

第二章 物理层

刘 轶

北京航空航天大学 计算机学院

2.1 物理层的基本概念

2.1 物理层的基本概念

- 物理层的主要任务
 - 如何在传输介质上**传输比特流**

- 物理层涉及的四个特性

- ① **机械特性**

- 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

- ② **电气特性**

- 在接口电缆的各条线上出现的电压的范围

- ③ **功能特性**

- 某条线上出现的某一电平的电压表示何种意义

- ④ **过程特性**

- 对于不同功能的各种可能事件的出现顺序

2.2 数据通信的基础知识

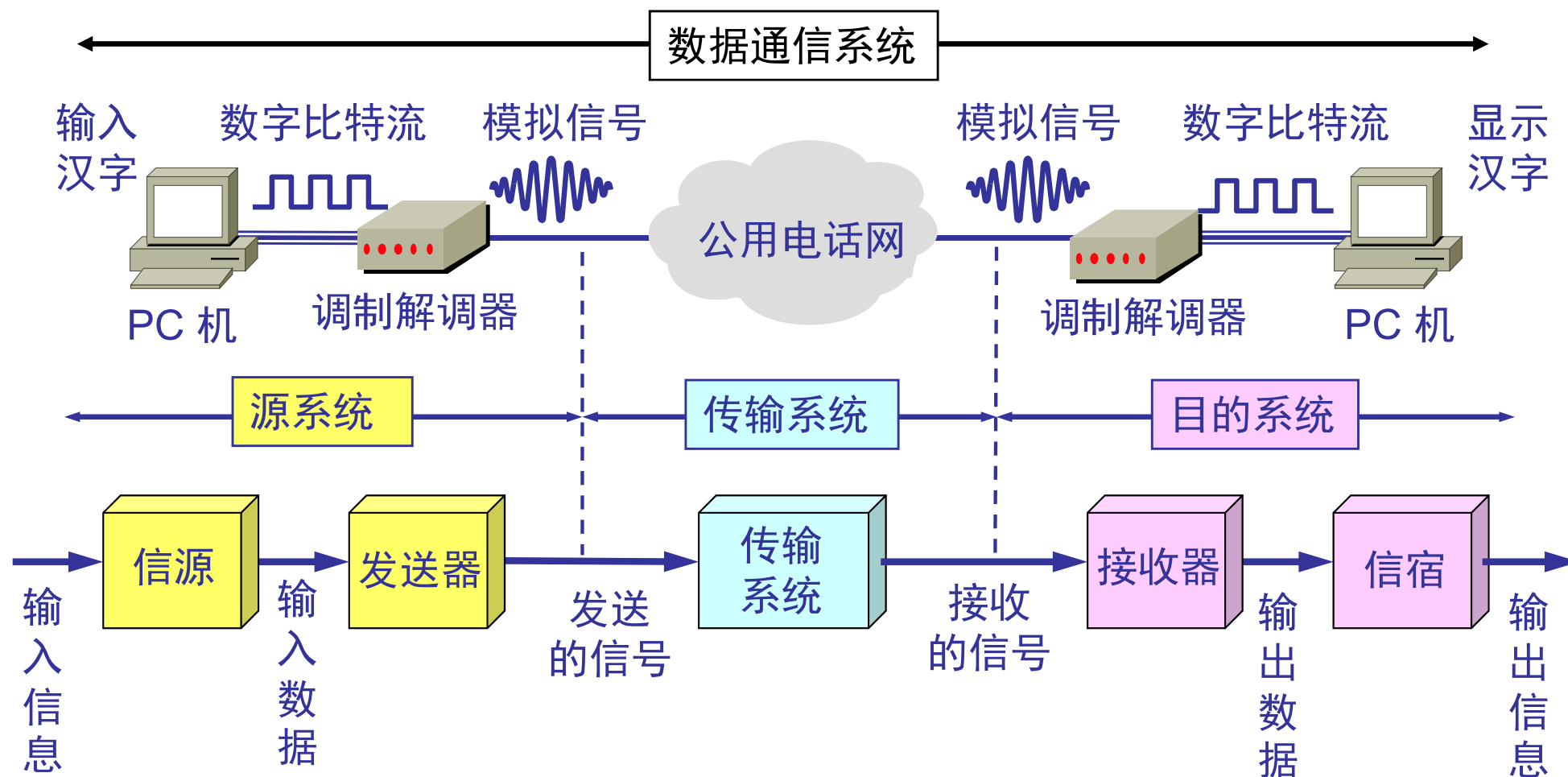
2.2 数据通信的基础知识

Modulate: 调制

Demodulate: 解调

Modem: 调制解调器

一、数据通信系统的模型



2.2 数据通信的基础知识

- 若干术语和概念

- 信道(channel)一般表示向某一方向传送信息的介质
- 通信的目的是传送消息(message)，如话音、文字、图像等
- 消息的实体是数据(data)
- 信号(signal)是数据的电气的或电磁的表现。信号分为模拟信号和数字信号两大类
- 在使用时间域(或简称为时域)的波形表示数字信号时，代表不同离散数值的基本波形称为码元
 - 码元速率：单位时间内通过信道的码元个数，单位为波特(baud)
 - 数据速率：单位时间内通过信道的信息量(比特数)，单位b/s或bps
 - 注意：码元速率和数据速率两个不同的概念，对同一信道，仅当使用二进制编码时二者相等
 - 我们希望用一个码元携带尽可能多的比特，以提高信道的数据速率

2.2 数据通信的基础知识

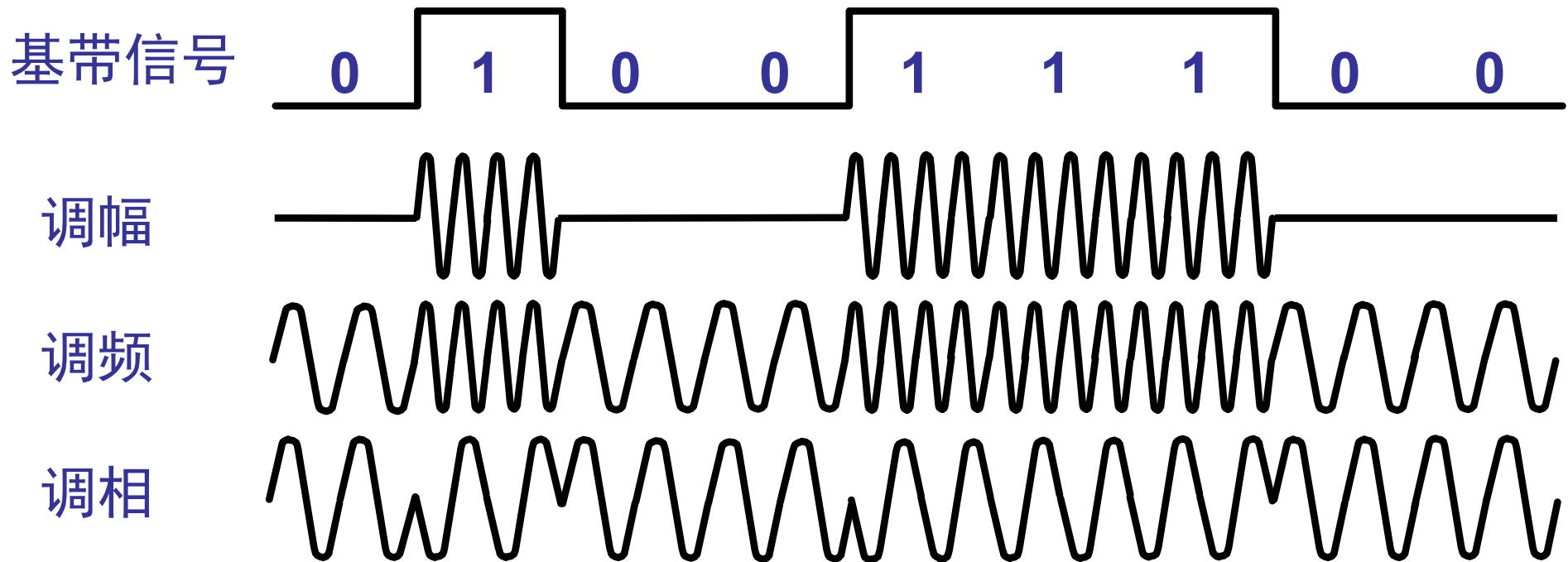
二、有关信号的几个基本概念(1/2)

- 通信双方的交互方式
 - 单向通信(单工通信, simplex)
 - 只能有一个方向的通信而没有反方向的交互
 - 双向交替通信(半双工通信, half-duplex)
 - 通信的双方都可以发送信息,但不能双方同时发送(当然也就不能同时接收)
 - 双向同时通信(全双工通信, duplex)
 - 通信的双方可以同时发送和接收信息
- 基带(baseband)信号和带通(band pass)信号
 - 基带信号(即基本频带信号): 来自信源的信号。计算机输出的代表各种文字或图像文件的数据信号都属于基带信号。
 - 基带信号往往包含有较多的低频成分,甚至有直流成分,而许多信道并不能传输这种低频分量或直流分量。因此必须对基带信号进行调制(modulation)。
 - 带通信号: 基带信号经过载波调制后,信号的频率范围搬移到较高的频段以便在信道中传输(即仅在一段频率范围内能够通过信道)

2.2 数据通信的基础知识

二、有关信号的几个基本概念(2/2)

- 最基本的二元制调制方法：
 - 调幅(AM): 载波的振幅随基带数字信号而变化
 - 调频(FM): 载波的频率随基带数字信号而变化
 - 调相(PM): 载波的初始相位随基带数字信号而变化
- 为了获得更高的传输速率, 常采用多元制的混合调制方法, 如振幅和相位相结合的正交振幅调制QAM(Quadrature Amplitude Modulation)

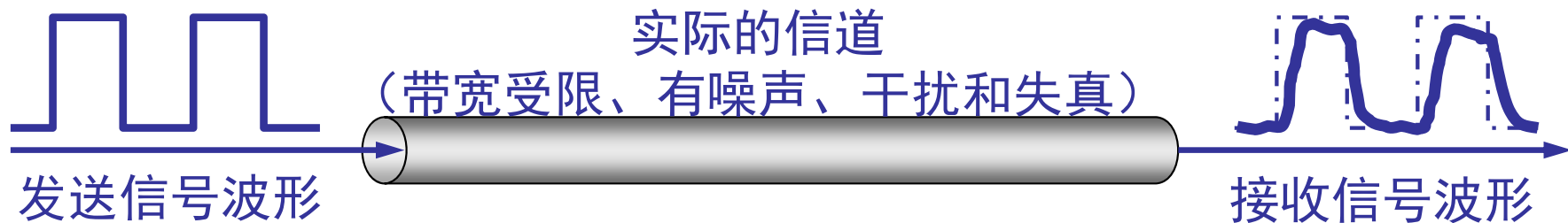


2.2 数据通信的基础知识

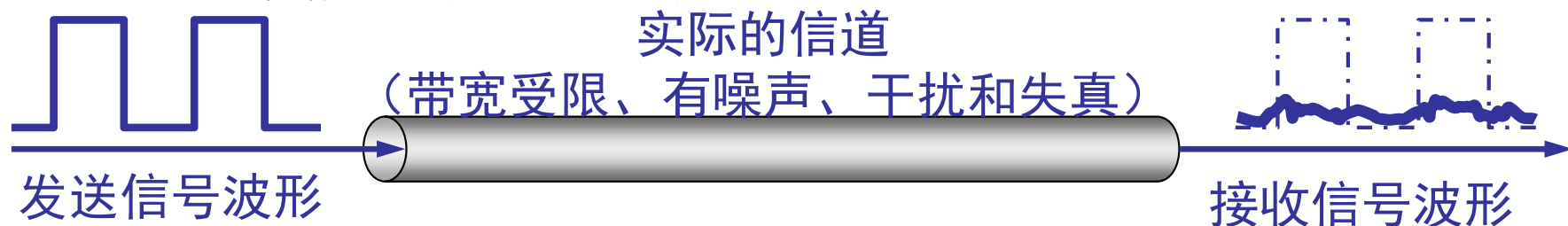
三、信道的极限容量

- 信号失真问题

- 任何实际的信道都不是理想的，在传输信号时会产生各种失真以及带来多种干扰
- 码元传输的速率越高，或信号传输的距离越远，在信道的输出端的波形的失真就越严重。
 - 有失真，但可识别



- 失真大，无法识别



2.2 数据通信的基础知识

三、信道的极限容量

- 信道能够通过频率范围
 - 一个信道所能通过的频率范围总是有限的，高频分量往往不能通过信道
 - 接收端收到的信号波形失去了码元之间的清晰界限，即“码间串扰”
 - 奈奎斯特(Nyquist)定理
- 理想低通信道最大数据传输率= $2H \log_2 V$ (bps)
- H ----信道带宽，V----信号电平的级数(信号的状态数)
- 在任何信道中，码元传输的速率是有上限的，否则就会出现码间串扰的问题，使接收端对码元的判决(即识别)成为不可能
 - 信道的频带越宽，能够通过的信号高频分量越多，就可以用更高的速率传送码元而不出现码间串扰

2009年的一道考研题：

在无噪声情况下，若某通信链路的带宽为3kHz，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：

A. 12kbps B. 24kbps C. 48kbps D. 96kbps

2.2 数据通信的基础知识

- 信噪比

- 信号的平均功率与噪声的平均功率之比，常记为S/N，以分贝(dB)作为计量单位

$$\text{信噪比} = 10\log_{10}(S/N) \quad (\text{dB})$$

例：S/N=10时，信噪比为10dB；S/N=1000时，30dB

- 1948年，信息论创始人香农(Shannon)推出了香农公式
信道的极限信息传输速率 C 可表达为：

$$C = W \log_2(1+S/N) \quad \text{b/s}$$

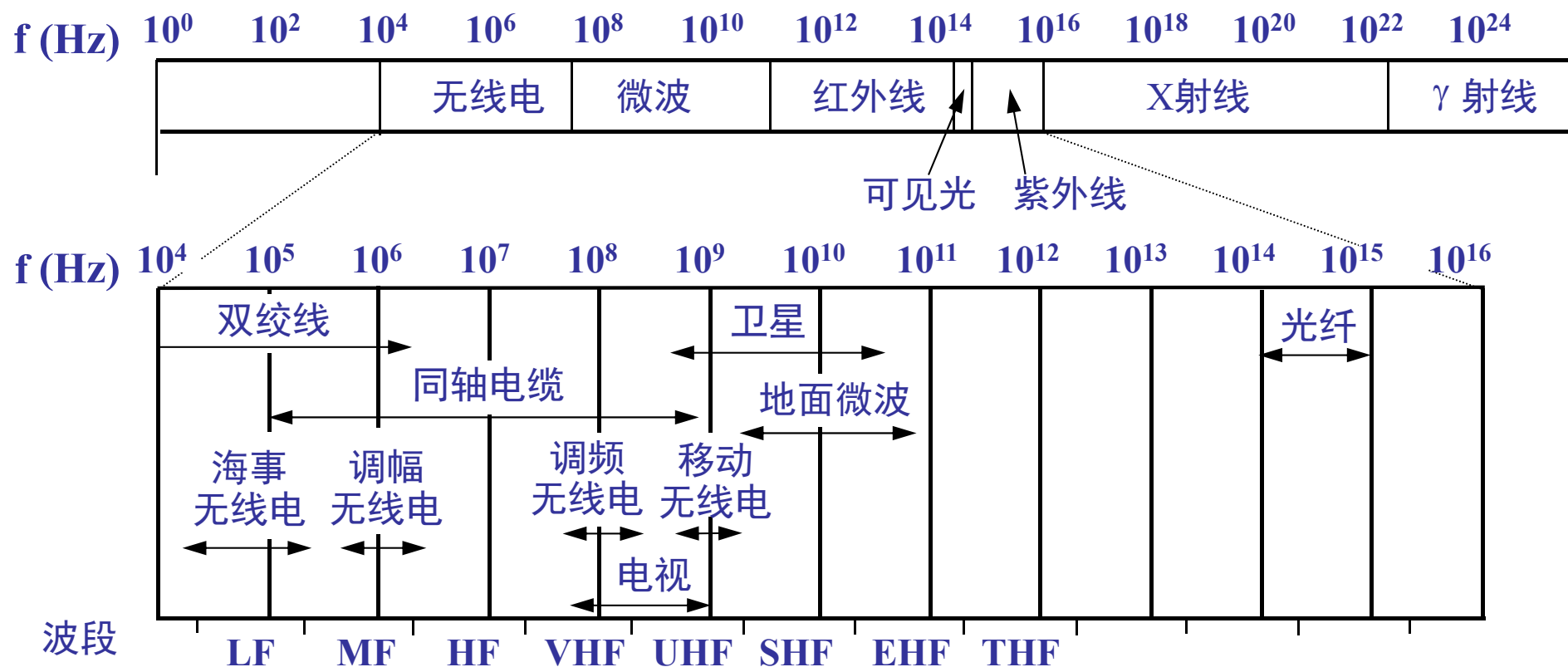
- W：信道带宽(单位：Hz)
- S：信道内所传信号的平均功率
- N：信道内部的高斯噪声功率
- 香农公式表明：信道的带宽或信道中的信噪比越大，则信息的极限传输速率就越高

2.3 物理层下面的传输介质

media: 介质、媒体

2.3 物理层下面的传输介质

- 传输介质：又称为传输媒体或传输媒介，指数据传输系统中发送器和接收器之间的物理通路
- 传输媒体分为两大类
 - 导引型传输介质
 - 非导引型传输介质

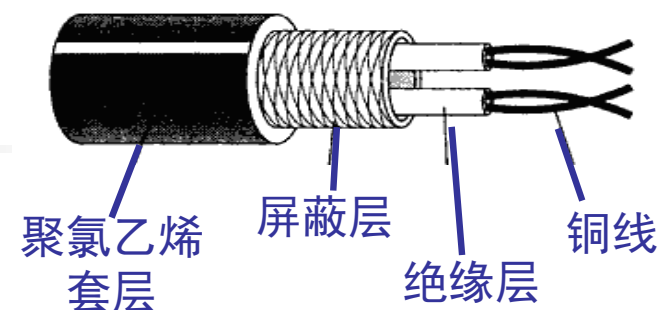


2.3 物理层下面的传输介质

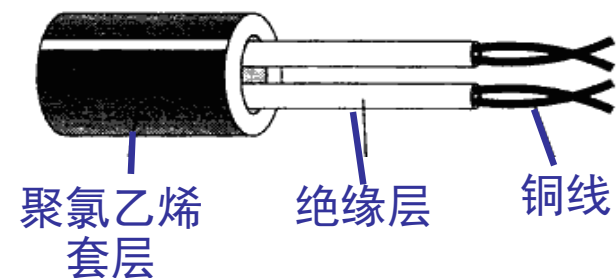
一、导引型传输介质(1/3)

• 双绞线(**twisted pair**)

- 通过将两根绝缘铜线绞合，减少相互干扰
- 分两类
 - 屏蔽双绞线 STP (Shielded Twisted Pair)
 - 无屏蔽双绞线 UTP (Unshielded Twisted Pair)
- 在网络时代前即广泛应用于电话系统
- 价格便宜，便于安装使用，传输距离较短
- 局域网布线系统常使用8芯非屏蔽双绞线
- 标准EIA/TIA-568中规定了非屏蔽双绞线的类别和带宽



屏蔽双绞线 STP



无屏蔽双绞线 UTP



3 类线



5 类线

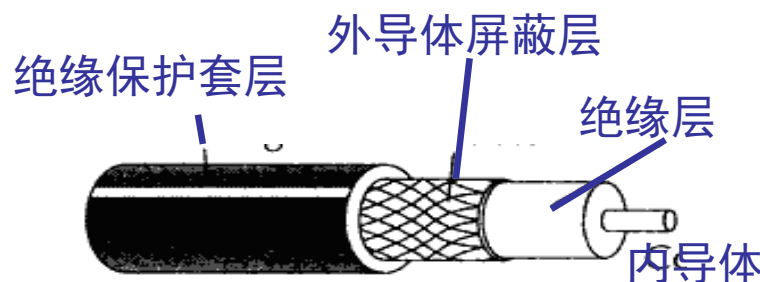
绞合线类别	带宽	线缆特点	典型应用
3	16 MHz	2 对 4 芯双绞线	模拟电话；曾用于传统以太网（10 Mbit/s）
4	20 MHz	4 对 8 芯双绞线	曾用于令牌局域网
5	100 MHz	与 4 类相比增加了绞合度	传输速率不超过 100 Mbit/s 的应用
5E（超 5 类）	125 MHz	与 5 类相比衰减更小	传输速率不超过 1 Gbit/s 的应用
6	250 MHz	与 5 类相比改善了串扰等性能	传输速率高于 1 Gbit/s 的应用
7	600 MHz	使用屏蔽双绞线	传输速率高于 10 Gbit/s 的应用

2.3 物理层下面的传输介质

一、导引型传输介质(2/3)

- 同轴电缆(coaxial cable)

- 内导体铜质芯线外包裹网状编织的屏蔽层
- 抗干扰能力和传输速率均高于双绞线，但造价较高，大规模安装使用不便
- 广泛应用的同轴电缆分为2类
 - 50 Ω 同轴电缆
 - 75 Ω 同轴电缆



同轴电缆

2.3 物理层下面的传输介质

一、导引型传输介质(3/3)

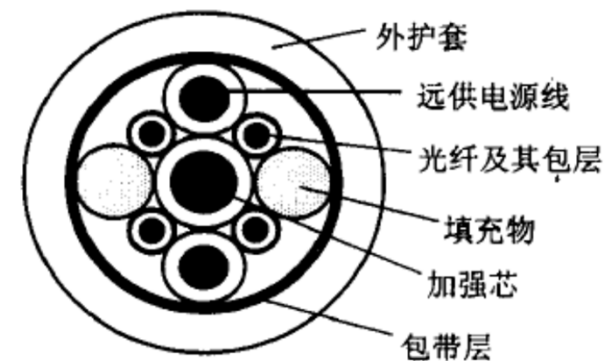
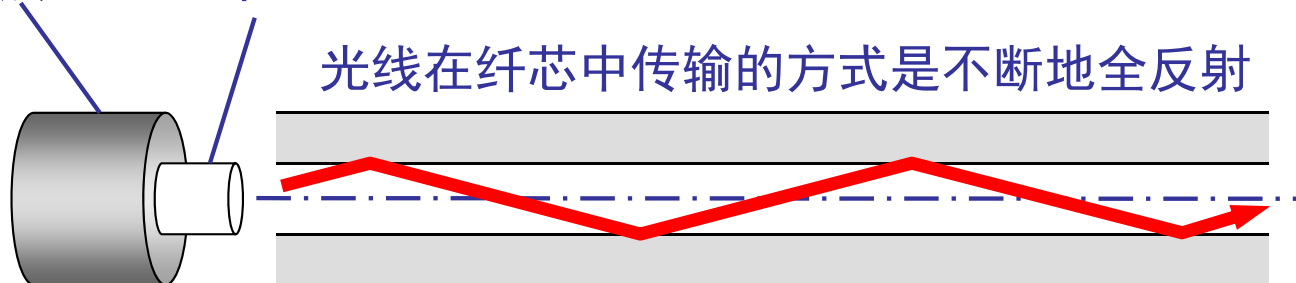
- 光纤(fiber optics)

- 光纤由非常透明的石英玻璃拉成细丝，由纤芯和包层构成双层通信圆柱体
- 光纤分为两类
 - 多模(multi-mode)光纤：多条不同入射角度的光线在一条光纤中传输，距离短，成本低
 - 单模(single-mode)光纤：光纤直径=光波波长，光纤成为波导，此时光线沿直线传播，不会反射
- 光纤通信优点
 - 通信容量大
 - 传输损耗小、距离长
 - 抗干扰能力强
 - 保密性好
 - 体积小、重量轻
- 广泛应用于长途干线传输、局域网/城域网的干线、高带宽且高可靠的网络连接(如服务器)
- 缺点
 - 安装较为复杂(光纤连接需专用设备)；需光/电转换；价格？

2.3 物理层下面的传输介质

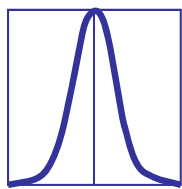
低折射率
(包层)

高折射率
(纤芯)

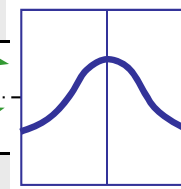


多模光纤

输入脉冲

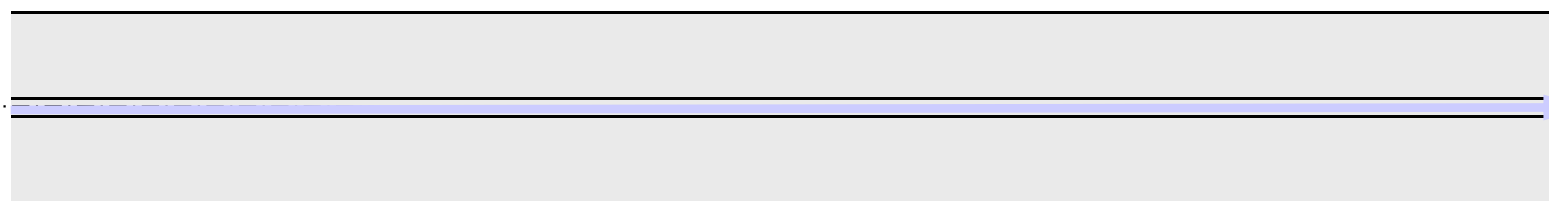
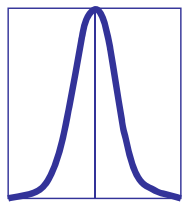


输出脉冲

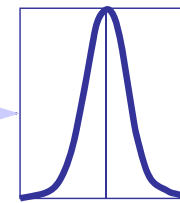


输入脉冲

单模光纤



输出脉冲



2.3 物理层下面的传输介质

二、非导引型传输介质(1/4)

- 非导引型传输介质指可传播无线电波的自由空间
- 无线通信的适用场合
 - 偏远地区通信
 - 城市中敷设线缆较为困难的场合
 - 移动设备
- 主要分类
 - 短波通信
 - 通过电离层反射，传输距离长，通信质量较差，传输速率低
 - 微波通信及卫星通信
 - 微波频率范围：300MHz—300GHz
 - 频率大于100MHz的电磁波几乎按直线传播，可使用抛物面状天线将能量聚集成束，从而获得极高信噪比
 - 分为地面微波通信和卫星通信

2.3 物理层下面的传输介质

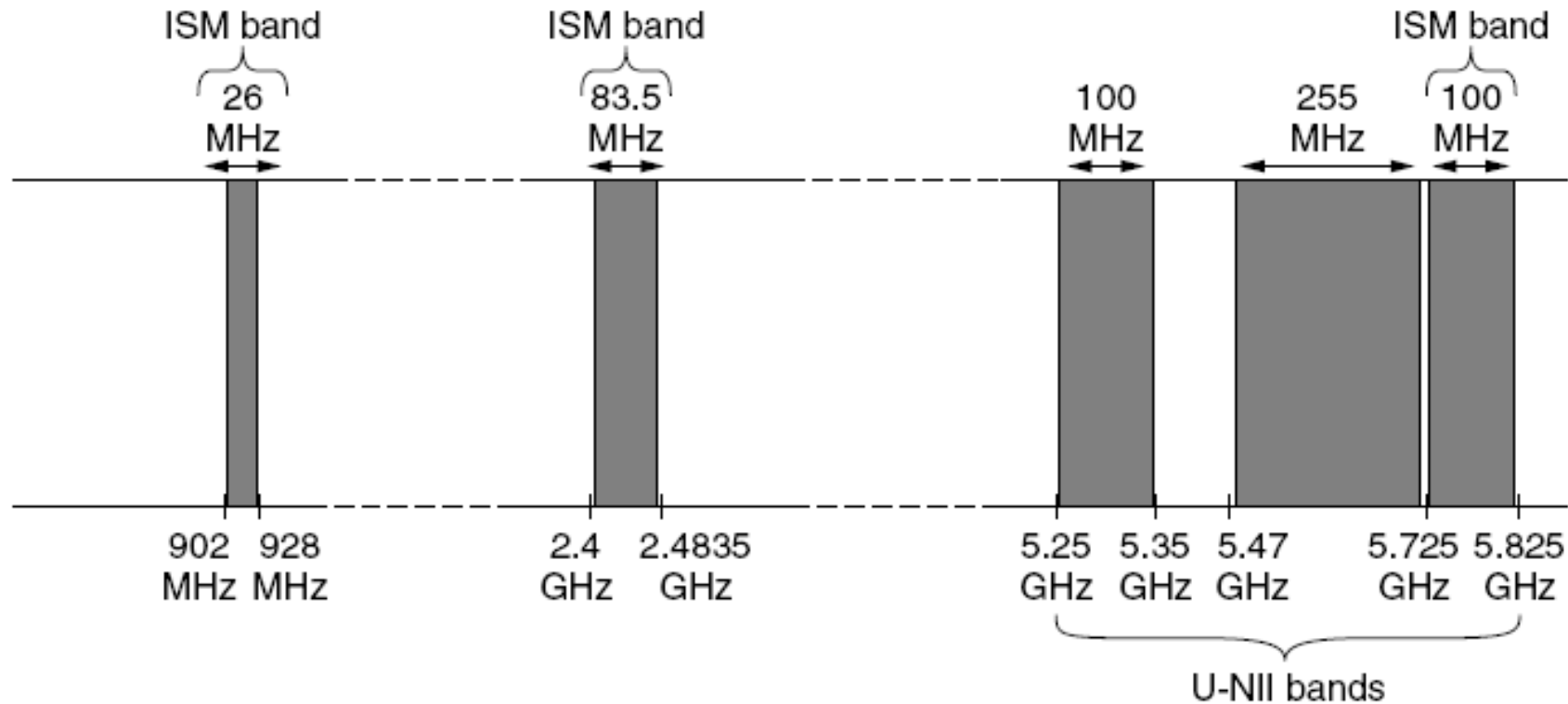
二、非导引型传输介质(2/4)

- 地面微波通信
 - 长距离传输时，每隔一定距离需建立中继站，进行接力转发
 - 优点
 - 信道频段范围宽，容量大
 - 在无线通信中抗干扰能力较强
 - 与线缆通信相比，建设速度快、成本低
 - 缺点
 - 相邻站需直视，易受地理或建筑物影响
 - 有时受气候影响(雷电、太阳黑子爆发等)
 - 隐蔽性和保密性较差
 - 中继站维护需消耗人力物力

二、非导引型传输介质(3/4)

• 关于无线频谱政策

- 多数无线频段由政府管理和分配，需获得许可才能使用
 - 电磁波在空间中传播时相互影响，且无线频段范围有限
- 预留了无需许可即可免费使用的频段，即**ISM频段**
 - **ISM---Industrial, Scientific, Medical**
 - 限制：发射功率 < 1Watt
 - 极大地促进了短距离无线通信的应用
 - 使用ISM频段的设备：**WLAN、Bluetooth**、无线鼠标、无绳电话、...



未来可能增加
60GHz频段用
于家庭和个人
无线应用

2.3 物理层下面的传输介质

二、非导引型传输介质(4/4)

- 卫星通信

- 通过卫星进行微波信号转发
- 优点：
 - 通信距离远、覆盖范围广
 - 通信容量较大
- 传播时延较大，对于地球同步卫星单向时延达**250—300ms**
- 除地球同步卫星外，低轨道卫星在数据通信领域发展较快
 - 卫星造价和发射成本低
 - 传输距离短，信号衰减小，可与地面手持设备通信
 - 时延较小

SpaceX Starlink

- 其他无线通信手段：红外通信、激光通信

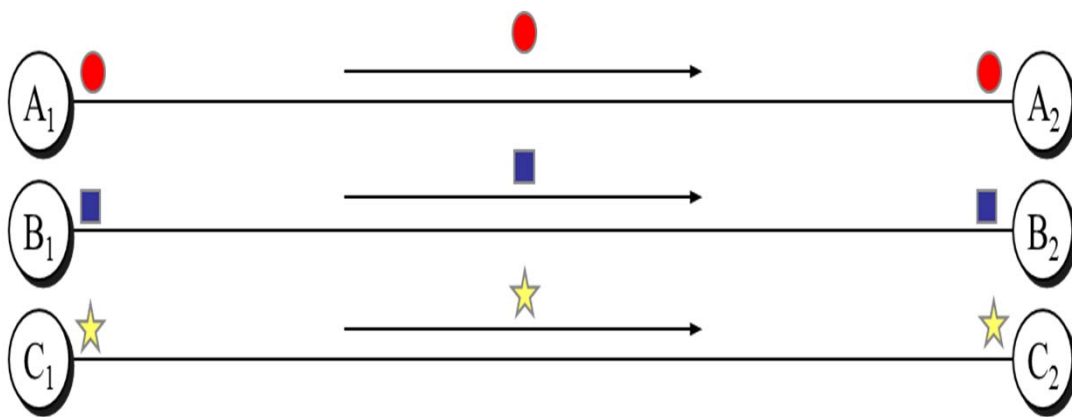
- 易受天气和可见光影响，通常用于近距离或室内通信

2.4 信道复用技术

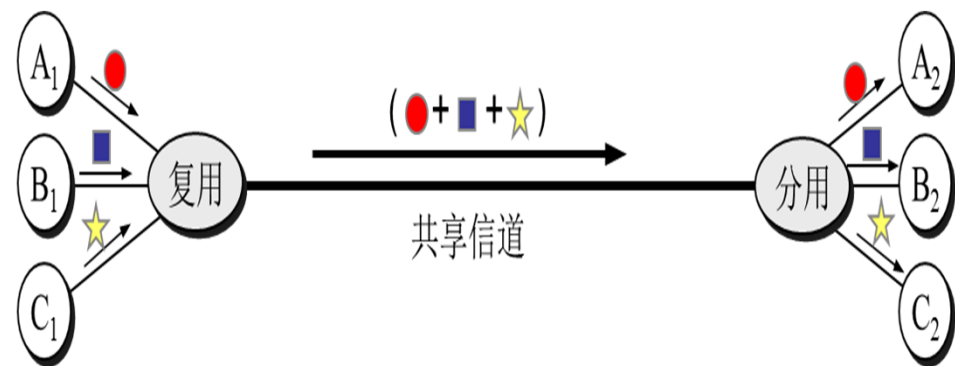
2.4 信道复用技术

一、频分复用与时分复用

- 复用(multiplexing)就是在一个信道上传输多路信号
- 最基本的复用方法
 - 频分多路复用(FDM—Frequency Division Multiplexing)
 - 不同用户占用不同的频带资源
 - 时分多路复用(TDM—Time Division Multiplexing)
 - 将时间划分成一段段等长的时隙，每个用户使用不同的时隙
 - 便于数字传输



使用单独的信道



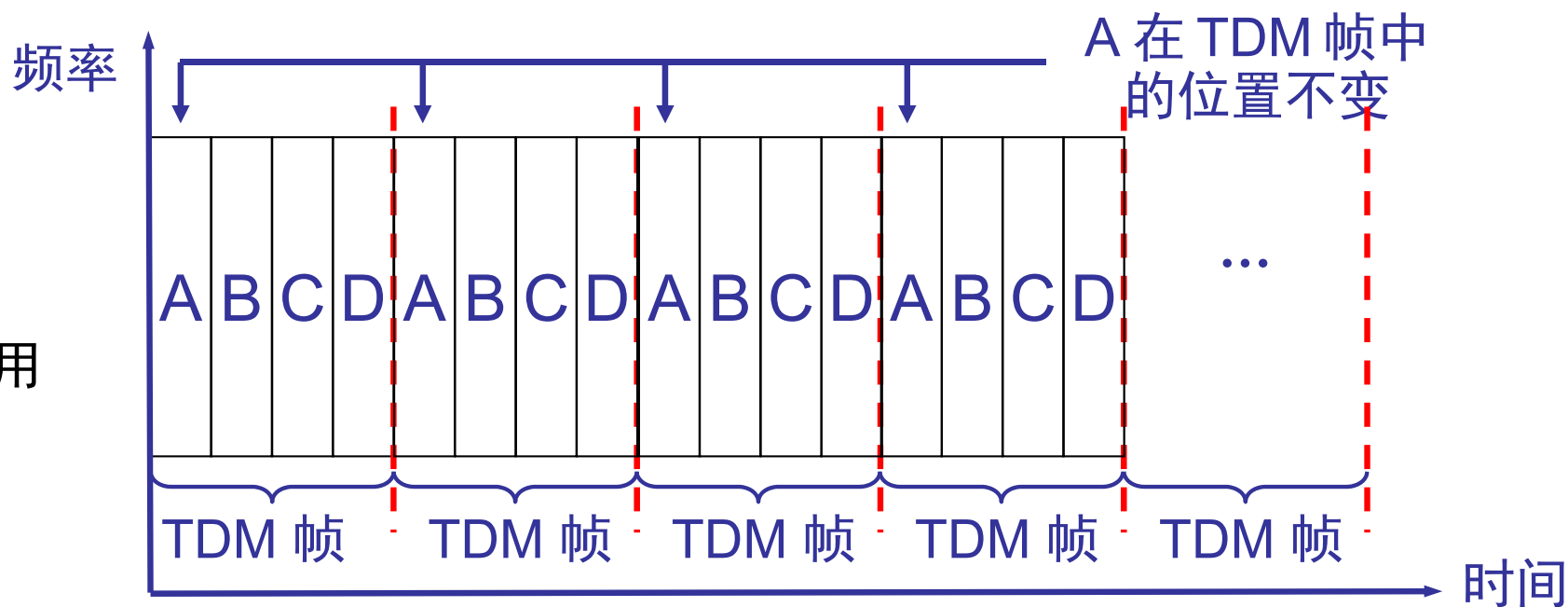
使用共享信道

2.4 信道复用技术

频分多路复用



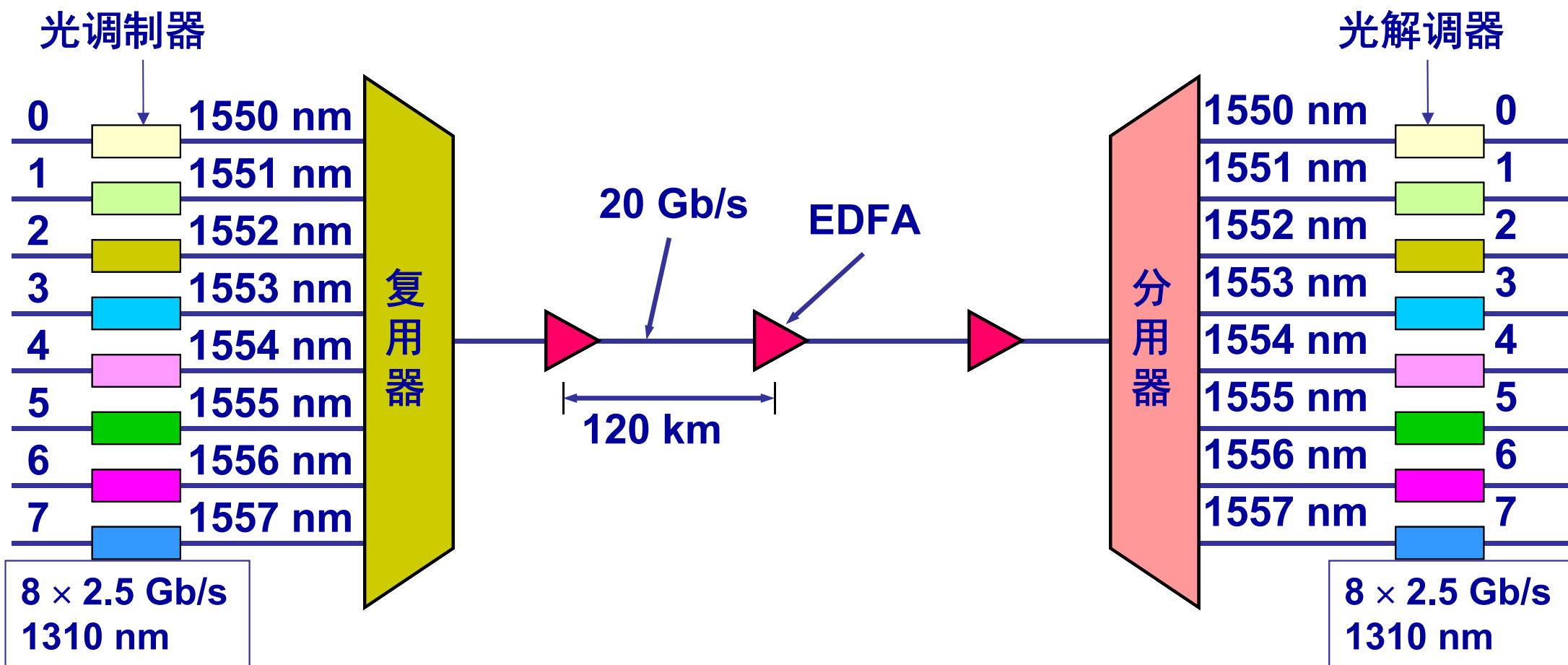
时分多路复用



2.4 信道复用技术

二、波分复用(WDM--Wavelength Division Multiplexing)

- 波分复用实际上就是光的频分复用
- 专门用于光纤通信，由于光纤中光载波频率很高，人们习惯于使用波长来表示光载波



2.4 信道复用技术

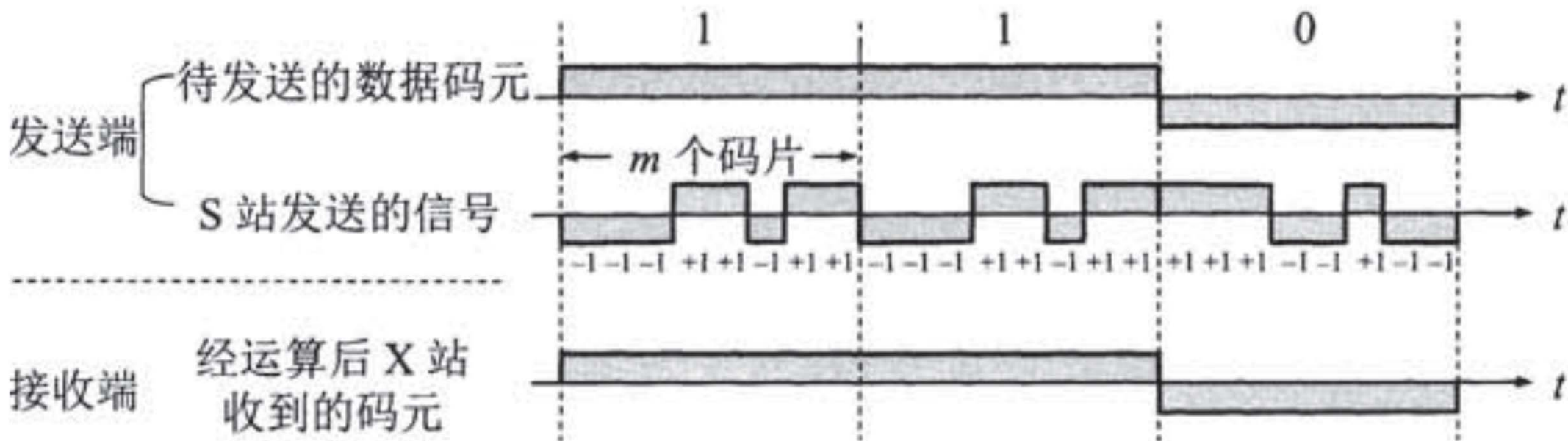
三、码分复用(CDM--Code Division Multiplexing)

- 更常用的名词是码分多址：CDMA--Code Division Multiple Access
- 用于无线通信
- 基本原理
 - 每一个比特时间划分为 m 个短的间隔，称为码片(chip)
 - 每个站分配一个唯一的 m bit 码片序列，各站的码片序列必须互相正交(orthogonal)
 - 正交：两个向量规格化内积为0
 - 向量规格化内积：向量内积除以向量长度
 - 使用扩频通信(Spread spectrum)方法，每bit转换成 m bit 码片
- 例：S站的8bit码片序列是00011011，向量表示(-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)
 - 发送比特 1 时，就发送序列 00011011
 - 发送比特 0 时，就发送序列 11100100
- 这种系统发送的信号有很强的抗干扰能力，其频谱类似于白噪声

2.4 信道复用技术

举例：

- S站的8bit码片序列：(-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)
- T站的8bit码片序列：(-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)
- 满足条件： $S \cdot T = 0$ 且 $S \cdot S = 1$
- 假设S站发送码元序列110，经扩频后发射信号 S_x ，
- 接收端使用S站的码片可以提取出来自S站的信息：计算 $S \cdot S_x$



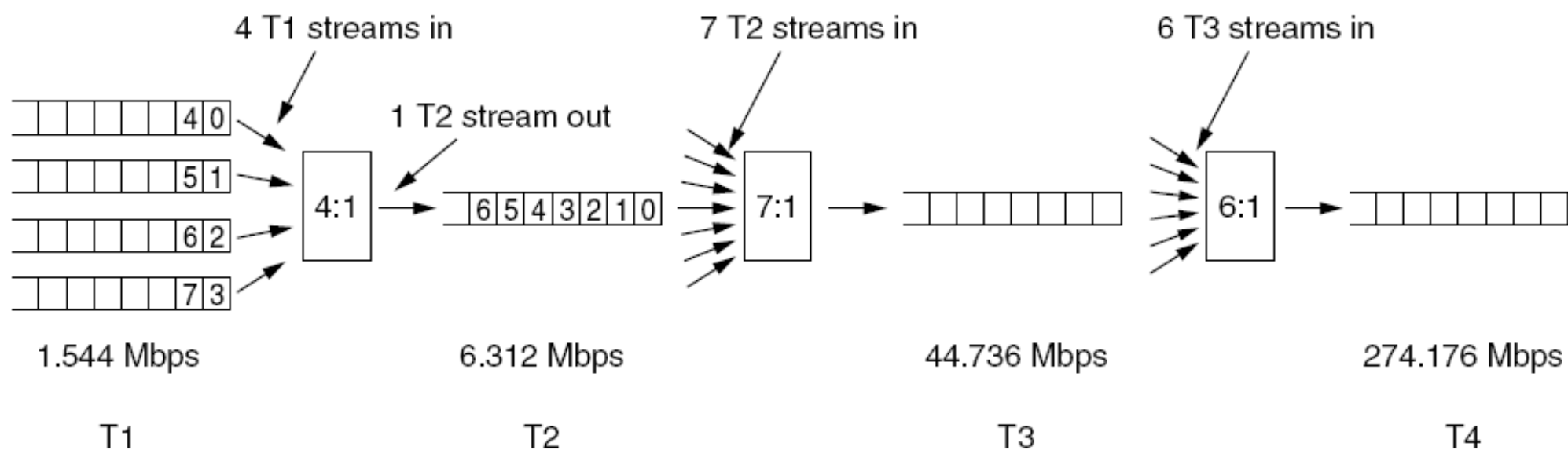
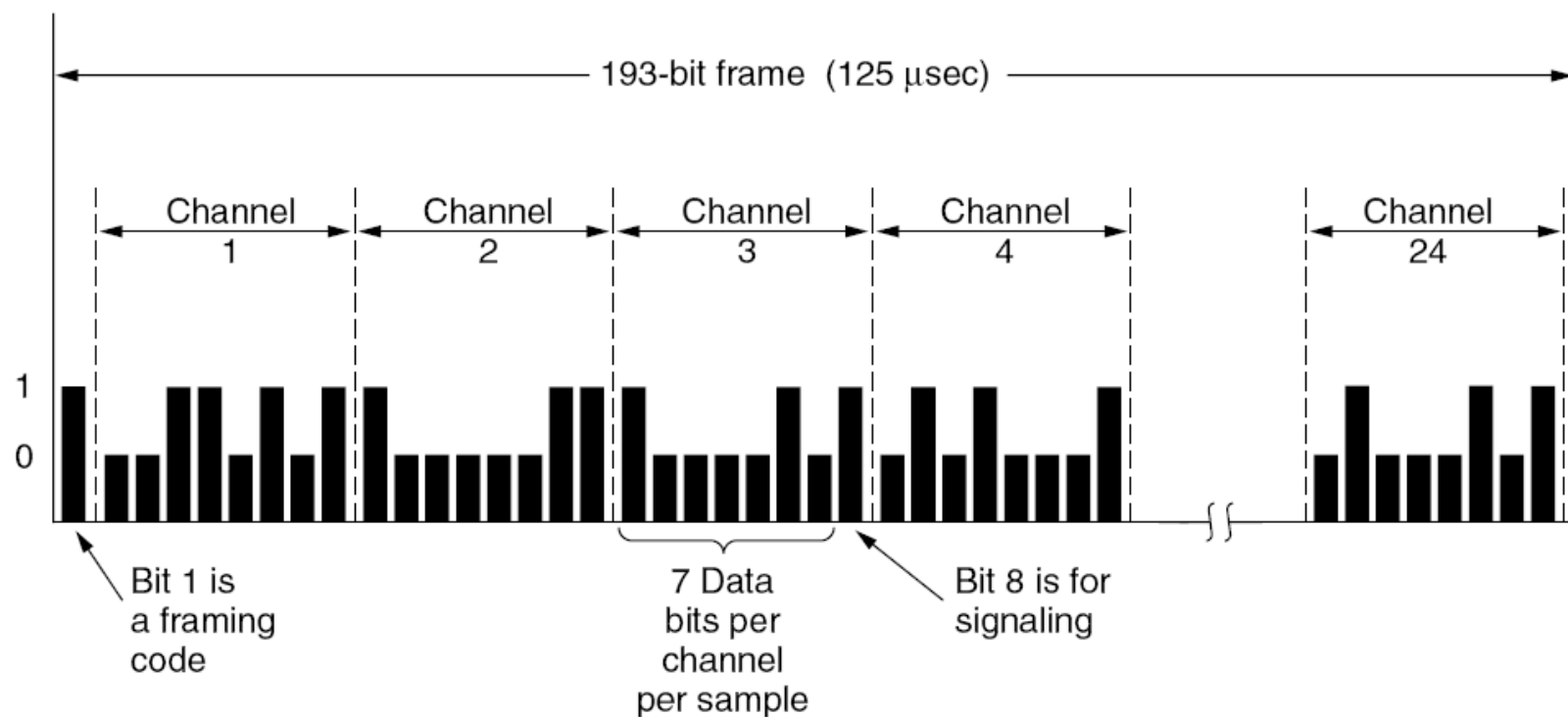
2.5 数字传输系统

2.5 数字传输系统

一、脉码调制系统(PCM—Pulse Code Modulation)

- 用于电话交换系统，在数字传输系统中进行多路话音的变换与传输
- 话音由模拟→数字的变换：对模拟话音按周期进行采样和A/D变换
 - 采样频率8000次/秒，采样数据用8bit表示
 - 话音数据速率：64kb/s
- 数字化的话音数据进行时分多路复用
 - 欧洲体制 -----中国使用该体制
 - 每个时分复用帧包含32个时隙，其中2个用于同步和控制，30个用于传输话音数据，每个时隙8bit。即有帧长度： $32 \times 8 = 256 \text{ bit}$
 - $8000 \times 256 \text{ bit} = 2.048 \text{ Mb/s}$ ，称为**E1**，可传输30路话音
 - 北美体制
 - 每个时分复用帧包含24个时隙，每个时隙8bit，其中1bit用做信令，7bit话音数据，每帧1bit同步。即有帧长度： $24 \times 8 + 1 = 193 \text{ bit}$
 - $8000 \times 193 \text{ bit} = 1.544 \text{ Mb/s}$ ，称为**T1**，可传输24路话音

T1帧的构成



T1经时分多路复用构成T2、T3、T4

2.5 数字传输系统

二、同步光纤网 SONET和同步数字系列SDH

- 用于高速干线传输，特别是光纤传输
- 1988年美国制定了SONET(Synchronous Optical Network)标准
 - 同步传输，系统需要精确的主时钟
 - 主要用于光纤传输
- ITU-T以SONET为基础制定出SDH(Synchronous Digital Hierarchy)
- 一般可认为SONET与SDH是同义词

线路速率 (Mb/s)	SONET 符号	ITU-T 符号	表示线路速率 的常用近似 值
51.840	OC-1/STS-1	—	
155.520	OC-3/STS-3	STM-1	155 Mb/s
466.560	OC-9/STS-9	STM-3	
622.080	OC-12/STS-12	STM-4	622 Mb/s
933.120	OC-18/STS-18	STM-6	
1244.160	OC-24/STS-24	STM-8	
2488.320	OC-48/STS-48	STM-16	2.5 Gb/s
4976.640	OC-96/STS-96	STM-32	
9953.280	OC-192/STS-192	STM-64	10 Gb/s
39813.120	OC-768/STS-768	STM-256	40 Gb/s

2.6 宽带接入技术

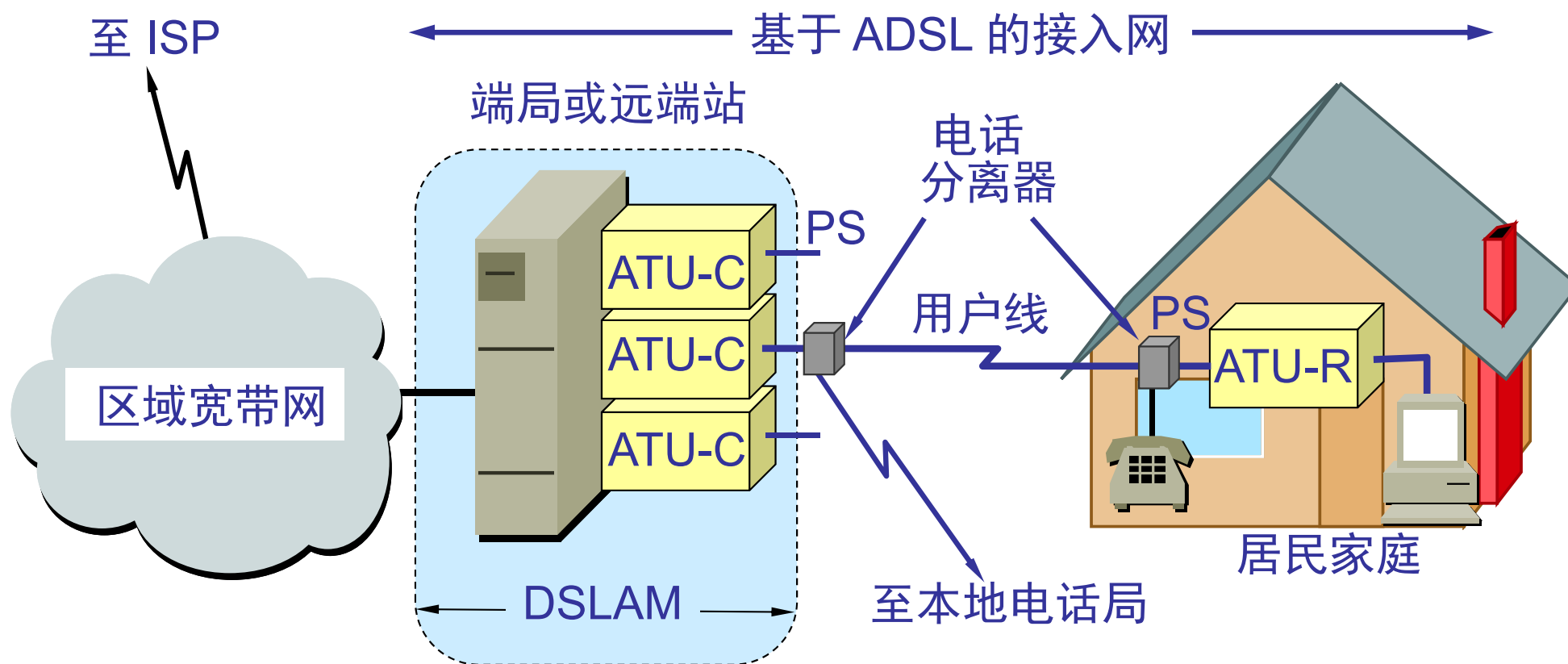
- 接入：**access**
- 通常指远程用户(计算机)访问网络的技术，如家庭用户
- 接入服务器：**access server**
- 宽带没有严格定义，宽带接入泛指超越传统的**modem**+电话线拨号上网(最高**56kbps**)的技术
- 典型的宽带接入技术
 - 以家庭现有线路为基础：基于电话线的**xDSL**、基于有线电视线的**HFC**
 - 基于光纤传输：典型的**FTTH**

2.6 宽带接入技术

一、xDSL技术(Digital Subscribe Line)

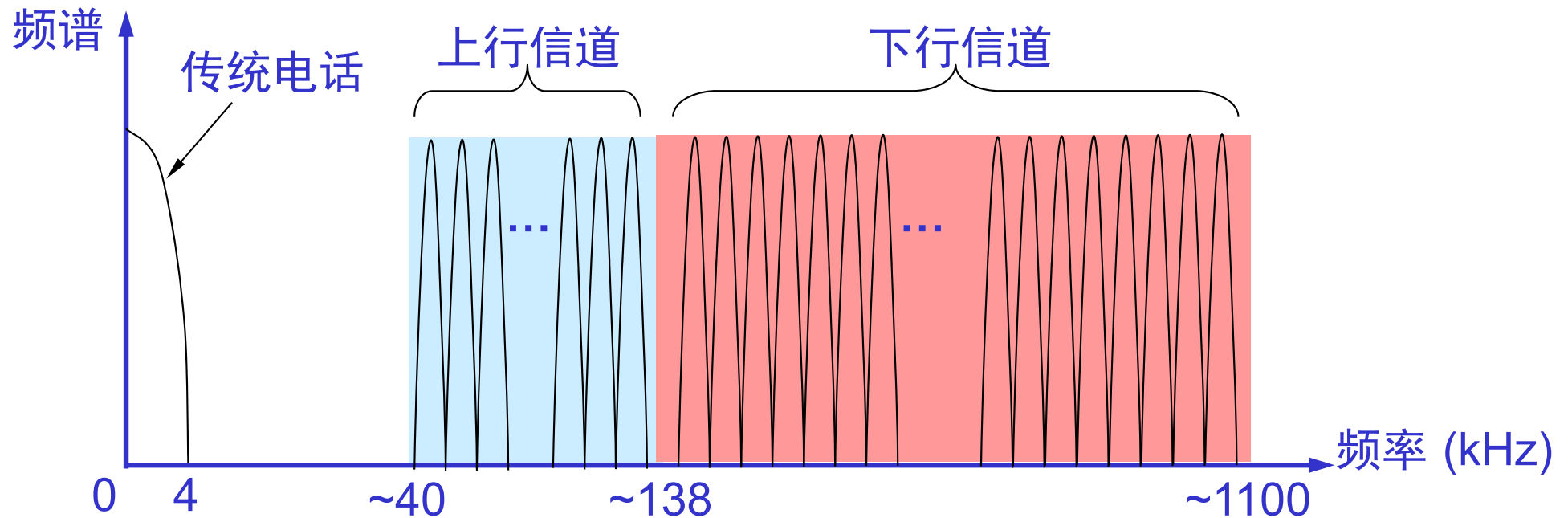
- “最后一英里(last mile)”
 - 通常指通信运营商局端到家庭用户之间的本地回路
 - 对此段线路进行数字化改造代价高昂，仍普遍采用模拟传输方式
 - “最后一英里”是宽带接入技术需要面对的核心问题之一
- xDSL技术在不改变“最后一英里”线路的前提下，通过改造现有的模拟电话用户线的传输方式，使其能够承载宽带业务
- xDSL的几种类型
 - ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line)
 - HDSL (High speed DSL)
 - SDSL (Single-line DSL)
 - VDSL (Very high speed DSL)
- ADSL主要特点
 - 仍然使用现有电话线，无需对庞大的电话布线系统进行改造
 - 把0~4 kHz 低端频谱留给传统电话使用，而把高端频谱用作网络接入(用户上网)
 - 带宽非对称，即上行(用户→ISP)和下行(ISP→用户)带宽不同，适应普通用户上网特点(多运行浏览、下载等应用)

ADSL 的组成



数字用户线接入复用器 DSLAM (DSL Access Multiplexer)
接入端接单元 ATU (Access Termination Unit)
ATU-C (C 代表局端 Central Office)
ATU-R (R 代表远端 Remote)
电话分离器 PS (POTS Splitter)

ADSL频谱分布



- 离散多音调 **DMT (Discrete Multi-Tone)**调制技术
- 采用频分复用
 - 把 **40k--1.1MHz**的高端频谱划分为许多的子信道，其中 **25** 个子信道用于上行，而 **249** 个子信道用于下行
- 每个子信道占据 **4 kHz** 带宽，并使用不同的载波(即不同的音调)进行数字调制
- 用户线彼此差异很大(距离、线径、干扰等)，**ADSL** 采用自适应调制技术使用户线能够传送尽可能高的数据率

2.6 宽带接入技术

一、xDSL技术(Digital Subscribe Line)

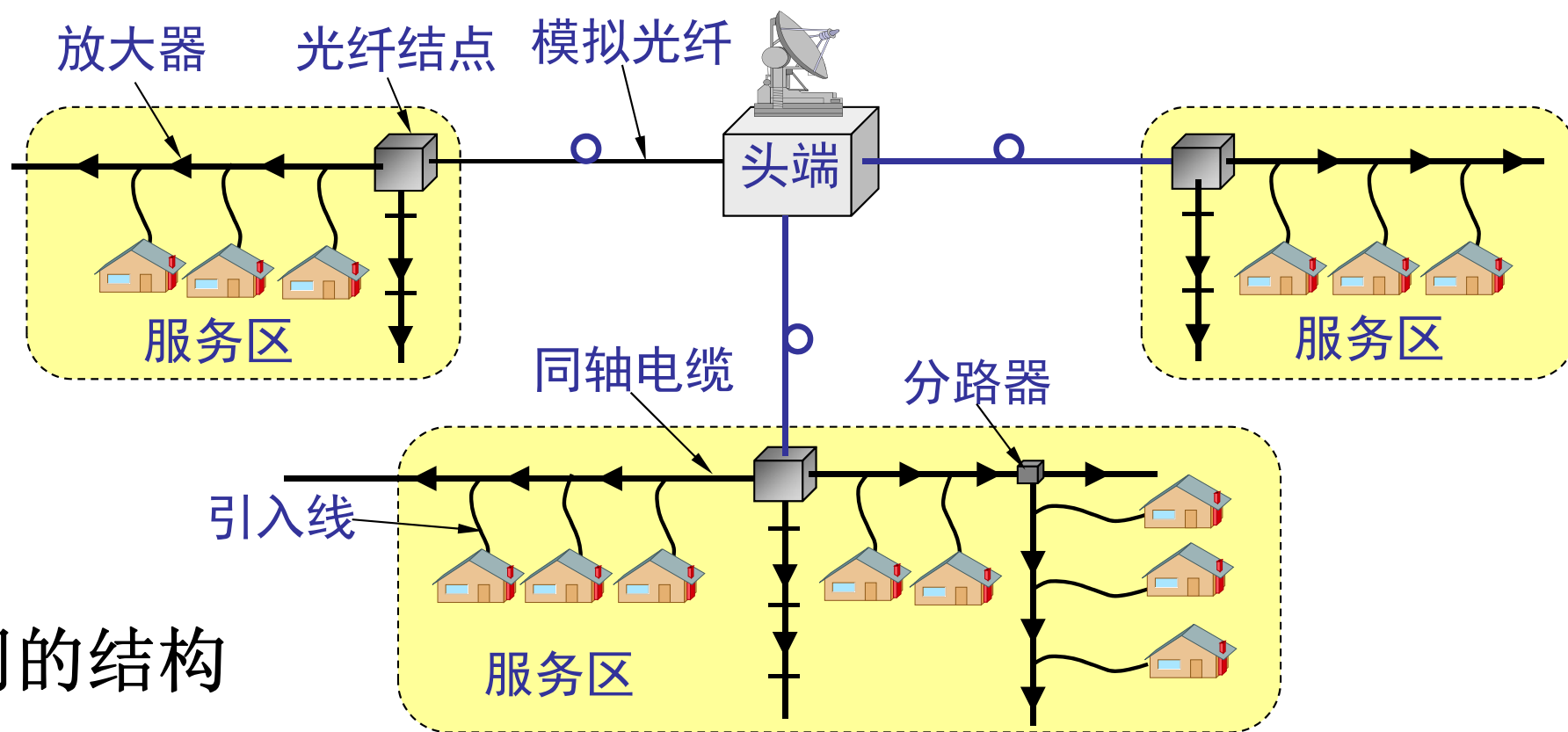
- ADSL标准和传输速率
 - 1999年, ADSL成为国际标准(ITU-T), 下行8Mbps, 上行1Mbps
 - 2002年, ADSL2, 下行12Mbps, 上行1Mbps
 - 2003年, ADSL2+, 下行24Mbps, 上行1Mbps
- ADSL定义的传输速率是可能达到的最高传输速率, 实际传输速率与用户线路的质量和距离相关

2.6 宽带接入技术

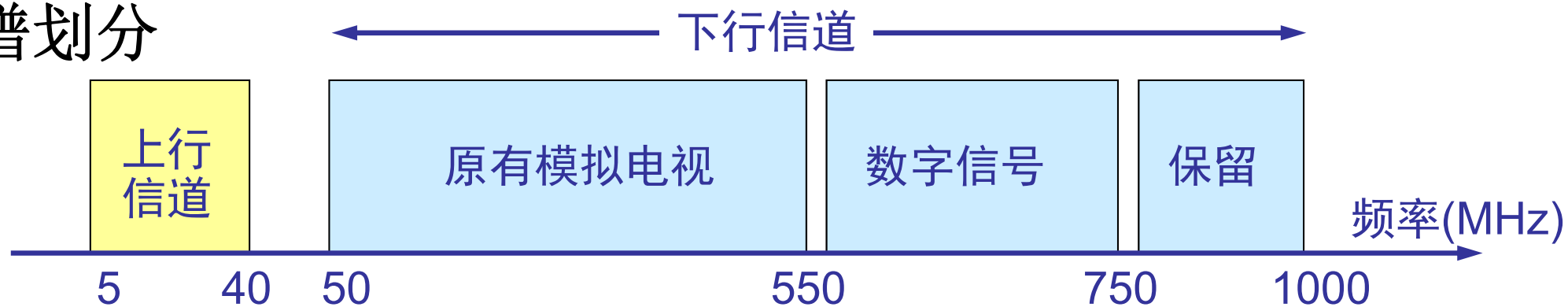
二、HFC

- **Hybrid Fiber Coax** 光纤混合同轴网
- 以有线电视网 **CATV** 为基础的宽带接入技术
 - 单向广播式传输 → 双向传输
 - 传输电视信号 → 传输电视、话音、数据
 - 以同轴电缆为主 → 光纤 + 同轴电缆
- 主要特点
 - 主干线路采用光纤
 - 采用结点体系结构
 - 具有比 **CATV** 网更宽的频谱，且具有双向传输功能
 - 每个家庭要安装一个用户接口盒 **UIB (User Interface Box)**
 - 提供三种连接：同轴电缆连接到机顶盒(**set-top box**)、双绞线连接到用户的电话机、电缆调制解调器连接到用户的计算机

HFC网的结构

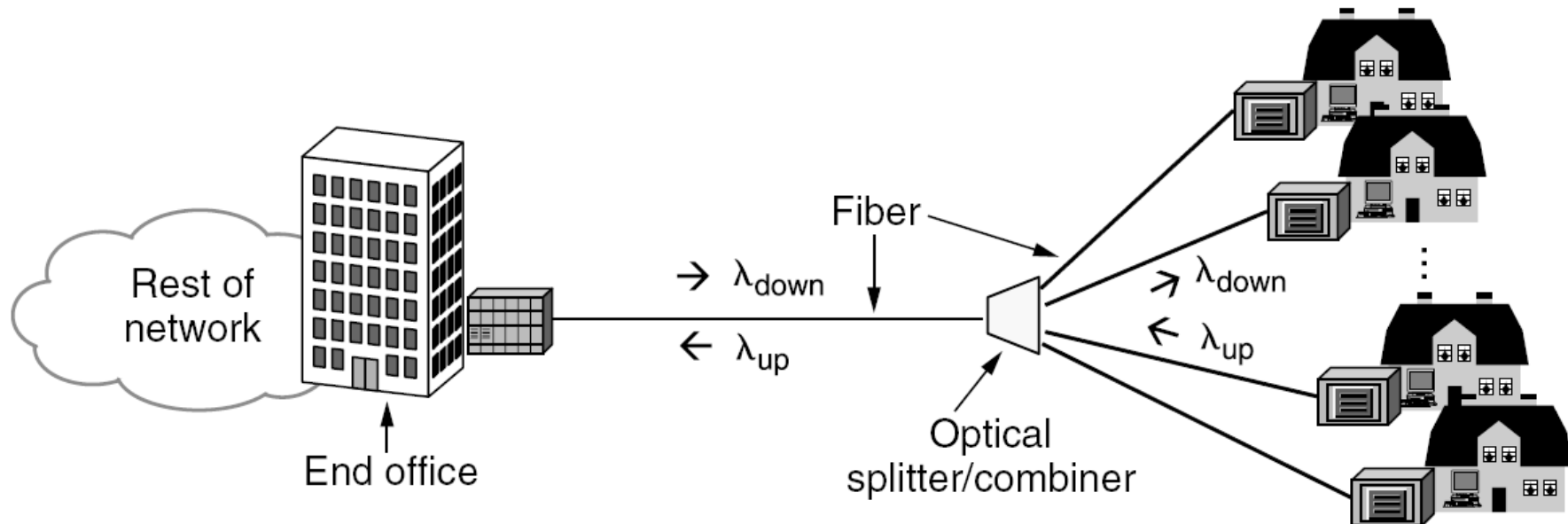


频谱划分



三、基于光纤的宽带接入：**FTTx**

- 基于光纤传输的宽带接入技术
 - **FTTH**(Fiber To The Home): 光纤到户
 - **FTTB**(Fiber To The Building): 光纤到大楼
 - **FTTC** (Fiber To The Curb): 光纤到路边
- 目前用于光纤到户的技术：**无源光网络PON—Passive Optical Network**
 - 光纤配线网中无需供电，运营维护成本低；上下行使用波分复用
 - **EPON**(Ethernet Passive Optical Network) --- IEEE802.3ah
 - **GPON**(Gigabit-capable Passive Optical Network) --- ITU-T G.984



用做光纤到户的无源光网(PON)结构

第2章作业

- 2-04
- 2-05
- 2-07
- 2-09
- 2-13
- 2-14

下周三交