



武汉大学

WUHAN UNIVERSITY

第二章 物理层

林海

Lin.hai@whu.edu.cn



2.1 物理层

是网络的基础

- 物理层介质包含有线、无线、光纤等
- 决定了网络的传输速度

Application
Transport
Network
Link
Physical

物理层的关键问题是如何使用信号（电磁波）来发送比特

- 称为调制/解调

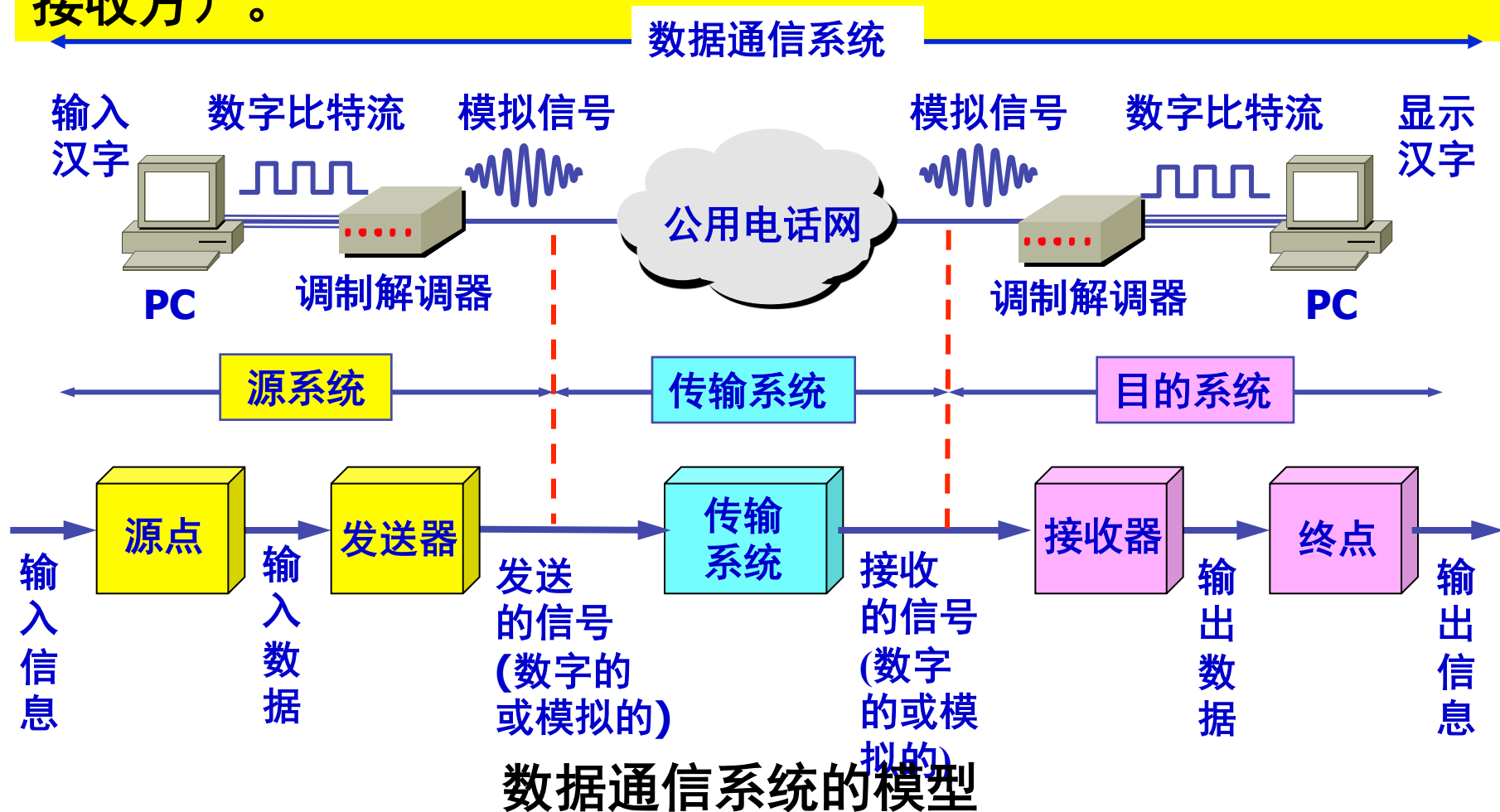


2.2 数据通信的基础知识

- 2.2.1 数据通信系统的模型
- 2.2.2 有关信道的几个基本概念
- 2.2.3 信道的极限容量



一个数据通信系统包括**三大部分**：源系统（或发送端、发送方）、传输系统（或传输网络）和目的系统（或接收端、接收方）。





几个术语

- 数据(data)——运送消息的实体。
- 信号(signal)——数据的电气的或电磁的表现。
- “模拟的” (analogous)——代表消息的参数的取值是连续的。
- “数字的” (digital)——代表消息的参数的取值是离散的。
- 码元(code)——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。



2.2.2 有关信号的几个基本概念

- **单向通信**（单工通信）——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）——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）——通信的双方可以同时发送和接收信息。



调制解调

- **调制：**信号转换为适宜无线传输的形式过程。
 - 基带调制：对原始信号进行波形的变化（编码）
 - 带通调制：使用载波进行调制



基带调制

- **不归零制**：正电平代表 1，负电平代表 0。
- **归零制**：正脉冲代表 1，负脉冲代表 0。
- **曼彻斯特编码**：位周期中心的向上跳变代表 0，位周期中心的向下跳变代表 1。但也可反过来定义。
- **差分曼彻斯特编码**：在每一位的中心处始终都有跳变。位开始边界有跳变代表 0，而位开始边界没有跳变代表 1。



基带传输

- 最简单的调制就是用(+1V)表示1，用(-1V)表示0
 - **NRZ (不归零)**
 - 问题: consecutive 0 or 1 is difficult to tell the bits apart

1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 um, 0? er, 0?

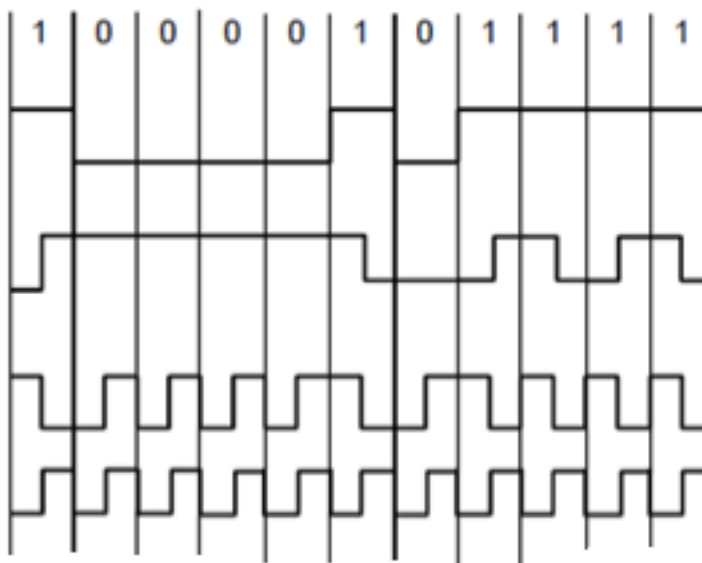
(a) Bit stream

(b) Non-Return to Zero (NRZ)

(c) NRZ Invert (NRZI)

(d) Manchester

(Clock that is XORed with bits)



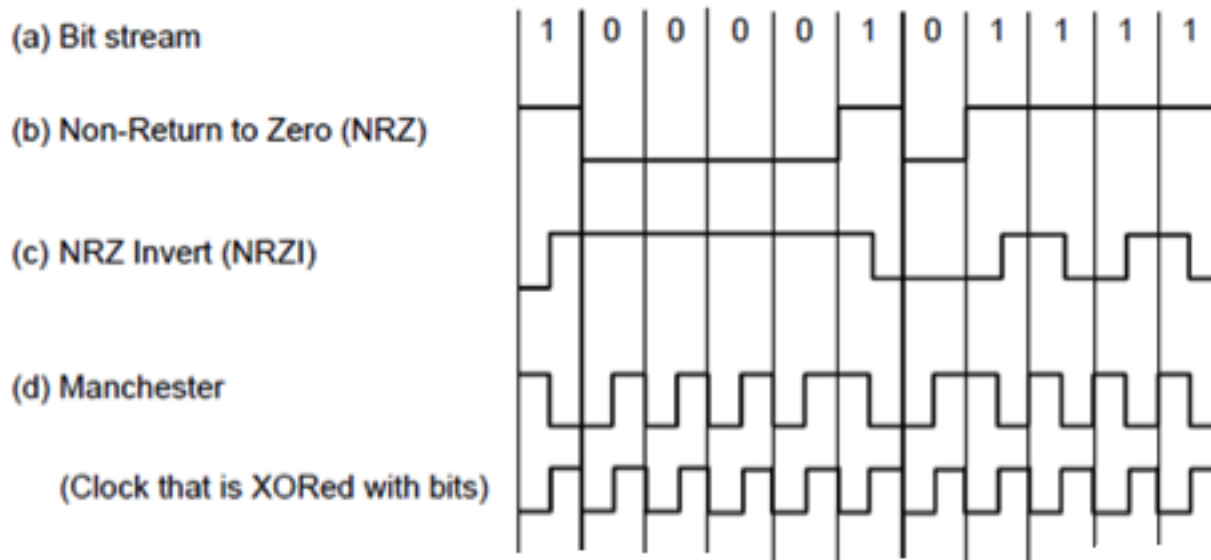


曼彻斯特编码

■ 解决方案:

■ Manchester 编码

- Mixes clock signal with the bits by XOR
- 问题: the frequency becomes twice than NRZ (need twice bandwidth to send data)





不归零反转

好，我们让跳变代表1，无跳变代表0

- **NRZI (NRZ Invert)**

(c) NRZ Invert (NRZI)



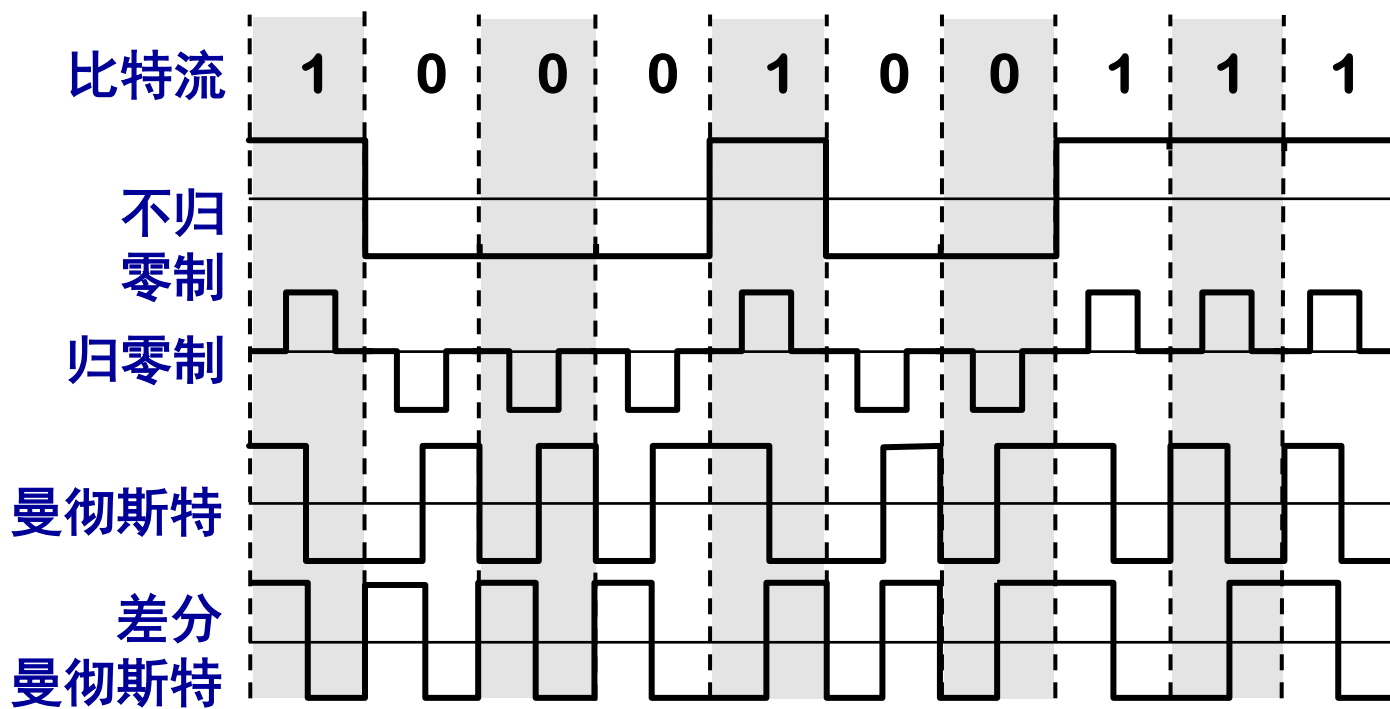
- Long 1 is not issue any more, but long 0 issue still here
- 解决方案：让长的0从不出现
 - If four 0 in a row appear, changed them: 4B/5B code
 - 4B/5B maps 4 data bits to 5 coded bits:

Data	Code	Data	Code	Data	Code	Data	Code
0000	11110	0100	01010	1000	10010	1100	11010
0001	01001	0101	01011	1001	10011	1101	11011
0010	10100	0110	01110	1010	10110	1110	11100
0011	10101	0111	01111	1011	10111	1111	11101



差分曼彻斯特

在每一位的中心处始终都有跳变。位开始边界有跳变代表0，而位开始边界没有跳变代表1





例子

1. 如果信号传输使用NRZ和曼彻斯特编码，试问为了达到B bps速率，至少需要多少带宽？
 - 答：NRZ一个信号（码元）可以发送2比特，即B bps的频率是 $B/2$ Hz，所以带宽是 $B/2$ Hz（基带传输带宽从0开始）。同理可得，曼彻斯特需要B Hz带宽
- 2. 4B/5B编码中 0000 用 11110编码，那么如有真实的数据11110怎么和0000区别？
- 3. 证明4B/5B编码，至少每4个比特时间要发生一次信号跳变



带通调制（传输）

- 基带传输

- 频率从0开始
- 要求天线很长，且和其他干扰。

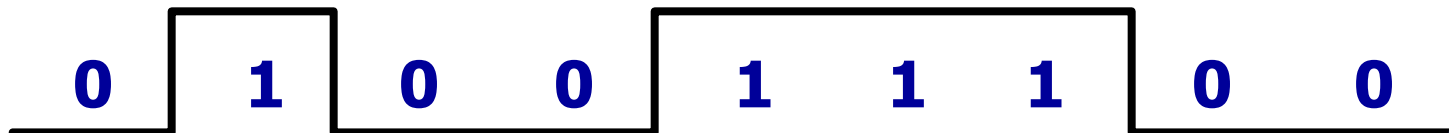
- 带通调制：将信号放在一个给定的频带上（载波）

- **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。

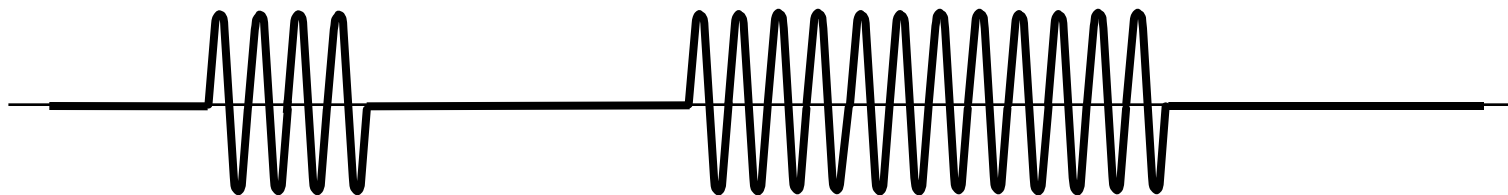


带通调制

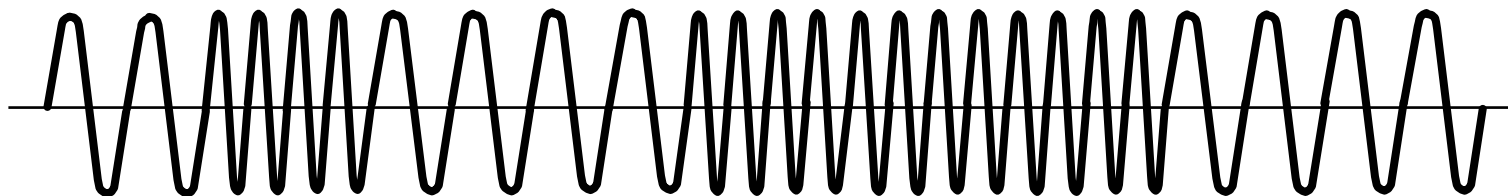
基带信号



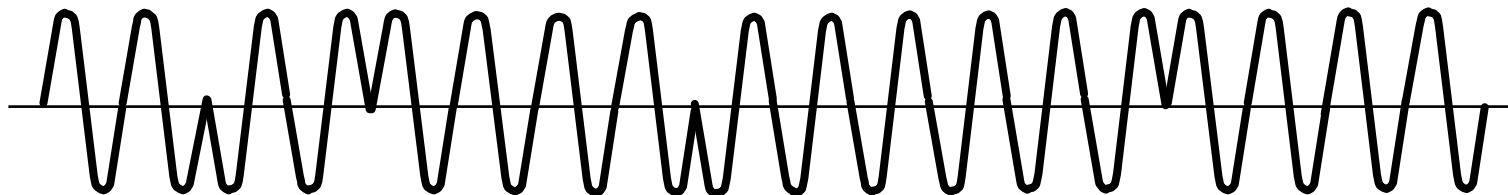
调幅



调频



调相

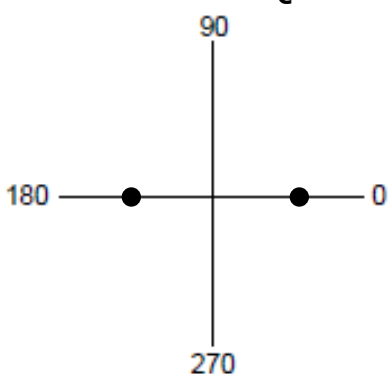




正交振幅调制 QAM

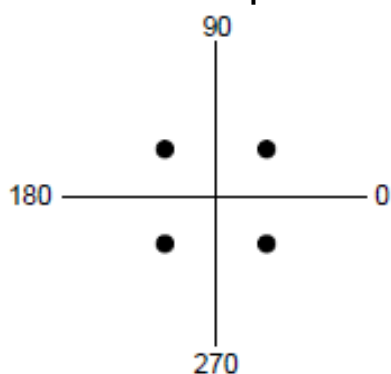
为了更有效的利用载波，通常会同时调制振幅和相位

- Constellation diagrams (星座图) are used to capture the amplitude and phase modulations of symbols:
- BPSK: Binary Phase Shift Keying;
- QPSK: Quadrature Phase Shift Keying;
- QAM: Quadrature Amplitude Modulation

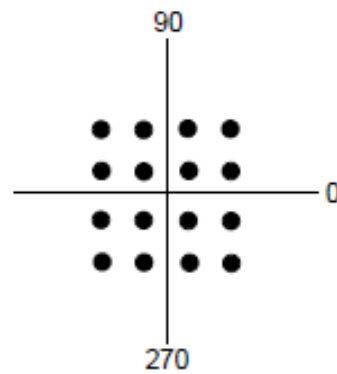


BPSK
2 symbols
1 bit/symbol

BPSK/QPSK varies only phase

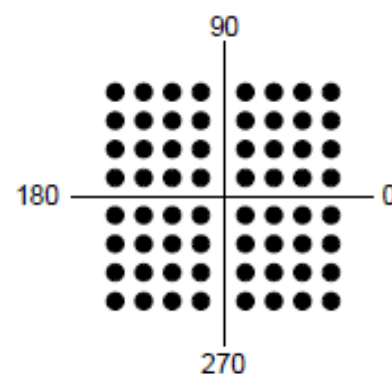


QPSK
4 symbols
2 bits/symbol



QAM-16
16 symbols
4 bits/symbol

QAM varies amplitude and phase



QAM-64
64 symbols
6 bits/symbol



符号率（波特率）和比特率

符号率：信号改变的速率，一个信号（码元）可以代表多个比特。

比特率：发送比特的速率

比特率=符号率*（一个符号代表的比特）

例子：星座图有以下数据点：（1，1）、（1，-1）、（-1，1）、（-1，-1），试问一个具备这些参数的调制解调器以1200符号/秒的速率能获得多少bps？

答：2400 bps



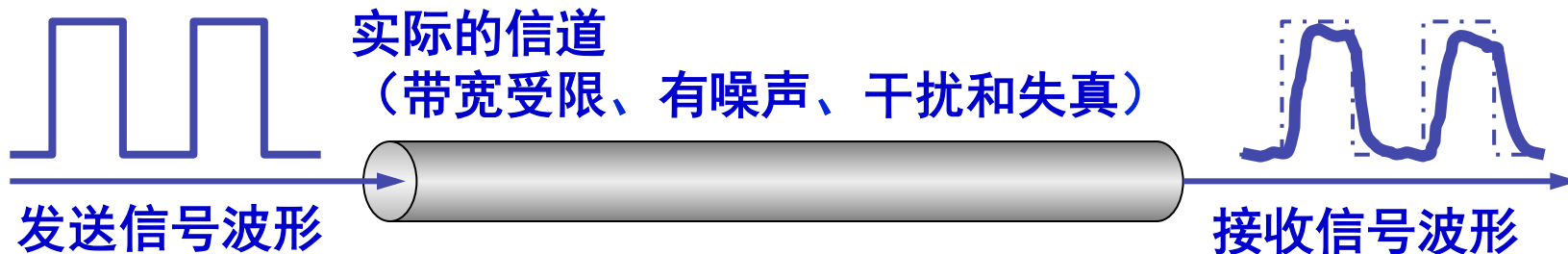
2.2.3 信道的极限容量

- 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，或传输媒体质量越差，在信道的输出端的波形的失真就越严重。



数字信号通过实际的信道

有失真，但**可识别**



失真大，**无法识别**





2.2.3 信道的极限容量

从概念上讲，限制码元在信道上的传输速率的因素有以下两个：

- 信道能够通过的频率范围
- 信噪比



信道能够通过的频率范围

- 如果不考虑信噪比（信道是理想的），那么最大速率是多少？
- Nyquist's theorem
 - 根据信道带宽(W)和信号等级(V)

$$\text{Max. data rate} = 2W \log_2 V \text{ bits/sec}$$

其中信号等级 V 表示一个符号（码元）可以代表信号的个数

信道 —— 一般用来表示向某一个方向传送信息的媒体。



信噪比

- 噪声存在于所有的电子设备和通信信道中。
- 噪声是随机产生的，它的瞬时值有时会很大。因此噪声会使接收端对码元的判决产生错误。
- **信噪比**就是信号的平均功率和噪声的平均功率之比。常记为 S/N ，并用分贝 (dB) 作为度量单位。即：

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

- 例如，当 $S/N = 10$ 时，信噪比为 10 dB，而当 $S/N = 1000$ 时，信噪比为 30 dB。



信噪比

- 如果考虑信噪比
 - 香农 (Shannon)理论。
- 信道的极限信息传输速率 C 可表达为:

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

其中: W 为信道的带宽 (以 Hz 为单位) ;

S 为信道内所传信号的平均功率;
 N 为信道内部的高斯噪声功率。



例子

1. A noiseless 4-kHz channel, what is the maximum data rate (a sample represents 0 or 1; a sample represents 4bits) ?
 - maximum data rate is independent of sampled rate. According to Nyquist's theorem:
 - Max. data rate = $2B \log_2 V = 8000 * \log_2 V$
 - If a sample represent 0 or 1, Max. data rate = 8000bit/s
 - If a sample represent 4 bits, , Max. data rate = $8000 \log_2 2^4$
 - =32 kbps
2. If this channel with signal to noise is 30dB, what's the maximum data ratio?
 - 30dB means $S/N=1000$, so according to Shannon's theorem, the limit is about 40 kbps



2.3 物理层下面的传输媒体

- 传输媒体也称为传输介质或传输媒介，它就是数据传输系统中在发送器和接收器之间的物理通路。
- 传输媒体可分为两大类，即导引型传输媒体和非导引型传输媒体。
- 在导引型传输媒体中，电磁波被导引沿着固体媒体（铜线或光纤）传播。
- 非导引型传输媒体就是指自由空间。在非导引型传输媒体中，电磁波的传输常称为无线传输。



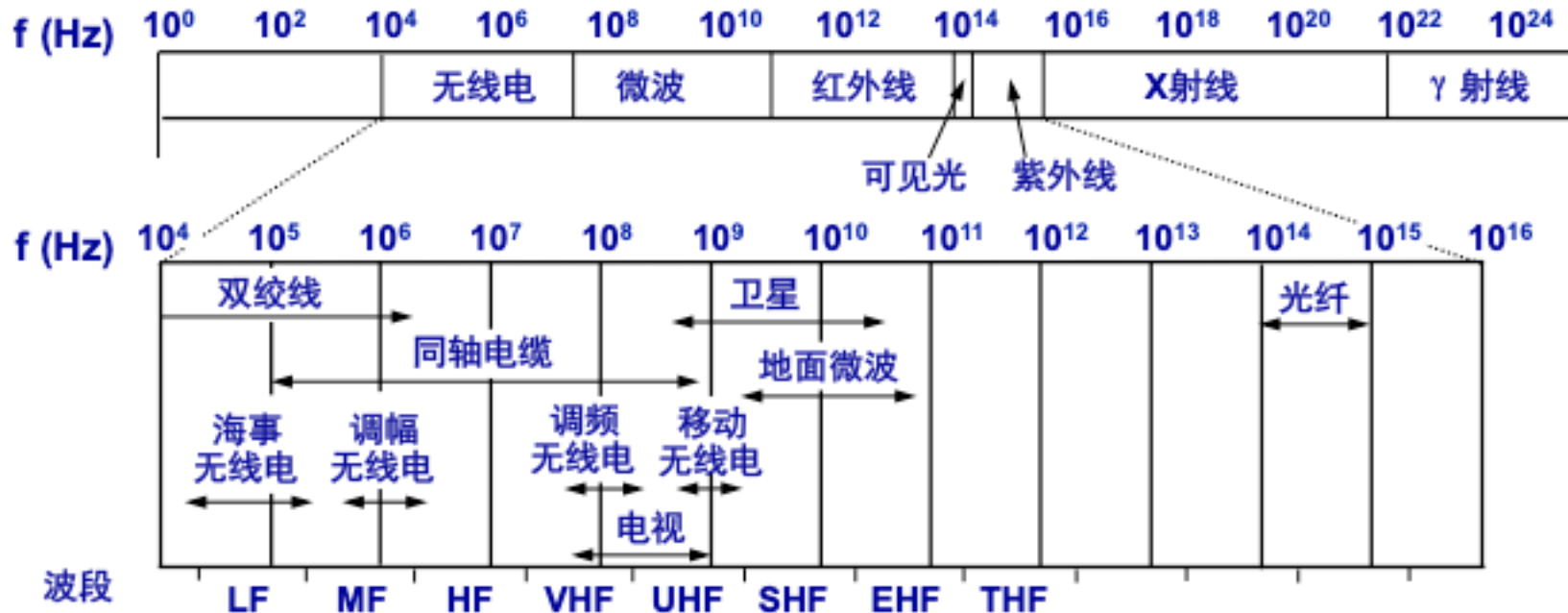
电磁波的频谱

电磁波不同的频带用于不同的应用:

Radio: wide-area broadcast; Infrared

/Light: line-of-sight

Microwave: LANs and 3G/4G;





2.3.1 导引型传输媒体

■ 双绞线

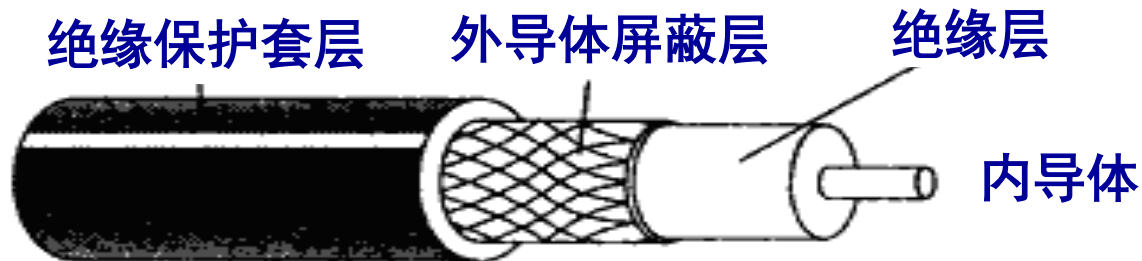
- 最常用的传输媒体。
- 模拟传输和数字传输都可以使用双绞线，其通信距离一般为几到十几公里。
- 屏蔽双绞线 STP (Shielded Twisted Pair)
 - 带金属屏蔽层
- 无屏蔽双绞线 UTP (Unshielded Twisted Pair)



2.3.1 导引型传输媒体

■ 同轴电缆

- 同轴电缆具有很好的抗干扰特性，被广泛用于传输较高速率的数据。
- 同轴电缆的带宽取决于电缆的质量。
- 50 Ω 同轴电缆 —— LAN / 数字传输常用
- 75 Ω 同轴电缆 —— 有线电视 / 模拟传输常用



同轴电缆的结构



2.3.1 导引型传输媒体

■ 光缆

- 光纤是光纤通信的传输媒体。
- 由于可见光的频率非常高，约为 10^8 MHz 的量级，因此一个光纤通信系统的传输带宽远远大于目前其他各种传输媒体的带宽。

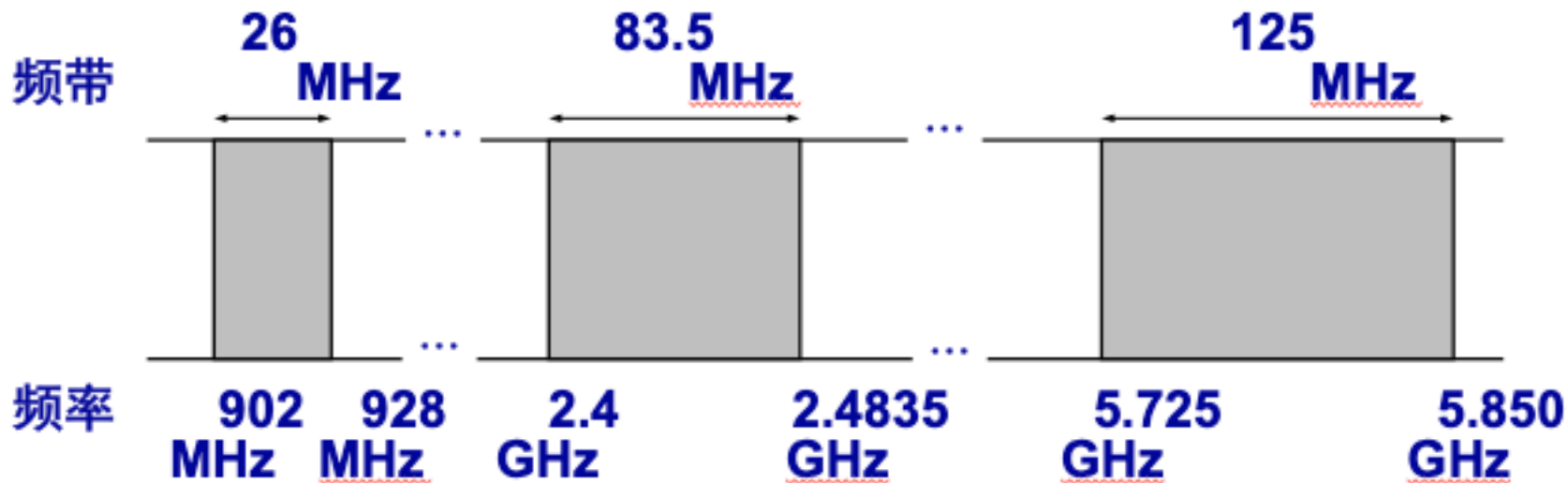


2.3.2 非导引型传输媒体

- 将自由空间称为“非导引型传输媒体”。
- 无线传输所使用的频段很广。
- **短波通信**（即高频通信）主要是靠电离层的反射，但短波信道的通信质量较差，传输速率低。
- **微波**在空间主要是直线传播。
- 传统微波通信有两种方式：
 - **地面微波接力通信**
 - **卫星通信**



无线局域网使用的 ISM 频段



无线局域网使用的 ISM 频段

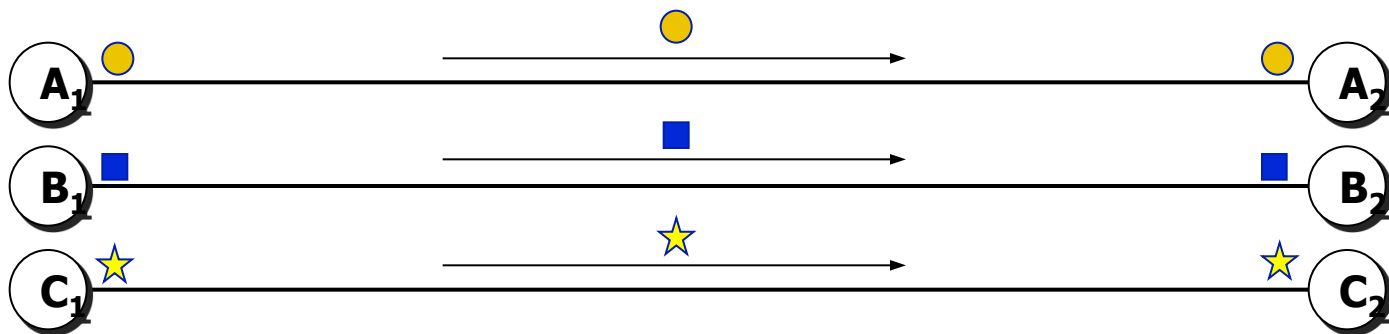


2.4 信道复用技术

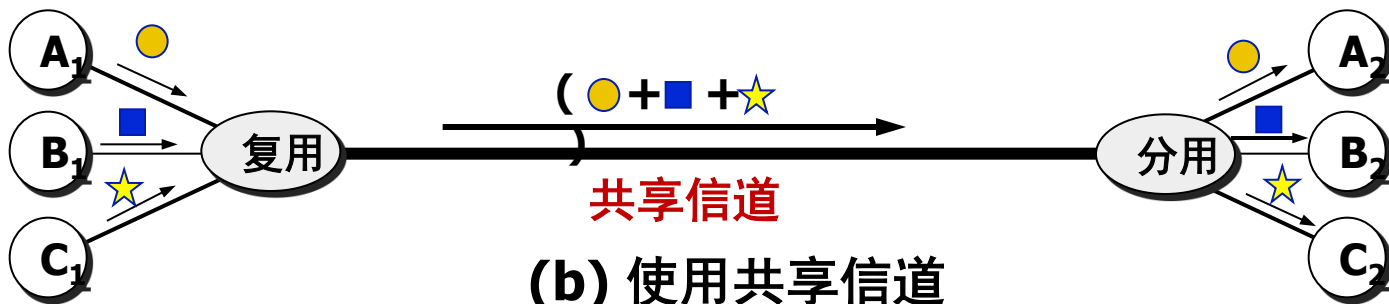
- 2.4.1 频分复用、时分复用和统计时分复用
- 2.4.2 波分复用
- 2.4.3 码分复用



复用 (multiplexing) 是通信技术中的基本概念。
它允许用户使用一个**共享**信道进行通信，降低成本，提高利用率。



(a) 使用单独的信道



(b) 使用共享信道

复用的示意图



频分复用 FDM (Frequency Division Multiplexing)

- 将整个带宽分为多份，用户在分配到一定的频带后，在通信过程中自始至终都占用这个频带。
- 频分复用的所有用户在同样的时间占用不同的带宽资源（请注意，这里的“带宽”是频率带宽而不是数据的发送速率）。



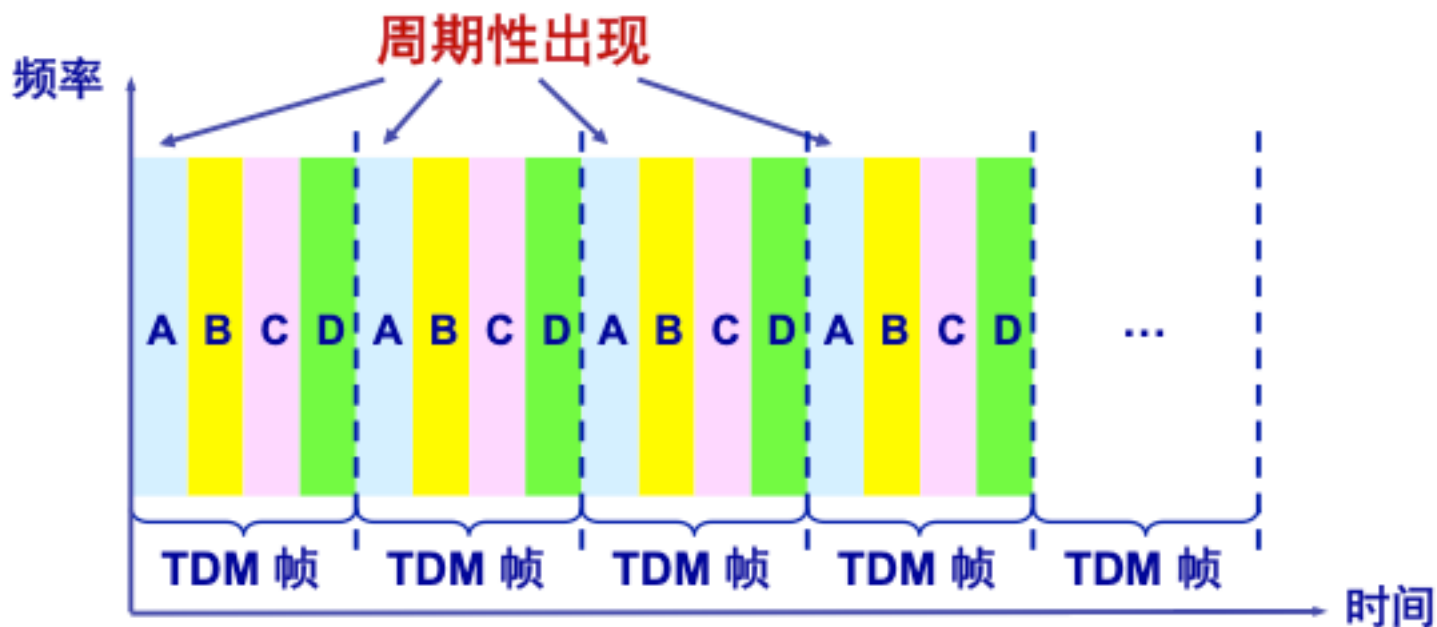


时分复用TDM (Time Division Multiplexing)

- 时分复用则是将时间划分为一段段等长的时分复用帧（TDM 帧）。每一个时分复用的用户在每一个 TDM 帧中占用固定序号的时隙。
- 每一个用户所占用的时隙是周期性地出现（其周期就是 TDM 帧的长度）。
- TDM 信号也称为等时(isochronous)信号。
- 时分复用的所有用户是在不同的时间占用同样的频带宽度。



时分复用TDM (Time Division Multiplexing)



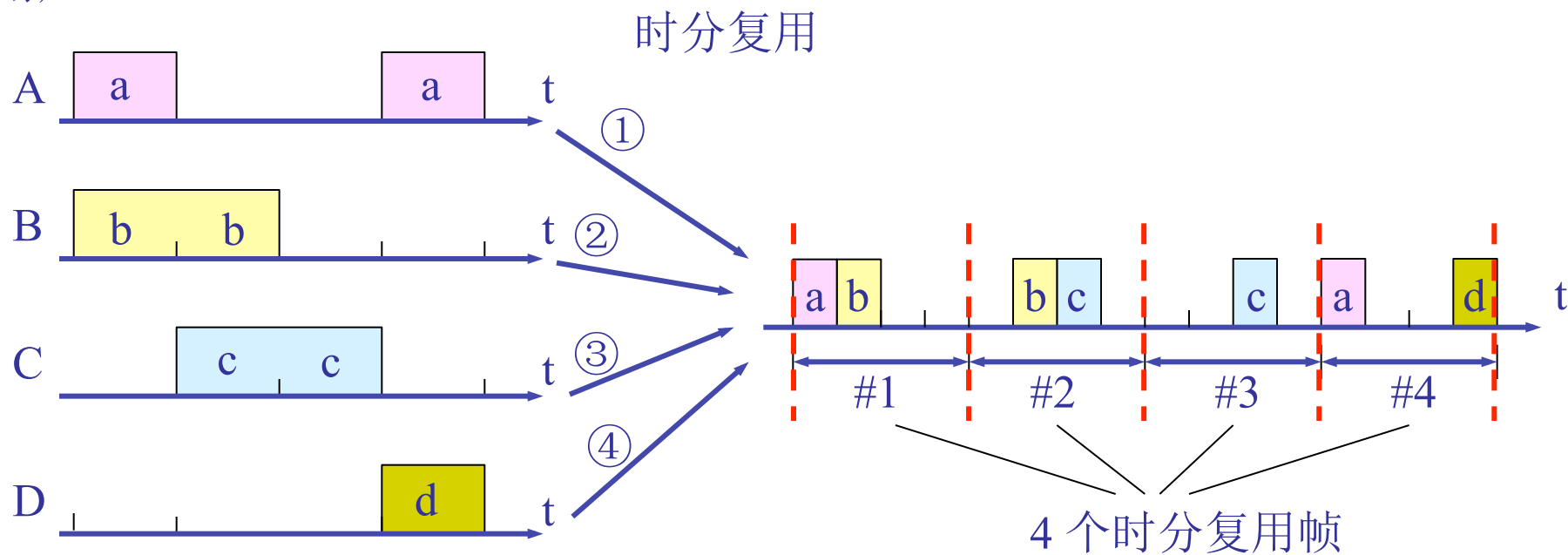
时分复用



时分复用可能会造成 线路资源的浪费

使用时分复用系统传送计算机数据时，
由于计算机数据的突发性质，用户对
分配到的子信道的利用率一般是不高的。

用户





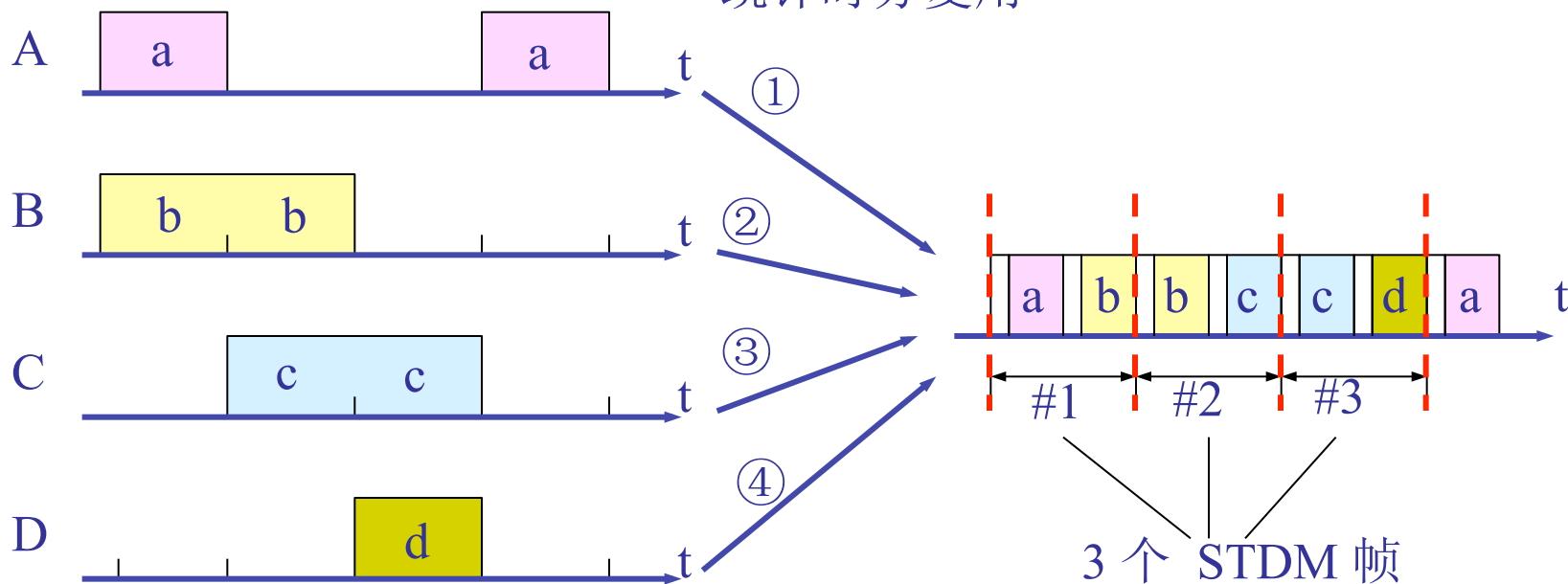
武汉大学

WUHAN UNIVERSITY

统计时分复用 STDM (Statistic TDM)

用户

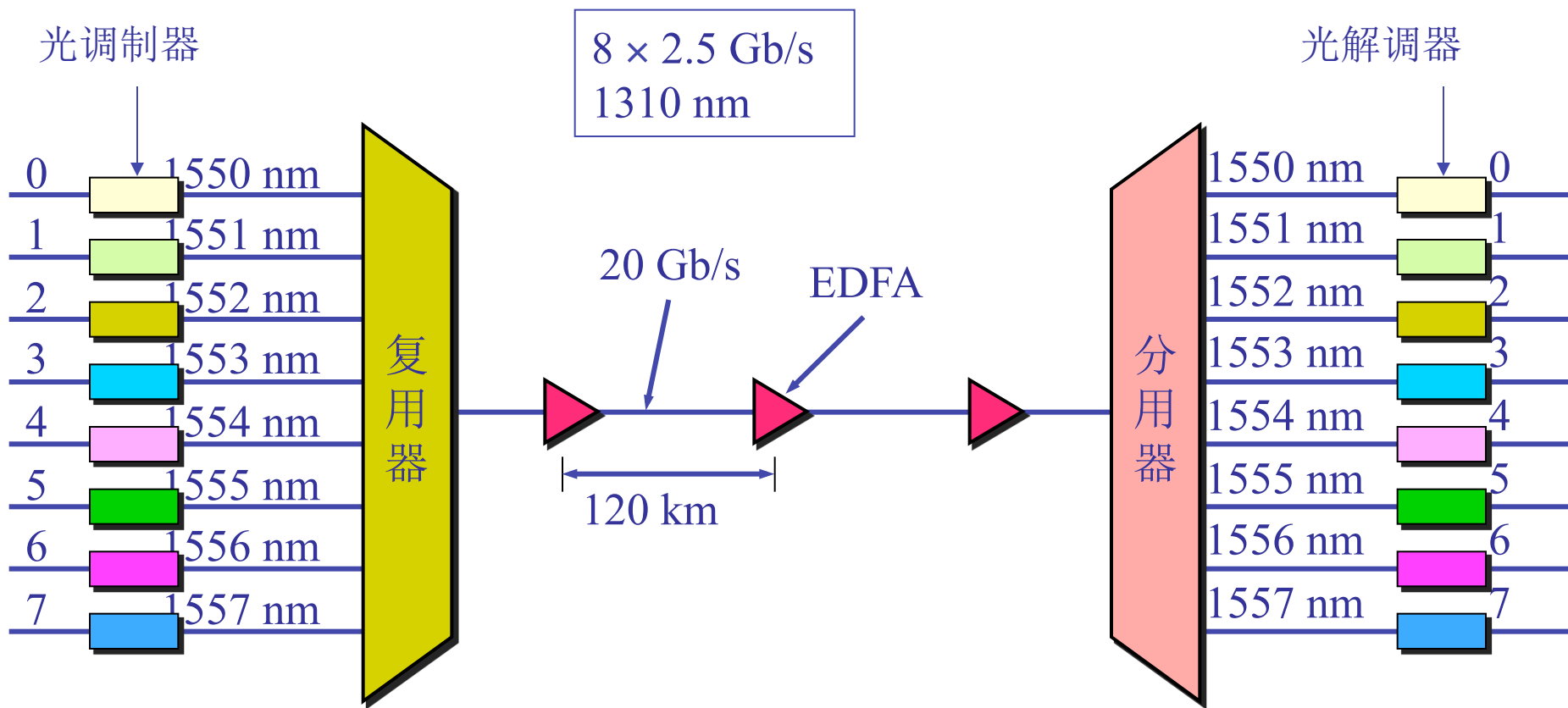
统计时分复用





2.4.2 波分复用 WDM (Wavelength Division Multiplexing)

- 波分复用就是光的频分复用。





2.4.3 码分复用 CDM (Code Division Multiplexing)

- 常用的名词是码分多址 CDMA (Code Division Multiple Access)。
- 各用户使用经过特殊挑选的不同码型，因此彼此不会造成干扰。
- 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，不易被敌人发现。



码片序列(chip sequence)

- 每一个比特时间划分为 m 个短的间隔，称为码片(chip)。
- 每个站被指派一个唯一的 m bit 码片序列。
 - 如发送比特 1，则发送自己的 m bit 码片序列。
 - 如发送比特 0，则发送该码片序列的二进制反码。
- 例如，S 站的 8 bit 码片序列是 $(-1-1-1+1+1-1+1+1)$ 。
 - 发送比特1时，就发送序列 $-1-1-1+1+1-1+1+1$ ，
 - 发送比特 0 时，就发送序列 $+1+1+1-1-1+1-1-1$ 。



CDMA 的重要特点

- 每个站分配的码片序列不仅**必须各不相同**，并且还**必须互相正交** (orthogonal)。
- $m=8$, then $A = (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)$ for station 1, $B = (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)$ for station 2, $C = (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)$ for station 3.
- Since they are orthogonal ($A \bullet B = 0$; $A \bullet C = 0$; $C \bullet B = 0$), the negative (反码) is also orthogonal (e.g. $\bar{A} \bullet C = 0$)

$$S \bullet T \equiv \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0$$



码片序列的正交关系

- 任何一个码片向量和该码片向量自己的规格化内积都是 **1**。
- 一个码片向量和该码片反码的向量的规格化内积值是 **-1**。



CDMA 的工作原理

接收方（基站）收到的数据如何？基站又是如何还原原始数据的？：

For example: station 1 sends '0'; station 2 sends '1'; station 3 sends '1'

- Base station will receive $S = (\bar{A} + B + C)$
- So, base station recovers the data sent by station 1:
 $S \cdot A = (\bar{A} + B + C) \cdot A = -1$, so '0' is sent by station 1
- similar, $S \cdot B = (\bar{A} + B + C) \cdot B = 1$, so '1' is sent by station 2
- $S \cdot C = (\bar{A} + B + C) \cdot C = 1$, so '1' is sent by station 3
- Note: if a station sends nothing, base station will get result of 0



码分复用 (CDM)

例子:

$A = (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)$, $B = (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)$
 , $C = (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)$, $D = (-1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 -1)$.

(1) 如A、B、C同时传输0，则结果码片序列？

(2) 如结果是 $(-1 +1 -3 +1 -1 -3 +1 +1)$ ，则各站都发了什么？

(1) $(+3 +1 +1 -1 -3 -1 -1 +1)$.

(2) $(-1 +1 -3 +1 -1 -3 +1 +1) \cdot (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)/8 = 1$

$(-1 +1 -3 +1 -1 -3 +1 +1) \cdot (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)/8 = -1$

$(-1 +1 -3 +1 -1 -3 +1 +1) \cdot (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)/8 = 0$

$(-1 +1 -3 +1 -1 -3 +1 +1) \cdot (-1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 -1)/8 = 1$

The result is that A and D sent 1 bits, B sent a 0 bit, and C was silent.



2.5 数字传输系统

- 在早期电话网中，从市话局到用户电话机的用户线是采用最廉价的双绞线电缆，而长途干线采用的是频分复用 **FDM** 的模拟传输方式。
- 与模拟通信相比，数字通信无论是在传输质量上还是经济上都有明显的优势。
- 目前，长途干线大都采用时分复用 **PCM** 的数字传输方式。
- **脉码调制 PCM** 体制最初是为了在电话局之间的中继线上传送多路的电话。



同步光纤网 SONET

- **同步光纤网 SONET** (Synchronous Optical Network) 的各级时钟都来自一个非常精确的主时钟。
- **SONET** 为光纤传输系统定义了同步传输的线路速率等级结构
 - 对电信信号称为第 1 级**同步传送信号** STS-1 (Synchronous Transport Signal), 其传输速率是 51.84 Mbit/s。
 - 对光信号则称为第 1 级**光载波** OC-1 (OC 表示 Optical Carrier)。
- 现已定义了从 51.84 Mbit/s (即 OC-1) 一直到 9953.280 Mbit/s (即 OC-192/STS-192) 的标准。



同步数字系列 SDH

- ITU-T 以美国标准 SONET 为基础，制订出国际标准同步数字系列 SDH (Synchronous Digital Hierarchy)。
- 一般可认为 SDH 与 SONET 是同义词。
- 其主要不同点是：SDH 的基本速率为 155.52 Mbit/s，称为第 1 级同步传递模块 (Synchronous Transfer Module)，即 STM-1，相当于 SONET 体系中的 OC-3 速率。

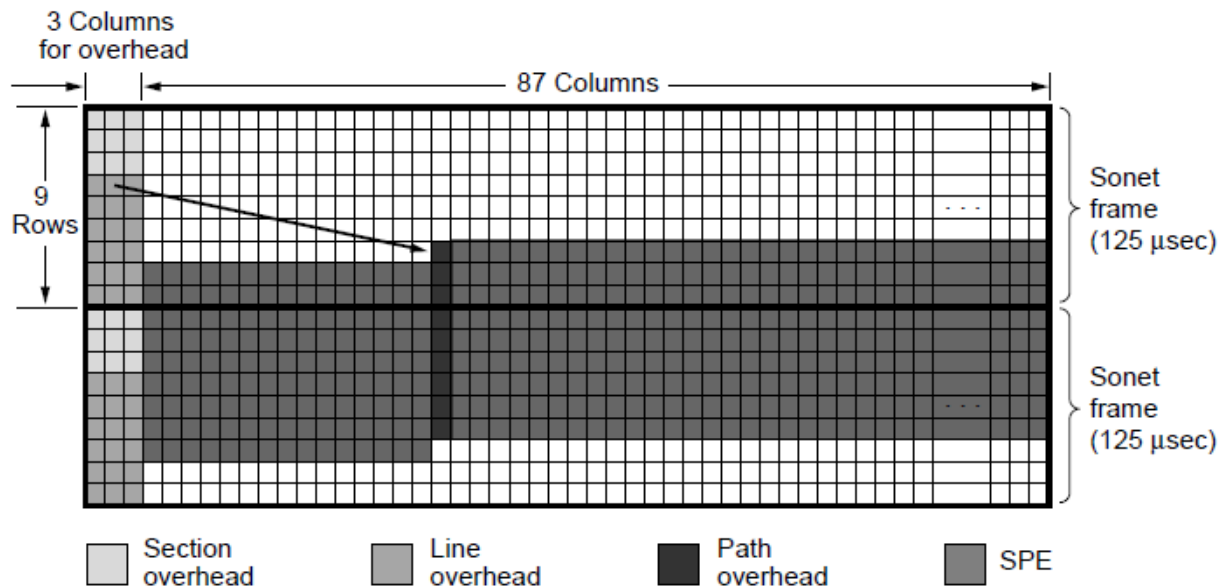
SONET的 OC 级/STS 级与 SDH 的 STM 级的对应关系

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



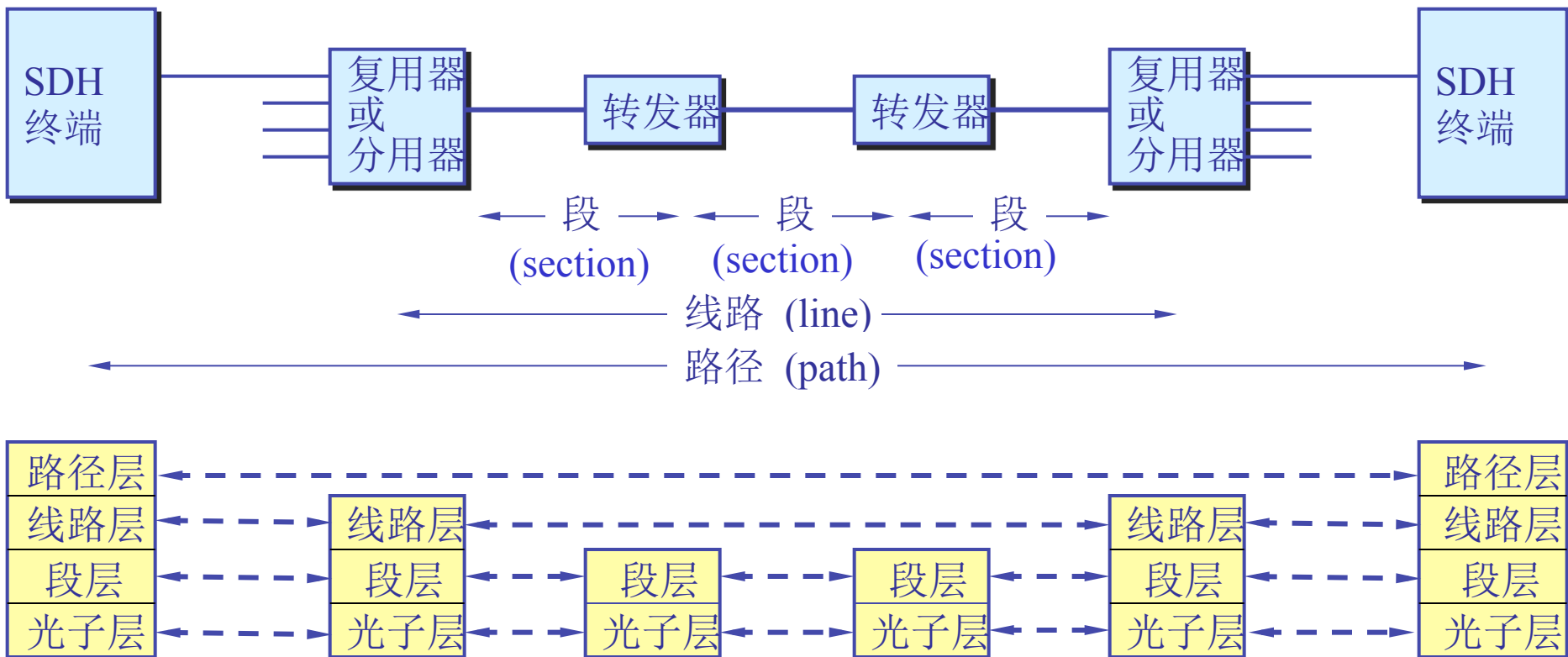
同步光纤网 SONET

- SONET (Synchronous Optical NETwork, 也称为SDH) 定义了如何用光纤来传递数据
 - 保留125 μ s 每帧，其中每帧为810字节即基本速率为52Mbps
 - 帧结构如图，由于前三列保留，实际数据由后87列传输，所以SPE（有效载荷）为50.112Mbps





SONET 的体系结构





2.6 宽带接入技术

- 2.6.1 ADSL 技术
- 2.6.2 光纤同轴混合网（HFC网）
- 2.6.3 FTTx 技术



2.6 宽带接入技术

- 用户要连接到互联网，必须先连接到某个 **ISP**。
- 在互联网的发展初期，用户都是利用电话的用户线通过调制解调器连接到 **ISP** 的，电话用户线接入到互联网的速率最高只能达到 **56 kbit/s**。
- 美国联邦通信委员会 **FCC** 认为只要双向速率之和超过 **200 kbit/s** 就是**宽带**。



2.6.1 ADSL 技术

- 非对称数字用户线 **ADSL** (Asymmetric Digital Subscriber Line) 技术就是用数字技术对现有的模拟电话用户线进行改造，使它能够承载宽带业务。
- 标准模拟电话信号的频带被限制在 300~3400 Hz 的范围内，但用户线本身实际可通过的信号频率仍然超过 1 MHz。
- ADSL 技术就把 0~4 kHz 低端频谱留给传统电话使用，而把原来没有被利用的高端频谱留给用户上网使用。
- DSL 就是数字用户线 (Digital Subscriber Line) 的缩写。



DSL 的几种类型

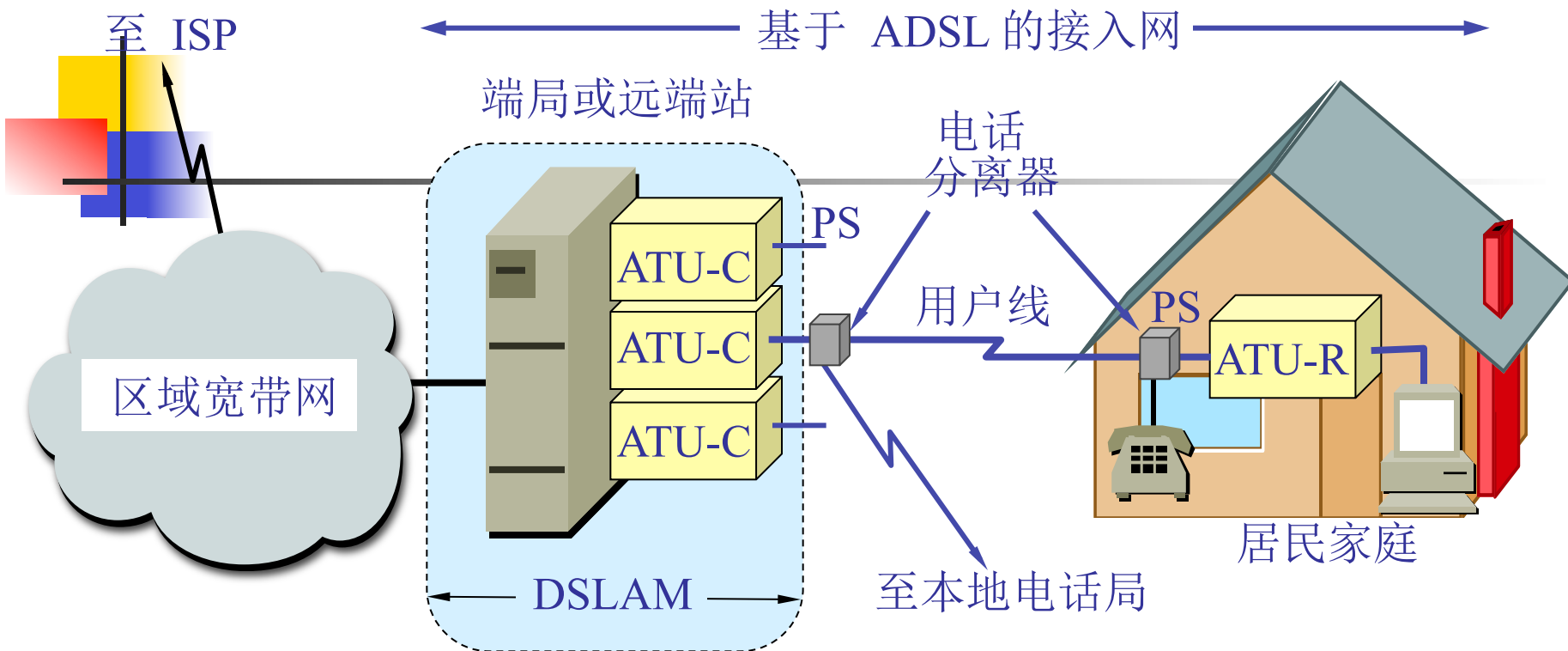
- **ADSL** (Asymmetric Digital Subscriber Line): 非对称数字用户线
- **HDSL** (High speed DSL): 高速数字用户线
- **SDSL** (Single-line DSL): 1 对线的数字用户线
- **VDSL** (Very high speed DSL): 甚高速数字用户线
- **DSL** (Digital Subscriber Line) : 数字用户线。
- **RADSL** (Rate-Adaptive DSL): 速率自适应 DSL，是 ADSL 的一个子集，可自动调节线路速率）。



武汉大学

WUHAN UNIVERSITY

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 代表端局 Central Office)

ATU-R (R 代表远端 Remote)

电话分离器 PS (POTS Splitter)

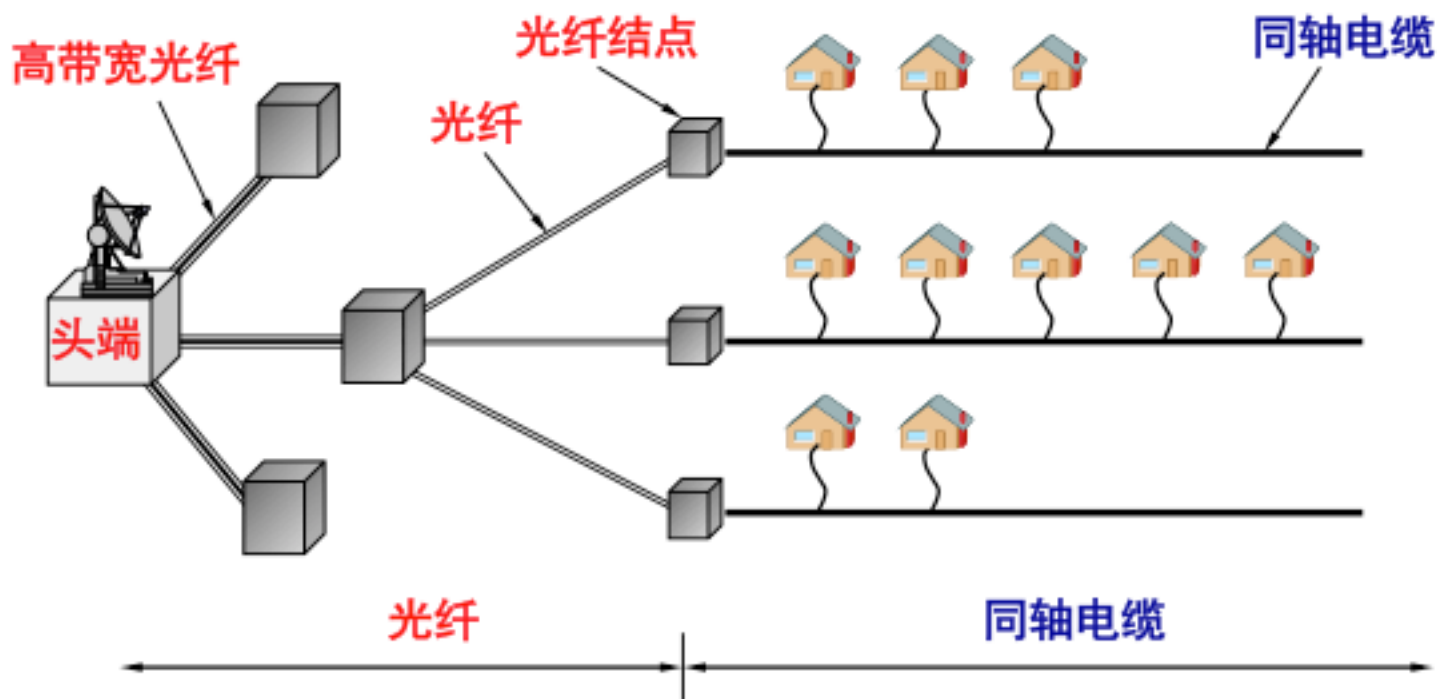


2.6.2 光纤同轴混合网（HFC网）

- HFC (Hybrid Fiber Coax) 网是在目前覆盖面很广的有线电视网 CATV 的基础上开发的一种居民宽带接入网。
- HFC 网除可传送 CATV 外，还提供电话、数据和其他宽带交互型业务。
- 现有的 CATV 网是树形拓扑结构的同轴电缆网络，它采用模拟技术的频分复用对电视节目进行单向传输。
- HFC 网对 CATV 网进行了改造。



HFC 网采用结点体系结构



HFC 网的结构图



2.6.3 FTTx 技术

- FTTx 是一种实现宽带居民接入网的方案，代表多种宽带光纤接入方式。
- FTTx 表示 Fiber To The...（光纤到...），例如：
 - 光纤到户 **FTTH** (Fiber To The Home): 光纤一直铺设到用户家庭，可能是居民接入网最后的解决方法。
 - 光纤到大楼 **FTTB** (Fiber To The Building): 光纤进入大楼后就转换为电信号，然后用电缆或双绞线分配到各用户。
 - 光纤到路边 **FTTC** (Fiber To The Curb): 光纤铺到路边，从路边到各用户可使用星形结构双绞线作为传输媒体。



武汉大学

WUHAN UNIVERSITY



作业

- 2-01, 2-07, 2-08, 2-12, 2-13
 , 2-16, 2-17