



计算机网络与通信

第二章 物理层

唐璐

2025-9

目录

一

物理层的基本概念

二

数据通信基础

三

数据通信技术

四

传输介质

五

带宽接入

六

物理层设备

应用层
Application Layer

传输层
Transport Layer

互联网层
Internet Layer

数据链路层
Data Link Layer

物理层
Physical Layer

目录

一

物理层的基本概念

1.1 物理层的功能

1.2 物理层接口特性

1.3 物理层常用标准

二

数据通信基础

三

数据通信技术

四

传输介质

五

带宽接入

六

物理层设备

❖ 物理层 (Physical Layer)

- 定义如何在信道上传输0、1 : Bits on the wire
- 机械特性：网线接口形状、尺寸、引脚数目和排列等
- 电气特性：电压范围等
- 功能特性：电平意义，电子信号如何表示0和1
- 过程特性：事件时序
- 介质：各种线缆，无线频谱等
-

应用层 Application Layer
传输层 Transport Layer
网络层 Network Layer
数据链路层 Data Link Layer
物理层 Physical Layer

1. 物理层的基本概念 – 物理层功能

❖ **位置**：物理层是网络体系结构中的最低层

- 是连接计算机的具体物理设备吗？×不是
- 是负责信号传输的具体物理媒体吗？×不是

❖ **功能**：如何在连接各计算机的传输媒体上**传输数据比特流**

- 数据链路层将数据比特流传送给物理层
- 物理层将比特流按照传输媒体的需要进行编码
- 然后将信号通过传输媒体传输到下一个节点的物理层

❖ **作用**：尽可能地**屏蔽掉不同传输媒体和通信手段的差异**

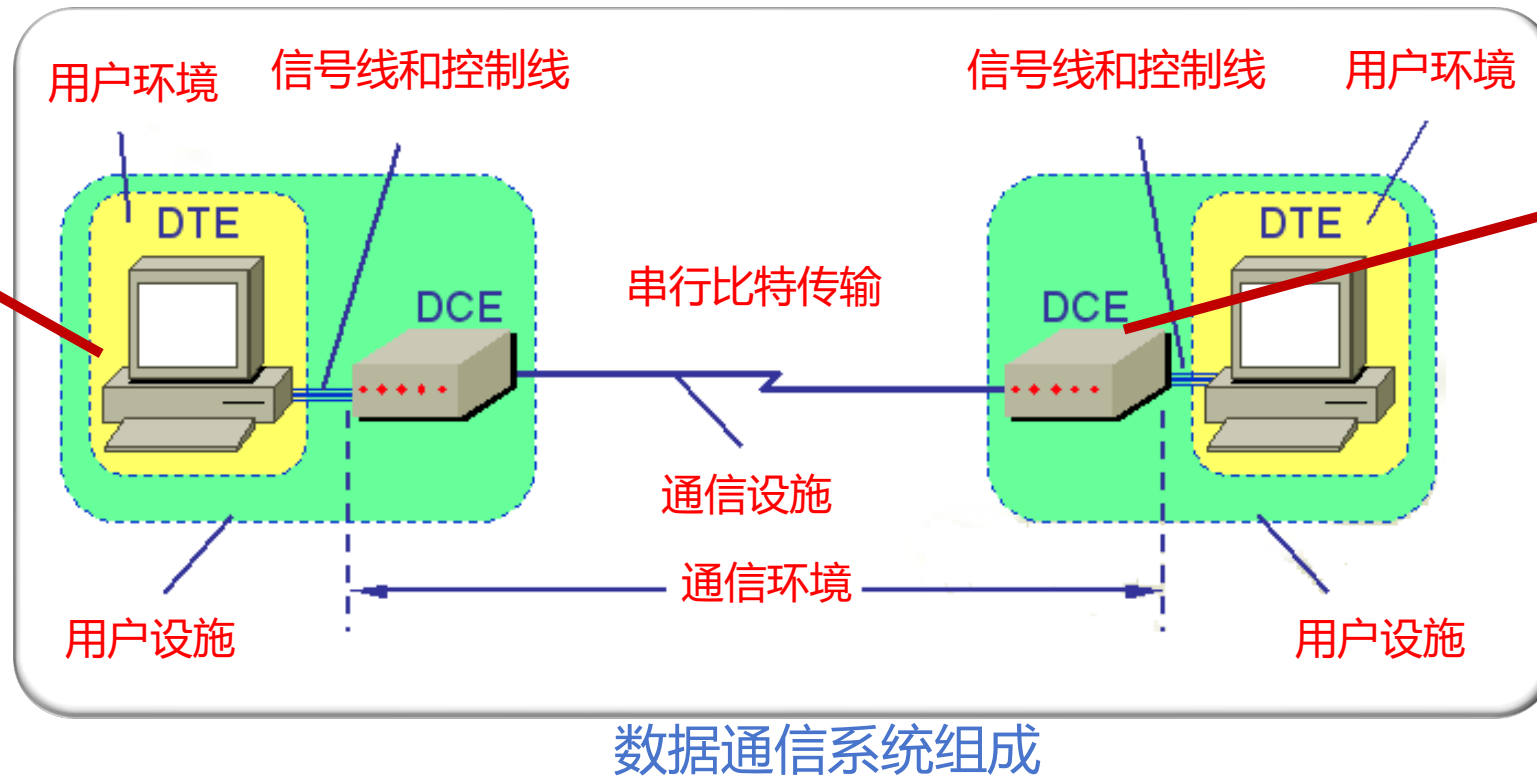
- 为数据链路层提供一个统一的数据传输服务

应用层 Application Layer
传输层 Transport Layer
网络层 Network Layer
数据链路层 Data Link Layer
物理层 Physical Layer

1.2 物理层接口特性

数据终端设备 (DTE)

- 具有一定的数据处理和转发能力的设备
- 可以是数据的源点或终点



数据电路终结设备 (DCE)

- 在DTE和传输线路之间提供信号变换和编码的功能
- 负责建立、保持和释放数据链路

❖ 标准化的DTE/DCE接口具有

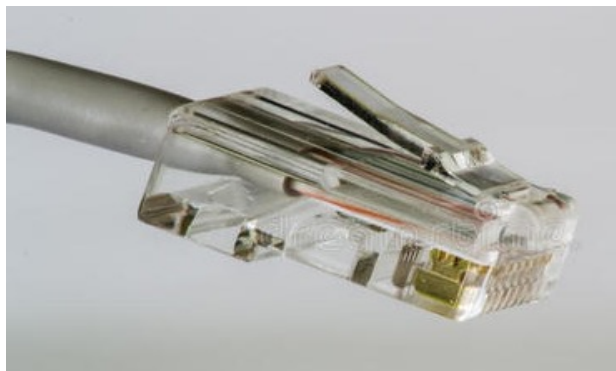
- 机械特性、电气特性
- 功能特性、过程特性

❖ 物理层协议是DTE和DCE间的约定，规定了两者的接口特性

物理层协议呈现的四个特性

- ❖ ①**机械特性**：规定接口所用接插件的形状、尺寸、引线数目、排列方式等
- ❖ ②**电气特性**：规定在接口电缆的各条线上应有的电压范围
- ❖ ③**功能特性**：规定某条线上出现某一电平的意义
- ❖ ④**过程特性**：规定实现特定功能的事件应该出现的顺序

- ❖ ①**机械特性**：规定接口所用接插件的**形状、尺寸、引线数目、排列方式**等
- 涉及接口的物理结构，通常采用接线器来实现机械上的连接

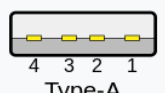
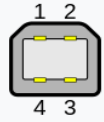
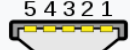
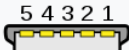
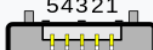
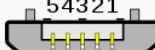
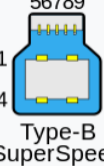
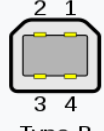
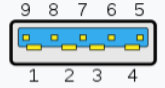
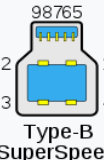
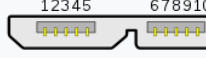


各种类型物理接口

物理层机械特性

- ❖ ①**机械特性**：规定接口所用接插件的**形状、尺寸、引线数目、排列方式**等
 - 涉及接口的物理结构，通常采用接线器来实现机械上的连接

USB机械电子标准一览

类别		Type-A	Type-B	Type-C	Mini-A	Mini-B	Mini-AB	Micro-A	Micro-B	Micro-AB
插头 (公头)	2.0	 Type-A	 Type-B	不存在	 Mini-A	 Mini-B	不存在	 Micro-A	 Micro-B	不存在
	3.2	 Type-A SuperSpeed	 Type-B SuperSpeed		已弃用	已弃用		已弃用	 Micro-B SuperSpeed	
插座 (母头)	2.0	 Type-A	 Type-B	不存在	 Mini-A	 Mini-B	 Mini-AB	不存在	 Micro-B	 Micro-AB
	3.2	 Type-A SuperSpeed	 Type-B SuperSpeed	 Type-C	已弃用	已弃用	已弃用		 Micro-B SuperSpeed	已弃用
应用范围		计算机	扫描仪、打印机等	新式计算机、移动电话、平板电脑等	旧式便携设备		仅作为万能接头	移动电话、平板电脑等		仅作为万能接头

- ❖ ②**电气特性**：规定了DTE/DCE之间多条信号线的电气连接及有关电路特性
 - 发送器和接收器的**电路特性**、**负载要求**、**传输速率**和**连接距离**等
 - 如**发送信号电平**、**发送器和接收器的输出阻抗**、**平衡特性**等
- ❖ 电气特性举例：普通电话交换网接口电气特性的主要规定

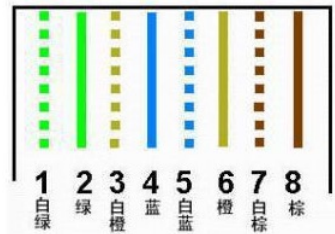
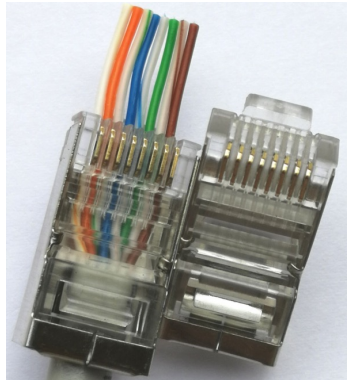
ITU-T V/X系列有关建议的某些电气特性

发送电平	$\leq 0\text{dBm}$		
接收电平	$-5 \sim -35\text{dBm}$ ，视各种Modem而定		
阻 抗	600Ω		
平衡特性	平衡输入/输出		
ITU-T建议	1信号电平	0信号电平	速率范围
V.28	$-5 \sim -15\text{V}$ (对地)	$+5 \sim +15\text{V}$ (对地)	$\leq 20\text{ kb/s}$
V.10/X.26	$-4 \sim -6\text{V}$ (对地)	$+4 \sim +6\text{V}$ (对地)	$\leq 300\text{ kb/s}$
V.11/X.27	$-2 \sim -6\text{V}$ (差动)	$+2 \sim +6\text{V}$ (差动)	$\leq 10\text{ Mb/s}$

物理层功能特性

❖ ③功能特性：规定某条线上出现某一电平的意义

- 描述接口执行的功能，定义接线器的每一引脚(针，Pin)的作用



引脚	信号
1	TD+(发送数据，正向差分信号)
2	TD-(发送数据，负向差分信号)
3	RD+(接收数据，正向差分信号)
4	未使用
5	未使用
6	RD-(接收数据，负向差分信号)
7	未使用
8	未使用

10BASE-T RJ-45 接口功能特性

针脚	符号	方向	说明
1	DCD	输入	数据载波检测
2	RXD	输入	接收数据
3	TXD	输出	发送数据
4	DTR	输出	数据终端准备好
5	GND	-	信号地
6	DSR	输入	数据装置准备好
7	RTS	输出	请求发送
8	CTS	输入	允许发送
9	RI	输入	振铃指示

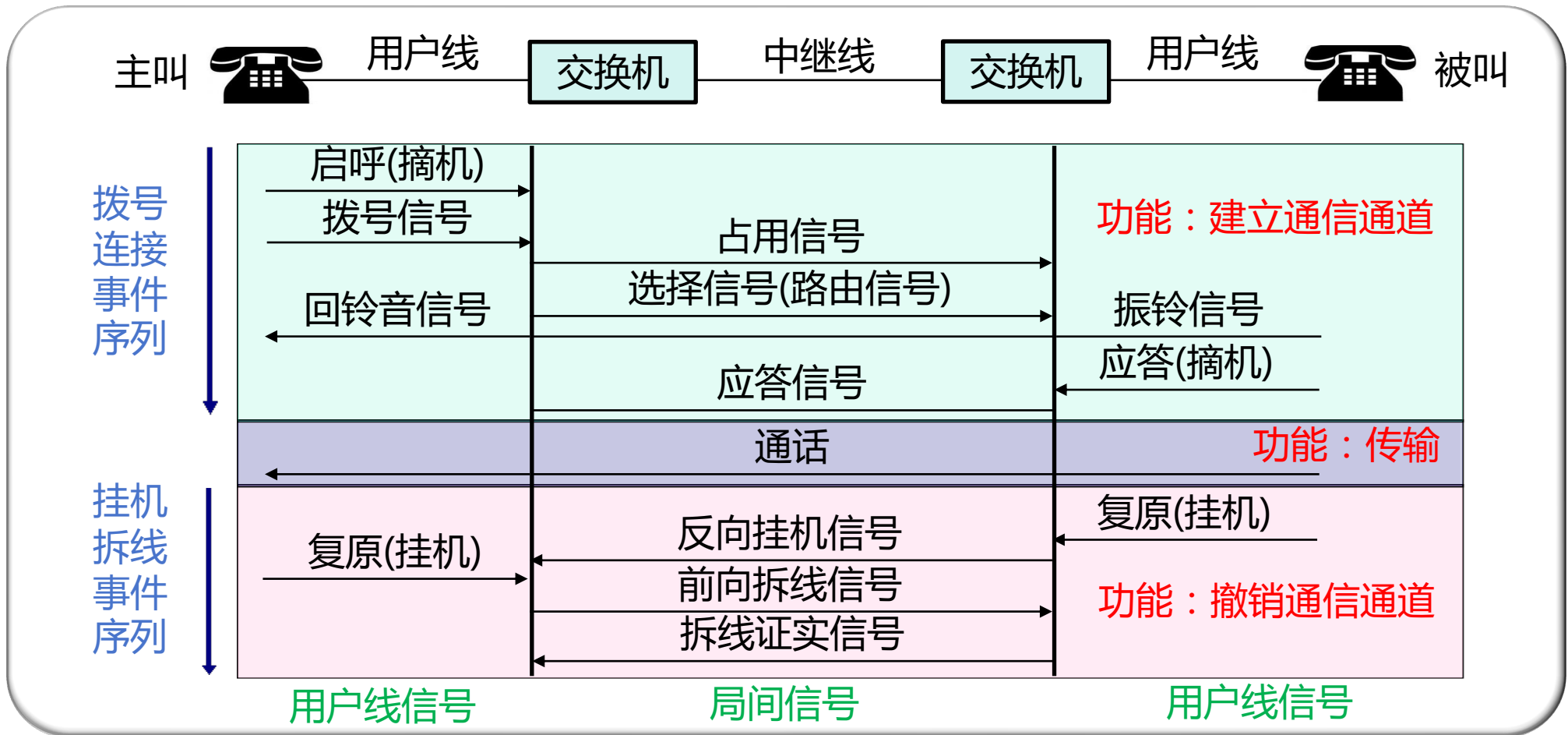


RS-232-C DB-9接口功能特性

物理层过程特性

❖ ④过程特性：规定实现特定功能的事件应该出现的顺序

- 指明对于不同功能的各种可能事件的出现顺序



过程特性示例：电话通信

1.3 物理层常用标准

❖ 点对点通信线路用于直接连接两个结点

❖ 点对点通信线路的物理层标准

• EIA RS-232-C标准

- 美国电子工业协会(EIA)于1969年颁布
- 串行、低速、模拟传输设备与计算机之间的物理接口标准
- 规定了计算机串行通信接口卡与调制解调器之间物理接口的机械、电气、功能和过程的具体参数与工作流程
- 目前很多低速的数据通信设备仍然采用该标准

• EIA RS-449标准

- 想取代RS-232-C而开发，但未被广泛使用



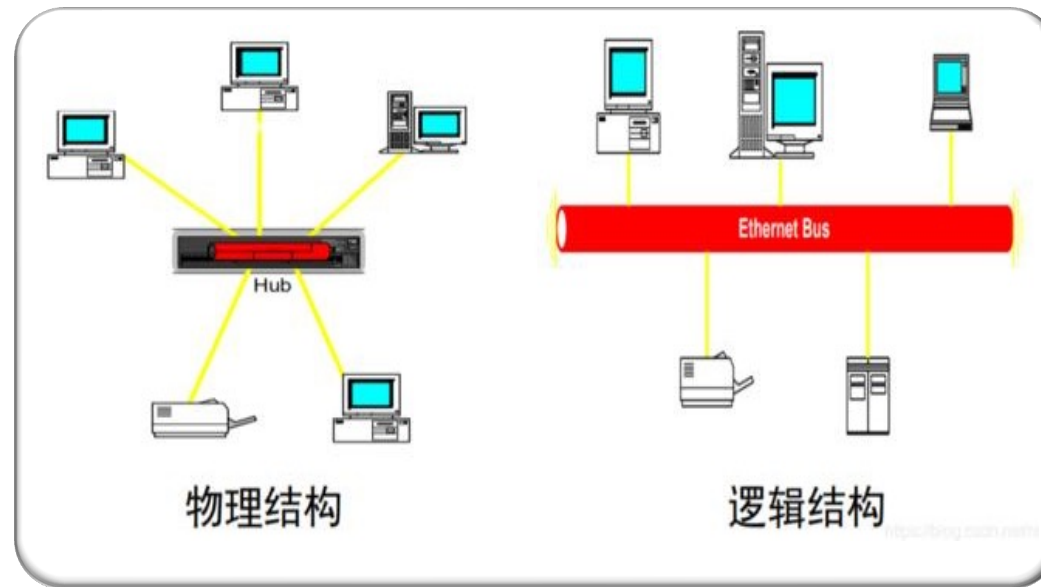
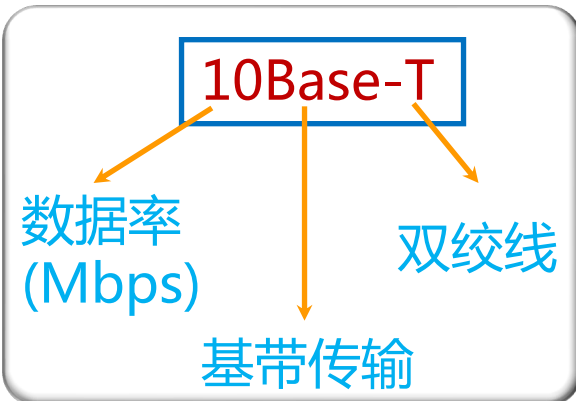
美国电子工业协会(EIA)创建于1924年，它广泛代表了设计生产电子元件、部件、通信系统和设备的制造商以及工业界、政府和用户的利益，在提高美国制造商的竞争力方面起到了重要的作用。



点对点通信线路和RS-232-C标准

1.3 物理层常用标准

- **广播通信线路**：一条公共通信线路连接多个结点
- 广播通信线路的物理层标准
 - 传统以太网IEEE 802.3：**10BASE-T**等
 - 快速以太网
 - 千兆以太网
 - 万兆以太网
 - 无线局域网



广播通信线路(以太网)

广播通信线路的物理层标准

802.3 : 10BASE-2 , 10BASE-5 ,
10BASE-T

802.3u : 100BASE-T , 100BASE-TX ,
100BASE-T4 , 100BASE-FX

802.3z : 1000BASE-T , 1000BASE-CX ,
1000BASE-LX , 1000BASE-SX

802.3ae : LAN PHY , WAN PHY

802.15.4 : 无线个人区域网WPAN

目录

一

物理层的基本概念

二

数据通信基础

2.1 傅里叶分析

2.2 奈奎斯特定理

2.3 香农定理

三

数据通信技术

四

传输介质

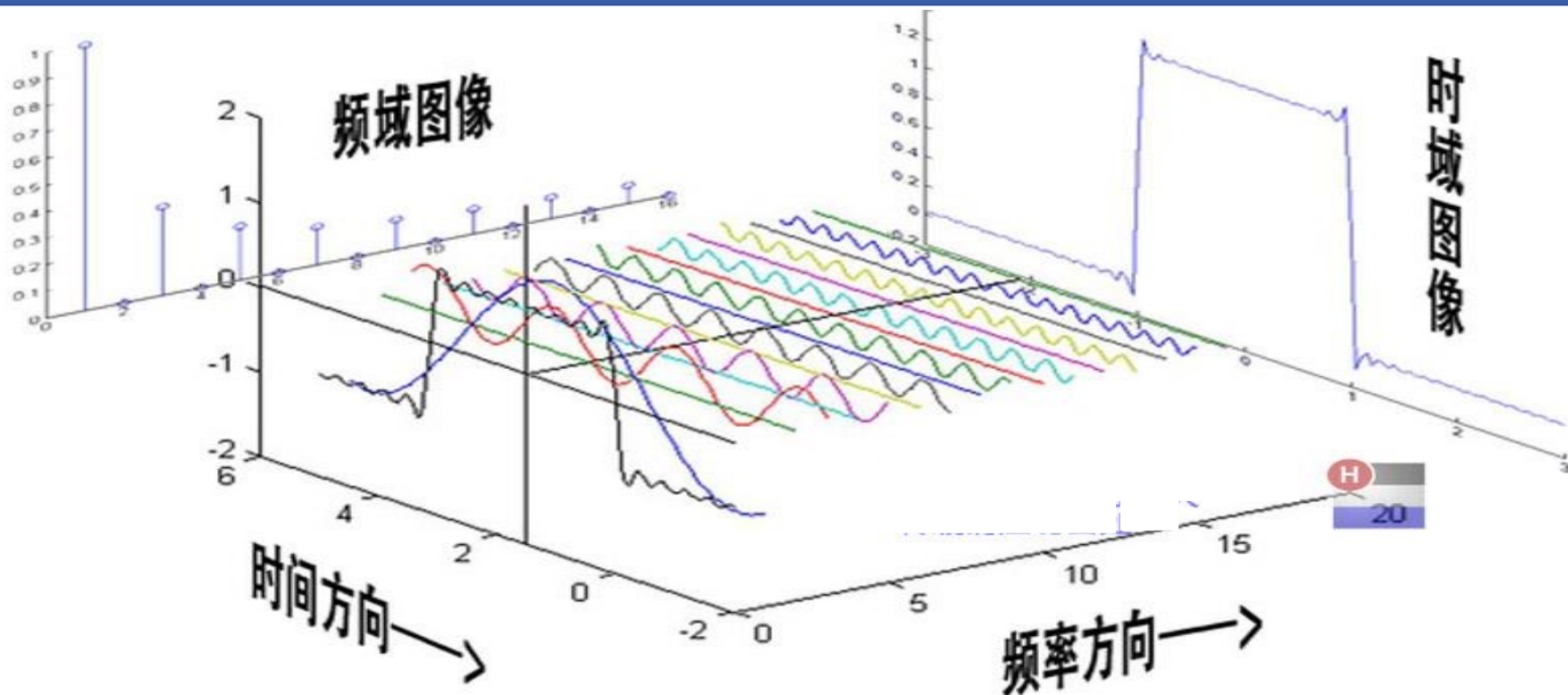
五

带宽接入

六

物理层设备

傅立叶分析



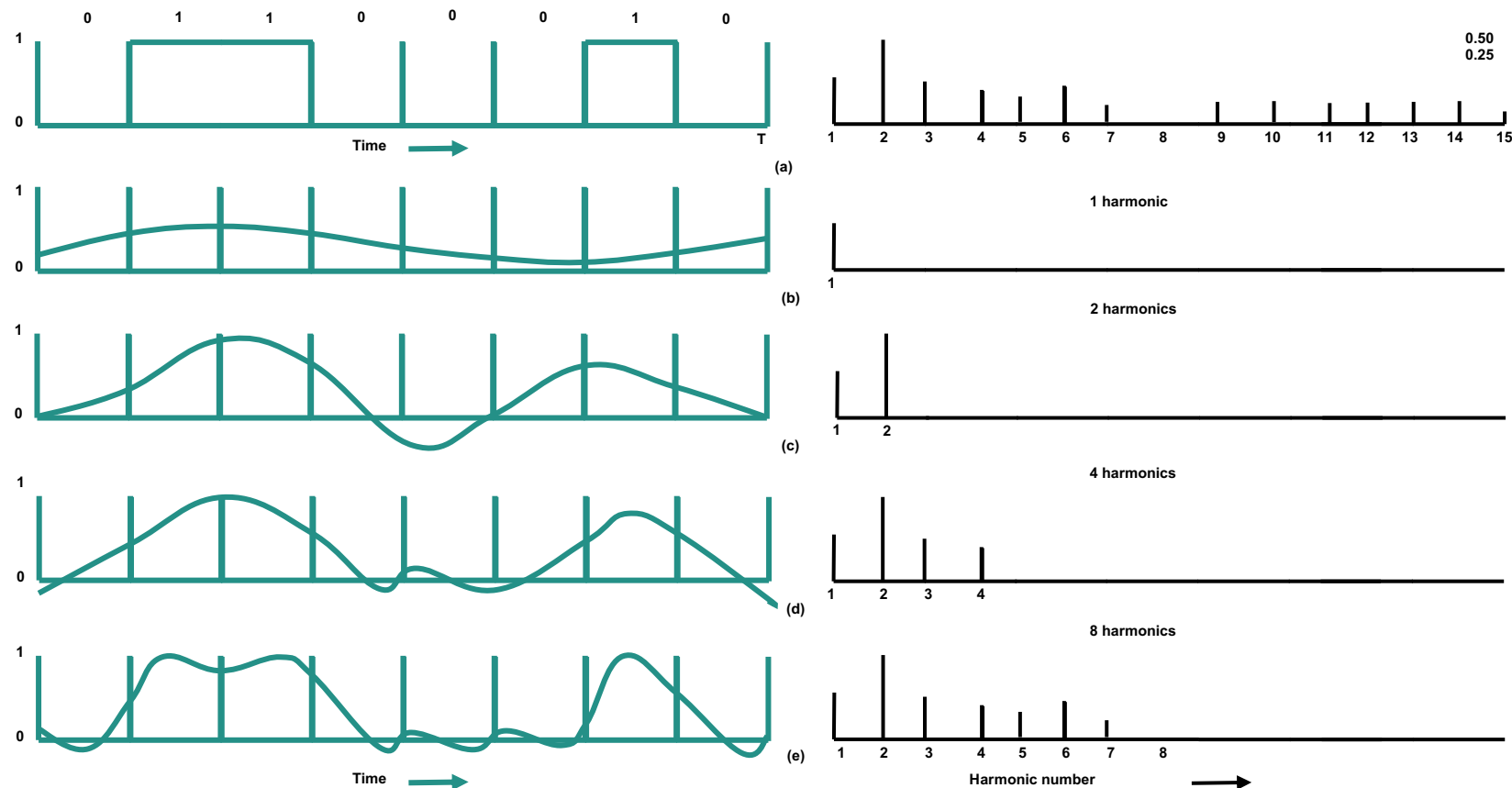
- 任一周期为T的有理周期性函数 $g(t)$ 可分解为若干项正弦和余弦函数之和

$f = 1/T$ 基本频率； a_n, b_n n 次谐波项的正弦和余弦振幅值

$$g(t) = c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

2.1 傅里叶分析

- ❖ 根据傅立叶分析，任何电磁信号可由若干具有不同振幅、频率和相位的周期模拟信号（正弦波）组成
- ❖ 反过来，只要有足够具有适当振幅、频率和相位的正弦波，就可构造任一信号



2.1 傅里叶分析

❖ 频谱 (spectrum) 是一个信号所包含的频率的范围

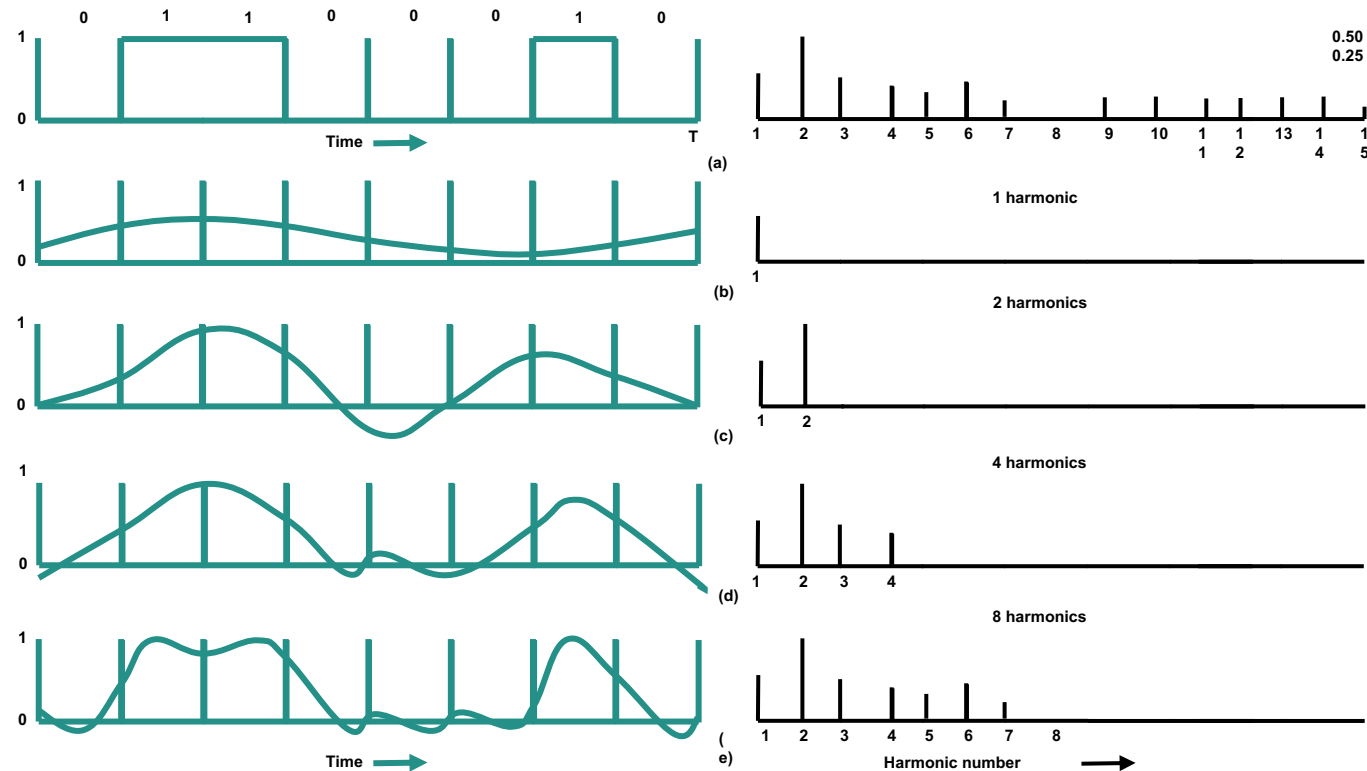
❖ 图中信号的频谱从 f 到 $8f$

❖ 信号的绝对带宽等于频谱的宽度

❖ 图中信号的带宽为 $8f - f = 7f$

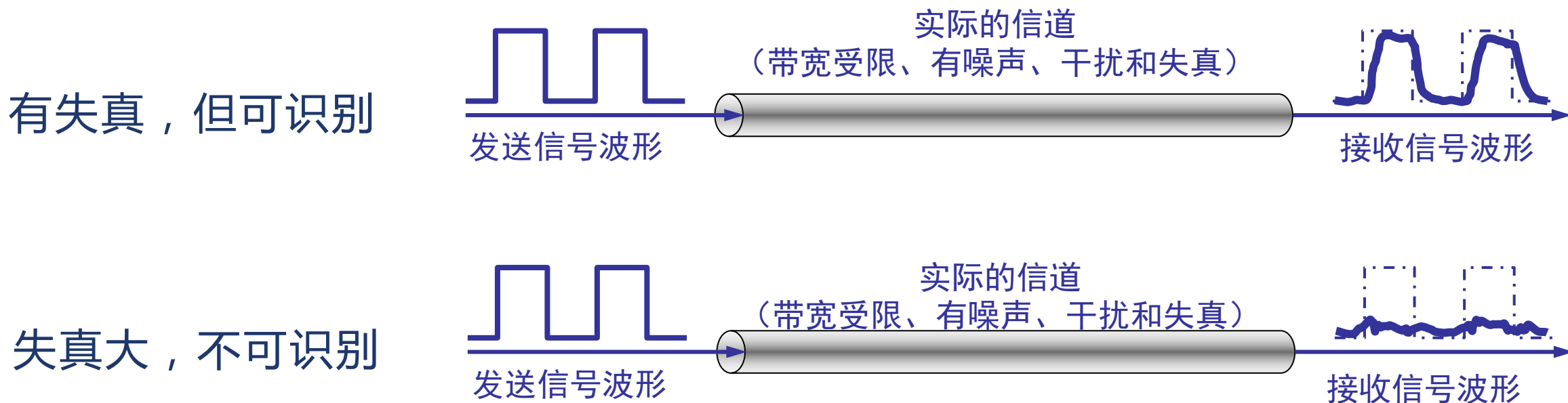
❖ 许多信号的带宽是无限的，然而信号的主要能量集中在相对窄的频带内，该频带称为有效带宽，或带宽

❖ 信号的信息承载能力与带宽直接相关，带宽越宽，信息承载能力越强



信号在信道上传输

- ❖ 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，或噪声干扰越大，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
- ❖ 数字通信的优点——对失真信号的容忍度



❖ 信号在信道上传输时的特性

- 对不同傅立叶分量的衰减不同，引起输出失真
 - 信道有截止频率 f_c ， $0 \sim f_c$ 的振幅衰减较弱， f_c 以上的振幅衰减厉害，这主要由信道的物理特性决定， $0 \sim f_c$ 是信道的有限带宽
- 通过信道的谐波次数越多，信号越逼真

❖ 波特率 (baud) 和比特率 (bit) 的关系

❖ 波特率：每秒钟信号变化的次数，也称调制速率

❖ 比特率：每秒钟传送的二进制位数

❖ 波特率与比特率的关系取决于信号值与比特位的关系

❖ 例：每个信号值可表示3位，则比特率是波特率的3倍；每个信号值可表示1位，则比特率和波特率相同

2.2 奈奎斯特定理

❖ 1924年，奈奎斯特推出无噪声有限带宽信道的最大数据传输率

$$\text{最大数据传输率} = 2B \log_2 L \text{ (bps)}$$

B:信道物理带宽

L:信号的离散级别



Harry Nyquist

❖ 奈奎斯特定理指出:

① 任意信号通过一个带宽为B的低通滤波器，则每秒采样2B次就能完整地重现该信号,以每秒高于2B次的速率对线路采样是无意义的，因为高频分量已被滤掉，无法再恢复

② 信道的数据传输率与信道物理带宽和码元宽度（二进制码元的位数）正相关

1. 已知电话信道带宽是4kHz, PCM产生8位数字序列, 其采样频率应该是多少?
2. 如果有四种信号, 分别表示00, 01, 10, 11, 那么一个信号就表示2位, 最大数据传输率是多少?

思考：奈奎斯特定理中， L 可以尽可能大吗？

$$\text{最大数据传输率} = 2B\log_2 L \text{ (bps)}$$

❖ 如何提高数据传输速率（数字带宽）？

- 给定信道，其物理带宽是定值，也即 B 为定值
- 须使 L 变大，也即设法使每个码元携带更多比特的信息量，需要采用多元调制的方法

❖ 思考：为提高数据传输率， L 可以尽可能大吗？

2.3 香农定理

❖ 香农推导出了带宽受限且有高斯白噪声干扰的信道的极限、无差错的信息传输速率

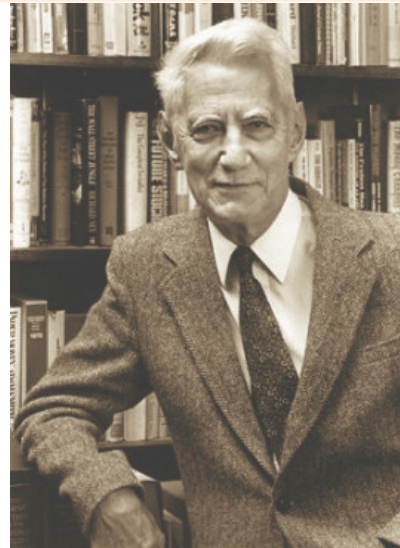
- B 为信道的带宽
- S 为信道内所传信号的平均功率
- N 为信道内部的高斯噪声功率

$$\text{极限传输速率 } C = B \log_2(1 + S/N) \text{ (bps)}$$

❖ 信噪比 = $10\log_{10}S/N$ ，单位：分贝

- 衡量随机噪声的大小
- 电话系统典型信噪比为30dB， $S/N=?$

❖ C 与信号电平级数、采样速度无关



克劳德·艾尔伍德·香农 (Claude Elwood Shannon, 1916年4月30日—2001年2月24日) 是美国数学家、信息论的创始人。1936年获得密歇根大学学士学位，1940年在麻省理工学院获得硕士和博士学位，1941年进入贝尔实验室工作。香农提出了信息熵的概念，为信息论和数字通信奠定了基础

2.3 香农定理



信道的极限传输速率 $C = B \log_2(1 + S/M)$ (bps)

❖ 香农定理表明：

- ① C与信号电平级数、采样速度无关
- ② 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
- ③ 只要信息传输速率低于信道的极限信息传输速率，就一定可以找到某种办法来实现无差错的传输
- ④ 若信道带宽或信噪比没有上限（当然实际信道不可能有这样的），则信道的极限信息传输速率也就没有上限，实际信道上能够达到的信息传输速率要比香农的极限传输速率低不少

总结：信道上的最大数据传输速率是多少？

奈奎斯特定理

$$\text{最大数据传输率} = 2B \log_2 L \text{ (bps)}$$

香农定理

$$\text{信道的极限传输速率 } C = B \log_2(1 + S/N) \text{ (bps)}$$

奈氏准则激励大家去探索先进的**编码技术**，使每一个码元表示任意多个比特；香农定理告诫大家，在有噪音的信道上，不论多么复杂的编码技术，都**无法**突破公式的传输极限。

目录

一

物理层的基本概念

二

数据通信基础

三

数据通信技术

3.1 数据通信系统模型

3.2 常见传输方式

3.3 数据编码技术

3.4 信道复用技术

四

传输介质

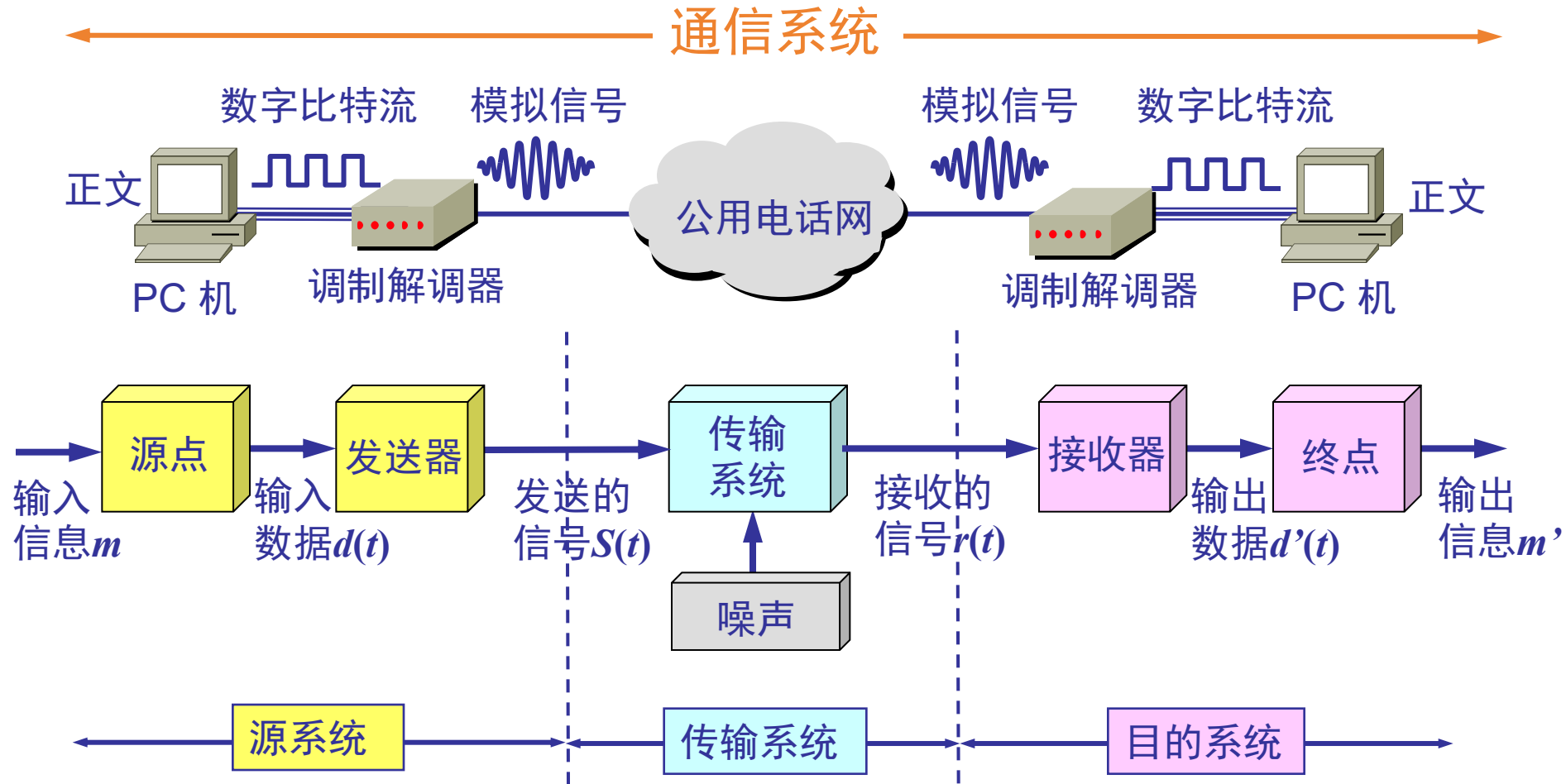
五

带宽接入

六

物理层设备

2.1 数据通信系统模型



数据通信离不开计算机，因此常把数据通信与计算机通信这两名词混用。

数据通信系统模型

2.2 传输方式 – 模拟通信和数字通信

❖在网络通信中，信息是以**电磁信号**的形式传输的

- **模拟信号**：信号强度随时间平滑变化，信号中没有突变或不连续的地方
- **数字信号**：信号强度在一段时间内保持一个恒定值，然后又变成另外一个恒定值
- 模拟信号和数字信号在传输过程中可以相互变换

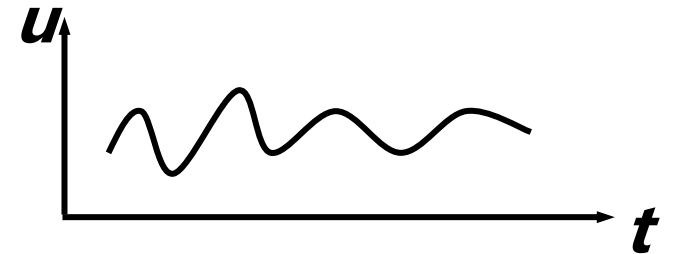
按照**传送消息的信号类型**，通信方式可分为：

❖**模拟通信**：以模拟信号来传送消息的通信方式

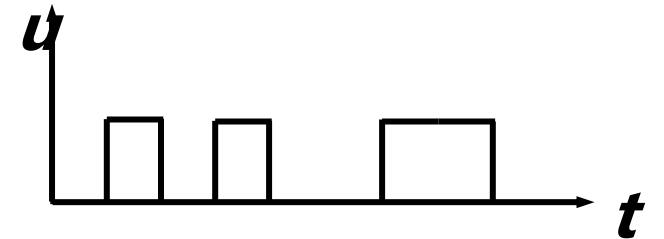
- 传输模拟信号的通信系统称为模拟通信系统

❖**数字通信**：以数字信号来传送消息的通信方式

- 传输数字信号的通信方式称为数字通信系统



模拟信号



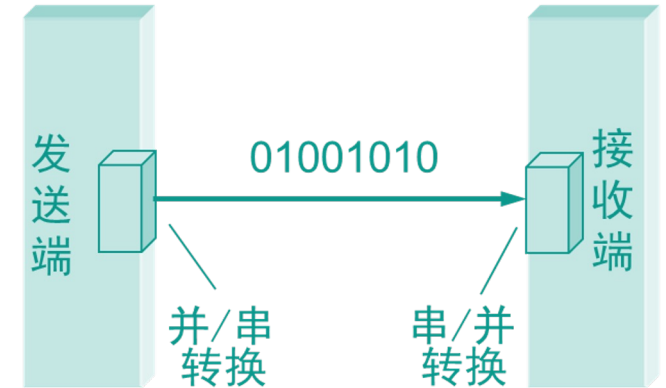
数字信号

2.2 传输方式 – 串行传输和并行传输

按照传输数据的时空顺序，传输方式可分为两类：

❖ 串行传输：数据在一个信道上按位依次传输

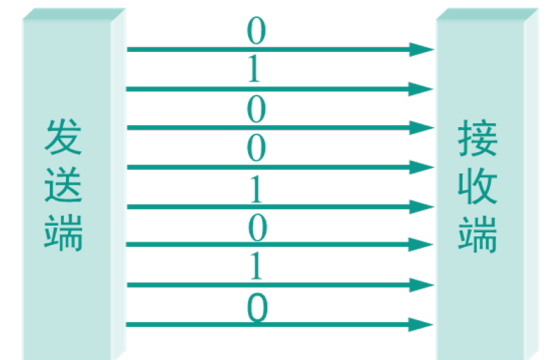
- 所需线路数少，投资省，线路利用率高
- 在发送和接收端需要分别进行并/串和串/并转换
- 收发之间必须实施同步，适用于远距离数据传输
- 例如：USB



串行传输

❖ 并行传输：数据在多个信道上同时传输

- 在终端装置和线路之间不需要对传输代码作时序变换
- 需要 n 条信道的传输设施，故其成本较高，适用于要求传输速率高的短距离数据传输
- 例如：计算机内部总线



并行传输

2.2 传输方式 – 同步传输和异步传输

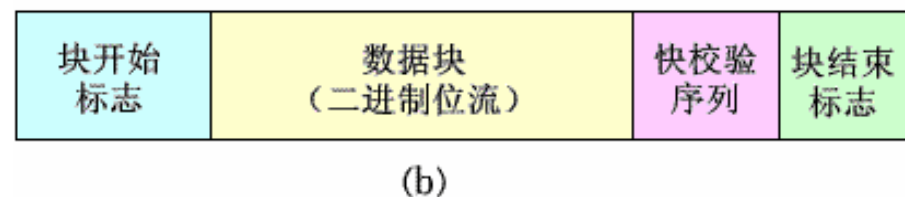
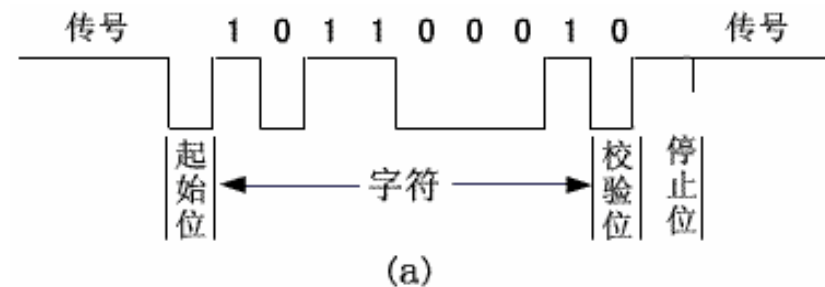
按照发/收两端实现同步的方法，传输方式可分为：

❖ **异步传输**：被传送的每一个字符一般都附加有**1个起始位**和**1个停止位**，接收方利用一个频率为传输比特率的 n (16)倍的时钟，在每一个比特周期的中心采样

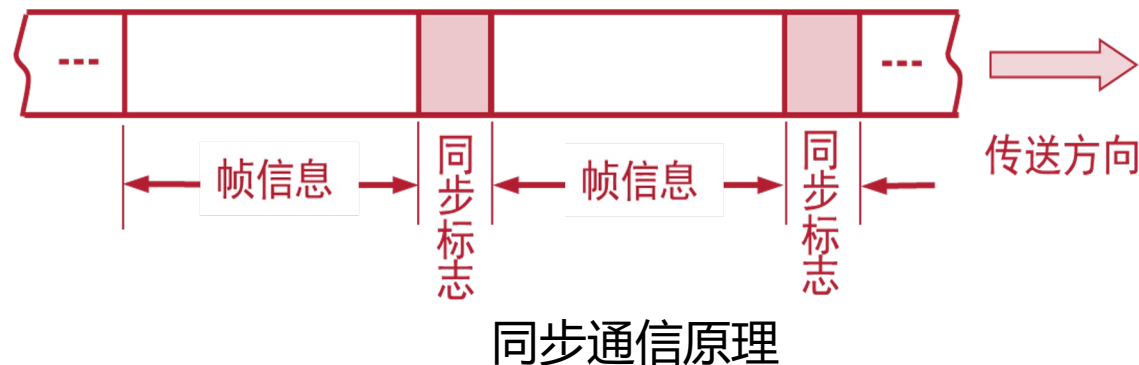
- 无需时钟同步，开销大，系统相对简单
- 多面向字符传输

❖ **同步传输**：收发双方使用**严格一致的时钟**来控制比特传输的开始和结束

- 需时钟同步，效率高，系统复杂性高
- 多面向数据块（帧）传输



异步通信原理



2.2 传输方式 – 单工、半双工、全双工通信

按照数据信号在信道上的传送方向与时间的关系，传输方式可分为：

❖ **单工**：只能有一个方向的通信而没有反方向的交互

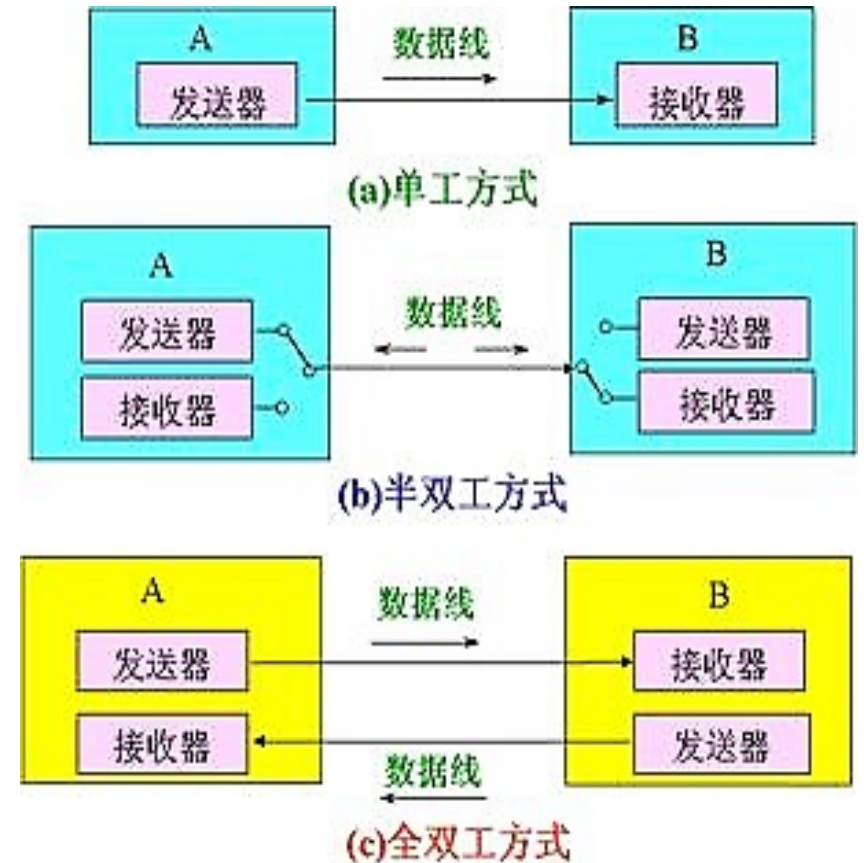
- 无线电广播、电视、信息采集系统、寻呼系统

❖ **半双工**：通信双方都可以发送信息，但不能同时发送，又称“双向交替”模式

- 对讲机、经典以太网

❖ **全双工**：通信双方可同时发送和接收信息

- 电话、万兆以太网



2.2 传输方式 – 基带传输和频带传输

按照传输系统在传输数据信号过程中是否搬其频谱，传输方式可分：

❖ **基带传输**：未对载波调制的待传信号称为基带信号，它所占的频带称为**基带**，基带传输，指一种不搬移基带信号频谱的传输方式

- 是一种最简单最基本的传输方式，一般用低电平表示“0”，高电平表示“1”
- 适用范围：低速和高速的各种情况
- 限制：因基带信号所带的频率成分很宽，所以对传输线有一定的要求

❖ **频带传输（通带传输）**：指利用调制解调器搬移信号频谱的传输体制

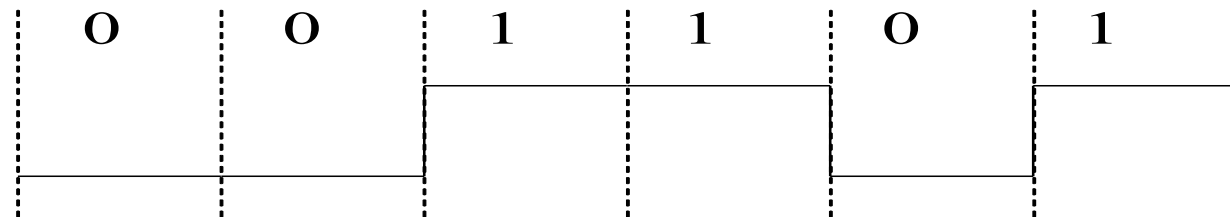
- 搬移频谱的目的是为了适应信道的频率特性

2.3 信号传输技术 – 基带传输

- ❖ 基带传输通过**线路编码**实现，频带传输调制信号后传输
- ❖ 线路编码：研究数据在信号传输过程中如何进行编码(变换)

1. 不归零制码 (NRZ : Non-Return to Zero)

- 原理：用两种电平分别表示 “0” 和 “1” ，低电平表示 “0” ，高电平表示 “1”
- 缺点：
 - 难以分辨一位的结束和另一位开始
 - 发送方和接收方必须有时钟同步
 - 若信号中 “0” 或 “1” 连续出现，信号直流分量将累加
- 结论：**容易产生传播错误**



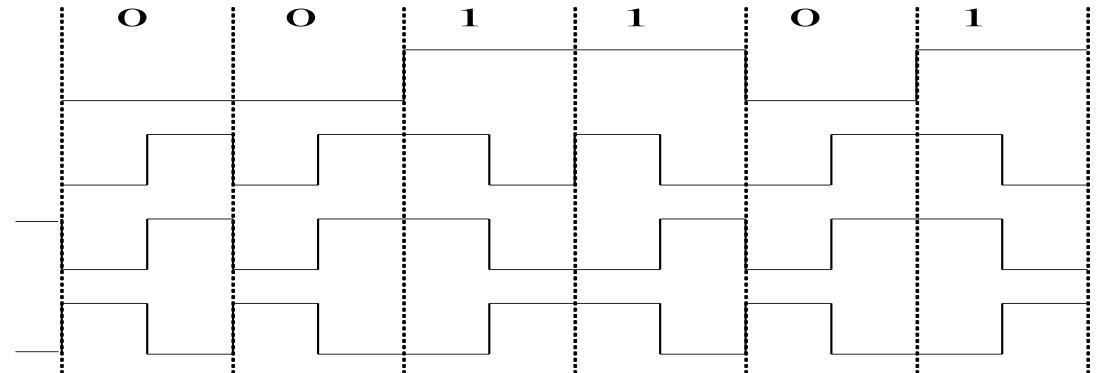
2.3 信号传输技术 – 基带传输

2. 曼彻斯特码 (Manchester) , 也称相位编码

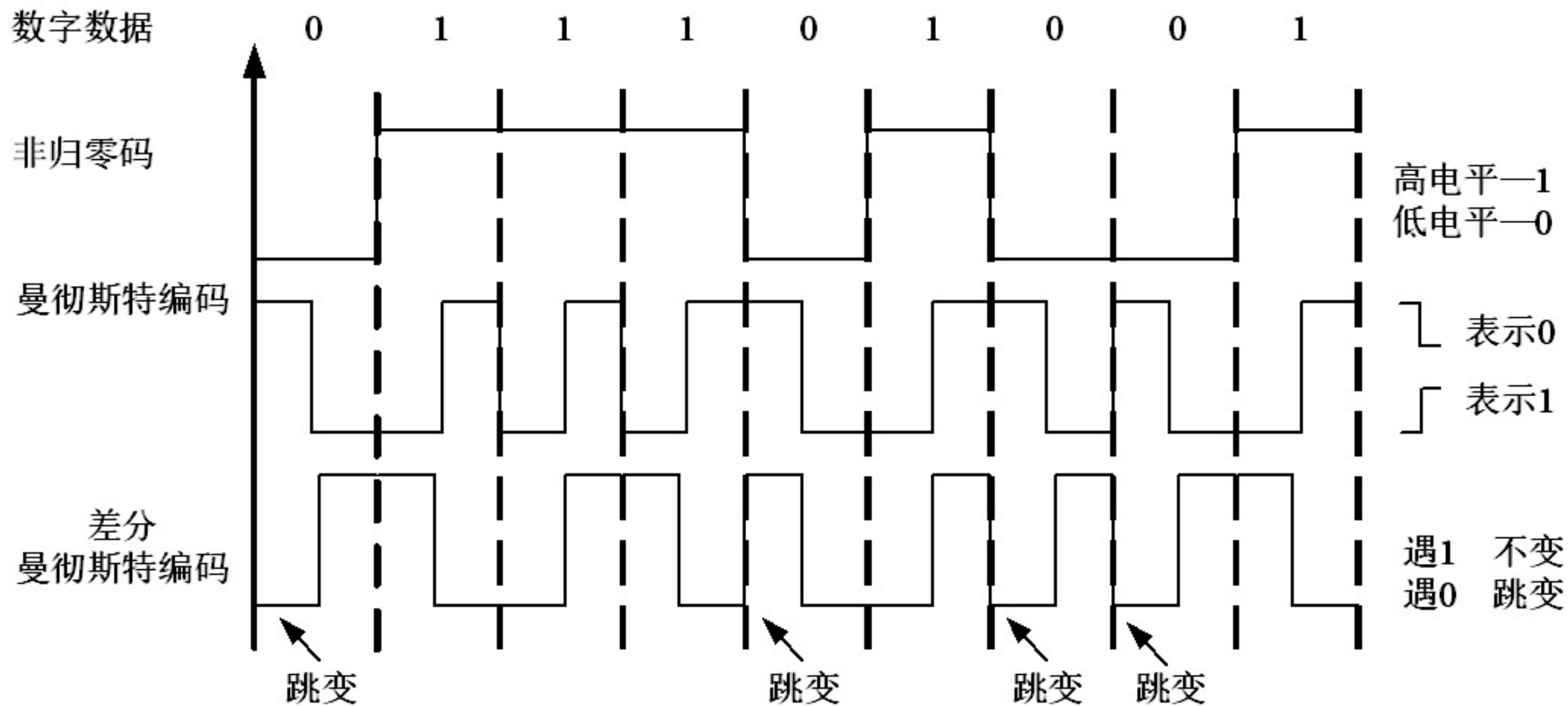
- 原理：每一位中间都有一个跳变，从低跳到高表示“0”，从高跳到低表示“1”
- 优点：克服了NRZ码的不足，每位中间的跳变既可作为数据，又可作为时钟，能够**自同步**

3. 差分曼彻斯特码 (Differential Manchester)

- 原理：每一位中间都有一个跳变，每位开始时有跳变表示“0”，无跳变表示“1”。位中间跳变表示时钟，位前跳变表示数据
- 优点：时钟、数据分离，便于提取



2.3 信号传输技术 – 基带传输



❖ 数字数据的模拟传输，也称频带传输

- 指在一定频率范围内的线路上，进行载波传输，用基带信号对载波进行调制，使其变为适合于线路传送的信号
- 调制（Modulation）：用基带脉冲对载波信号的某些参量进行控制，使这些参量随基带脉冲变化
- 解调（Demodulation）：调制的反变换
- 调制解调器MODEM（modulation-demodulation）

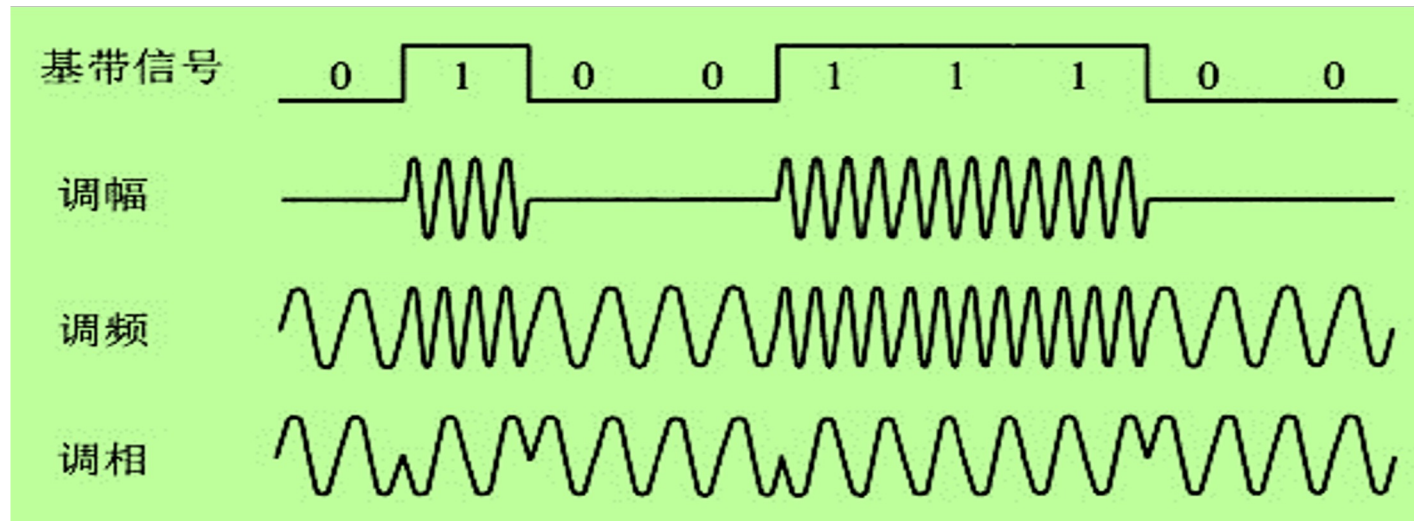


载波示意图

2.4 信号传输技术 – 频带传输

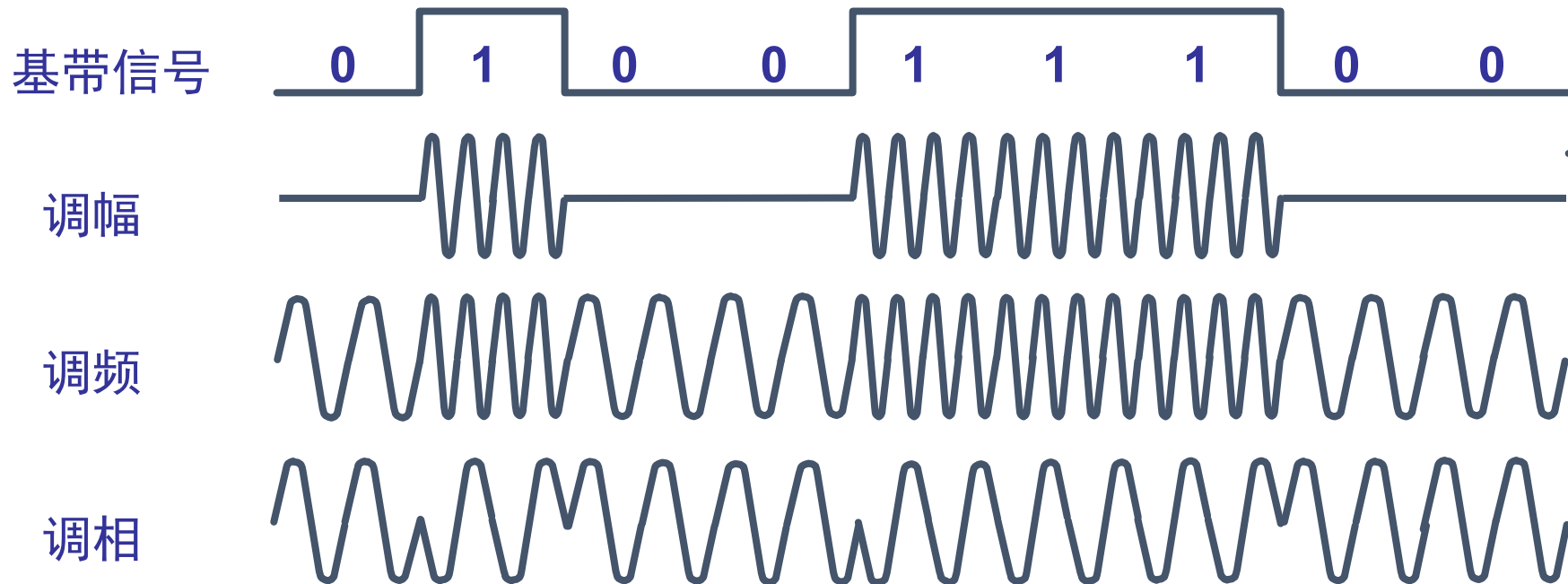
❖ 三种调制技术：载波 $A\sin(\omega t + \varphi)$ 的三个特性幅度、频率、相位

- 幅移键控法（**调幅**） Amplitude-shift keying (ASK)
 - 幅移就是把频率、相位作为常量，而把振幅作为变量
- 频移键控法（**调频**） Frequency-shift keying (FSK)
 - 频移就是把振幅、相位作为常量，而把频率作为变量
- 相移键控法（**调相**） Phase-shift keying (PSK)
 - 相移就是把振幅、频率作为常量，而把相位作为变量



2.4 信号传输技术 – 频带传输

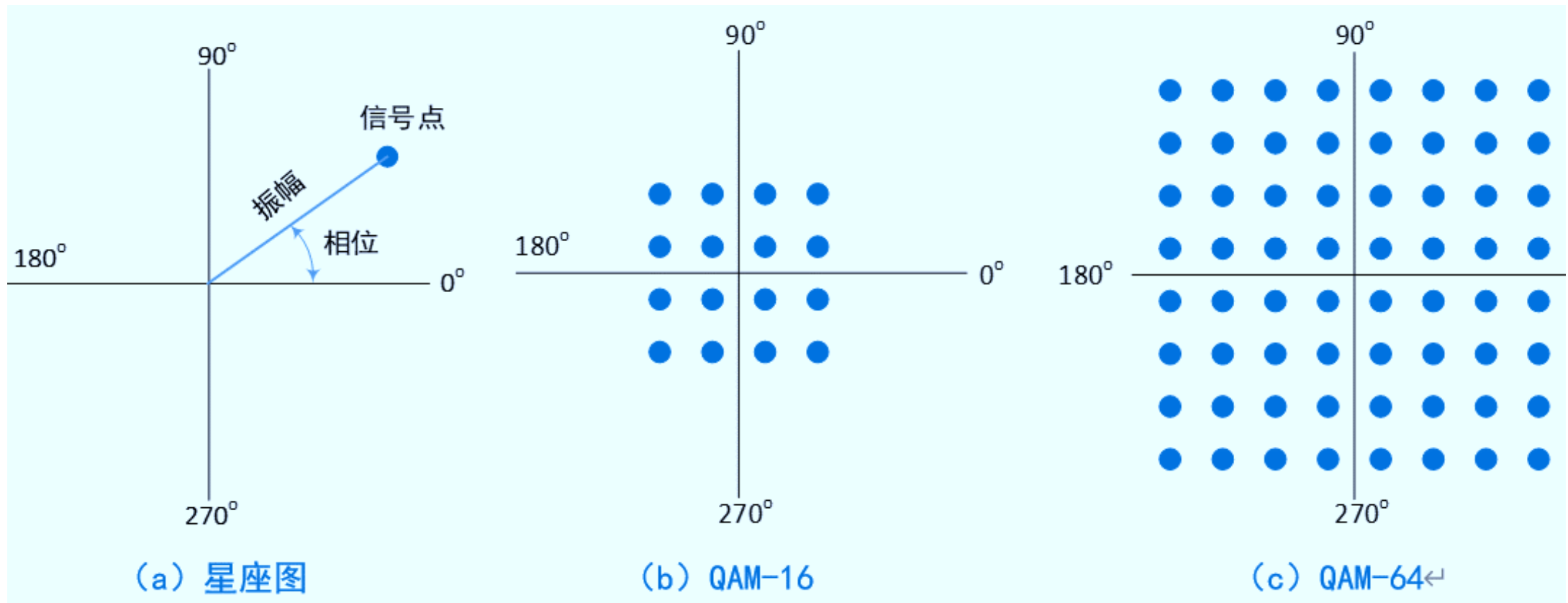
- ❖ 三种调制技术：载波 $A\sin(\omega t + \varphi)$ 的三个特性幅度、频率、相位
- 幅移键控法（**调幅**，ASK）：把频率、相位作为常量，而把振幅作为变量
 - 频移键控法（**调频**，FSK）：把振幅、相位作为常量，而把频率作为变量
 - 相移键控法（**调相**，PSK）：把振幅、频率作为常量，而把相位作为变量



2.4 信号传输技术 – 频带传输

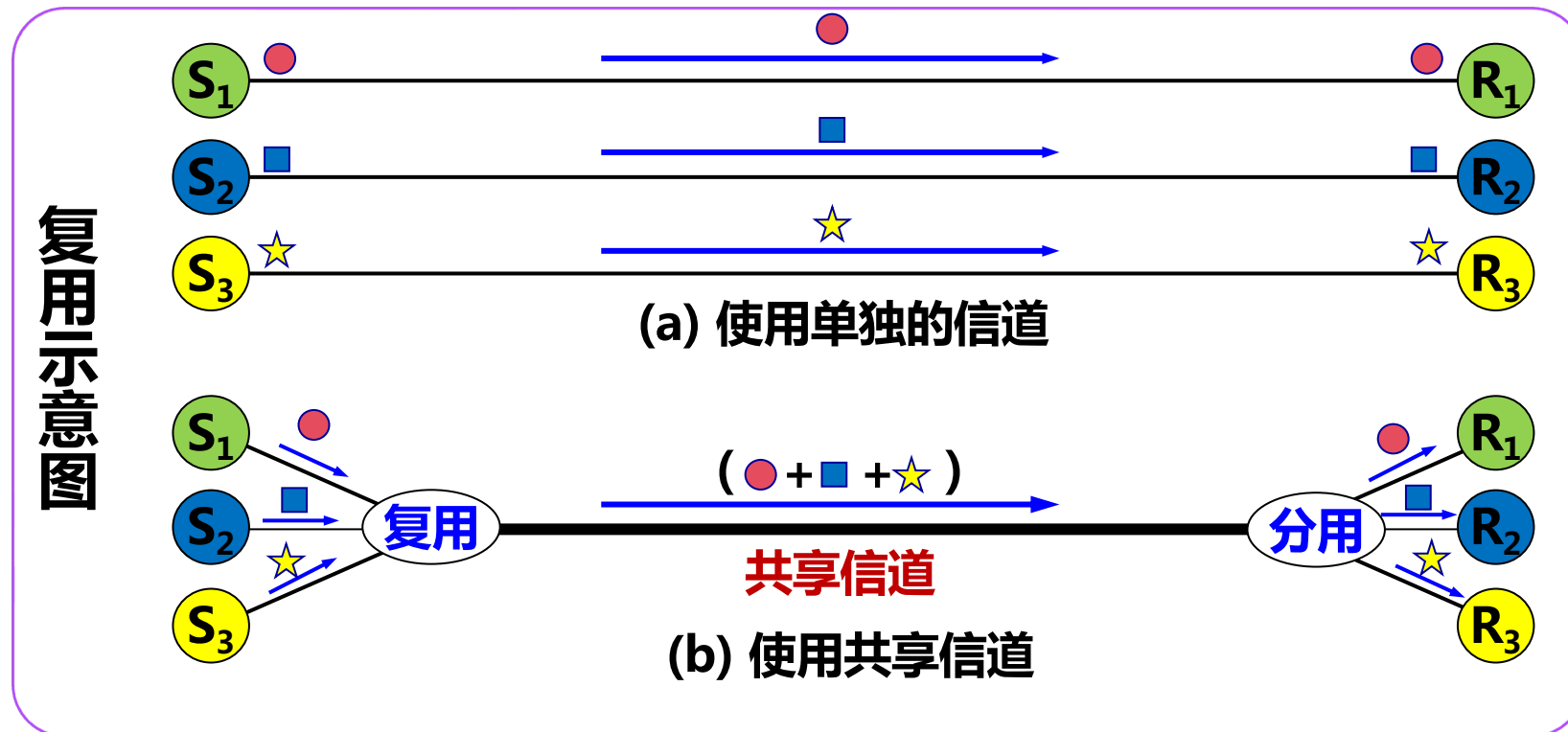
❖ 正交振幅调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM)

- 信号的振幅和相位的综合调制
- Wi-Fi、4G、5G移动通信、卫星通信、有线电视等



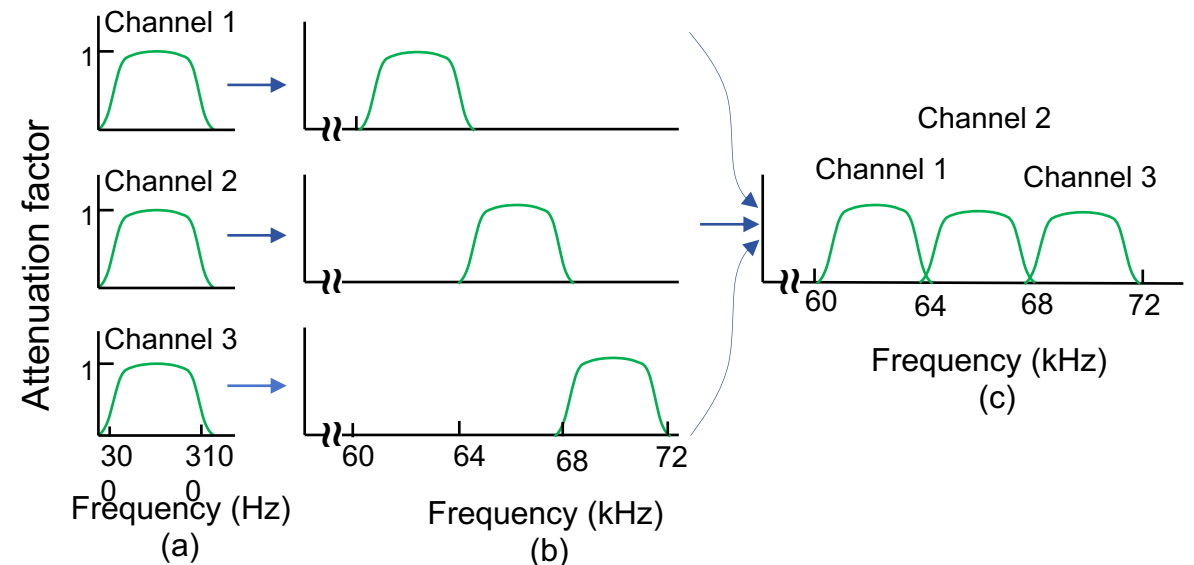
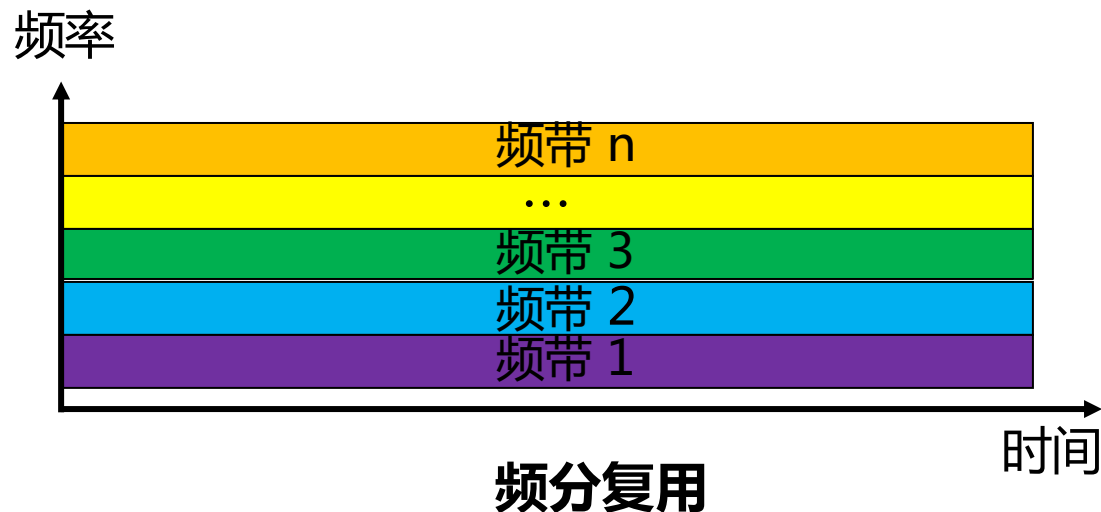
2.5 信道复用技术

- ❖ 信道资源是有限的，实际网络中，多对用户往往需要利用相同的信道资源传输信息
- ❖ 不同的信号同时在同一信道中传输会产生严重的相互干扰，导致传输失败
- ❖ **复用** (multiplexing) 技术的目的是：允许用户使用一个共享信道进行通信，避免相互干扰，降低成本，提高利用率



频分复用

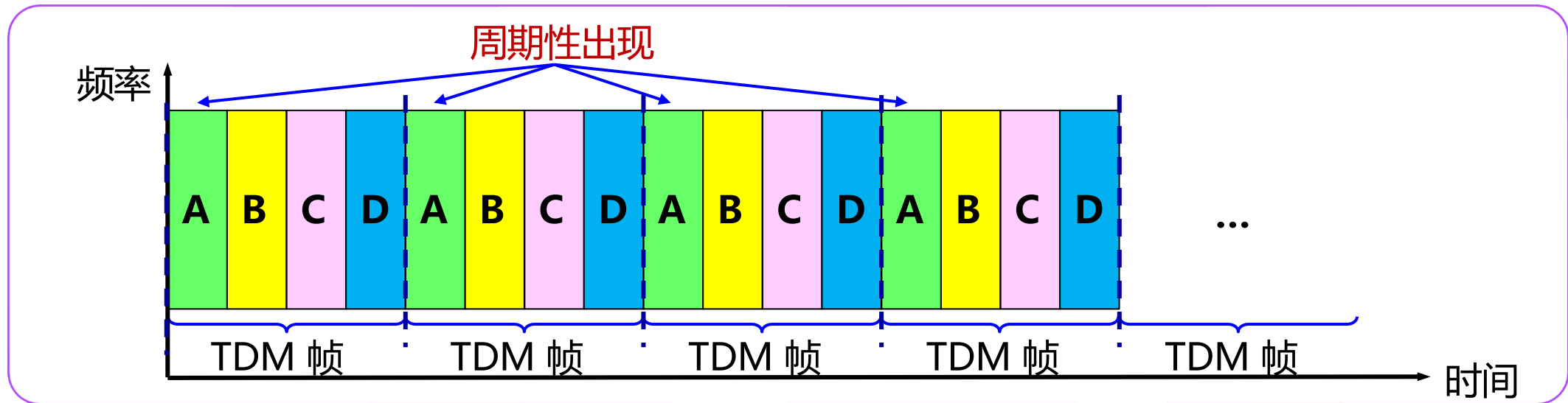
- ❖ **频分复用** (Frequency-division multiplexing, FDM) ，是一种将多路基带信号调制到不同频率载波上，再进行叠加形成一个复合信号的多路复用技术
- ❖ 频分复用将整个带宽分为多份，用户在分配到一定的频带后，在通信过程中自始至终都占用这个频带
- ❖ 频分复用的所有用户在同样的时间**占用不同的带宽资源**（ 请注意，这里的 “带宽” 是**频率带宽**而不是数据的**发送速率** ）



(a) 原始频带 (b) 叠加到不同频率上的频带 (c) 复用信道

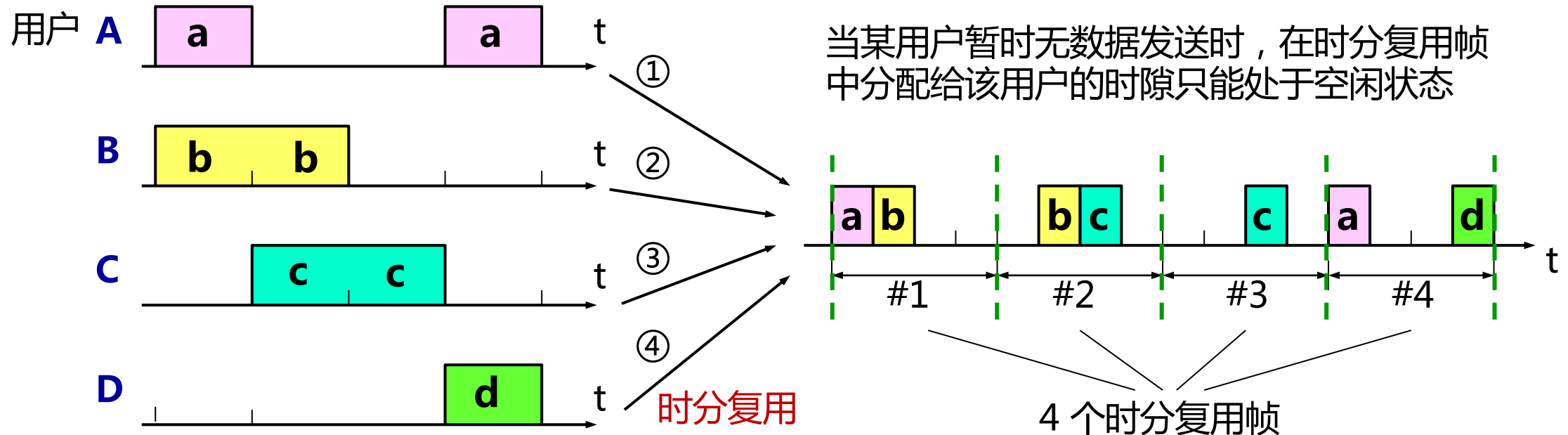
时分复用

- ❖ **时分复用** (Time Division Multiplexing, TDM) 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) 的
- ❖ TDM 信号也称为**等时** (isochronous) 信号
- ❖ 时分复用的所有用户**在不同的时间占用同样的频带宽度**



时分复用

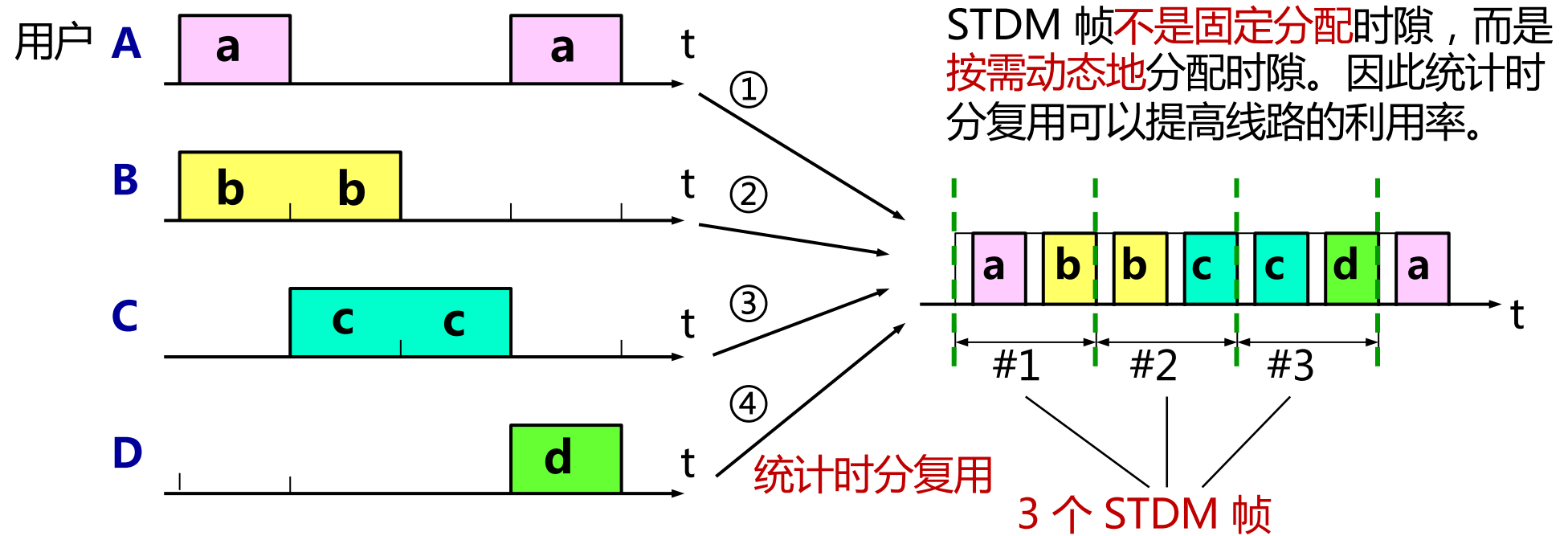
- **存在的不足**：使用时分复用系统传送计算机数据时，由于计算机数据的突发性质，用户对分配到的子信道的利用率一般是不高的



时分复用可能会造成线路资源的浪费

统计时分复用

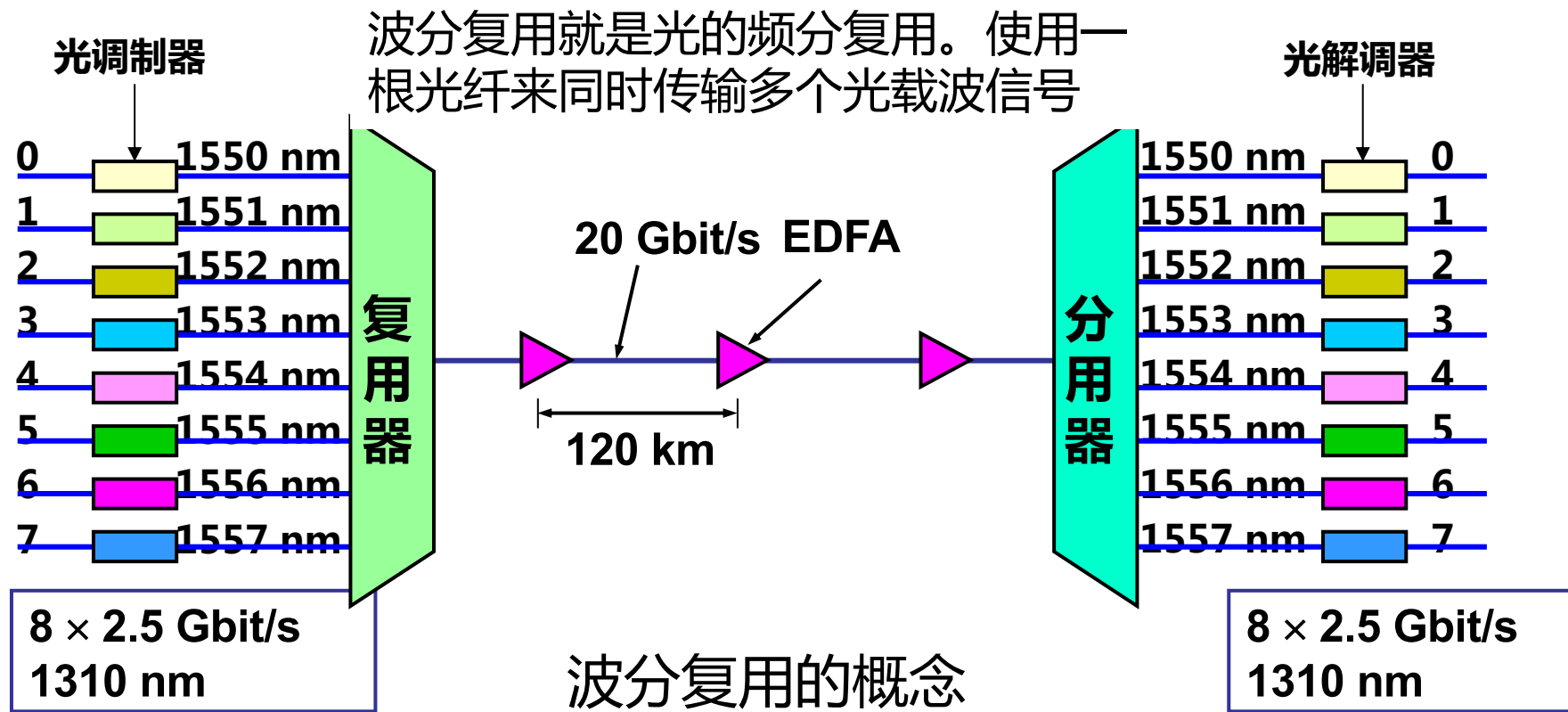
❖ **统计时分复用** (statistical time division multiplexing , STDM) 是指动态地**按需分配共用信道**的时隙，只将需要传送数据的终端接入共用信道，以提高信道利用率的多路复用技术



统计时分复用的工作原理

波分复用

❖ **波分复用** (Wavelength Division Multiplexing , WDM) 是利用多个激光器在单条光纤上同时发送多束不同波长激光的技术，也即光的频分复用



- ❖ **码分多址** (Code Division Multiple Access , CDMA)是指利用码序列相关性实现的多址通信，基本思想是靠不同的**地址码**来区分的地址
- ❖ 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
- ❖ 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**
 1. 如发送比特 1，则发送自己的 m bit 码片序列
 2. 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 00011011
 1. 发送比特 1 时，就发送序列 00011011
 2. 发送比特 0 时，就发送序列 11100100

- ❖ 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)
- ❖ 在实用的系统中是使用伪随机码序列
- ❖ 令向量 S 表示站 S 的码片向量，令 T 表示其他任何站的码片向量
- ❖ 两个不同站的码片序列正交，就是向量 S 和 T 的规格化内积等于 0

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

例如：

$S: (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)$

$T: (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)$

- ❖ 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

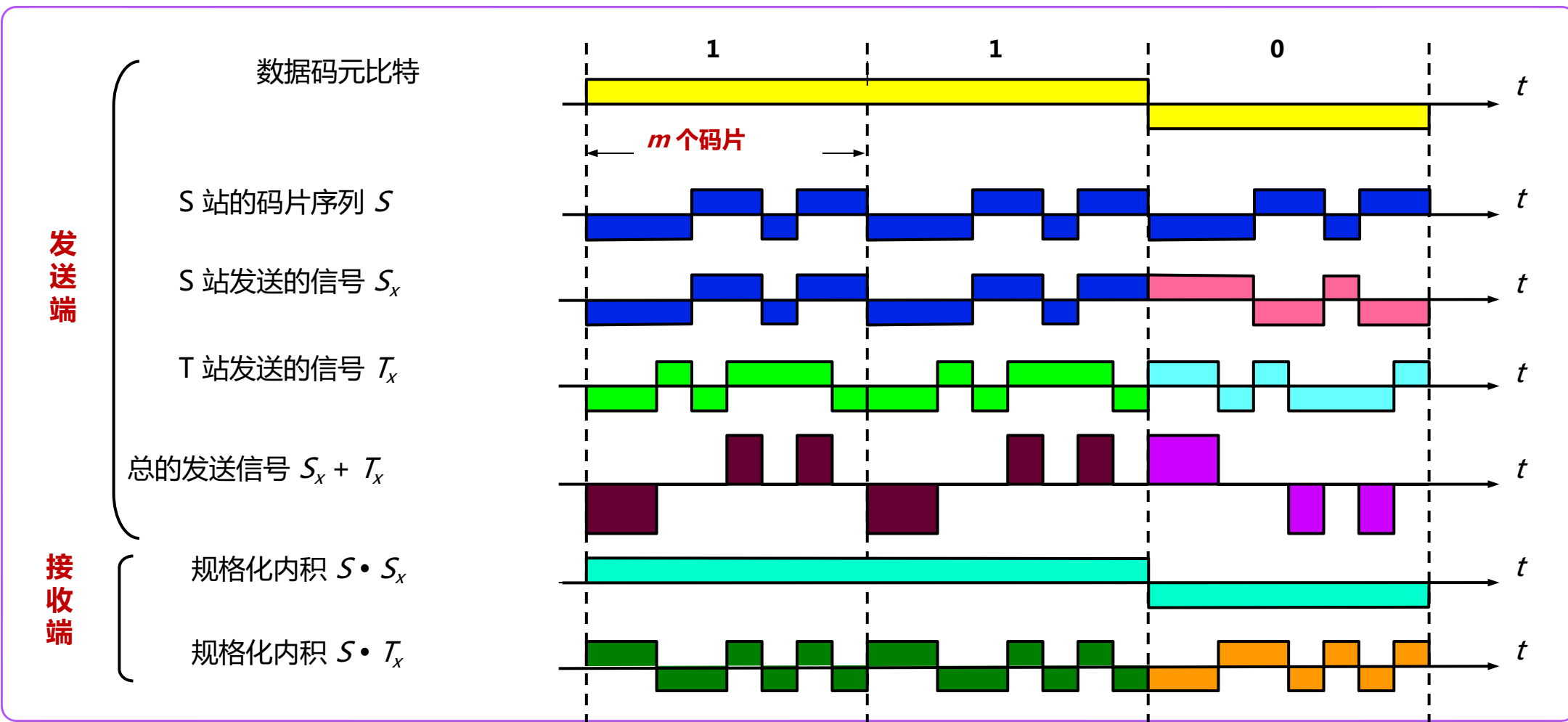
$$S \bullet S = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i S_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\pm 1)^2 = 1$$

- ❖ 一个码片向量和该码片反码的向量的规格化内积值是 -1

举例：码分复用

- 共有四个站进行码分多址CDMA通信。四个站的码片分别为
 - 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)
- 问题
 - 现收到这样的码片序列：M = (-1 +1 -3 +1 -1 -3 +1 +1)
 - 问哪个站发送数据了？
 - 发送数据的站发送的1还是0？
 - $A * M = 1/8 * (1 - 1 + 3 + 1 - 1 + 3 + 1 + 1) = 1$ 因此A发送了1
 - 同理， $B * M = -1$ ， $C * M = 0$ ， $D * M = 1$
 - 即A、D发送了1，B发送了0，C未发数据

CDMA编码和解码过程示例



一

物理层的基本概念

二

数据通信基础

三

数据通信技术

四

传输介质

五

带宽接入

六

物理层设备

4.1 传输介质分类

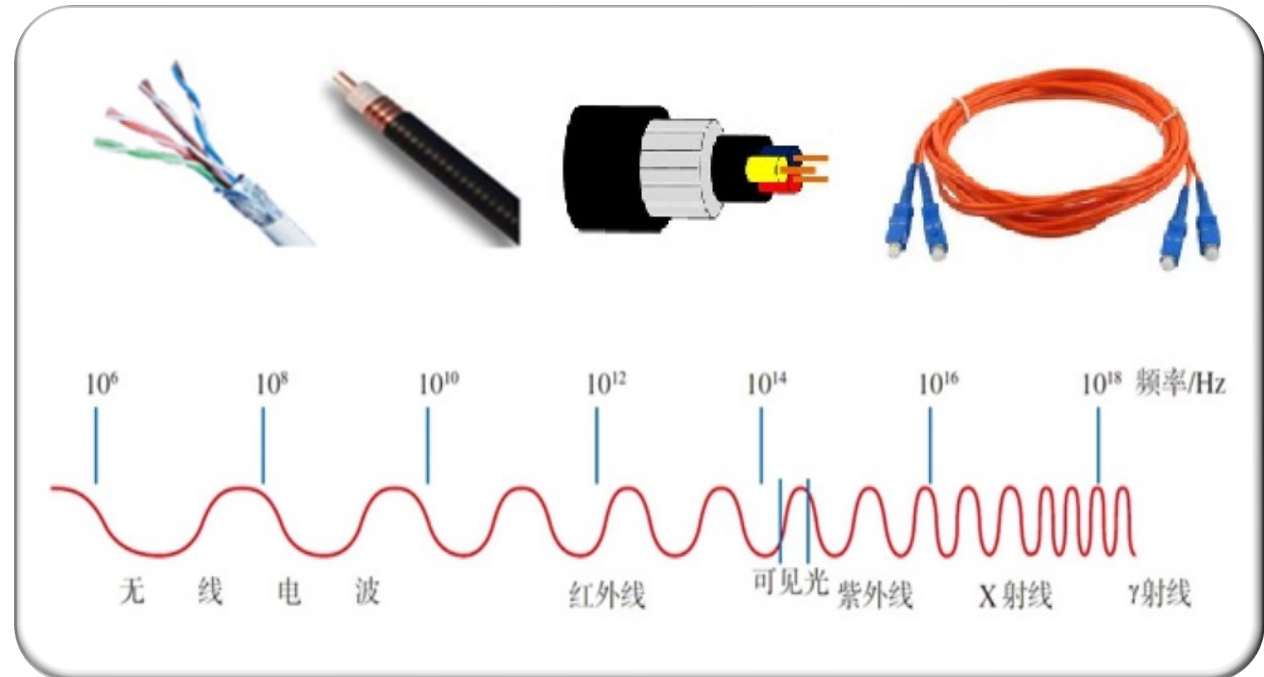
4.2 有导向传输介质

4.3 无导向传输介质

4.1 传输介质分类

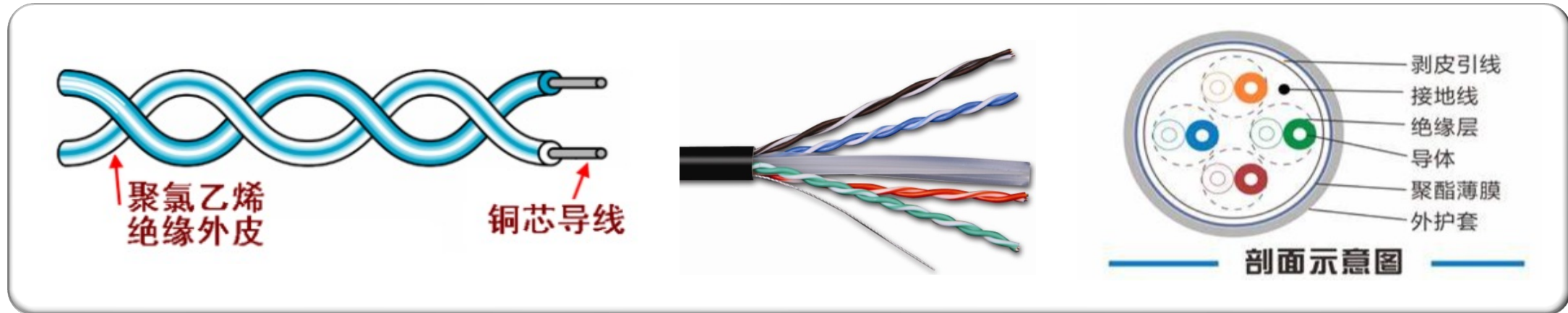
传输介质是指发送器与接收器之间的物理通路可分两大类：

- **有导向介质**：指电磁波被导向沿着某一媒体传播，包括
 - 双绞线、同轴电缆、电力线和光纤等
- **无导向介质**：指电磁波在大气层、外层空间或海洋中进行的无线传播，包括
 - 短波传输、地面微波
 - 卫星微波、光波传输等



4.2 有导向介质 – 双绞线

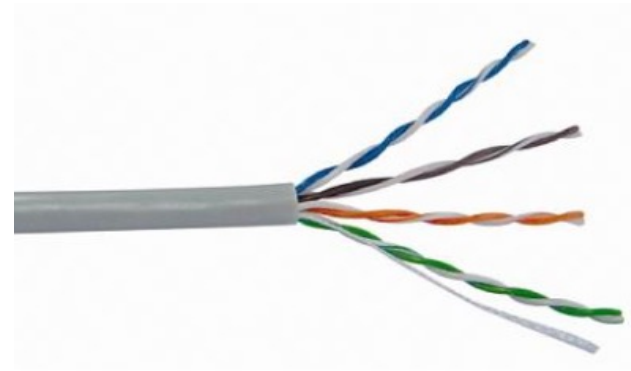
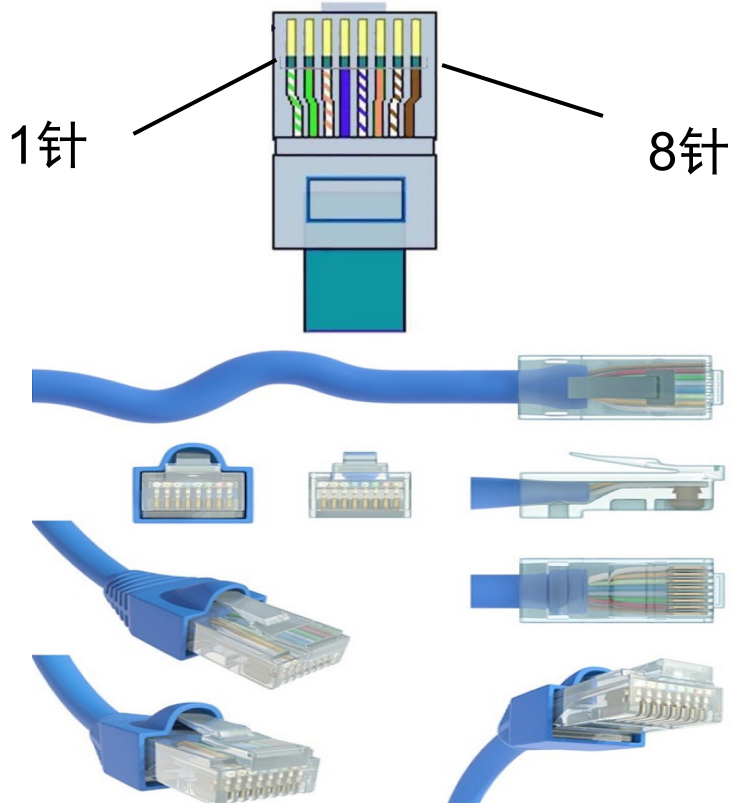
- ❖ 具有绝缘保护层的两根铜导线按一定密度绞缠在一起形成的线对
 - 通常多根双绞线再绞合成电缆状
- ❖ 影响双绞线的特性阻抗、衰减和近端串扰的因素
 - 绞合密度、扭绞方向和绝缘材料等
- ❖ 适用于模拟传输或数据传输，通信距离一般为几到几十公里



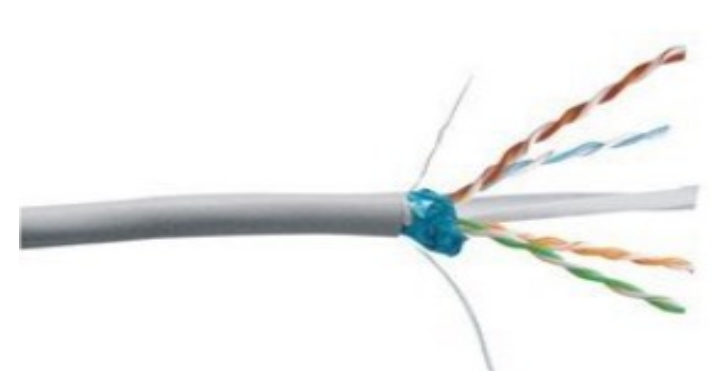
4.2 有导向介质 – 双绞线

双绞线的种类：

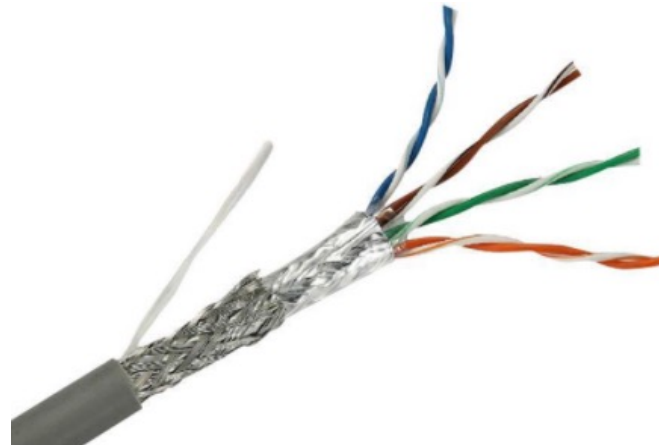
RJ45（网线水晶头）



UTP无屏蔽双绞线



FTP屏蔽双绞线



SFTP屏蔽金属箔双绞线



STP屏蔽双绞线

4.2 有导向介质 – 双绞线

常用的绞合线的典型应用

类别	带宽 (MHz)	典型应用
3	16	低速网络, 如模拟电话网
4	20	短距离的以太网, 如10BASE-T
5	100	10BASE-T以太网 某些100BASE-T快速以太网
5E(超5类)	100	100BASE-T快速以太网 某些1000BASE-T吉比特以太网
6	250	1000BASE-T吉比特以太网, ATM网
7	600	可用于10吉比特以太网(只使用STP)

- ❖ 上面类别是按照频率和信噪比进行分类
- ❖ 常用3类线和5类线区别在于单位长度的绞合次数不同



4.2 有导向介质 – 双绞线

❖ 双绞线通常制作为网线

❖ 有两种线序排列方式如右图

❖ 标准是美国电子工业协会（EIA）和电信行业协会（TIA）指定



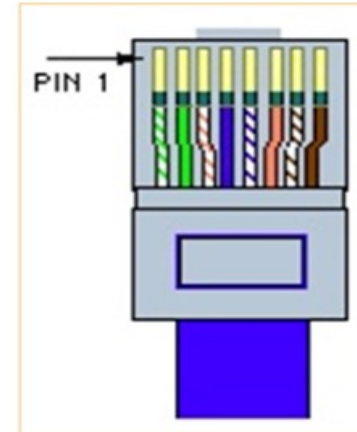
1、剪线



2、插入接头



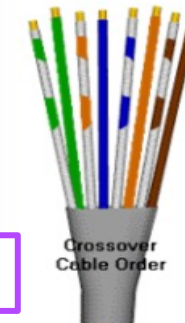
3、压线钳压紧



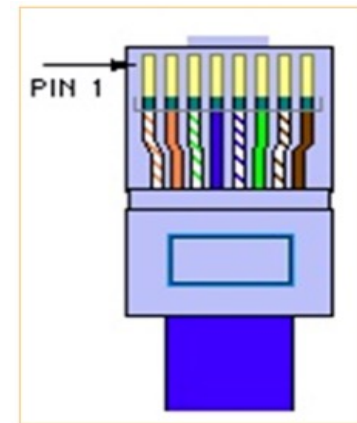
EIA/TIA568A

1 2 3 4 5 6 7 8
白绿, 绿, 白橙, 蓝, 白蓝, 橙, 白棕, 棕

水晶头塑料弹片突起的一面朝下,
棕线在最右边



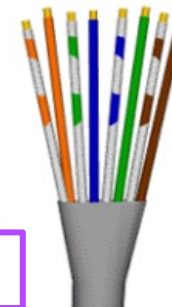
Crossover
Cable Order



EIA/TIA568B

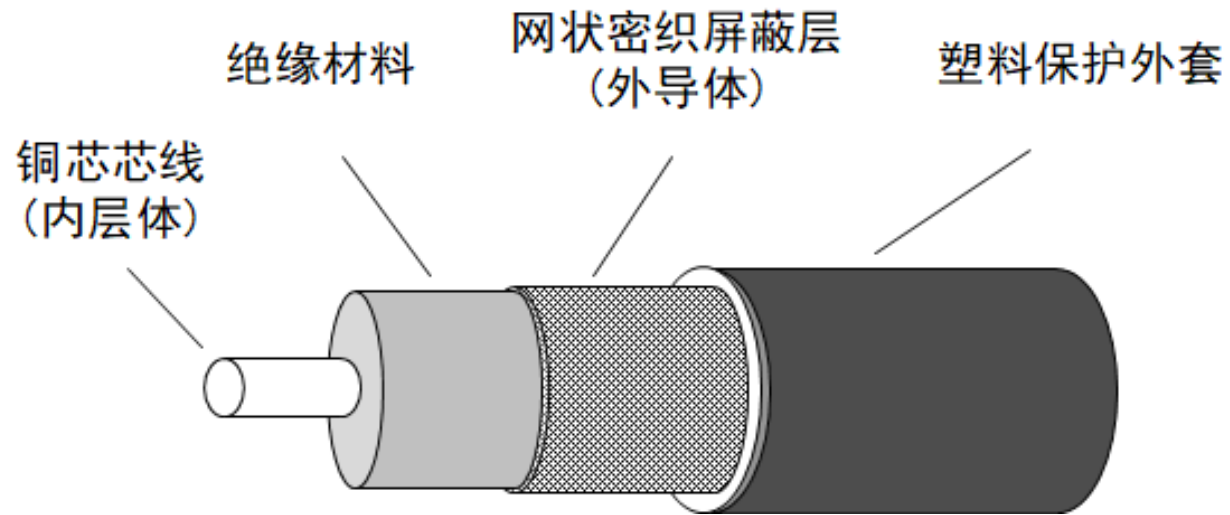
1 2 3 4 5 6 7 8
白橙, 橙, 白绿, 蓝, 白蓝, 绿, 白棕, 棕

水晶头塑料弹片突起的一面朝下,
棕线在最右边



4.2 有导向介质 – 同轴电缆

❖ **同轴电缆**由硬的铜质芯线和外包一层绝缘材料，在绝缘材料外面是一层网状密织的外导体，以及塑料保护外套组成



❖ 同轴电缆具有寿命长、容量大、传输稳定、外界干扰小、维护方便等优点

4.2 有导向介质 – 同轴电缆

- ❖按内、外导体尺寸不同，分为中、小和微三种规格
- ❖按特性阻抗的不同，分为基带同轴电缆（ 50Ω ）和宽带同轴电缆（ 75Ω ）
 - 基带同轴用来传送基带信号，其距离可达1km，传输速率为10Mb/s
 - 宽带同轴是**有线电视**的标准传输电缆，传送频分复用的宽带信号，信号频率可高达300-400MHz，距离可达100km
- ❖局域网发展初期广泛地使用同轴电缆（ 50Ω ）
- ❖现在同轴电缆（ 75Ω ）主要用在有线电视网

以太网标准	电缆类别	最长有效传输距离
10BASE5	粗同轴电缆	500米
10BASE2	细同轴电缆	185米

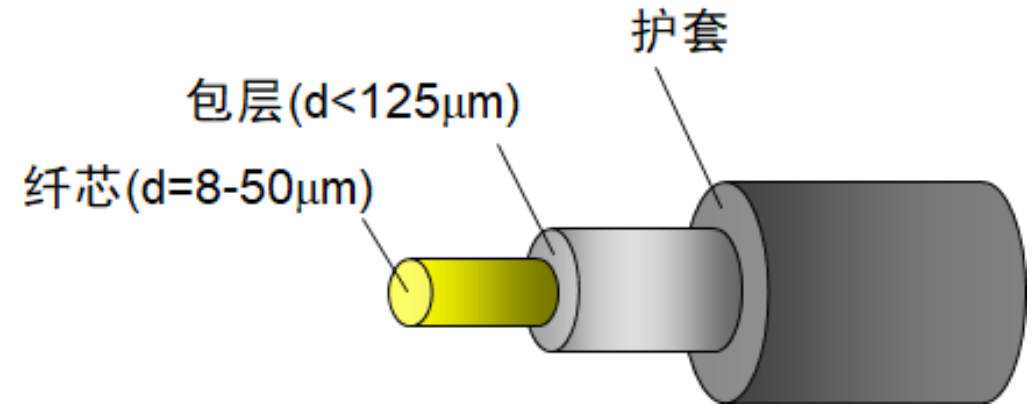


4.2 有导向介质 – 光纤

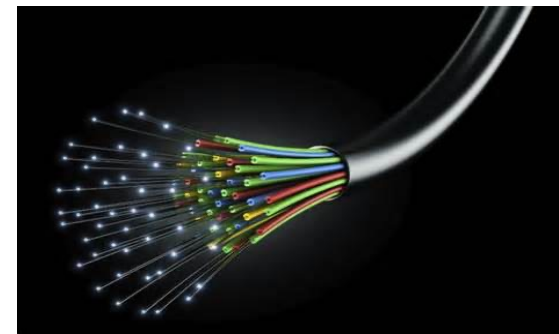
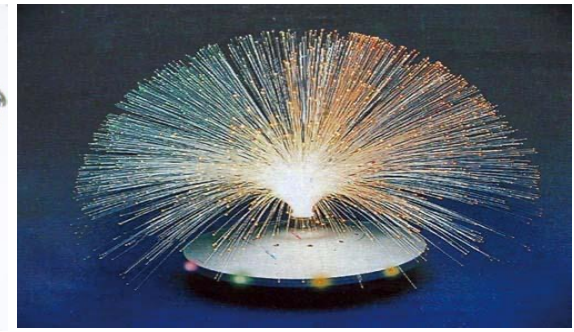
❖ 光纤通信已成为现代通信技术中的一个十分重要的领域

❖ 光纤是一种新型的光波导，

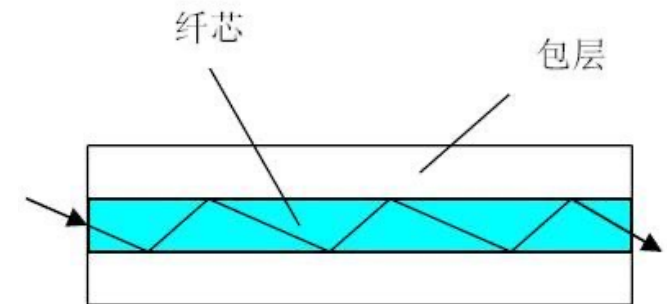
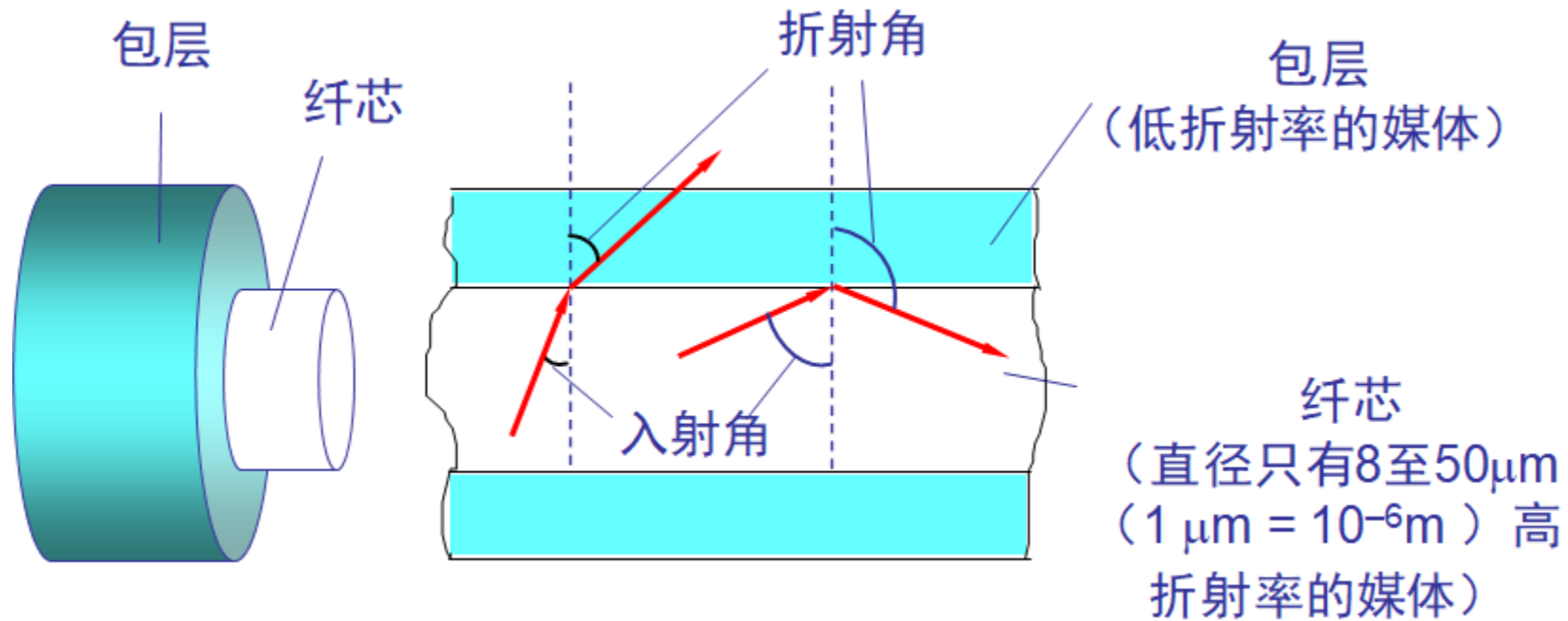
- 结构一般是双层或多层同心圆柱体
- 由纤芯、包层和护套组成



光交换机
——（家用光猫）



4.2 有导向介质 – 光纤



- ❖ 由于纤芯折射率大于包层的折射率，使得折射角大于入射角
- ❖ 当入射角足够大时，就会引起全反射，光线重新折回纤芯，从而不断向前传播

4.2 有导向介质 – 光纤

- ❖ **多模突变光纤**（又称阶跃光纤）：指光纤的纤芯和包层的折射率沿光纤的径向分布是均匀的，而在两者的交界面上发生突变
 - 多模突变光纤的带宽较窄，适用于**小容量短距离**通信
- ❖ **多模渐变光纤**：指纤芯的折射率是半径 r 的函数 $n(r)$ ，沿着径向随 r 的增加逐渐减小，直到达到包层的折射率值为止，而包层内的折射率又是均匀的
 - 多模渐变光纤带宽较宽，适用于**中容量中距离**通信
- ❖ **单模光纤**：指纤芯中仅传输一种最低模式的光波，由于纤芯直径很小（通常为 $8 \sim 12\mu\text{m}$ ），制作工艺难度大，其折射率分布属于突变型
 - 单模光纤的带宽极宽，适用于**大容量远距离**通信

单模



多模



4.2 有导向介质 – 光纤

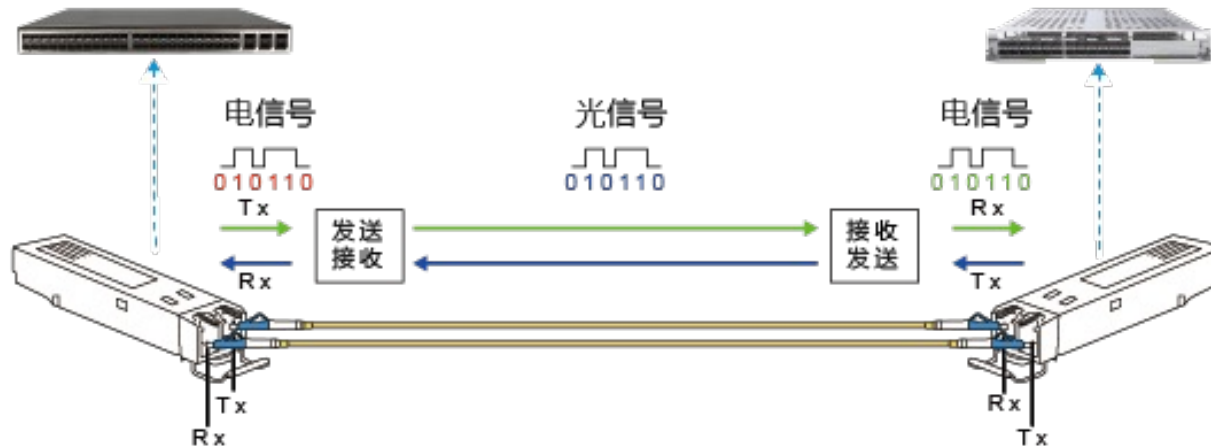
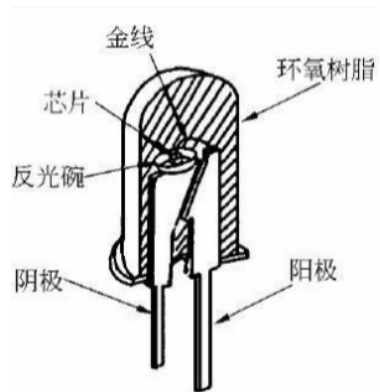
❖ 光传输系统由三个部分组成，即光源、传输介质和检测器

❖ 发送端的光源

- 发光二极管：价格较低，工作温度也较宽，使用寿命长
- 注入激光二极管：发光效率高，可支持较高的传输速率

• 接收端

- 光敏二极管：遇到光照射时，光敏二极管会产生一个电脉冲
- 光敏二极管的典型响应时间为1ns，因而限制传输速率在1Gb/s左右



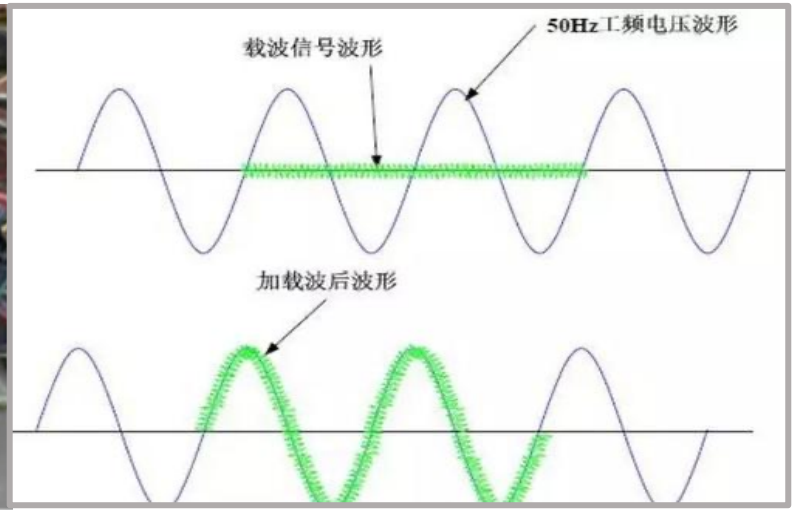
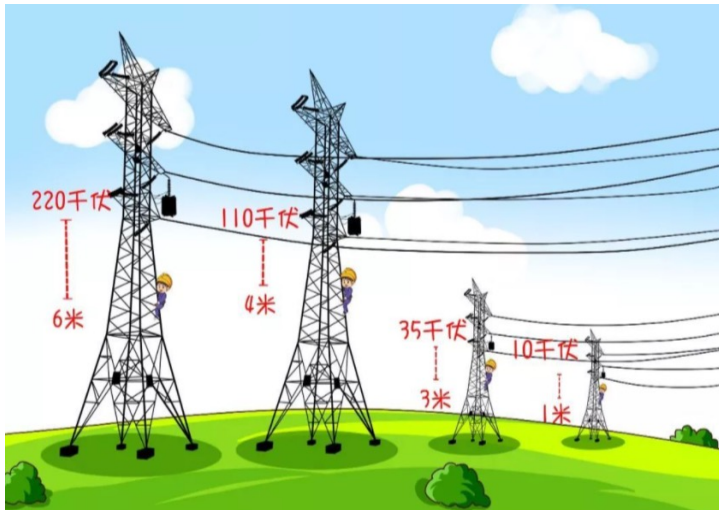
4.2 有导向介质 – 电力线

❖ 电力载波是电力系统特有的通信方式

- 利用现有电力线，通过载波方式将模拟或数字信号进行高速传输

❖ 电力线是指输送电能的电力线路

- 按结构形式的不同，输电线路分架空输电线路和电缆线路
- 架空输电线由线路杆塔和电力线组成



4.2 有导向介质 – 电力线

❖ 电力线载波通信可利用

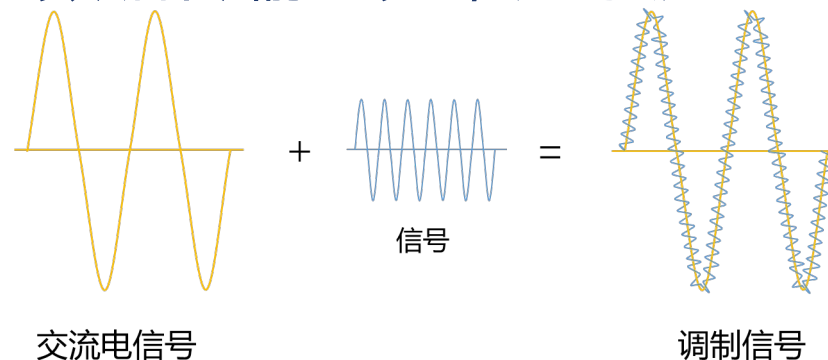
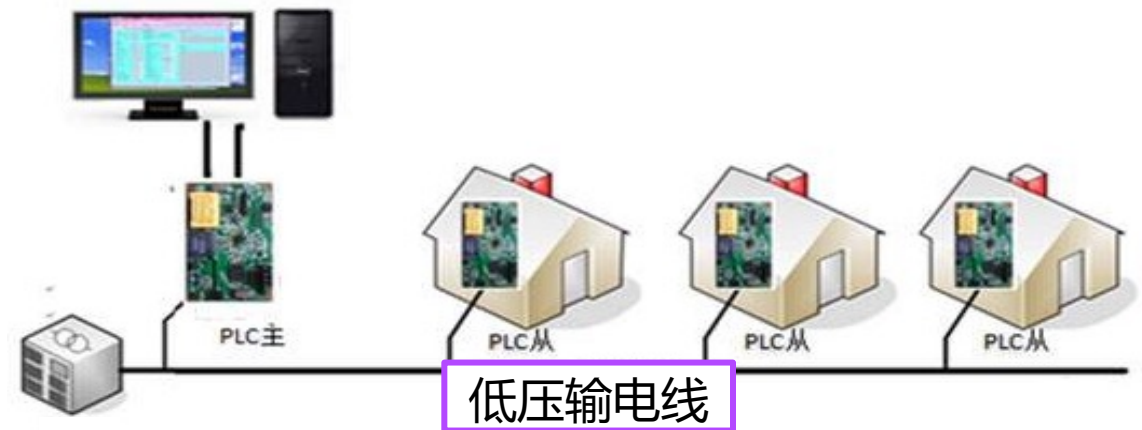
- 高压电力线 (35kV及以上)
- 中压电力线 (10kV)
- 低压配电线 (380/220V)

❖ 电力线载波通信系统最基本的一项任务：

- 根据通信信道的不同选择不同的调制方式，形成调制信号以适应信道传输

❖ 优点：投资少、连接方便、传输速率高、安全性好和使用范围广

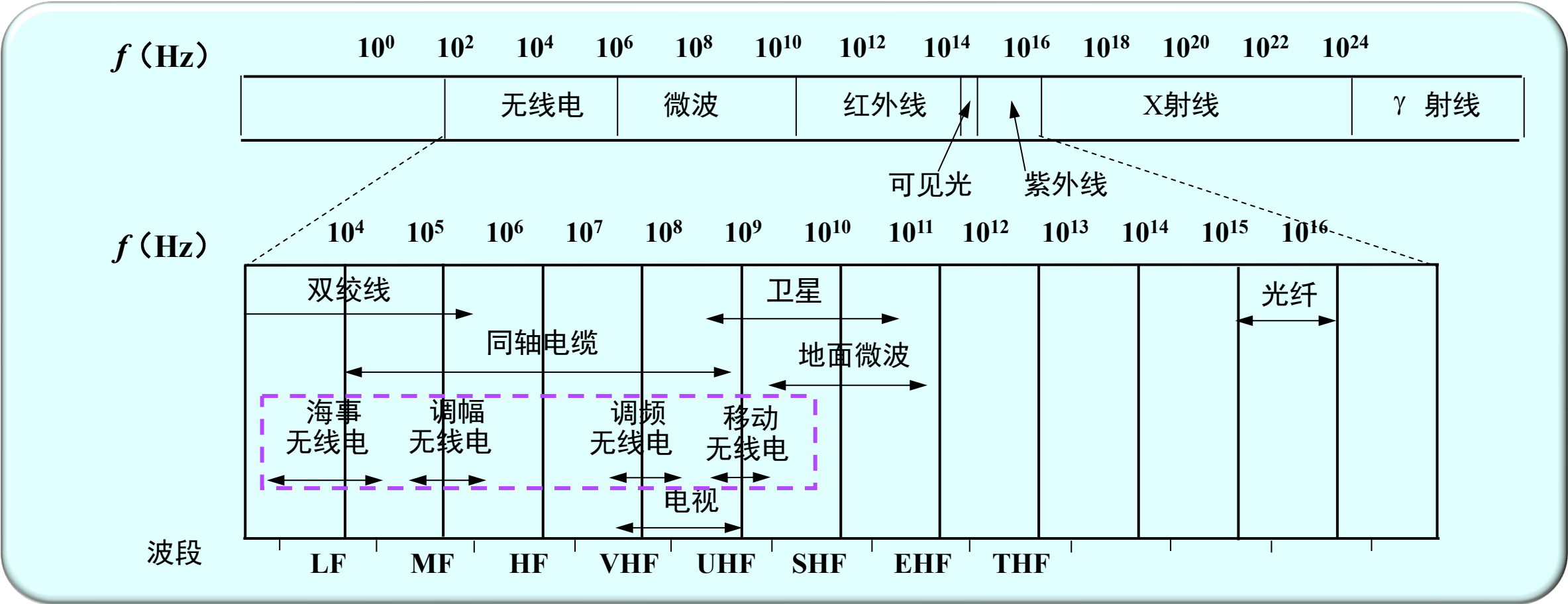
❖ 缺点：无法提供高质量的数据传输业务，如家庭电器产生的电磁波干扰等



传输介质是指发送器与接收器之间的物理通路可分两大类：

- 有导向介质：指电磁波被导向沿着某一媒体传播，包括
 - 双绞线、同轴电缆、电力线和光纤等
- 无导向介质：指电磁波在大气层、外层空间或海洋中进行的无线传播，包括
 - 短波通信、微波通信、光波通信等
 - **无线（电）通信**：利用电磁波的辐射和传播，经过空间传送信息的通信方式
 - 包括zigbee、蓝牙、红外线、卫星、微波、WiFi等无线方式的通信
 - 可传送电报、电话、传真、数据、图像以及广播和电视节目等通信业务

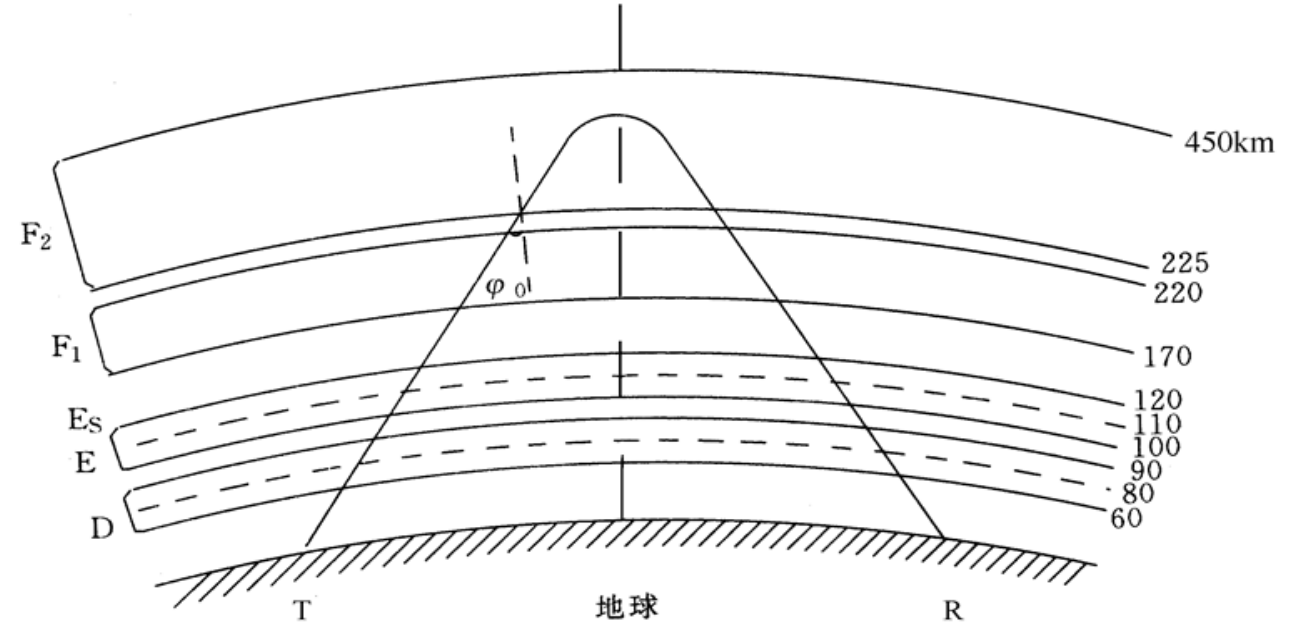
4.3 无导向介质



4.3 无导向介质 – 短波通信（无线电波）

❖ **短波**是指以波长为100m ~ 10m（或频率为3 ~ 30MHz）的电磁波

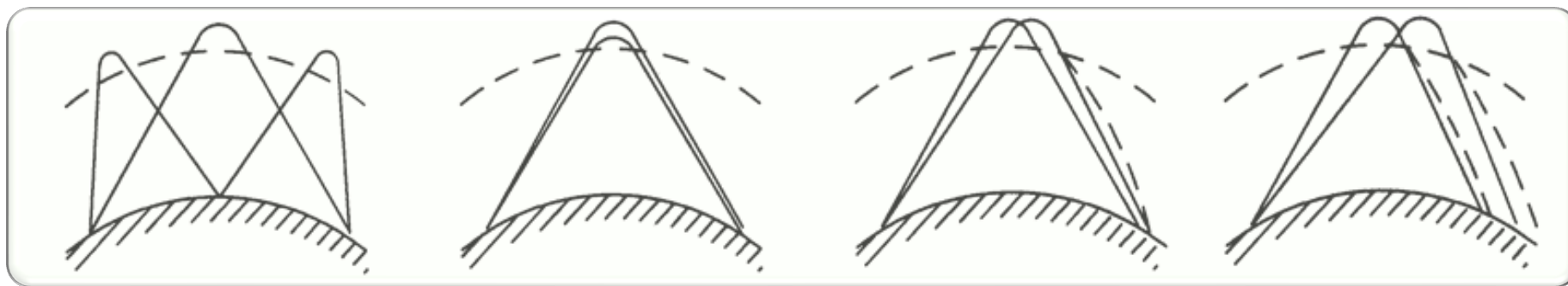
- 可沿地球表面以地波形式传播（数百千米）
- 主要以天波的形式靠大气层中的电离层反射传播（达数千 ~ 上万千米）



D层离地面约60 ~ 90km
E层离地面约90 ~ 130km

F2层离地面约220km以上
F1层离地面约130 ~ 220km

- ❖ **多径传播**：一个信号波以两个以上路径发送至同一个接收天线
 - 与地面或物体造成的反射和散射、大气折射、电离层折射和反射等有关
 - 当同一信号通过多条路径接收时，可能会产生干扰和信号相移
- ❖ **多径时散**：信号在传输过程中由于多径传播引起的时延扩展现象
- ❖ **衰落**：指在短波传输过程中，收信电平出现忽高忽低随机变化的现象



(a) 一次反射和二次反射

(b) 反射区的高度不同

(c) 寻常波与非寻常波

(d) 漫射现象

引起多径时散的几种主要原因

❖ 短波通信应用：军事通信

❖ 短波通信优点：

- 1) 不需建立中继站即可实现远距离通信，建设和维护费用低，建设周期短;
- 2) 设备简单，可定点固定通信，也移动通信;
- 3) 电路调度容易，临时组网方便、迅速，具有很大的使用灵活性;
- 4) 对自然灾害或战争的抗毁能力强

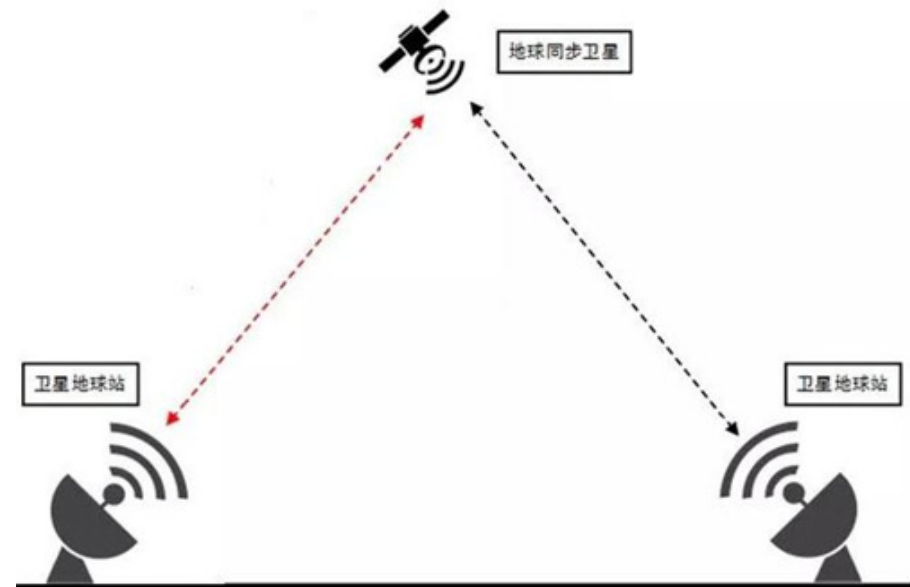
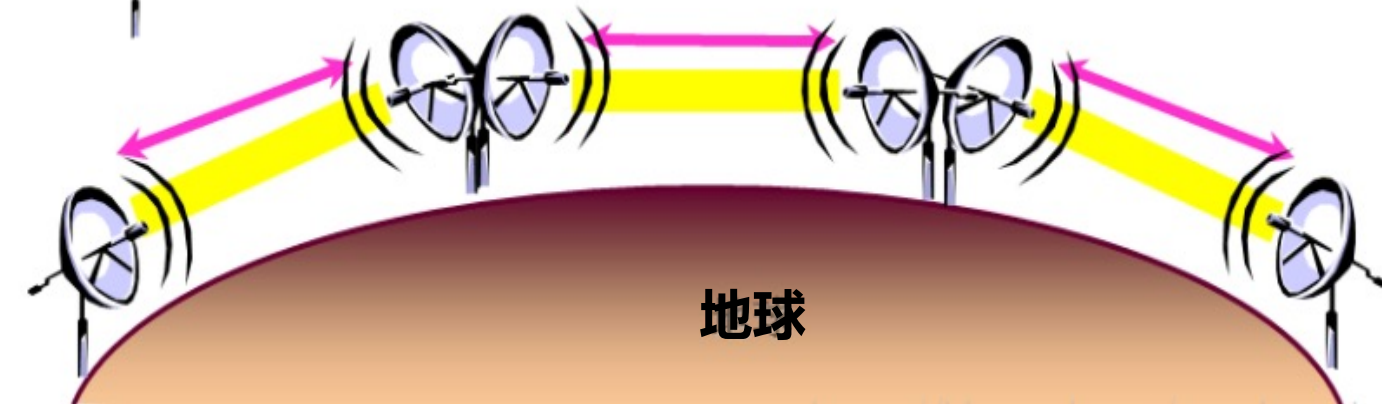
❖ 缺点：

- 1) 可供使用的频段窄，通信容量小
- 2) 短波的天波信道是变参信道，信号传输稳定性差

4.3 无导向介质 – 微波通信

- ❖ **微波通信**：以波长 $1\text{m} \sim 1\text{mm}$ （频率 $300\text{MHz} \sim 300\text{GHz}$ ）的电磁波传输信息
- ❖ **地面微波通信**：多路复用、射频工作中继接力是其三个基本特点
 - 远距离通信则采用中继方式
 - 因受地形和天线高度的限制，两通信站之间的距离一般在 $40 \sim 60\text{km}$
- ❖ **卫星通信**也属于微波通信的一种

—— 直视路线



- ❖ 短波通信应用：卫星通信，点对点无线通信
- ❖ 微波由于频率高，波长短的特点，使得其
 - 绕射能力差，穿透力弱，地表传输时，衰减很大，传输距离短（视距）
 - 高速数据传输，适合大带宽应用

4.3 无导向介质 – 光波通信

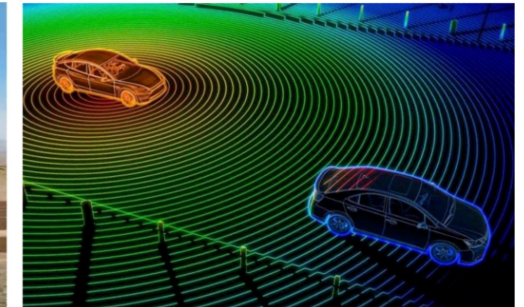
❖ **光波通信**：以光波为载波的通信方式

- 紫外线，可见光，红外线都属于光波范畴
- 光波的波长在 $3 \times 10^2 \sim 60 \times 10^4 \mu\text{m}$ ，频率在 $3 \times 10^{12} \sim 5 \times 10^{16} \text{Hz}$

❖ 常见应用：激光通信，大气激光通信，光纤通信



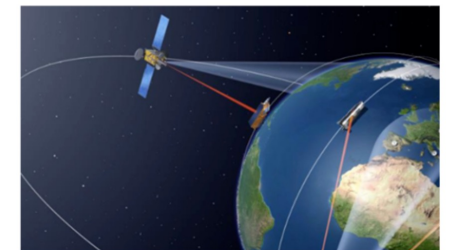
军事侦察



汽车环境感知



光纤数据传输

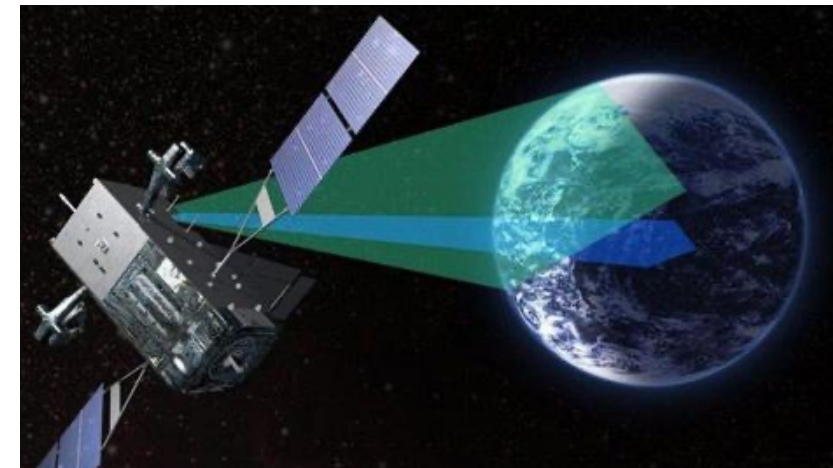
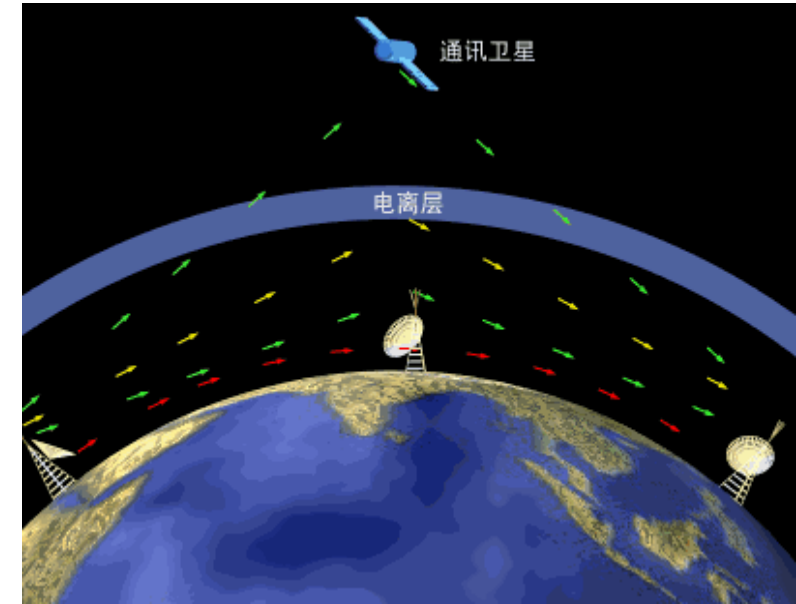


卫星通信

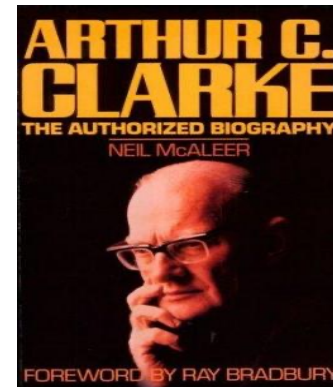
激光通信应用举例

4.3 无导向介质 – 卫星通信

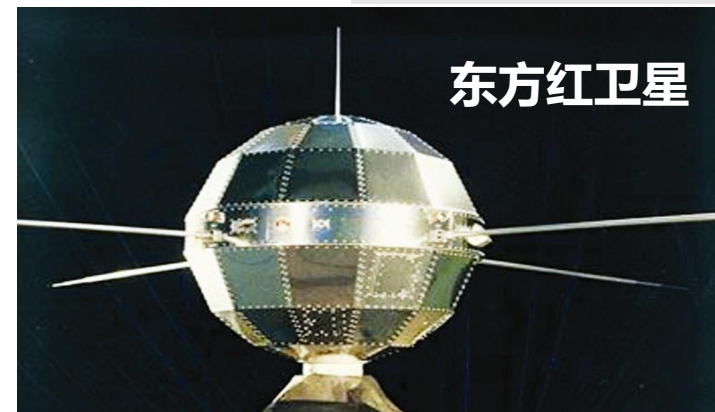
- ❖ **卫星通信**：利用人造地球卫星作为中继站，转发或反射无线电波，在两个或多个地球站之间进行的通信
 - 是地面微波接力通信向太空的延伸
- ❖ 卫星通信的特点：
 - 传播**时延长**，从一个地球站经卫星到另一个地球站的电波传播传播时间约需240 ~ 280ms（可取270ms）
 - 传播**损耗大**，达200dB左右
 - 受**大气层**的影响大
 - “**面覆盖**”式的传播信道



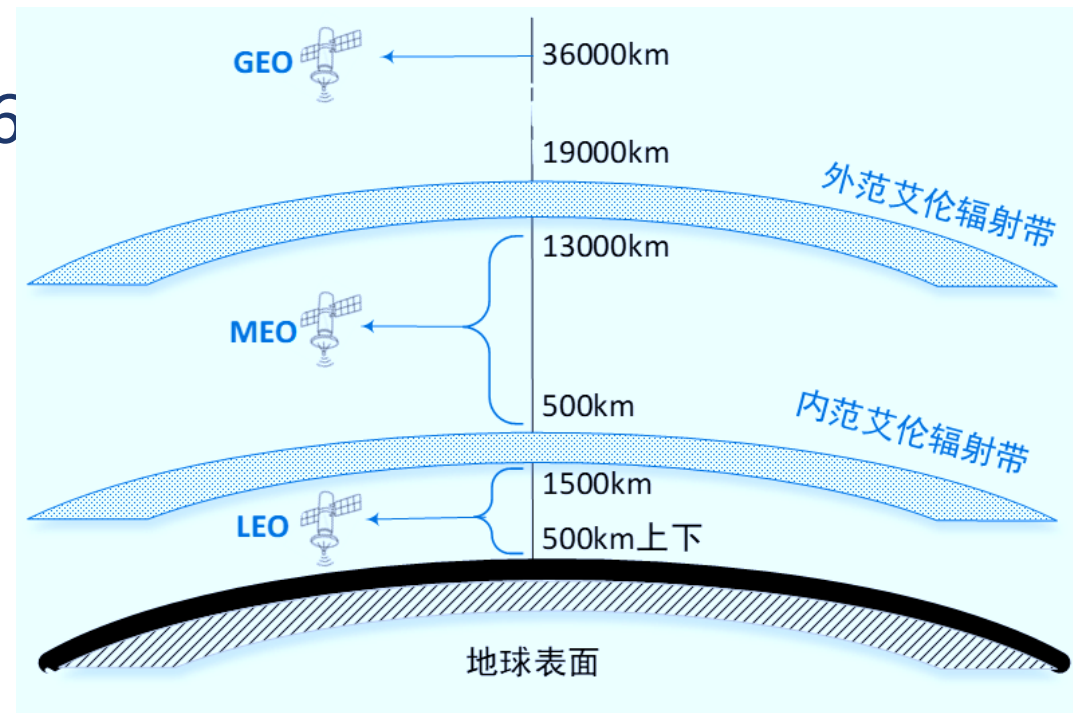
- 1945年10月，英国人A.C.克拉克提出静止卫星通信的设想
- 1957年10月，世界上第一颗人造卫星升空
-
- 1970年4月24日，我国第一颗人造地球卫星“东方红”1号在酒泉发射成功，中国成为世界上第五个发射卫星的国家
-
- 1984年4月8日，我国发射成功“东方红-I型”试验通信卫星(STW-1)，4月6日定点于东经125度赤道上空
-
- 1997年5月12日，我国发射成功第3代通信卫星“东方红三号(DFH-3)”，主要用于电视传输、电话、电报、传真、广播和数据传输等业务



英国科幻小说家。他的卫星通讯的描写，与实际发展惊人的一致，地球同步卫星轨道因此命名为“克拉克轨道”



- ❖ **静止卫星**：卫星的运行轨道在赤道平面内，轨道高度约35800km，自转方向和自转周期与地球相同，从地球看上去如同静止一样，称为静止或**同步卫星**
- ❖ **移动卫星通信**：利用卫星转发器构成的通信链路，使移动体之间或移动体与固定体之间建立的通信，因此它可以看成是陆地移动通信系统的延伸和扩展
- ❖ 按照卫星轨道分类：
 - 同步轨道卫星系统（GEO），轨道高度35786
 - 高轨道卫星系统（HEO），>20000km
 - 中轨道卫星系统（MEO），8000~20000km
 - 低轨道卫星系统（LEO），700~2000km



移动卫星通信

- 可以是全球性,亦可以是区域性,全球性的采用中、低轨道卫星,区域性的采用静止轨道通信卫星
- 静止轨道卫星移动通信系统
 - 例如: 提供全球覆盖的有“国际移动卫星”(Inmarsat)系统,利用11颗 GEO 卫星组成的3个星座在全球范围提供卫星移动通信服务



➤中轨道卫星移动通信系统

- 例如: ICO(Intermediate Circular Orbit) 全球卫星通信系统是由空间段和地面段组
- 空间段是位于中圆轨道的12颗星(采用倾斜圆轨道,轨道高度为10390 km,轨道倾角 45° ,所有卫星分布在相互垂直的2根轨道面上,每根轨道面有1颗备份卫星)
- 地面段称为 ICONET,与现有地面固定和移动通信网相联,构一个完整的天地结合的系统,利多模手机或其它终端实现随时随地的通信

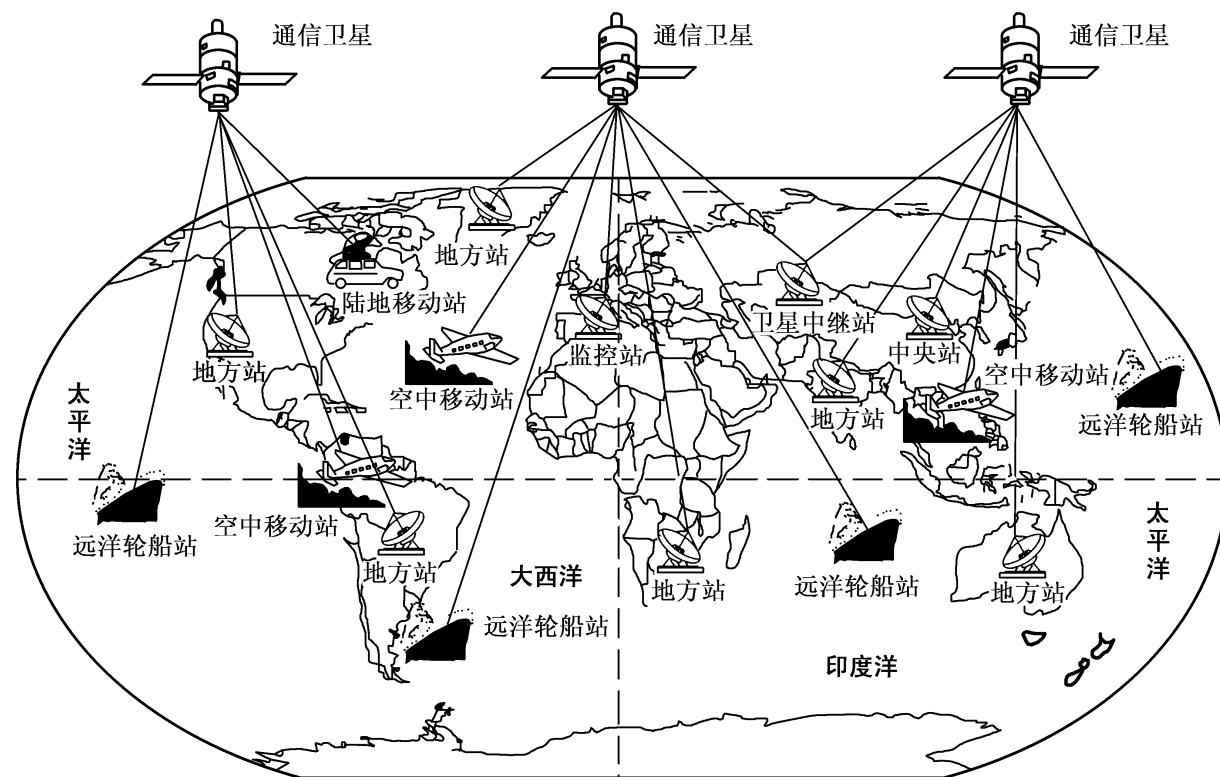
➤低轨道卫星移动通信系统

- 例如: 铱星系统由66颗低轨卫星组成的低轨卫星全球移动通信系统,全球覆盖包含两极地区,星上转发器采用先进的处理和交换技术,多点波束天线,且有星际链路

国际卫星通信系统

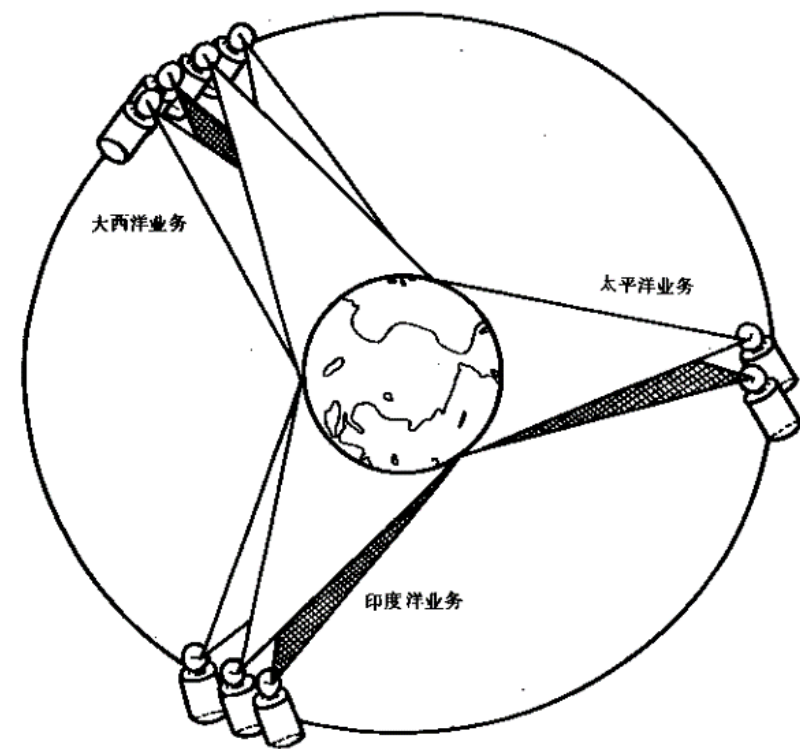
(**INTELSAT**)，简称IS系统，是一个全球商用的同步轨道卫星通信系统，由国际卫星通信组织建立

为实现全球通信，根据各国、各地区用户(地球站)业务量的大小，分别在大西洋、太平洋、印度洋的赤道上空，部署若干颗通信卫星。

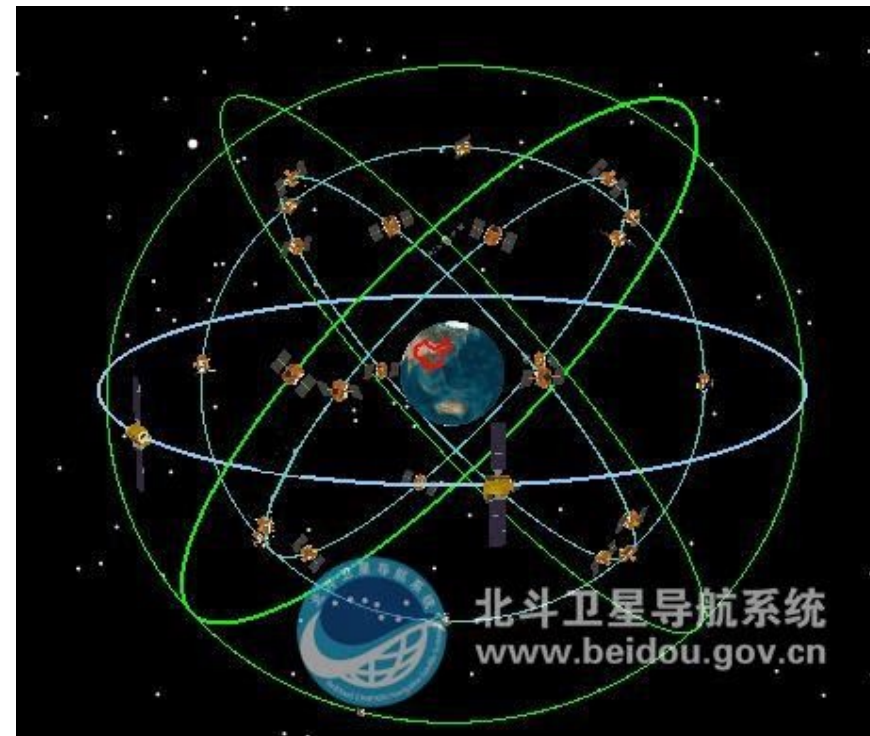


► INTELSAT具有以下特点：

- 系统庞大，用户广泛
- 世界有170个不同国家和地区使用IS业务，地球站遍布全球
- 系统容量、可靠性、可联接性和经济性均居世界前列
- 以IS VI为例，每颗卫星至少能同时传送120000路电话语音，或200路以上的电视，或30亿bit/s信息
- 技术先进，不断创新
- 4/6GHz六重频率再用、星上处理、数字化技术(TDMA、数字化电视、语音处理、数字调制解调)等

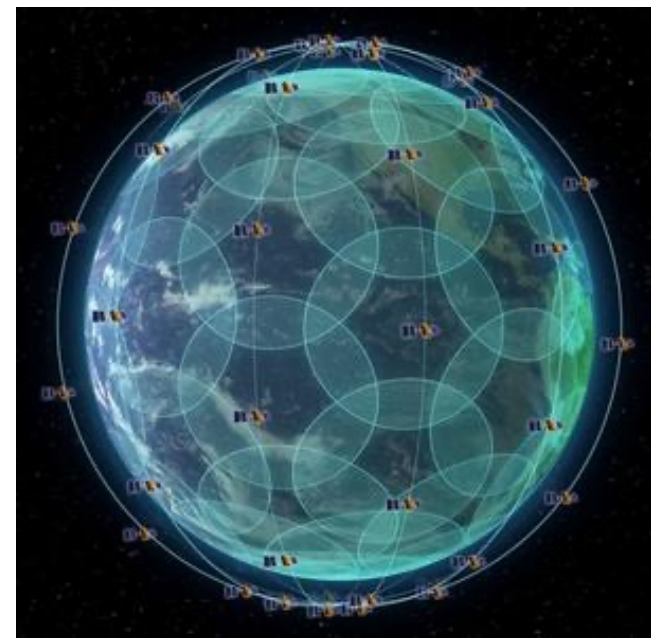


- ❖ **中轨道卫星系统**一般是指轨道高度介于低地球轨道（LEO）和地球静止轨道（GEO）之间的非同步卫星系统
- ❖ 结合了LEO和GEO的优点：
 - 全球覆盖能力强
 - 通信延迟低
 - 终端设备小型化
- ❖ 主要应用：
 - 全球移动通信系统
 - 卫星导航系统（例如，北斗卫星导航系统（BDS），GPS）



低轨道卫星系统一般是指多个卫星构成的可以进行实时信息处理的大型的卫星系统，其中卫星的分布称之为卫星星座。

- 主要优点：
 - 信号传输时延小
 - 地面终端设备简单、造价低，是手持式终端的最佳方式
 - 卫星造价低、发射容易
- 应用案例
 - 铱星系统
 - 全球星系统
 - 空中因特网系统
 - 星链互联网系统



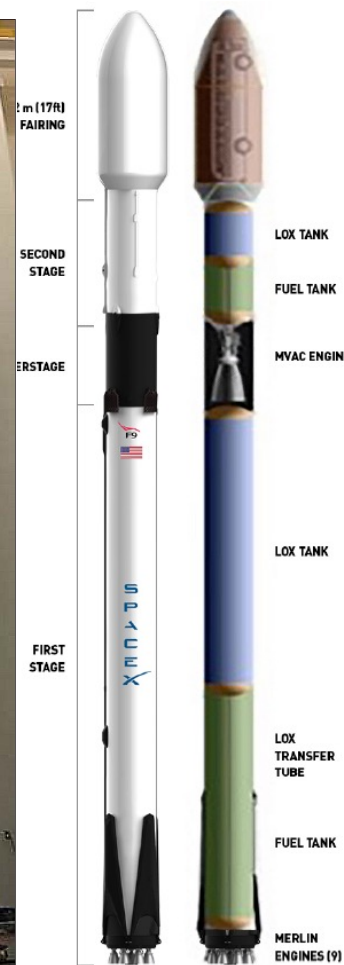
➤ SpaceX Starlink “星链” 互联网

- 2015年1月，马斯克宣布SpaceX计划将约1.2万颗通信卫星发射到轨道，这一项目被命名为“星链”（Starlink）
- 2019年5月，SpaceX 利用猎鹰9号运载火箭成功将“星链”首批60颗卫星送入轨道。
- 2021年2月，SpaceX 发射了 60 颗星链互联网卫星（Starlink satellites）进入轨道，这是猎鹰9号火箭的第 50 次发射

➤ 目前星链卫星互联网服务已经拥有1万多名用户



一箭60星示意图

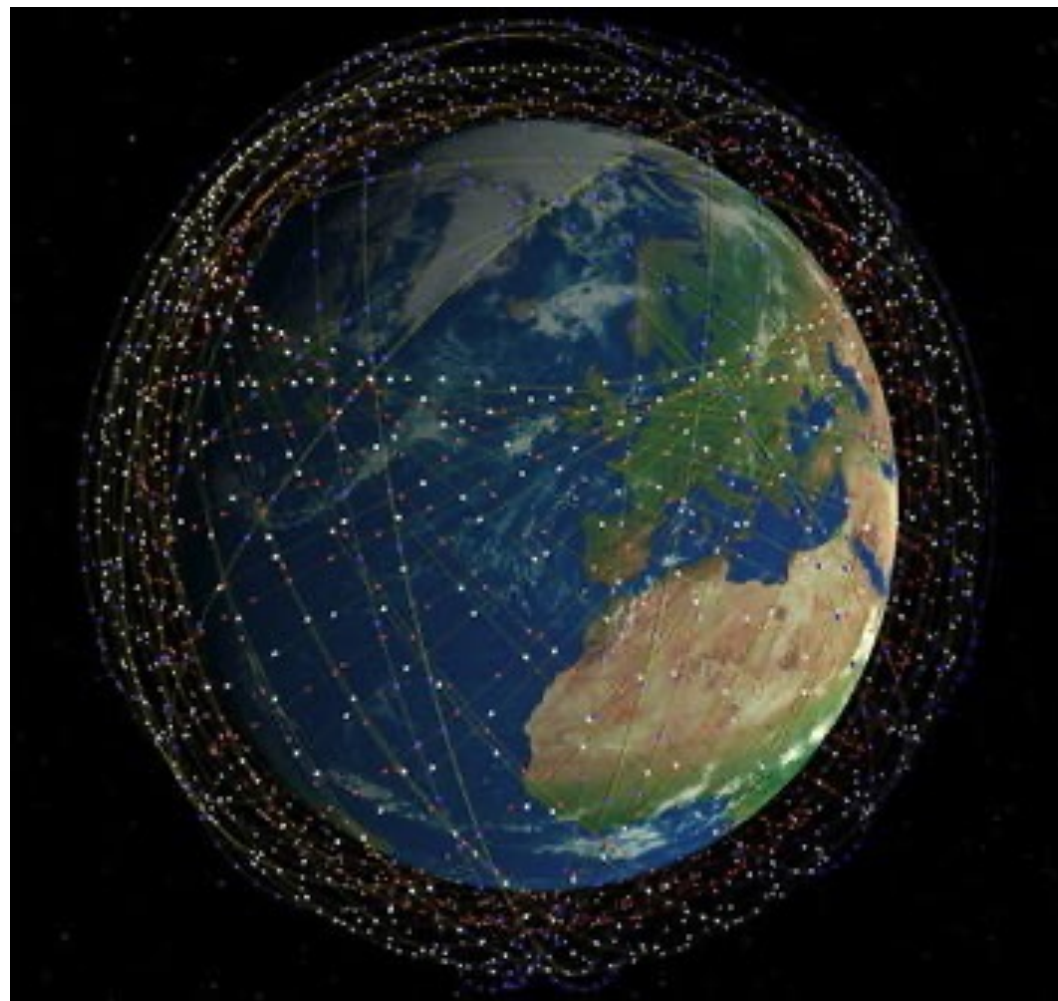


猎鹰9号火箭

➤ SpaceX Starlink “星链” 互联网

由SpaceX（美国太空探索技术公司，由马斯克创建）构建的卫星互联网星座，**可提供卫星互联网访问**，并从2020年开始工作。

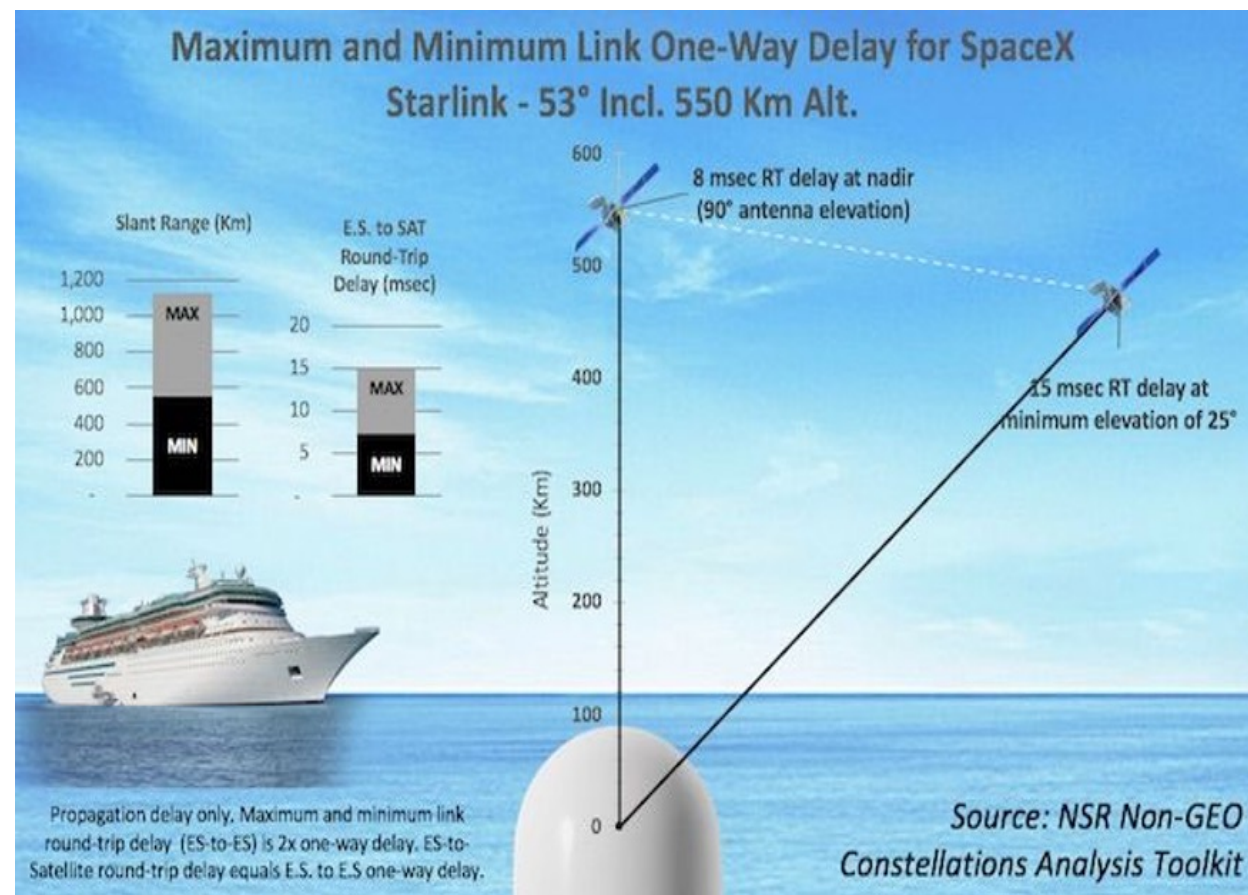
SpaceX计划在2019年至2024年间在太空搭建由**约1.2万颗卫星组成的**“星链”网络提供互联网服务，其中1584颗将部署在地球上空550千米处的近地轨道，并在地面装上星链信号接收器便可以使用低轨道卫星网络进行全球网络访问。



➤ SpaceX Starlink “星链” 互联网

通信能力

- 目前，用户终端可以达到从50Mb/s到150 Mb/s不等，延迟在20ms到40ms之间变化
- 未来，Starlink将提供**高达1 Gbit/s的速度**，延迟介于**25毫秒至35毫秒**之间
- 根据FCC的测量，这些等待时间将使SpaceX的服务可与电缆和光纤媲美，而现有的卫星宽带服务的等待时间为600毫秒或更长



一

物理层的基本概念

二

数据通信基础

三

数据通信技术

四

传输介质

五

带宽接入

5.1 无线接入

5.2 有线接入

六

物理层设备

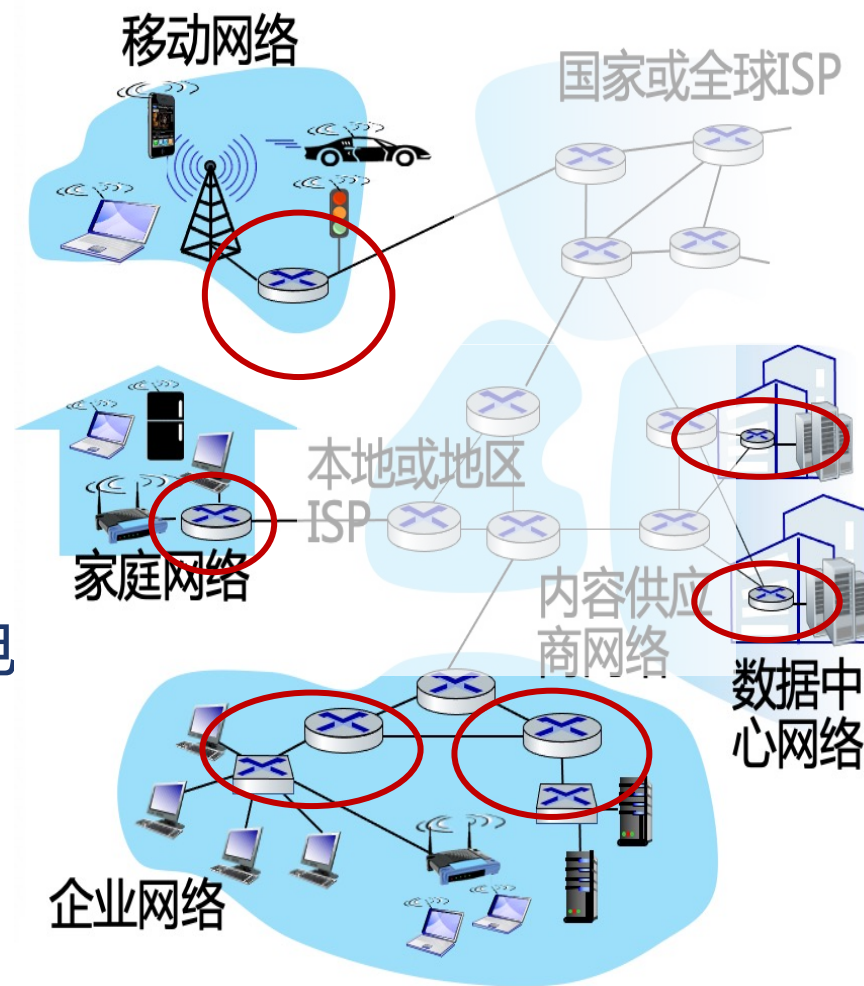
5 接入网

❖ 接入网目标：将主机连接到边缘路由器上

- 边缘路由器是端系统去往任何其他远程端系统的路径上的第一台路由器

❖ 如何将终端系统连接到边缘路由器？

- **无线网络接入**：WiFi、4G/5G，卫星广域覆盖
- **有线网络接入**：光纤到户FTTH，以太网，同轴电缆，双绞线的DSL，古老的拨号上网
- 接入场景：住宅（家庭）接入网，机构（学校、公司）接入网，移动接入网络（WiFi、4G/5G）

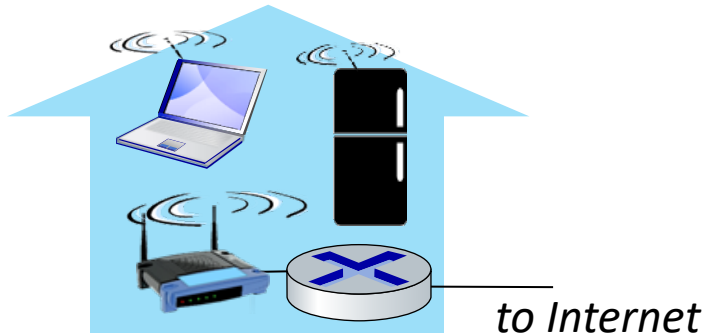


5.1 接入网 – 无线接入

❖无线接入网通过基站(“接入点”)将终端系统连接到路由器上

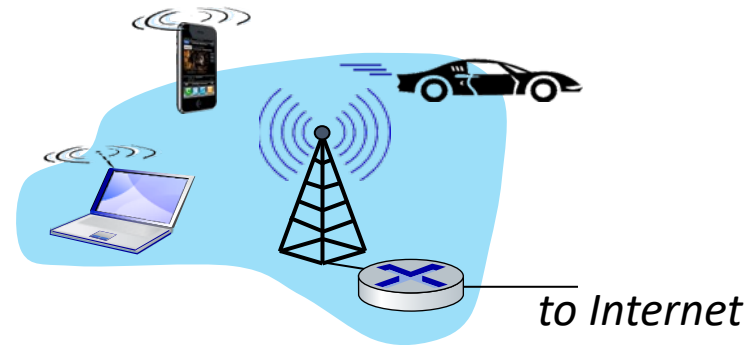
无线局域网 (WLAN)

- 通常在建筑物内或周围 (10米)
- 802.11b/g/n (WiFi) :
11、54、450 Mbps等传输速率
- Wi-Fi 6最高速率可达9.6Gbps



广域蜂窝接入网

- 由移动蜂窝网络运营商提供 (10公里)
- 2G/3G/4G/5G等蜂窝网络
- 0.1 ~ 1000 Mbps速率



大家家里如何上网？

5.2 接入网 – 有线接入

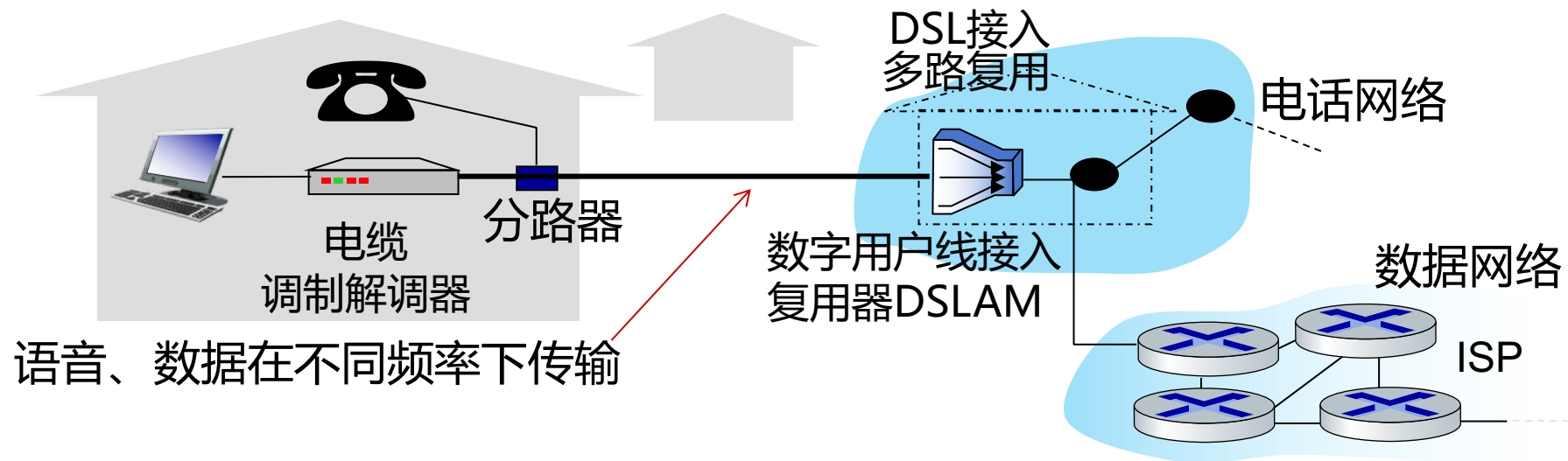
❖ 数字用户线DSL：Digital Subscriber Line

❖ 使用电话线连接到数字用户线接入复用器(DSLAM)

- DSL电话线上，语音和数据可以同时传输
- 数据进入互联网，语音连接到电话网

国外大量使用DSL☹

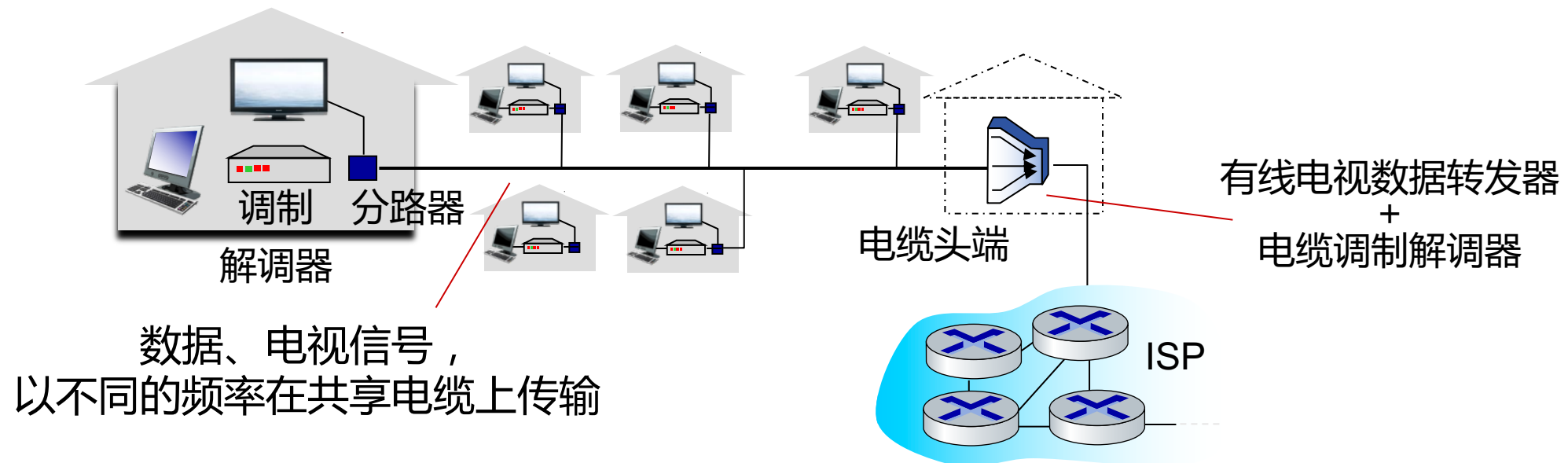
❖ 上下行速率不对称：24-52 Mbps下行速率，3.5-16 Mbps上行速率



5.2 接入网 – 有线接入

- ❖ **同轴电缆(Cable):** 家庭利用传统有线电视信号线（同轴电缆）接入头端上网
 - 多个家庭共享有线电视的头端
 - 不对称：高达40Mbps–1.2Gbps下行传输速率，30-100Mbps上行传输速率
- ❖ **混合光纤同轴电缆HFC**
 - ❖ 先用同轴电缆接入光纤节点，再用光纤连接到头端

美国住宅有80%多使用DSL或同轴电缆接入☹



5.2 接入网 – 有线接入

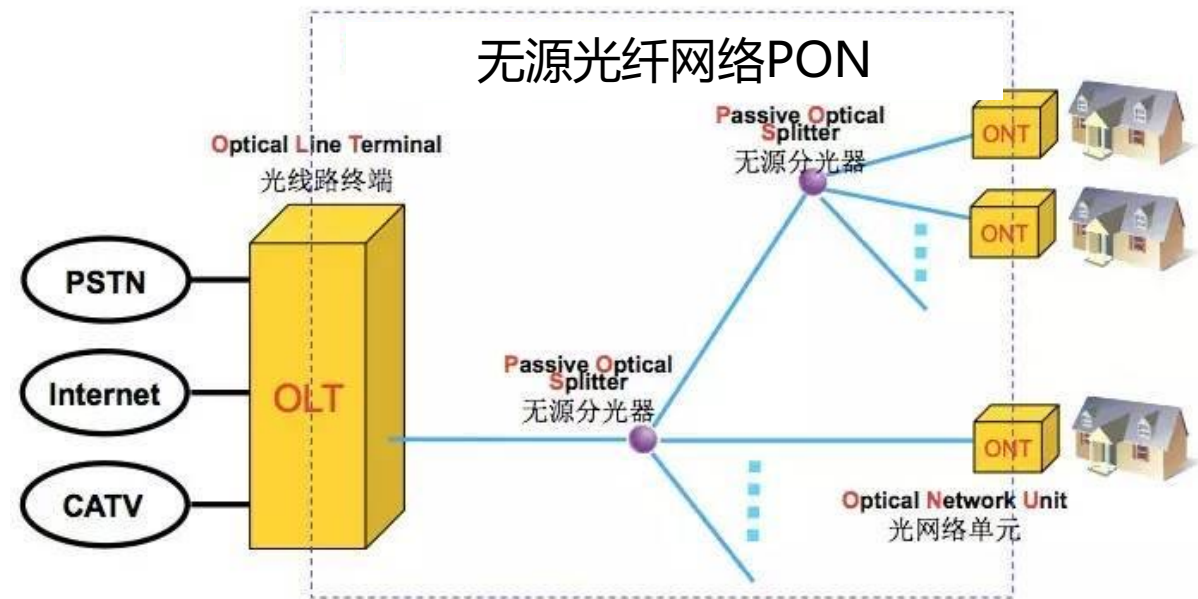
❖ 光纤到户FTTH: Fiber To The Home

- 我国及全球先进地区普遍采用的光纤通信的传输方法
- 分为两类：有源光纤网络AON和无源光纤网络PON
- 带宽大、线路稳定

我国FTTH用户
已接近5亿

❖ 无源光纤网络PON

- PON: Passive Optical Network
- OLT：局端的光线路终端
- ONU光网络单元（如光猫ONT）
- 光猫ONT通过一个或多个无源分光器，连接到局端的光线路终端OLT



5.2 接入网 – 有线接入

❖实际的接入网

- 往往采用有线、无线等多种技术的混合
- 甚至WiFi和4G等多种无线技术的混合接入

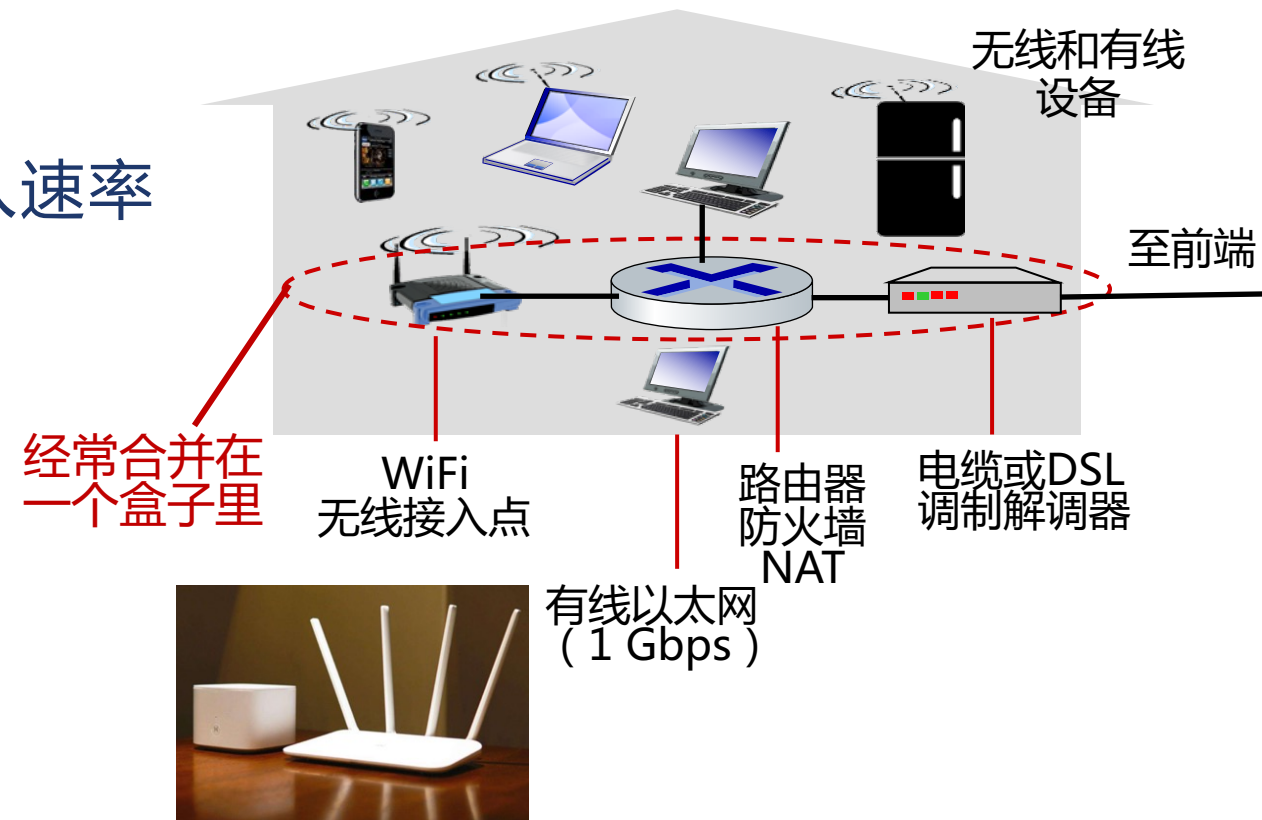
❖有线以太网接入

- 100Mbps、1Gbps、10Gbps等接入速率

❖无线WiFi接入

- ❖11、54、450Mbps等

校园、企业、家庭等网络



一

物理层的基本概念

二

数据通信基础

三

数据通信技术

四

传输介质

五

带宽接入

六

物理层设备

6.1 收发器

6.2 中继器

6.3 集线器

6.1 收发器

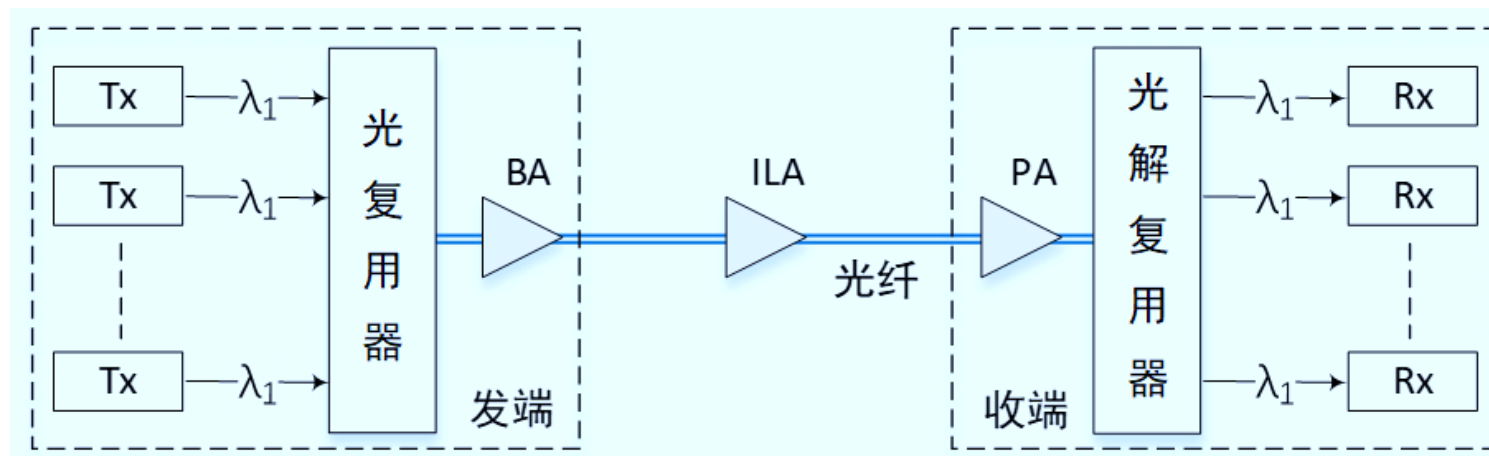
- ❖ 收发器（Transciever）：接收和发送信号，连接传输介质
 - 光纤收发器完成电信号和光信号的相互转换



6.2 中继器

❖ 中继器 (Repeater) : 从一个接口 (Interface) 接收信号 , 对信号进行去噪和放大 (也称为再生信号)

- 电中继器
- 全光中继器
- 无线中继器



6.3 集线器

- ❖ 集线器（Hub）：多接口（Interface）的中继器；，去噪和放大，即再生信号；但集线器有多个接口
- ❖ 泛洪：集线器从某一个接口接收信号，去噪、放大后，从所有其他的接口转发出去

