

第三章 物理层

授课教师：崔勇

清华大学



计算机网络
教案社区

致谢社区本章贡献者

北京交通大学

熊轲 刘强 赵阿群
王健 孙延涛 梁满贵

清华大学

崔勇



同学们关心的问题：价值和定位

➤ 有什么用？

- “学习了网络原理课程，却不会配置网络？”
- “我不研究网络，学这门课有什么用？”
- 原理课程：内容通用而抽象

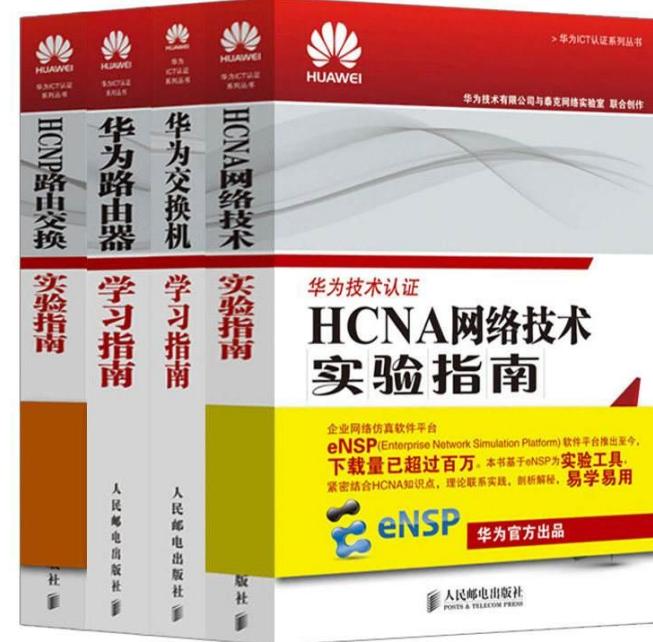
➤ 对后续课程的作用

- [√] 介绍网原和相关限选课之间的关系
- [√] 提供资料介绍网络领域的前沿研究

➤ 提前告知考试的形式

- [√] 提供样卷
- [√] 告知考试题型与分数分布

QUIC
流媒体直播



五道口技工学院？

知识、原理、技能
发现问题、解决问题？



同学们的建议

- 提前发课上思考题
 - [√] 在微信群中提前发送
- 投票选择考核形式
 - [√] 额外实验降低考试占比
 - [√] 提供期中考试的选项
 - [√] 积极探索因材施教的多样化（难为了我的研究生和助教们☺）
- 未来的可能☺
 - 课程介绍文档：学长评价（定位、关系、前沿研究等）
 - 课程介绍推送：介绍课程、老师等

感谢同学们
调研、思考和反馈



支撑贵系的后续“网络”课程

课程名称	教师
计算机 网络原理	崔勇
计算机 网络原理	吴建平
计算机 网络原理	徐明伟
计算机 网络	任丰原
计算机网络 专题训练	徐明伟
计算机网络 安全技术	尹霞
密码学与网络 安全	王兴军
网络安全工程与实践	段海新
网络空间安全导论	李琦

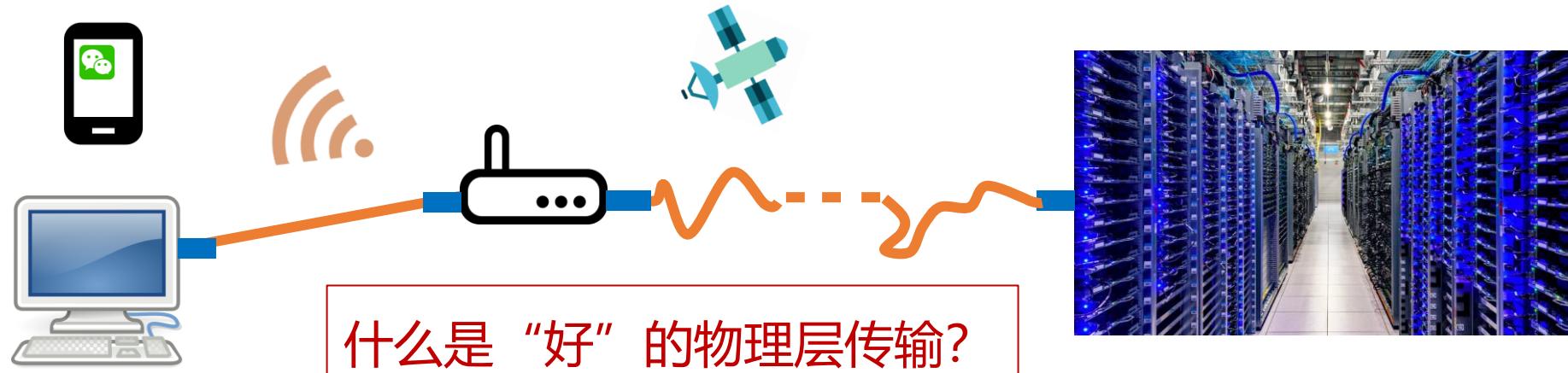
课程名称	教师
计算机 网络管理	王继龙
高级 网络管理	裴丹
网络存储技术	舒继武
高等计算机网络	徐恪
计算机网络 体系结构	徐明伟
软件定义网络	刘斌
高性能路由器	刘斌
计算机网络 性能评价	任丰原

玩协议玩设备！网络安全、云计算、直播、云游戏、区块链、元宇宙、AI ...



思考

网络跨越千山万水，连接世界



- 物理层目标：（插上线缆）传输比特
- 什么叫比特？信息量？什么是0/1？
- 不仅仅是铁丝：传输距离远，避免干扰、减少衰减，减小成本
- 插上无线的翅膀？如何避免遮挡广覆盖？高带宽？
- 多个设备怎样更高效地共享信道？带宽？差错？



本节目目标

- 了解物理层基本概念、功能和基本特性
- 掌握数据通信的基本术语、不同传输方式的特点和传输性能的刻画与度量
- 理解不同传输介质的特点
- 理解无线与卫星通信的特点和属性
- 掌握不同多路复用技术的基本原理和特点



本节内容

3.1 物理层基本概念

3.2 数据通信基础

3.3 传输介质

3.4 卫星通信

3.5 数字调制与多路复用

1. 物理层功能
2. 物理层特性
3. 物理层常用标准



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

➤ **物理层标准化的四个特性**

- 机械特性、电气特性、功能特性、过程特性

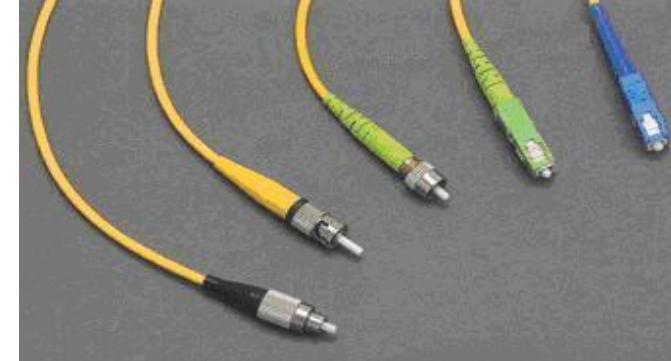
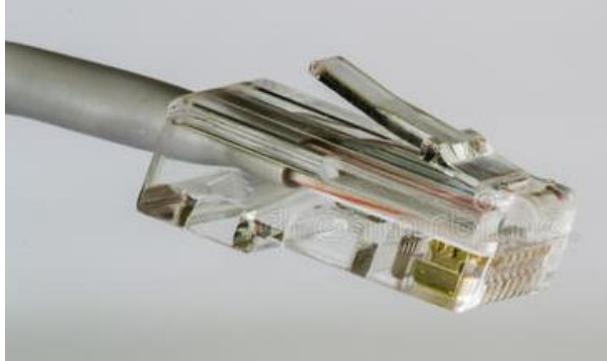


TCP/IP 5层模型



物理层机械特性

- 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
- 定义接线器的**形状和尺寸、引线数目和排列、固定和锁定装置等**



各种类型物理接口



➤ 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

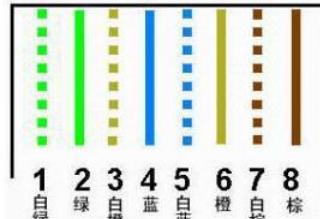
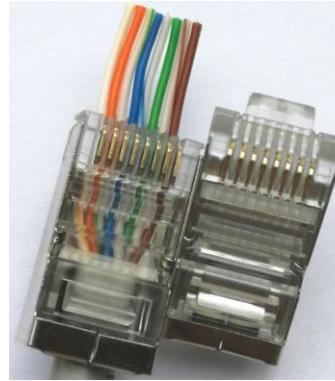
- 普通电话交换网接口
- 电气特性的主要规定
- ITU-T V/X系列有关建议的某些电气特性

发送电平	$\leq 0 \text{dBm}$		
接收电平	-5 ~ -35 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 ~ -15V(对地)	+5 ~ +15V(对地)	$\leq 20 \text{ kb/s}$
V.10/X.26	-4 ~ -6V(对地)	+4 ~ +6V(对地)	$\leq 300 \text{ kb/s}$
V.11/X.27	-2 ~ -6V(差动)	+2 ~ +6V(差动)	$\leq 10 \text{ Mb/s}$



物理层功能特性

➤ 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

物理层基本概念

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

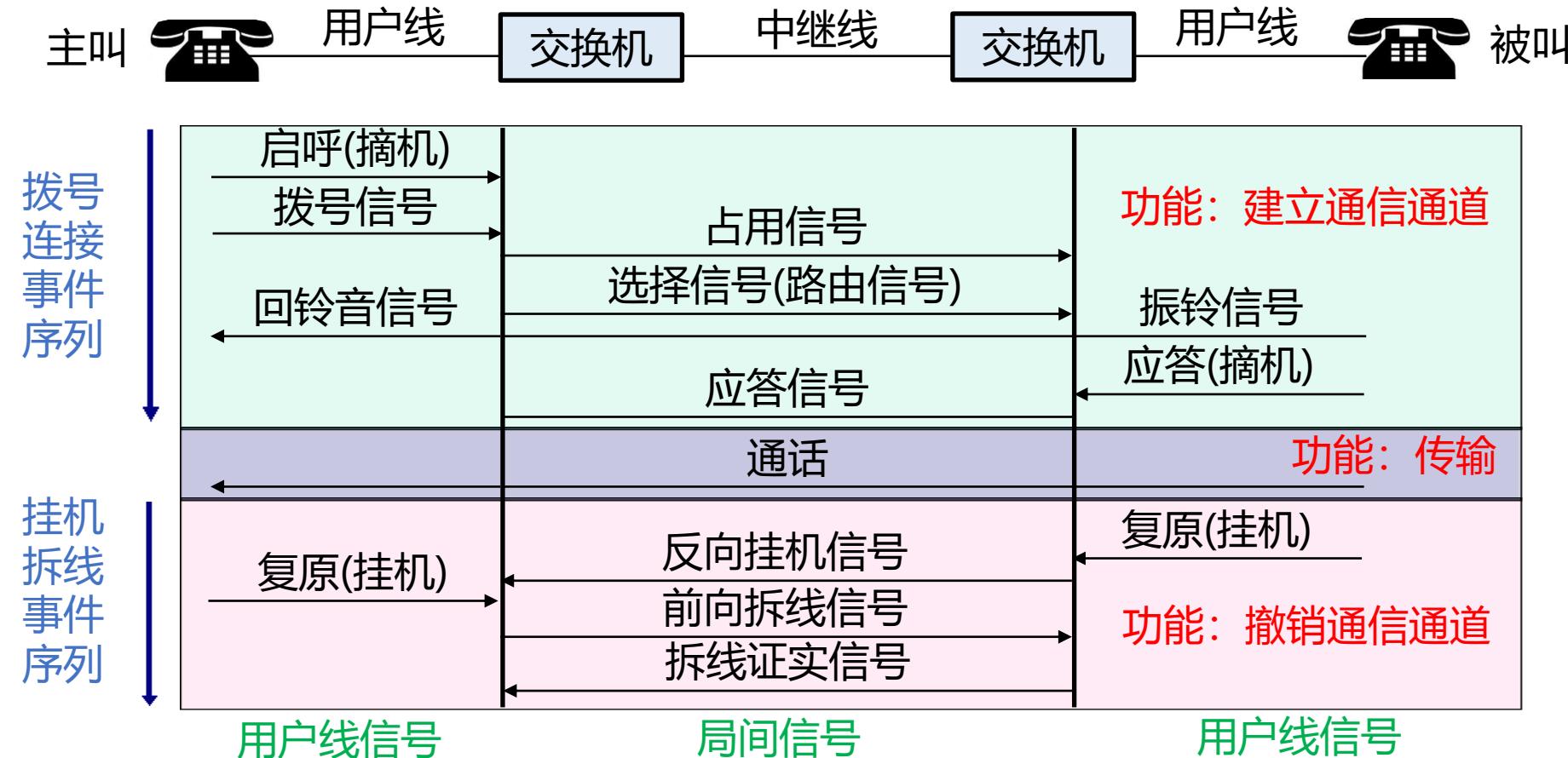
RS-232-C DB-9接口功能特性





物理层过程特性

➤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



小结：物理层的基本概念

➤ 功能

- 如何在连接各计算机的传输媒体上**传输数据比特流**

➤ 特性

- 机械特性：接口的物理结构
- 电气特性：信号线的电气连接及有关电路特性
- 功能特性：描述接口执行的功能
- 过程特性：指明对于不同功能的各种可能事件的出现顺序

怎样编码数据流?
高电位表示“1”?

线路带宽多少?
最大数据传输速率?



本节内容

3.1 物理层基本概念

3.2 数据通信基础

3.3 传输介质

3.4 卫星通信

3.5 数字调制与多路复用

1. 数据通信基础理论
2. 基本概念与术语
3. 传输方式
4. 性能度量



➤ 主要内容

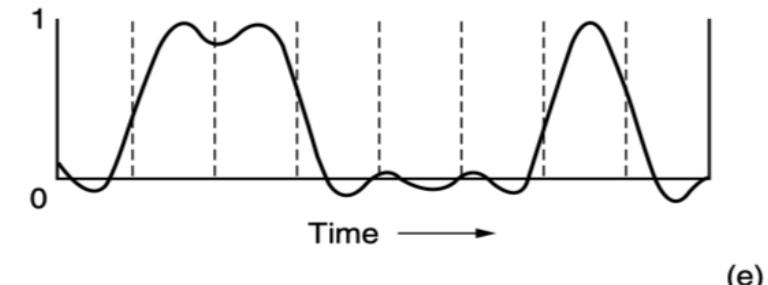
- 在网络通信中，信息是以电磁信号（或简称信号）的形式传输的
- 电磁信号是时间的函数（时域观），也是频率的函数（频域观）
- 研究信号在通信信道上传输时的数学表示

➤ 时域观

- 从时间函数的角度来看，电磁信号强度随着时间变化的情况

➤ 频域观（傅立叶分析）

- 对于理解数据传输来讲，信号的频域观比时域观更重要
- 当一个信号的所有频率成分是某一个频率的整数倍时，该频率被称为**基本频率**
- **信号的周期**等于基本频率的周期





➤ 傅立叶分析

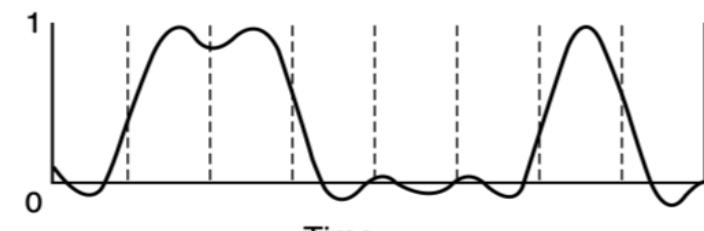
- 任何一个周期为T的有理周期性函数 $g(t)$, 可分解为若干项 (可能无限多项) 正弦和余弦函数之和

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

$f = 1/T$

a_n, b_n

基本频率
 n 次谐波项的正弦和
余弦振幅值



(e)



➤ 已知 $g(t)$, 求 c, a_n, b_n

- 将等式两边从 0 到 T 积分可得 c

$$c = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt$$

- 用 $\sin(2\pi kft)$ 乘等式两边, 并从 0 到 T 积分, 可得 a_n

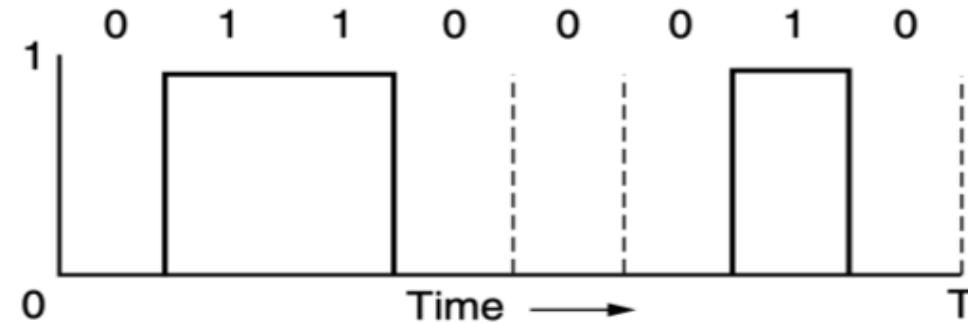
$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi nft) dt$$

- 用 $\cos(2\pi kft)$ 乘等式两边, 并从 0 到 T 积分, 可得 b_n

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi nft) dt$$



➤对于二进制编码 0 1 1 0 0 0 1 0，其输出电压波形为：



$$g(t) = \begin{cases} 0 & 0 < t \leq \frac{T}{8} \\ 1 & \frac{T}{8} < t \leq \frac{3T}{8} \\ 0 & \frac{3T}{8} < t \leq \frac{6T}{8} \\ 1 & \frac{6T}{8} < t \leq \frac{7T}{8} \\ 0 & \frac{7T}{8} < t < T \end{cases}$$

傅立叶分析的系数

- $a_n = [\cos(\pi n/4) - \cos(3\pi n/4) + \cos(6\pi n/4) - \cos(7\pi n/4)]$
- $b_n = [\sin(3\pi n/4) - \sin(\pi n/4) + \sin(7\pi n/4) - \sin(6\pi n/4)]$
- $c = 3/8$



傅立叶分析

- 根据傅立叶分析，任何电磁信号可以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，只要有足够的具有适当振幅、频率和相位的正弦波，就可以构造任何一个信号

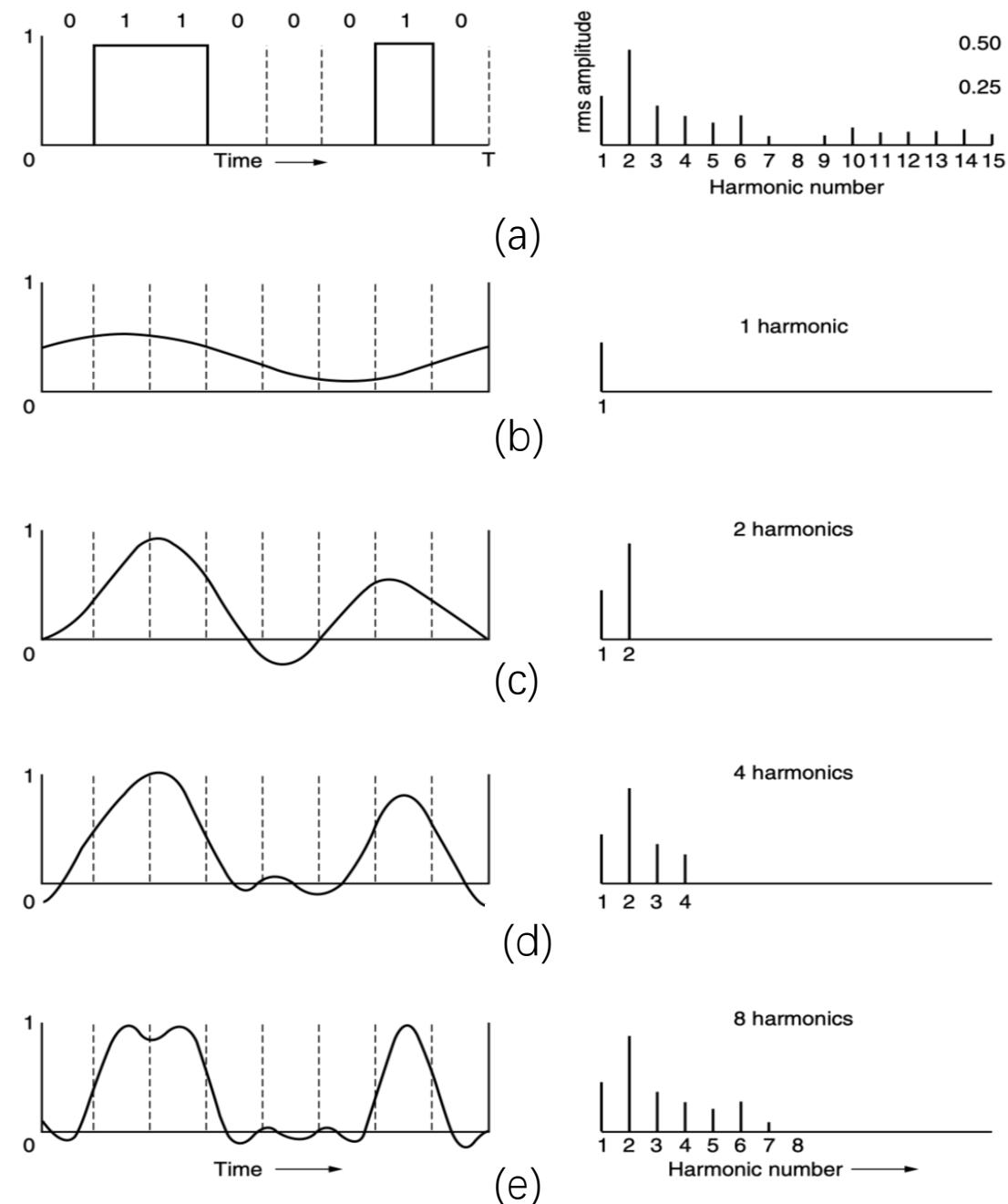


Figure 2-1. (a) A binary signal and its root-mean-square Fourier amplitudes. (b)–(e) Successive approximations to the original signal.



有限带宽信号

➤ 频谱 (spectrum)

- 频谱是信号所包含的频率的范围
- 图(e) 中信号的频谱从 f 到 $8f$

➤ 频谱的带宽 (bandwidth)

- 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，这个频带被称为有效带宽，或带宽
- 信号的绝对带宽等于频谱的宽度
- 图(e) 中信号的带宽为 $8f - f = 7f$
- 信号的信息承载能力与带宽有直接关系，带宽越宽，信息承载能力越强

图a的带宽是多少？

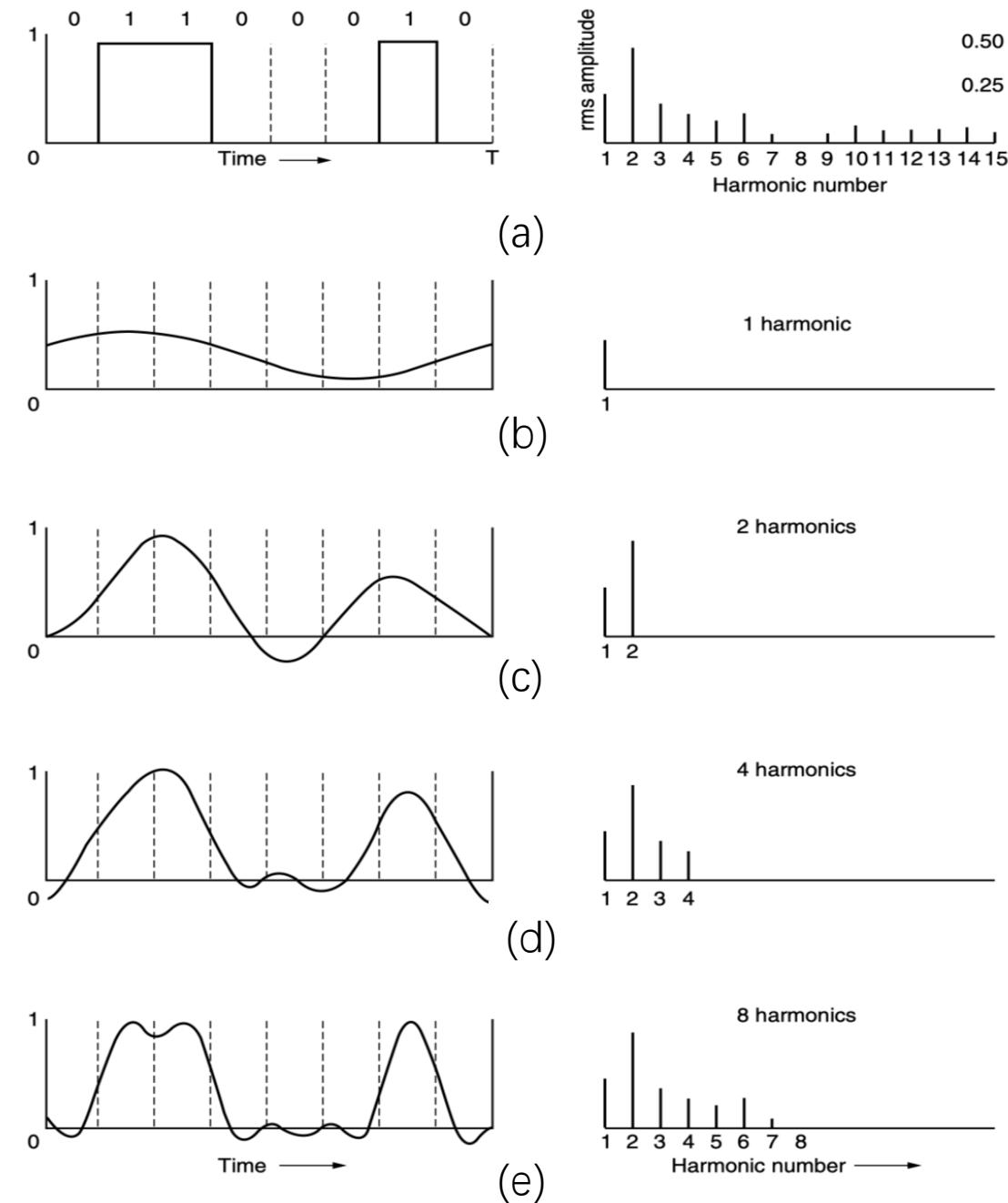


Figure 2-1. (a) A binary signal and its root-mean-square Fourier amplitudes.
(b)–(e) Successive approximations to the original signal.



➤ 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（频谱带宽）
- 比特率：每秒钟传送的二进制位数（数据传输带宽）
- 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

➤ 信号在信道上传输时的特性

- 信道对不同傅立叶分量的衰减不同，引起输出失真
- 信道常常有截止频率 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
- 实际使用时，可以接入滤波器，限制用户的带宽
- 通过信道的谐波次数越多，信号越逼真

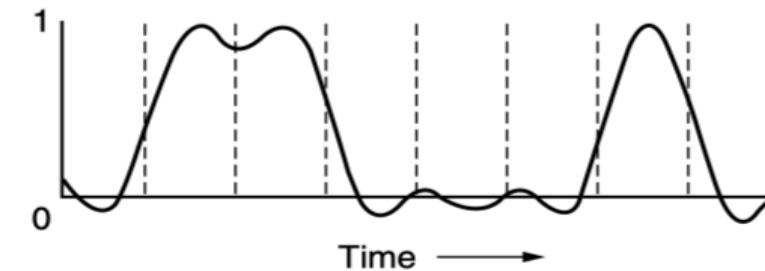
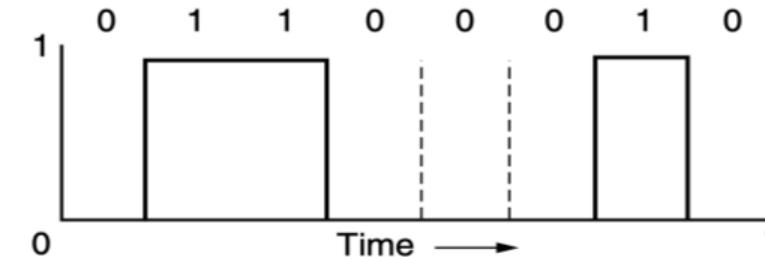


信道的最大数据传输速率

➤ 奈魁斯特定理

- 1924年，奈魁斯特(H. Nyquist)推导出无噪声有限带宽信道的最大数据传输率公式
- 最大数据传输率 = $2H\log_2 V$ (bps)
- 任意信号通过一个带宽为 H 的低通滤波器，则每秒采样 $2H$ 次就能完整地重现该信号，信号电平分为 V 级
- 例：无噪声的 3kHz 信道上，二进制传输速率不会超过 6000bps

在有噪声干扰的情况下传输率如何？
采样的信号电平数越多越好吗？





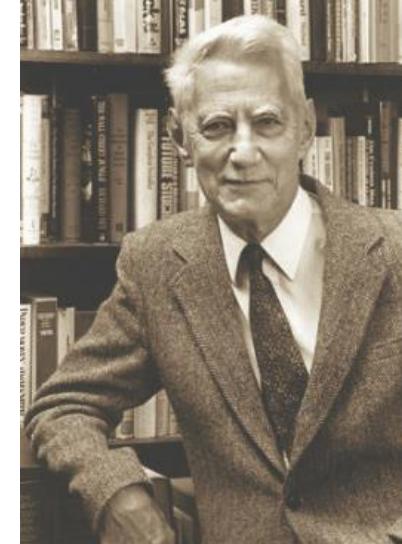
信道的最大数据传输速率

► 信噪比的提出

- 随机噪声出现的大小用信噪比来衡量：信号功率S与噪声功率N之比
- **信噪比： $10\log_{10}S/N$ ，单位：分贝**
- 电话系统的典型信噪比为40db

► 香农定理

- 带宽为 H 赫兹，信噪比为 S/N 的信道，最大数据传输率为： **$H\log_2(1 + S/N)$ (bps)**
- 与信号电平级数、采样速度无关
- 此式仅是上限，难以达到
- 例：对于 H=1MHz 的电话线，数据传输速率最高约为 13Mbps (无论如何采样)
- 逼近香农极限：ADSL 最高速率 12Mbps



香农 (Shannon, 1916—2001年) 是美国数学家、信息论的创始人，提出了信息熵的概念，为信息论和数字通信奠定了基础。1940 年在 MIT 获博士学位，1941 年进入贝尔实验室。21 岁就发表了一篇被许多人称为 20 世纪最具影响力的硕士学位论文《通信的数学理论》。

质量、能量和信息量



信息量

- 根据香农理论，一条消息包含信息的多少称为信息量
- 信息量的大小与消息所描述事件的出现概率有关
- 一条消息所荷载的信息量等于它所表示的**事件发生的概率** p 的倒数的对数

$$I = \log_a \frac{1}{p} = -\log_a p$$

通常用比特作为信息量的单位

a表示进制

a=2时，信息量I的单位为比特

✓ 得到信息的过程就是获得新知识的过程
✓ 概率信息是指一个随机事件发生之后，它带给人们的新知识，或者说是对原来该事件不定度的解除量；是指事物运动状态和状态变化方式的客观反映

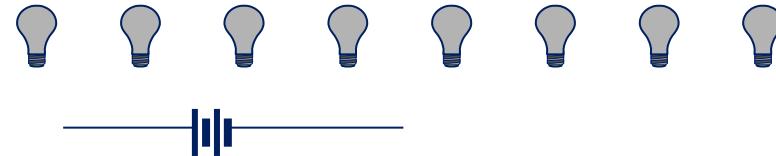
- 如消息表示的事件是必然事件(概率为1)，则该消息不含有任何信息量
- 如消息表示的事件根本不可能发生(概率为0)，则该消息含有无穷的信息量



信道的最大数据传输速率

举例：二元判断信息量

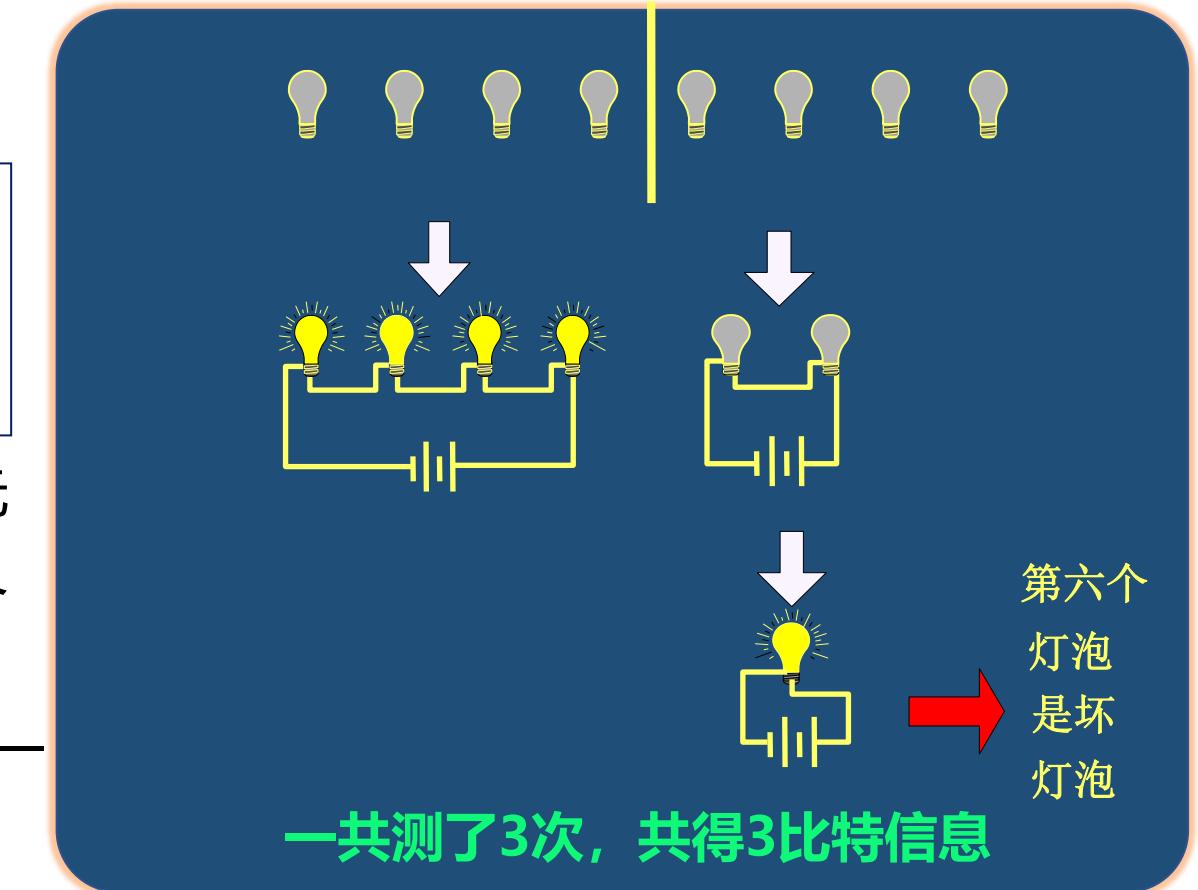
有8只灯泡，只知其中有1只灯丝已断，用1节电池来测，问只需测几次就可解除其不定度



每1次判断后我们可得到一个是/否信息，亦称二元信息。由于它是解除不定度的最小单位，由此定义出信息量的最小单位比特(bit = Binary Digits)。

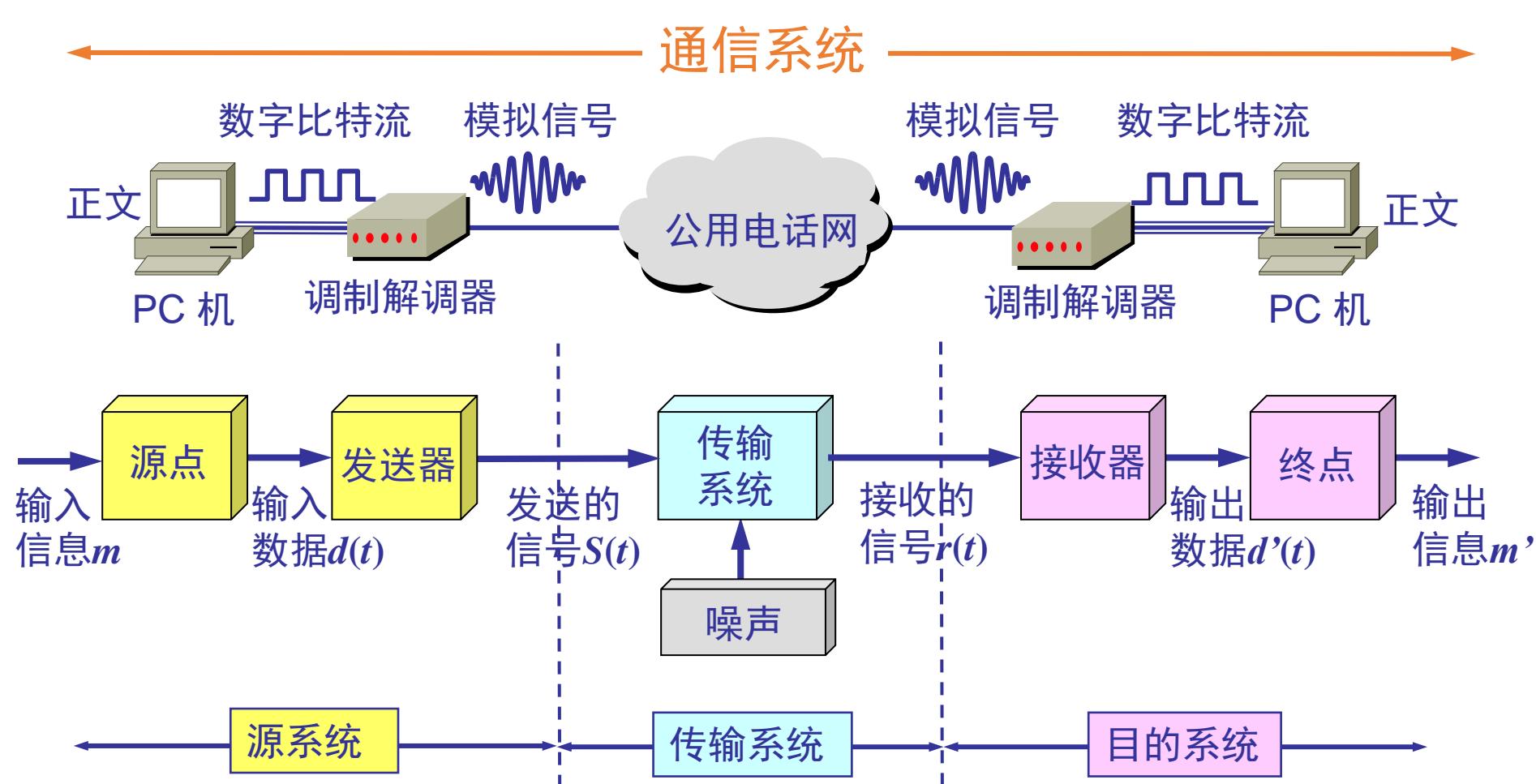
对于8只中任意一只灯泡都有可能断丝，因此这是一个等概率随机事件，故其概率为： $p(x) = \frac{1}{8}$

该事件不确定度的大小为： $-\log_2 p(x) = \log_2 8 = 3$ bit





数据通信系统模型

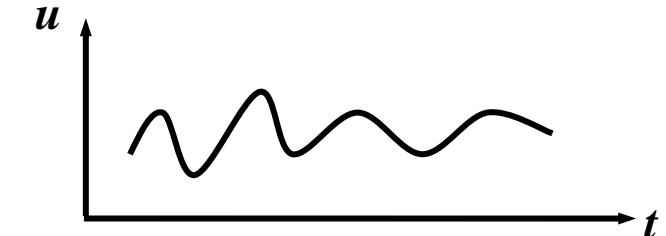


数据通信系统模型



➤ 模拟通信

- 以模拟信号来传送消息的通信方式称为模拟通信，而传输模拟信号的通信系统称为模拟通信系统

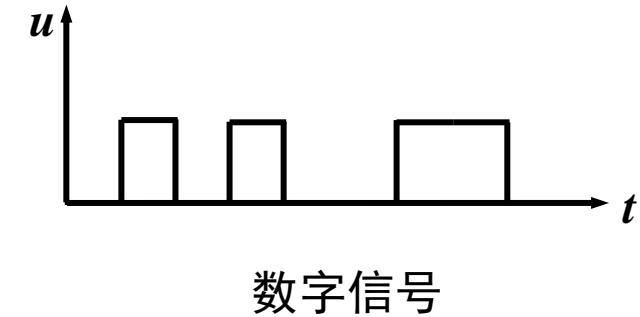


➤ 数字通信

- 以数字信号来传送消息的通信方式称为数字通信，而传输数字信号的通信方式称为数字通信系统

➤ 数模转换

- 模拟信号和数字信号在传输过程中可以相互变换，即A/D和D/A



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** 指数据在一个信道上按位依次传输的方式

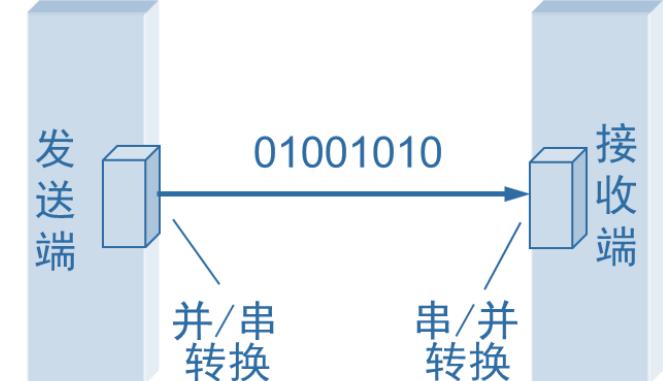
其特点是：

- 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

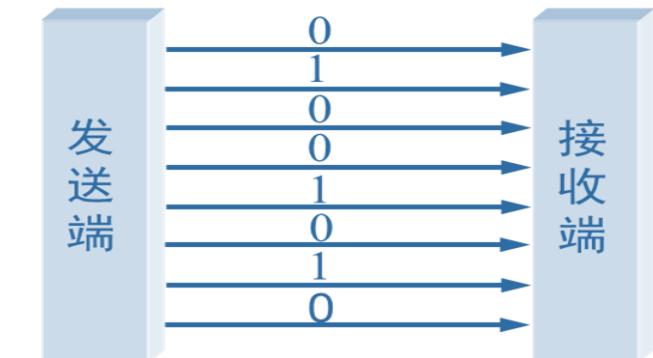
➤ **并行传输** 指数据在多个信道上同时传输的方式

其特点是：

- 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



串行传输



并行传输

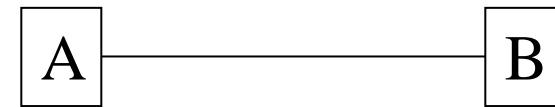


传输方式

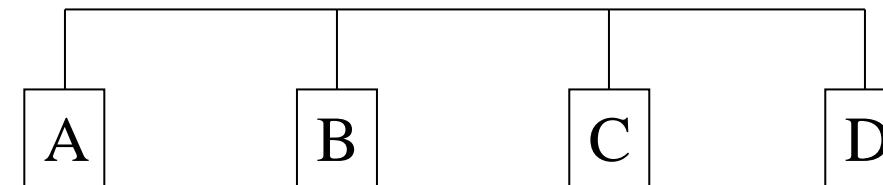
点到点传输/点到多点传输

➤ **连接方式** 为适应不同的需要，通信线路采用不同的连接方式

- 点到点传输



- 点到多点传输

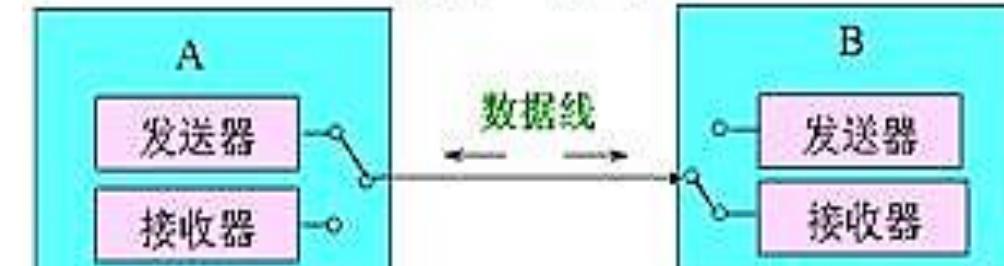


单工、半双工和全双工

- 按照数据信号在信道上的传送方向与时间的关系，传输方式可分为三类：
- **单工** 指两个站之间只能沿一个指定的方向传送数据信号
- **半双工** 指两个站之间可以在两个方向上传送数据信号，但不能同时进行，又称“双向交替”模式，发/收之间的转向时间为20~50ms
- **全双工** 指两个站之间可以在两个方向上同时传送数据信号



(a) 单工方式



(b) 半双工方式



(c) 全双工方式



➤傅立叶分析

- 任何一个周期为T的有理周期性函数 $g(t)$ 可分解为若干项（可能无限多项）正弦和余弦函数之和

➤信道的最大数据传输速率

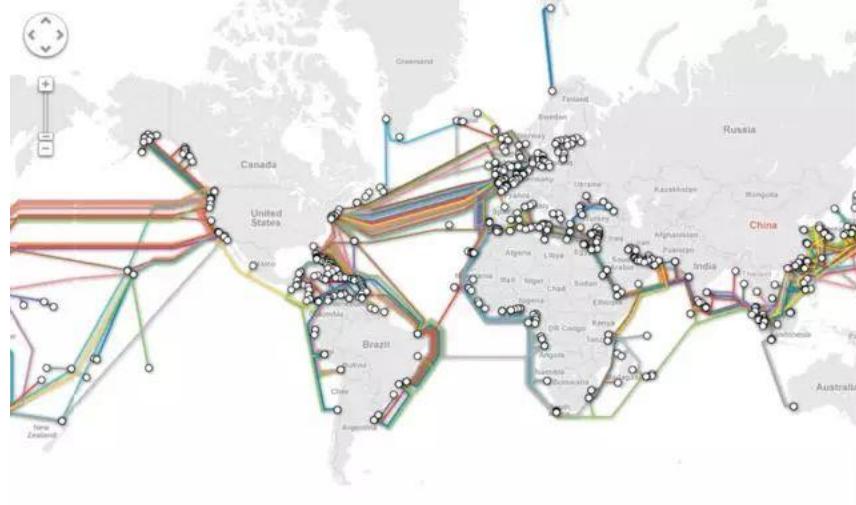
- 奈奎斯特定理：理想信道最大数据传输率 = $2H\log_2 V$ (bps)
- 香农定理：带宽为 H 赫兹，信噪比为 S/N 的任意信道的最大数据传输率为： $H\log_2(1 + S/N)$ (bps)

➤传输方式

- 数字/模拟，串行/并行，点到点/点到多点
- 单工/半双工/全双工



思考



实现跨大洋的高速连接?



空中的飞机连接到互联网?

如何选择网络传输的介质?



本节内容

3.1 物理层基本概念

3.2 数据通信基础

3.3 传输介质

3.4 卫星通信

3.5 数字调制与多路复用

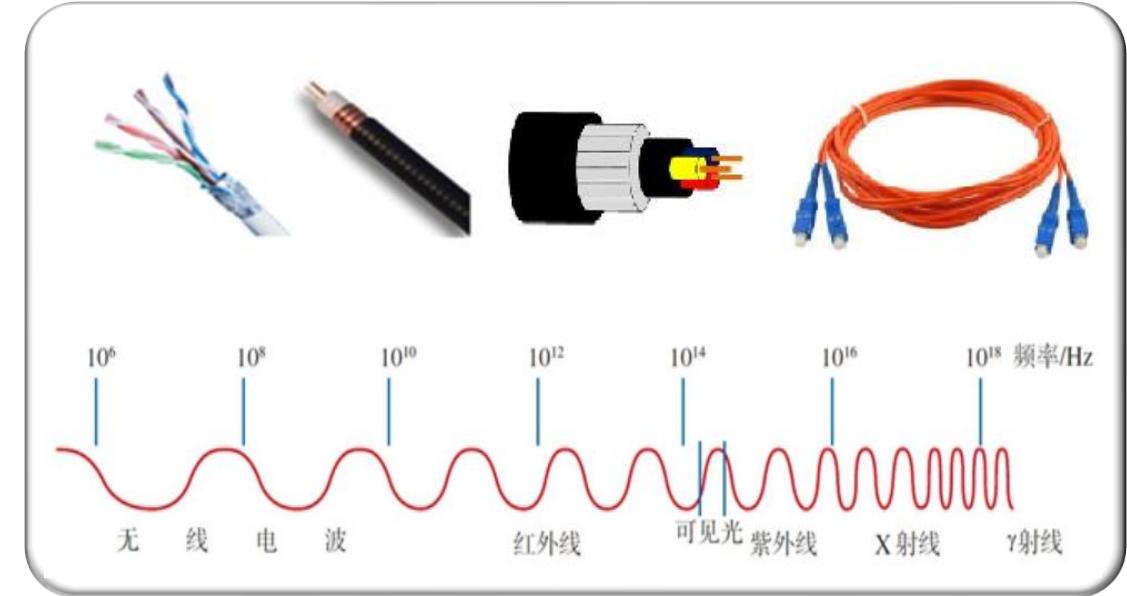
1. 传输介质分类
2. 导引性介质
3. 非导引性介质



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：

- **导引型传输介质** 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
 - 期望：低成本，低损耗，抗干扰，可弯曲...
- **非导引型传输介质** 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
 - 期望：低损耗，抗干扰，防遮挡，传播远...



最简单的传输介质？

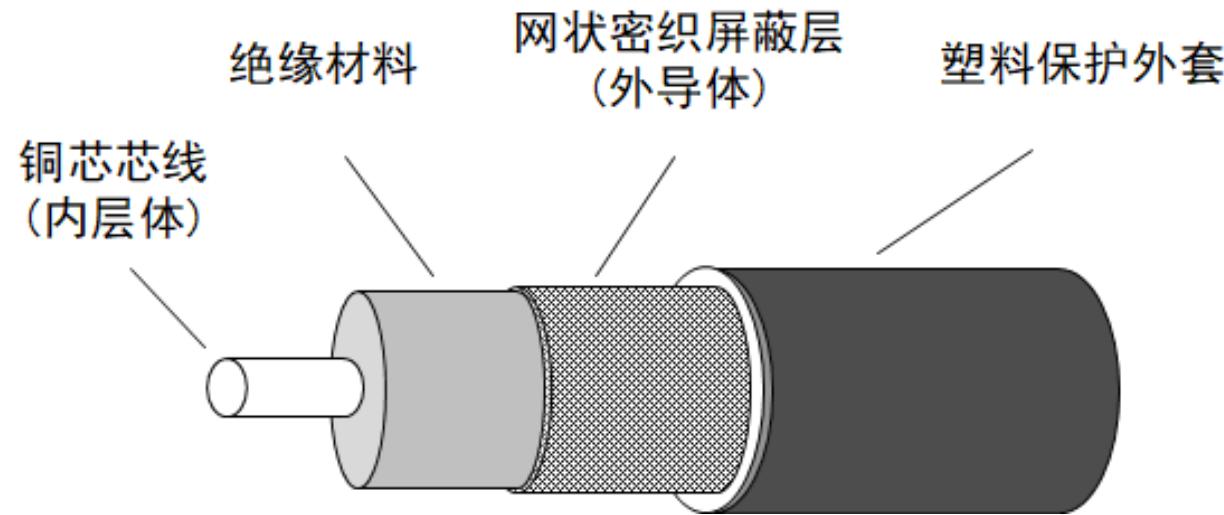


导引型传输介质-同轴电缆

同轴电缆

一起发明创造 “好的” 传输介质?

- 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



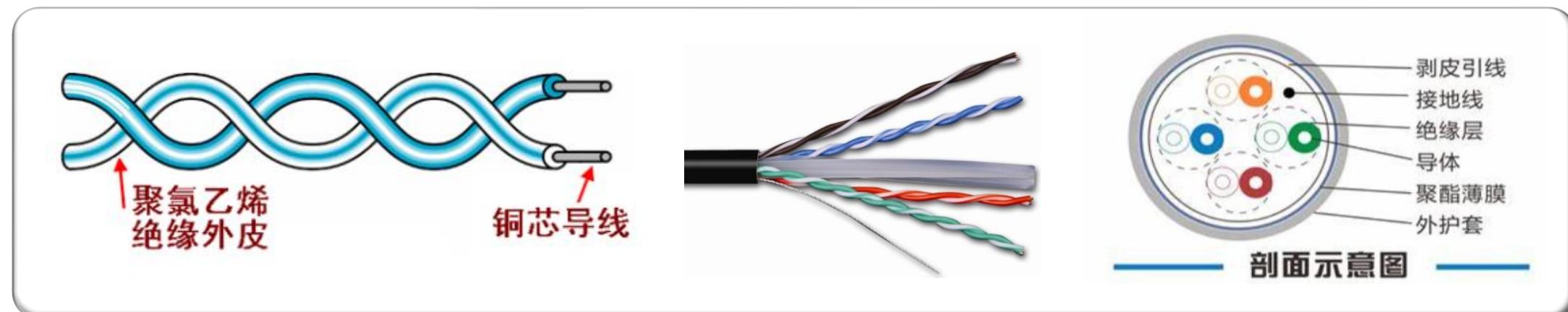
- 同轴电缆具有寿命长、容量大、传输稳定、外界干扰小、维护方便等优点



导引型传输介质-双绞线

双绞线

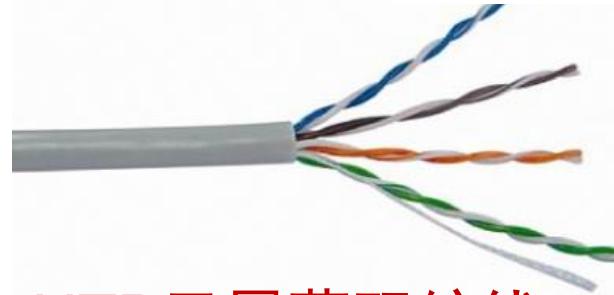
- 具有绝缘保护层的两根铜导线按一定密度绞缠在一起形成的线对
 - 通常多根双绞线再绞合成电缆状
- 影响双绞线的特性阻抗、衰减和近端串扰的因素
 - 绞合密度、扭绞方向和绝缘材料等



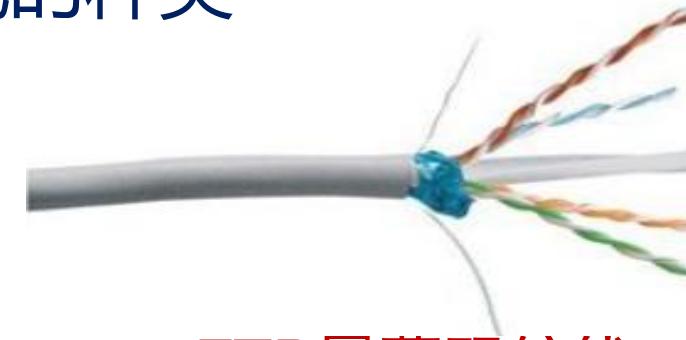


导引型传输介质-双绞线

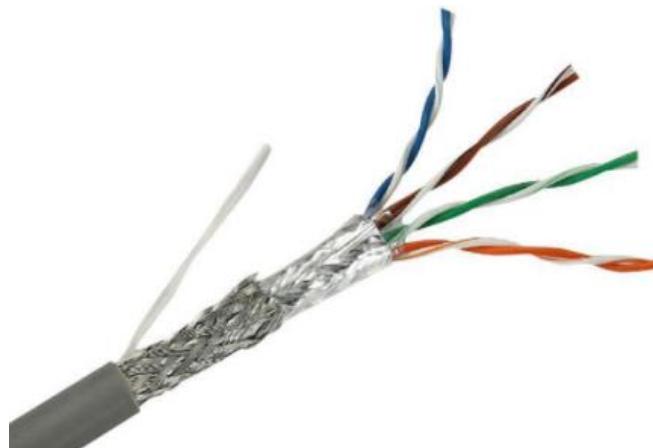
双绞线的种类



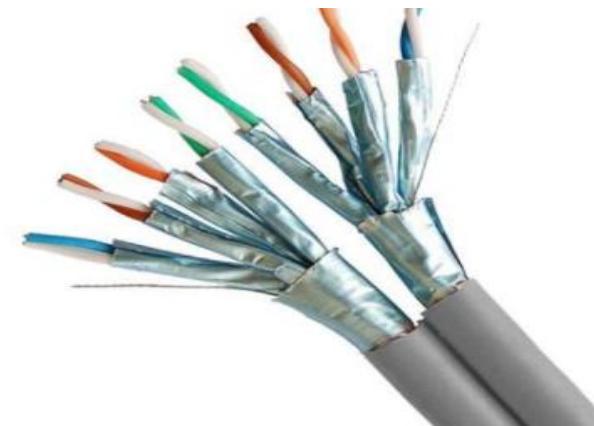
UTP无屏蔽双绞线



FTP屏蔽双绞线

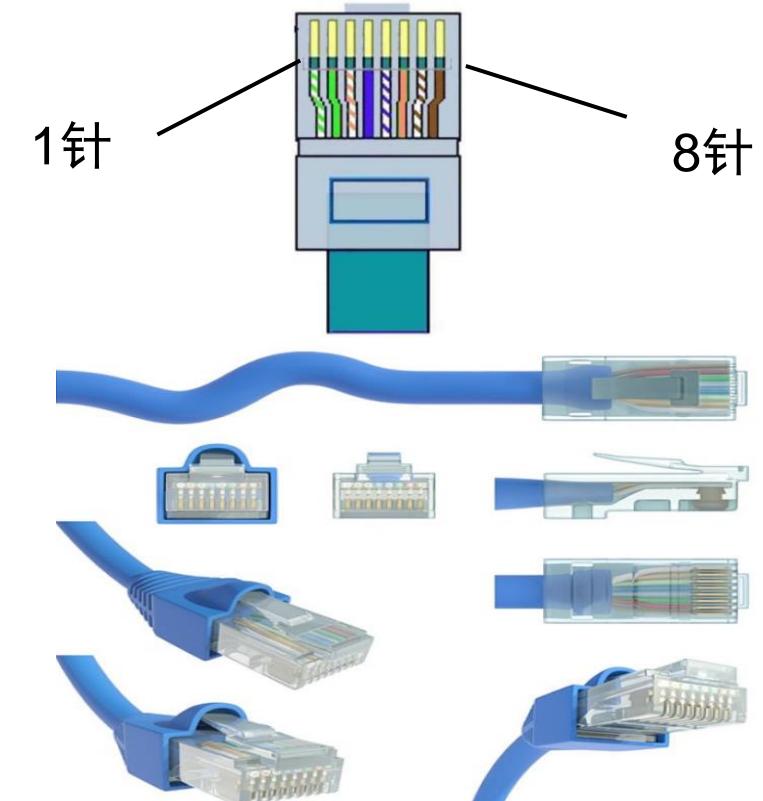


SFTP屏蔽金属箔双绞线



STP屏蔽双绞线

RJ45（网线水晶头）





导引型传输介质-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



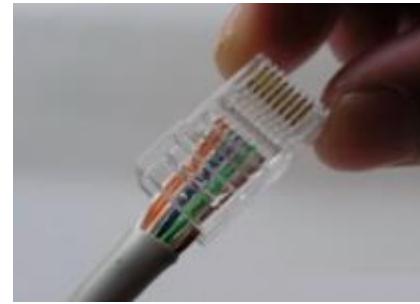


导引型传输介质-双绞线

- 双绞线通常制作作为网线
- 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



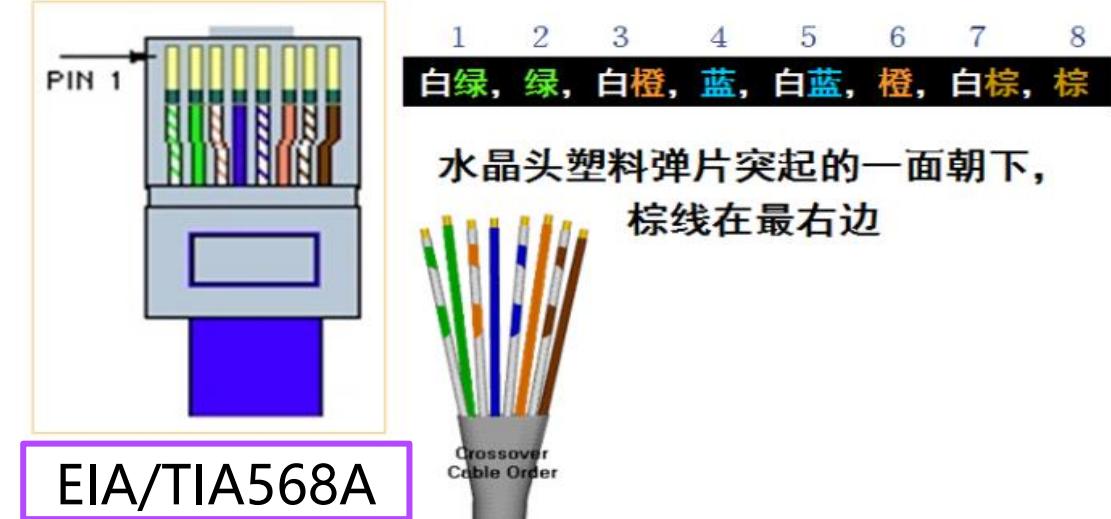
1、剪线



2、插入接头



3、压线钳压紧



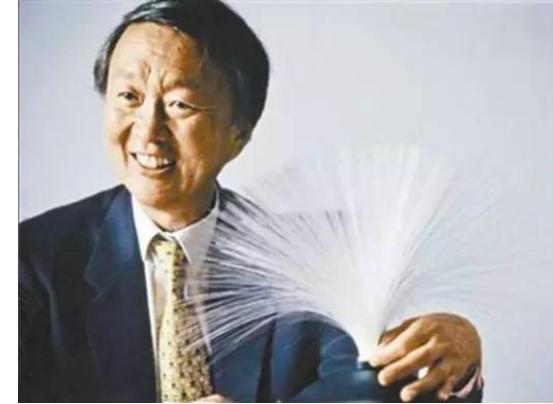
铜线传电信号?
一起发明创造：
“更好的” 传输介质



思考-怎样传输光

能否让光沿着线走，像
传输电信号一样传输光？

- 对传输光的材料有哪些要求？
 - 透明，可弯折，方便布线
 - 成本较低
- 如何减少光的损耗？
 - 将光限制在线路内
 - 损耗大小依赖什么
- 如何保护线路安全？
- 如何产生/感应光？



“光纤之父”
2009年诺贝尔物理学奖
炎黄子孙：高锟

被嘲笑的“异想天开”的“傻小子”
石破天惊的想法：用光纤来实现通讯？！
高锟：我在做一件未来会震惊世界的事情。
妻子：是吗？你会因为这件事得诺贝尔奖，是吗？

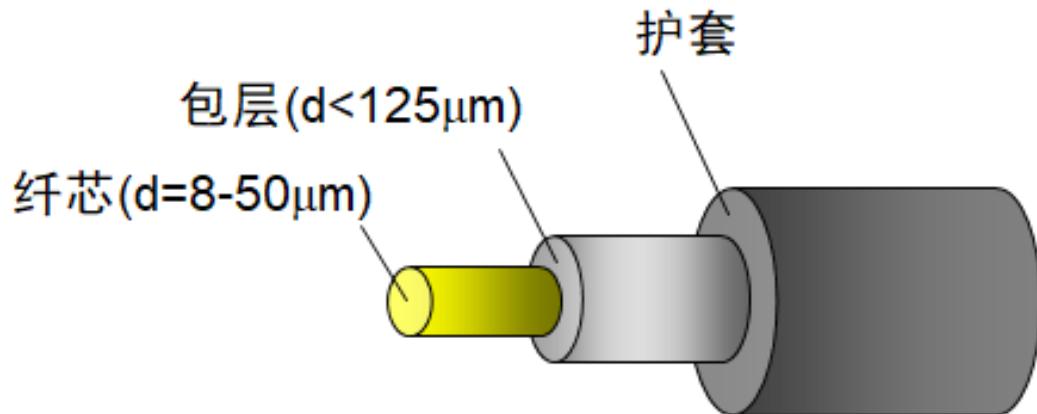
1966年发表论文《光频率介质纤维表面波导》，开创性地提出光导纤维应用于通信上的基本原理，描述了高信息量光通信所需绝缘性纤维的结构和材料特性，并在光通信工程和商业实现的早期发挥了主导作用



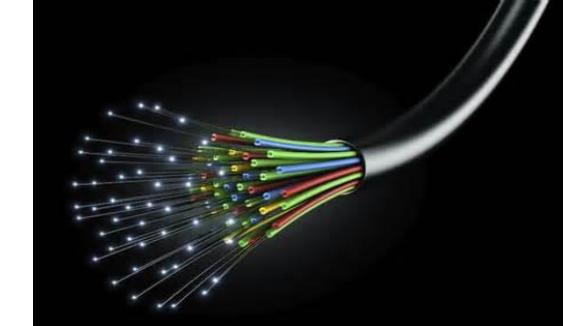
导引型传输介质-光纤

光纤

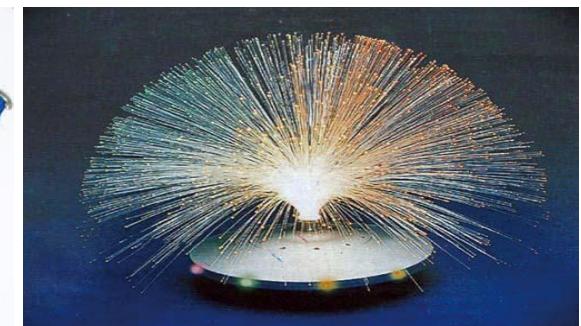
- 光纤通信已成为现代通信技术中的一个十分重要的领域
- 光纤是一种新型的光波导，结构一般是双层或多层同心圆柱体
 - 由纤芯、包层和护套组成



传输介质



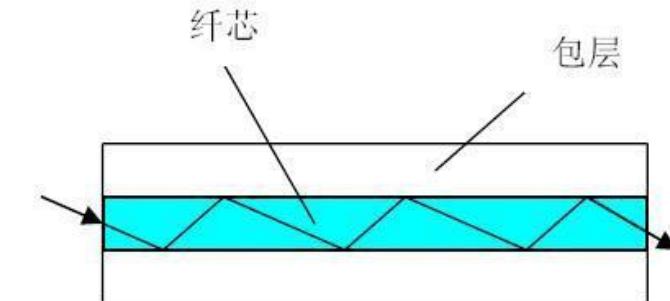
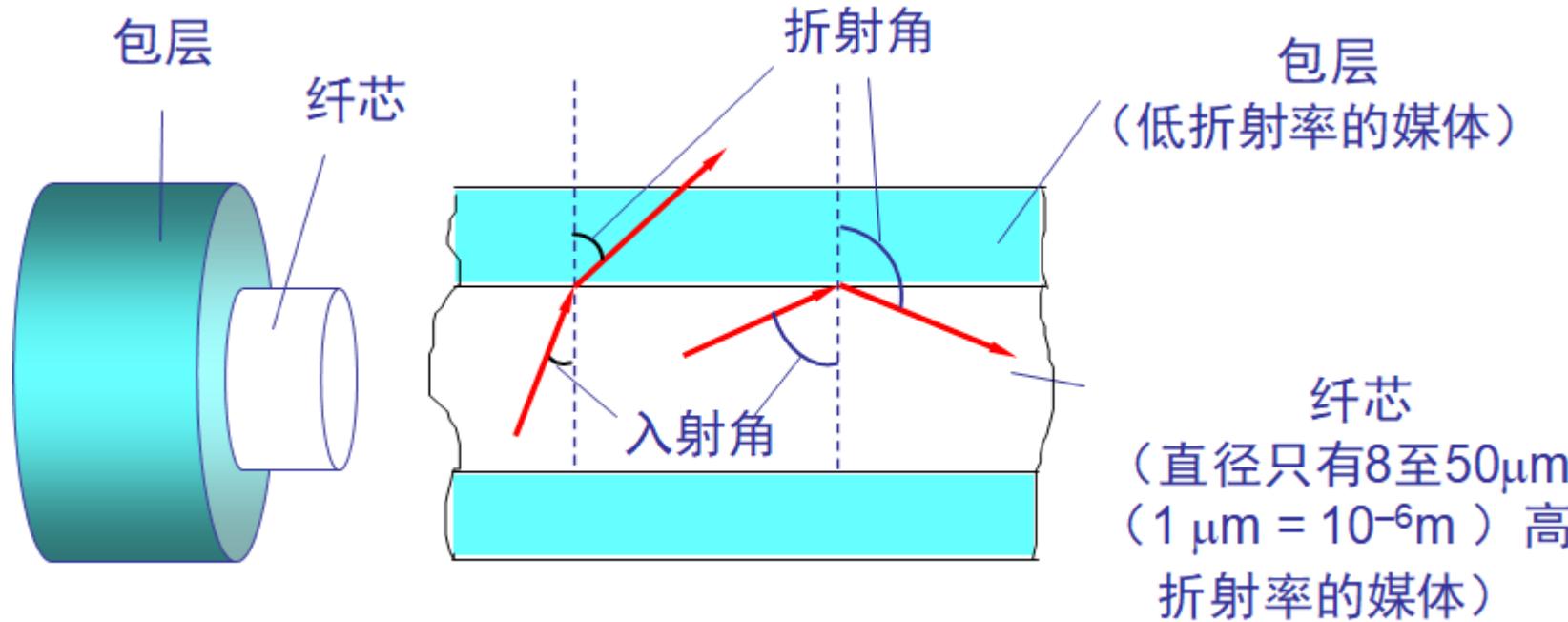
光交换机
(家用光猫)





导引型传输介质-光纤

光线在光纤中的折射



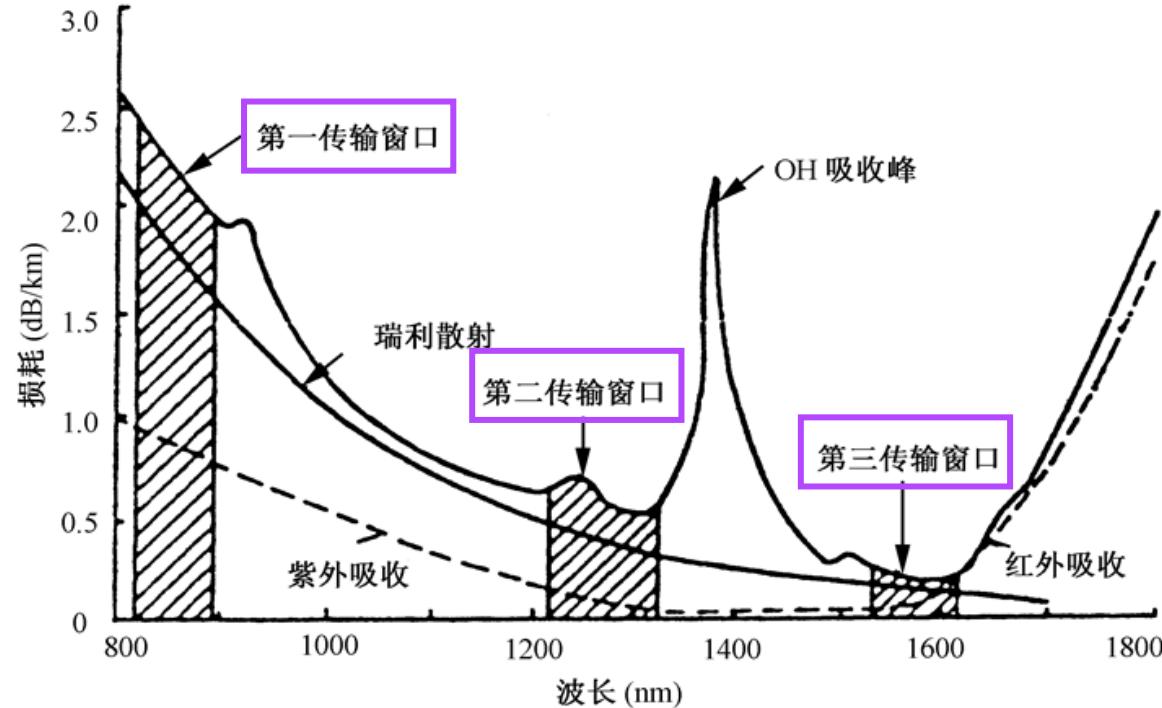
- 由于纤芯折射率大于包层的折射率，使得折射角大于入射角
- 当入射角足够大时，就会引起全反射，光线重新折回纤芯，从而不断向前传播
- 单模光纤与多模光纤



影响光纤传输质量的因素

- **损耗特性**表示光能在光纤中传输所受到衰减程度
- 光纤损耗分为
 - **固有损耗**指光纤材料的性质和微观结构引起的吸收损耗和瑞利散射损耗
 - **非固有损耗**指杂质吸收、结构不规则引起的散射和弯曲辐射损耗等

光纤损耗与波长的关系



在光纤通信中常用的三个波段的中心分别位于 $0.85 \mu\text{m}$ 、 $1.30 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$
这三个波段具有25000-30000GHz的带宽



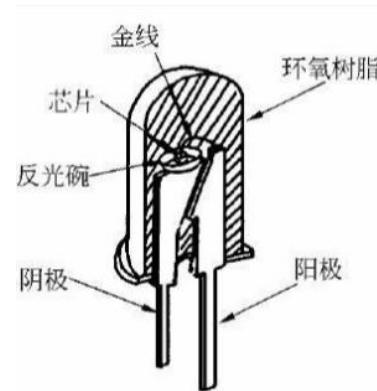
光纤通信系统的收发端器件

➤ 发送端的光源

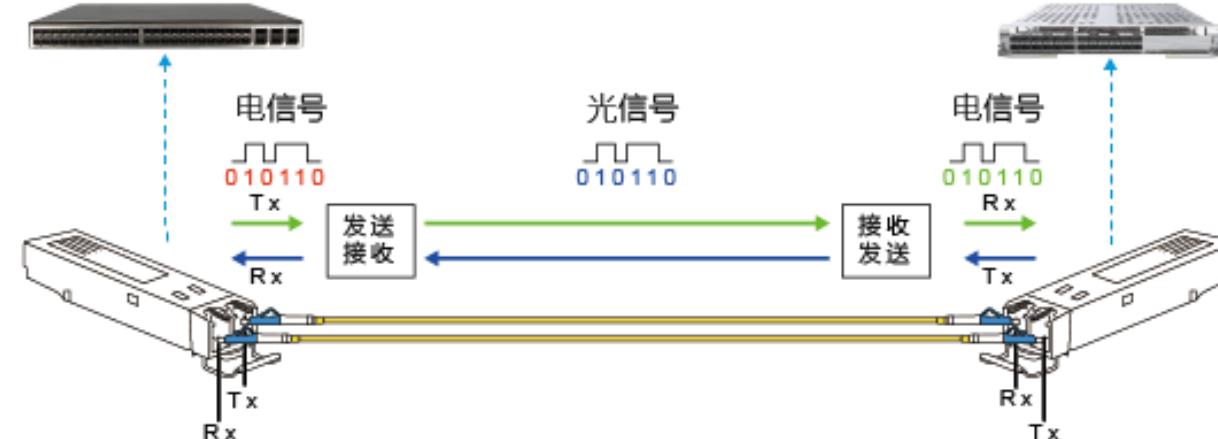
- **发光二极管**: 价格较低, 工作温度也较宽, 使用寿命长
- **注入激光二极管**: 发光效率高, 可支持较高的传输速率

➤ 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

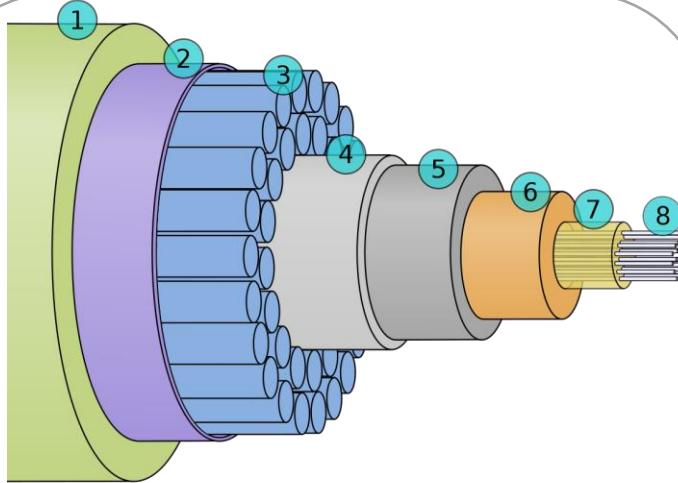


传输介质



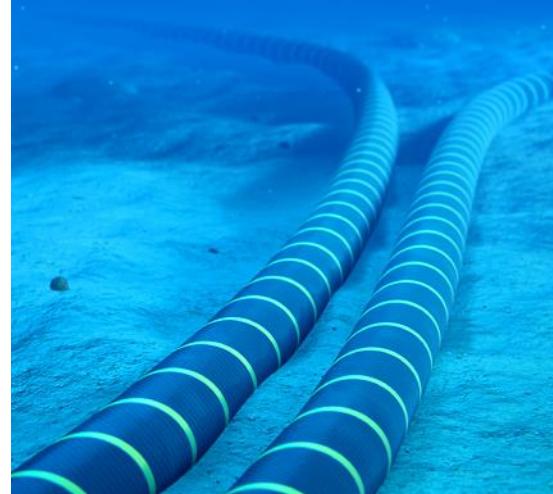


跨洋的信息高速路：海底光缆



典型海底光缆的结构解析：

1. 聚乙烯外皮
2. 聚酯树酯或沥青层
3. 钢绞线层
4. 铝制防水层
5. 聚碳酸酯层
6. 铜管或铝管
7. 石蜡，烷烃层
8. 光纤束





倒下的巨人：朗讯

➤ 贝尔实验室

- 9个诺贝尔奖、5个图灵奖
- 晶体管、电子数字计算机
- 连接美国和英国的海底电缆
- 发明非零色散光纤用于洲际和长距离通信

➤ 朗讯

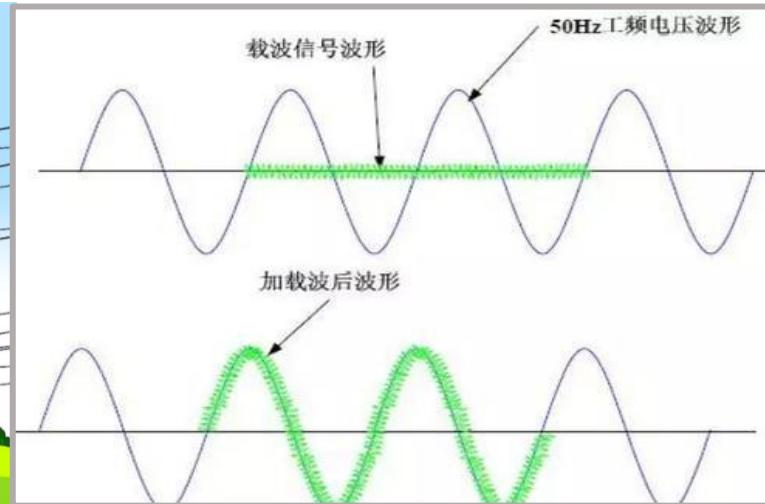
- 出身名门：从ATT拆分出来
- 1996年纽交所上市，2640亿美元
- 华尔街的期望：**大量收购，赊账卖货，16万员工**
- 2000年互联网泡沫破裂：**股价84美元->跌破1美元**





电力载波

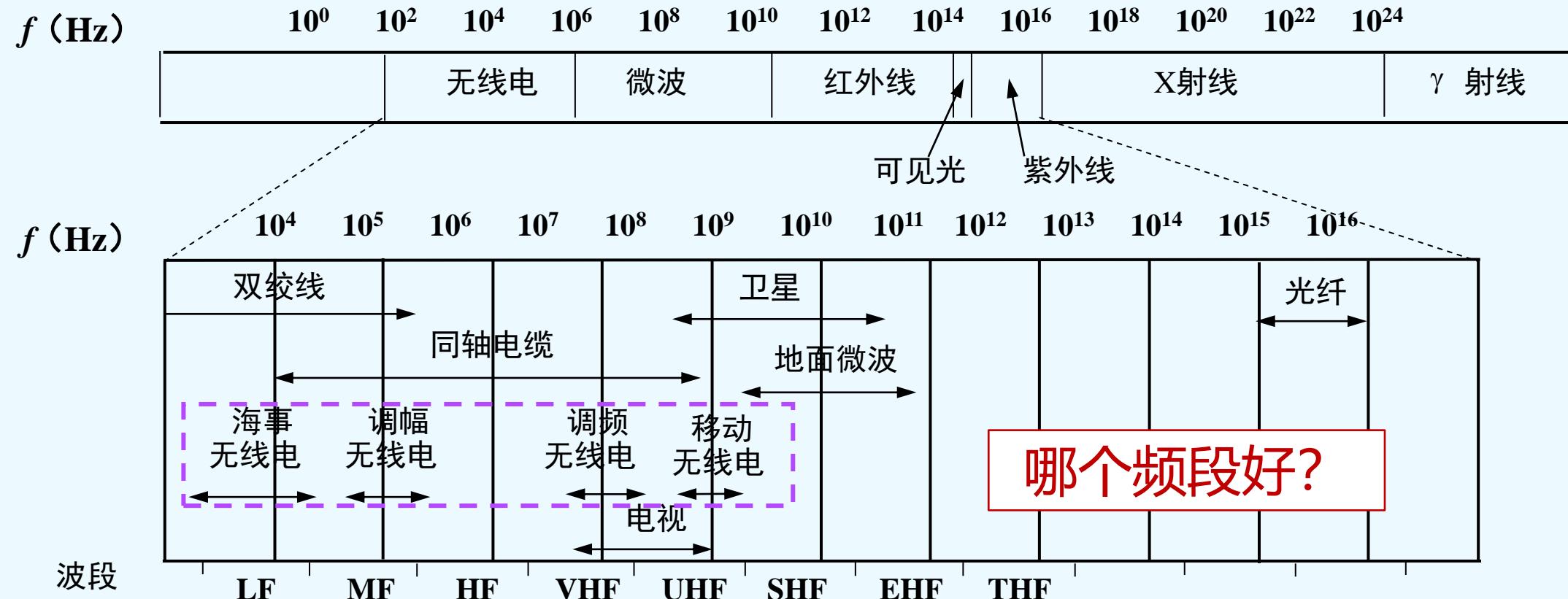
- **电力载波**是电力系统特有的通信方式
 - 利用现有电力线，通过载波方式将模拟或数字信号进行高速传输
- 优点：投资少、连接方便、传输速率高、安全性好和使用范围广
- 缺点：无法提供高质量的数据传输业务，如家庭电器产生的电磁波干扰等





非导引型传输介质

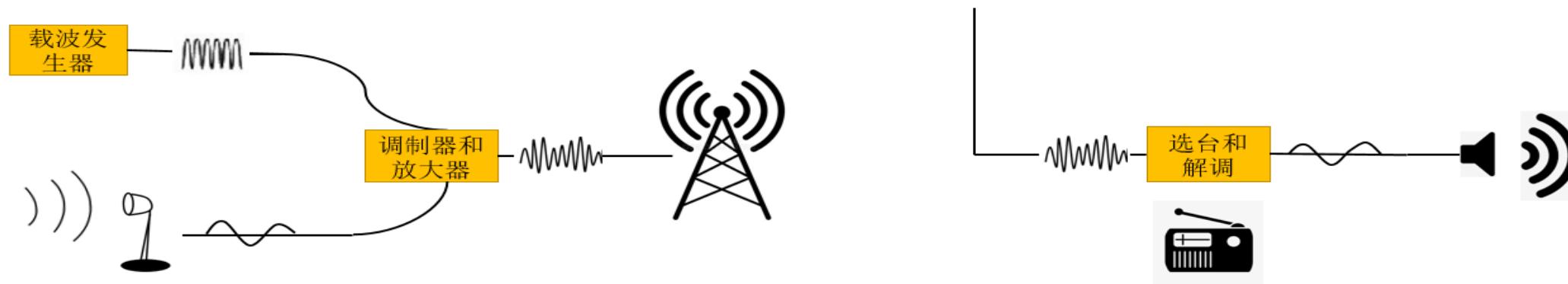
导引/非导引介质（电磁波）的频谱





短波传输（无线电波）

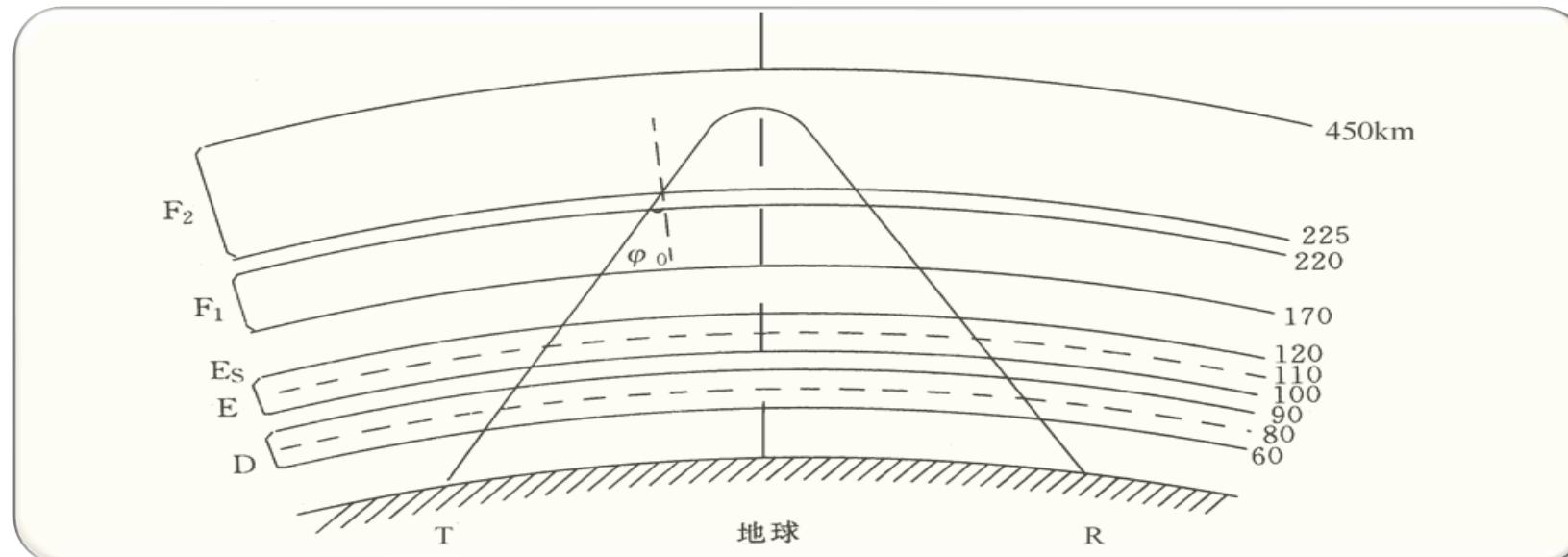
- 短波是指以波长为100m ~ 10m（或频率为3 ~ 30MHz）的电磁波
- 实用短波是3 ~ 30MHz
- 短波（频率为2MHz以下）
 - 可沿地球表面以地波形式传播（数百千米）
 - 主要以天波的形式靠大气层中的电离层反射传播（达数千 ~ 上万千米）





电离层的构成

- 电离层是离地面高度 $60 \sim 450\text{km}$ ，受太阳紫外线和X射线作用而存在的由离子、自由电子和中性分子、原子组成的一个区域
- 电离层由环绕地球处于不同高度的四个导电层组成：D、E、F₁和F₂

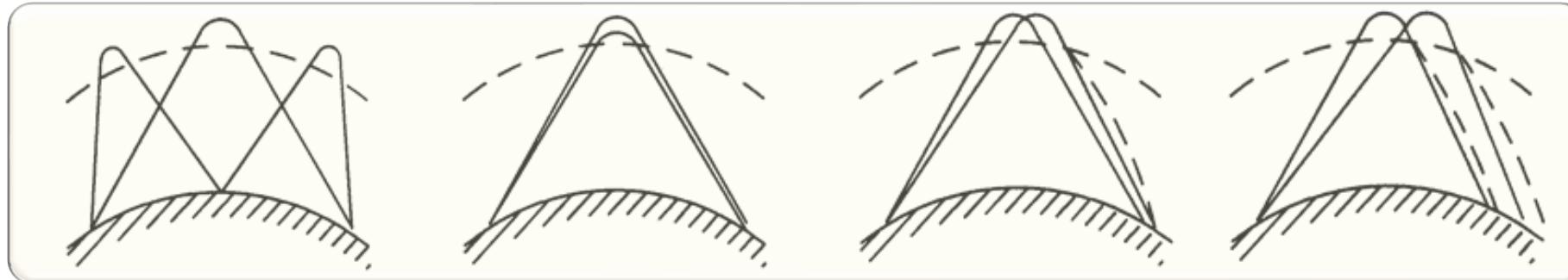


D层离地面约 $60 \sim 90\text{km}$
E层离地面约 $90 \sim 130\text{km}$
F₁层离地面约 $130 \sim 220\text{km}$
F₂层离地面约 220km 以上



- **多径传播** 短波电波通过若干条路径或者不同的传播模式由发信点到达收信点的长度不同，而引起由发信点到达收信点的时间不同的现象
- **多径时散** 指不同路径的时延差；与路径长度、工作频率、昼夜、季节等因素有关

引起多径时散的几种主要因素



(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

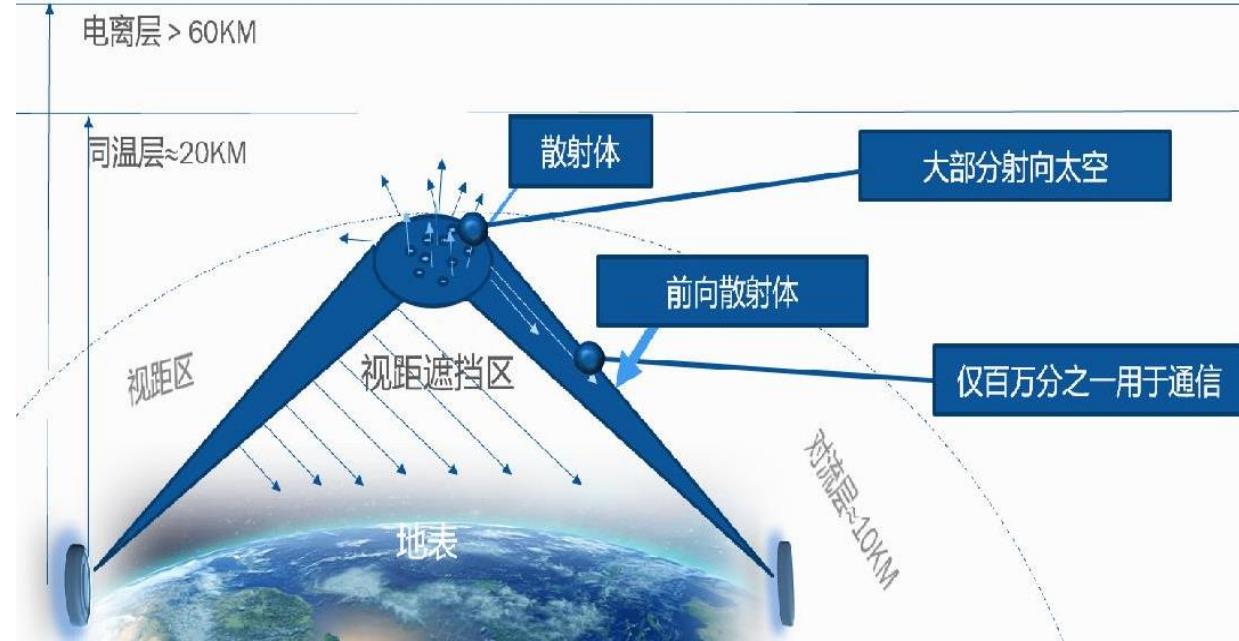
- 多径时散对数据通信的影响主要体现在码间干扰

- 为了保证传输质量，往往采用**限制数据传输速率**的措施



散射传输（无线电波）

- **散射通信**是指利用大气层中传输媒体的不均匀性对无线电波的散射作用进行的超视距通信
- 特点：可在被高山、湖泊等障碍物阻隔数百千米的用户之间实现超视距通信，适合于军事应用
- 散射通信包括**对流层散射通信**、**电离层散射通信**和**流星余迹散射通信**
- 对流层散射通信是军事通信中战略通信网和战术通信网中的主要传输手段





地面微波

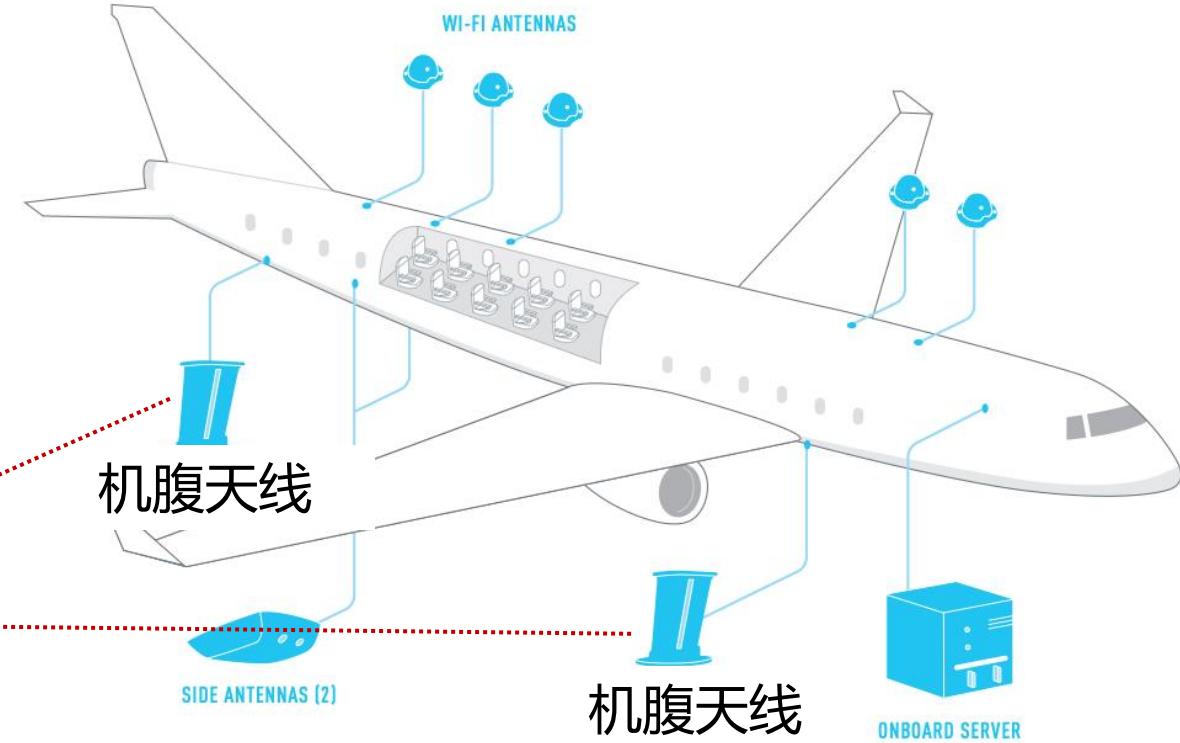
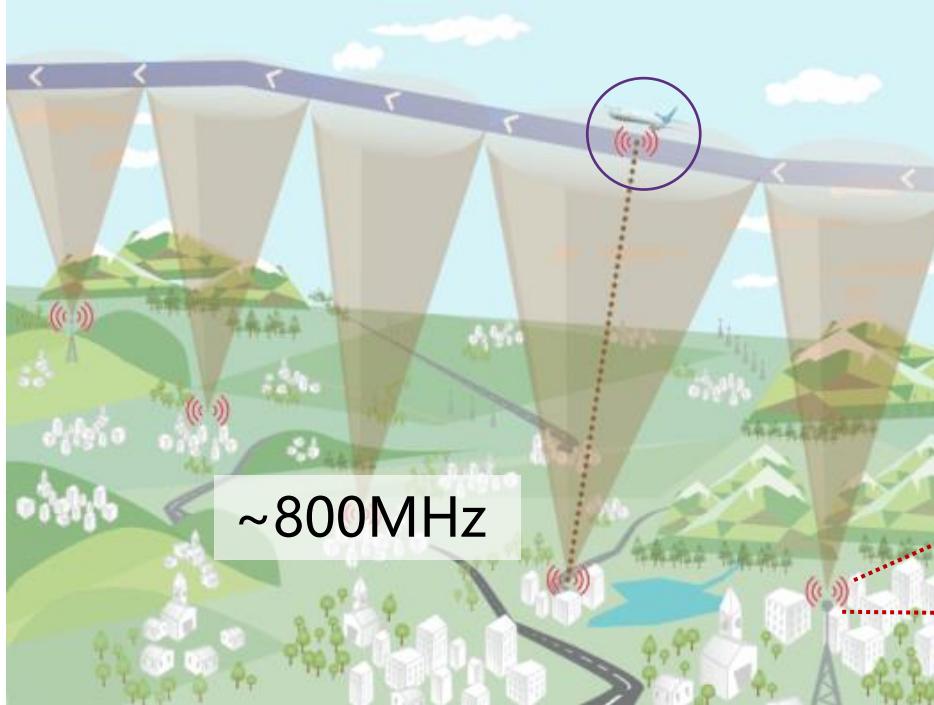
- **微波** 指在对流层的视距范围内，以波长为 $1m \sim 1mm$ （或频率为 $300MHz \sim 300GHz$ ）的电磁波进行信息传输
- **多路复用、射频工作和中继接力**是地面微波传输的三个最基本的工作特点



- 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 $40 \sim 60km$



飞机上网的方式之ATG



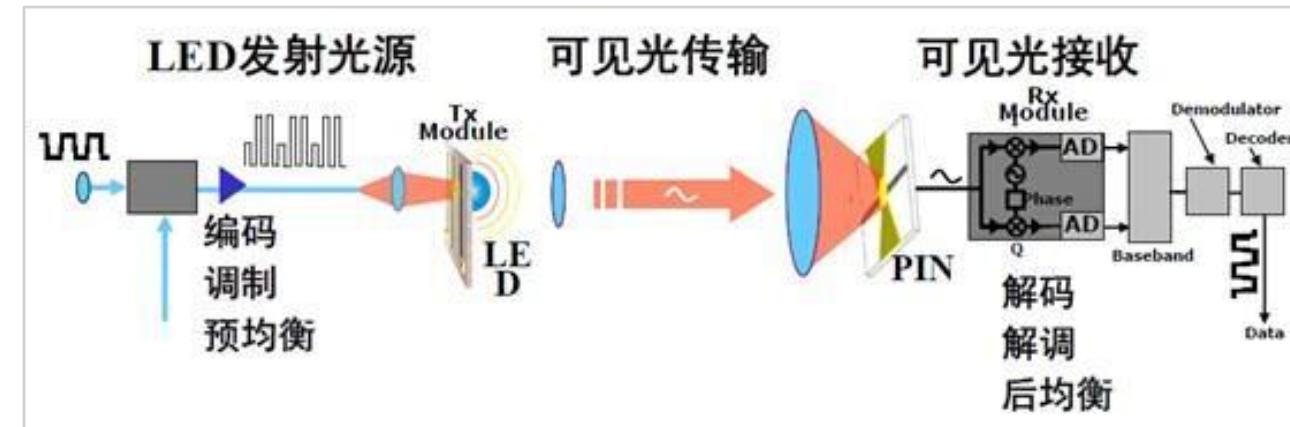
- 地面基站频率较低 (800MHz) , 峰值数据传输速率约 10 Mbps
- 飞越沙漠、海洋等无基站地区时 没有信号, 不可上网

Air to Ground (ATG)
方式的飞机上网



光波传输

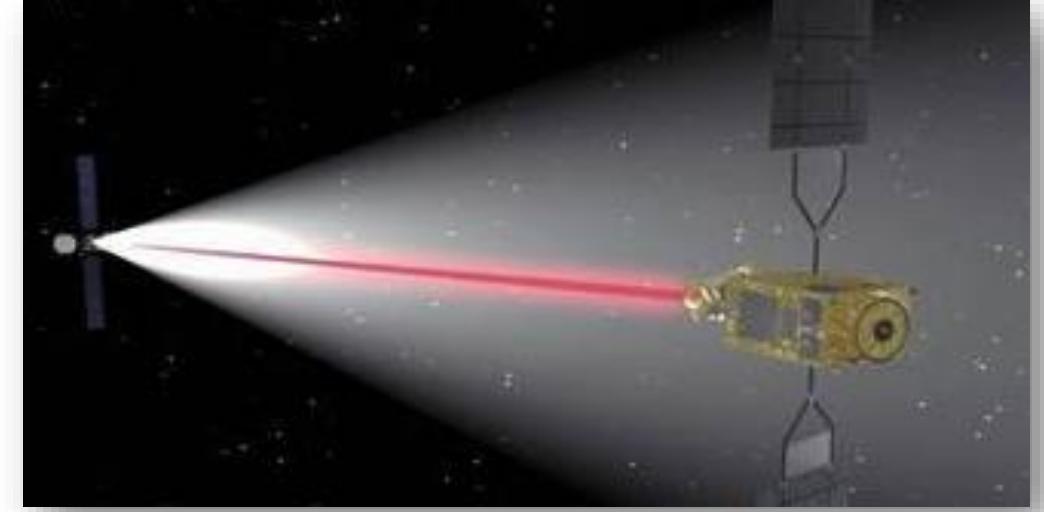
- 紫外线、可见光和红外线都属于光波的范畴。光波的波长在 $3 \times 10^2 \sim 60 \times 10^4 \mu\text{m}$ ，频率在 $3 \times 10^{12} \sim 5 \times 10^{16} \text{Hz}$
- 光波通信目前有三种分类
 - ① 按照光源特性的不同，分为激光通信和非激光通信
 - ② 按照传输媒体的不同，分为大气激光通信和光纤通信
 - ③ 按照传输波段的不同，光波通信分为可见光通信、红外线（光）通信和紫外线（光）通信





➤ 大气激光通信

- 具有抗干扰性好、设备轻便、保密性强、机动性
- 但使用时收、发天线相互对准较为困难，通信距离限于视距范围
- 易受气候影响，尤其在恶劣气候条件下会造成通信中断



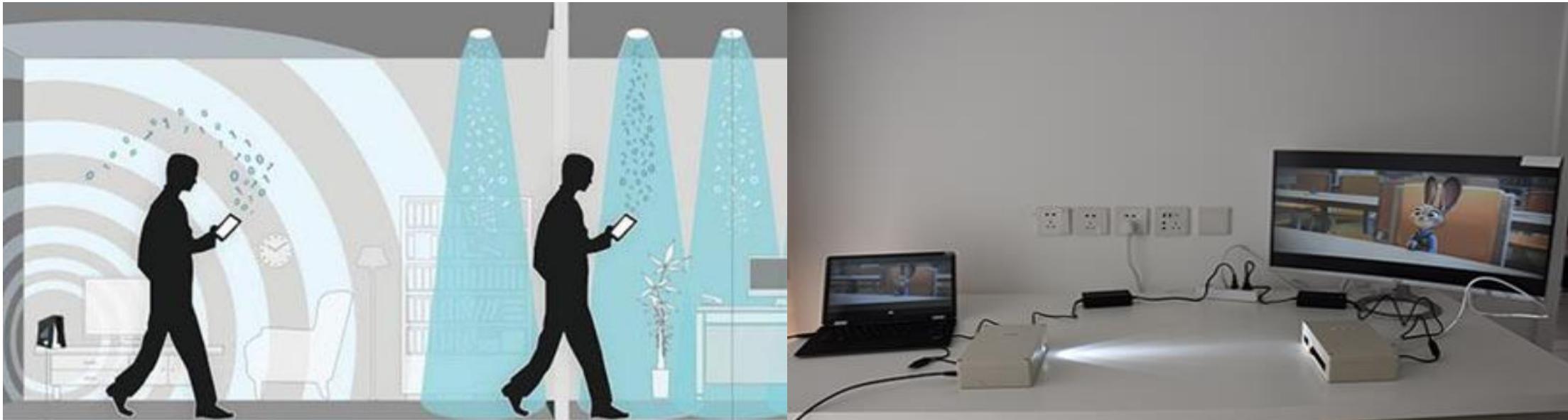
➤ 红外线通信

- 广泛应用于家电遥控器、手机、笔记本电脑等短距离通信领域
- 红外线传输不受无线电干扰，且使用不受国家无线电管理委员会的限制，具有方向性、便宜和易于制造等优点
- 红外线对非透明物体的透过性较差，导致传输距离受限制





- **可见光通信**是利用可见光波段的光作为信息载体，在空气中直接传输信号的通信方式
- **LED可见光通信**基于可见光发光二极管高速调制光波信号，利用光传输，并使用光电二极管等光电转换器件接收信号并获取数据
- 特点：抗复杂电磁干扰，多功能合一（照明、通信、传感、显示等）



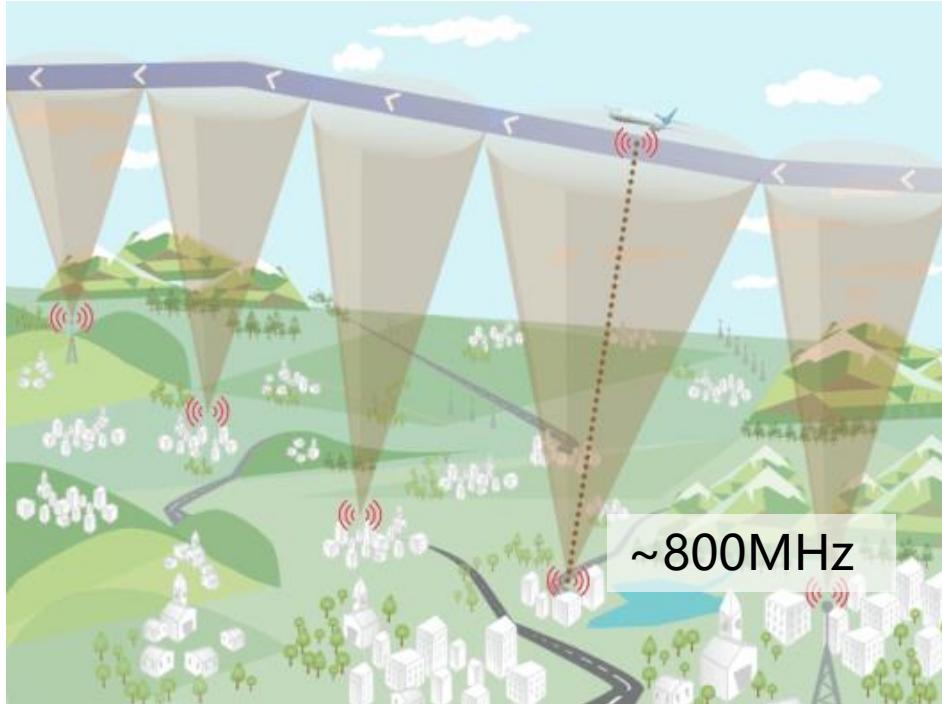


➤ 导引型传输介质

- 双绞线
 - 非屏蔽：成本较低，适用广；但可用距离较短
 - 屏蔽：比非屏蔽更快；但成本更高
- 同轴电缆：便于安装，短距离较常用；但长距离使用时成本高
- 光纤：带宽大，抗噪，可用距离长；但成本高，安装难，易损坏
- 电力载波：直接利用已有的电缆；但适用范围有限

➤ 非导引型传输介质

- 无线电波传输：距离远，基础设施较少；但保密性弱，易受干扰
- 光波传输：保密性强，抗干扰；但对准较为困难



➤ATG(Air to Ground)方式的缺点

- 频率较低 (约800 MHz)，峰值速度仅10Mbps，且由多用户共享使用
- 覆盖有限，海洋、沙漠等地难以部署地面基站

覆盖范围更广、更高速？



本节内容

3.1 物理层基本概念

3.2 数据通信基础

3.3 传输介质

3.4 卫星通信

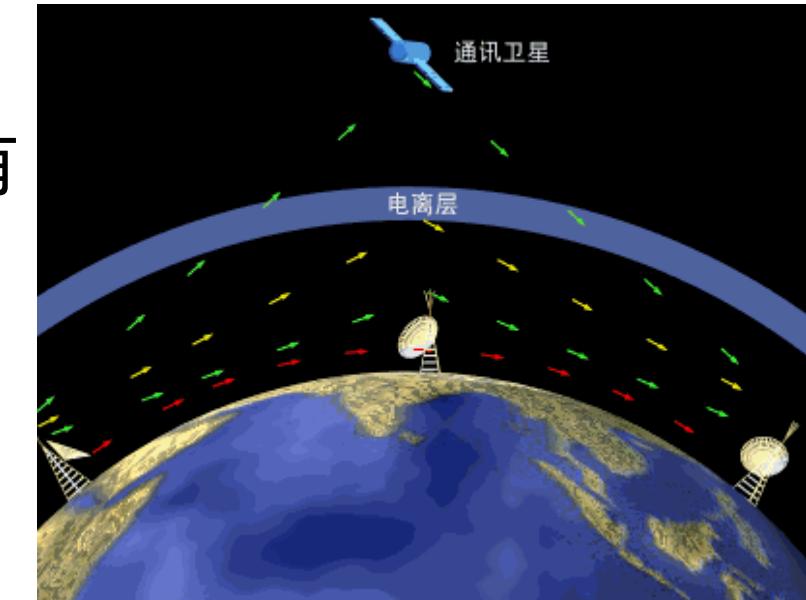
3.5 数字调制与多路复用

1. 卫星通信的基本概念
2. 典型的低轨道卫星系统



卫星通信的基本概念

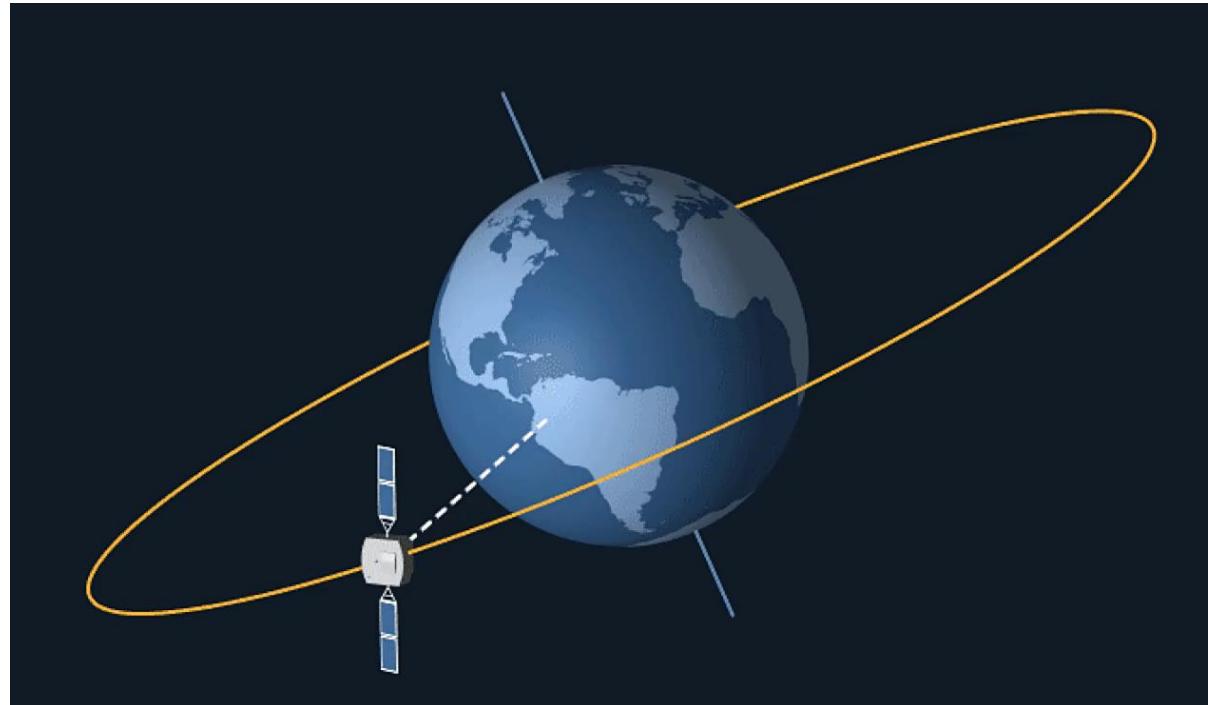
- **卫星通信**是指利用人造地球卫星作为中继站，转发或反射无线电波，在两个或多个地球站之间进行的通信。
- 卫星通信又是宇宙无线电通信形式之一，而宇宙通信是指以宇宙飞行体为对象的无线电通信，它有**三种形式**：
 - (1) 宇宙站与地球站之间通信；
 - (2) 宇宙站之间通信；
 - (3) 通过宇宙站转发/反射进行地球站间通信





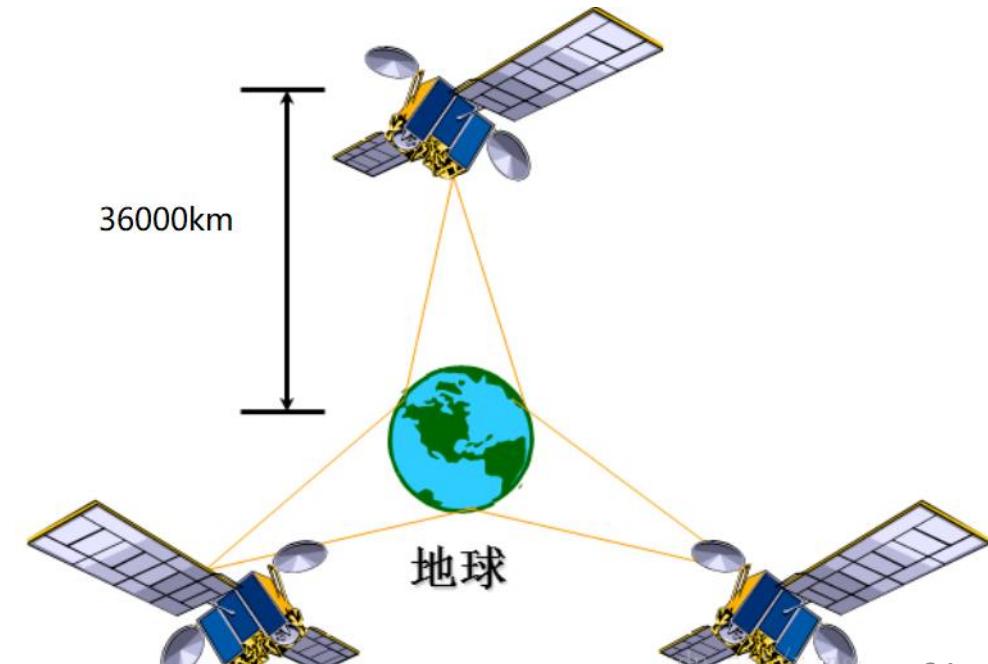
➤ 地球静止轨道

- 其绕地球运行周期为1恒星日，与地球自转同步



同步卫星的配置

- 同步卫星在赤道上空36000km，三颗相距120度的卫星就能覆盖整个赤道圆周





➤ 同步卫星通信的特点

- 传播时延长，从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 (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



➤ 同步卫星通信的缺点

- 传输时延大
- 高纬度地区难以实现卫星通信
- 为了避免各卫星通信系统之间的相互干扰，**同步轨道的星位**是有一点限度的，不能无限制地增加卫星数量
- 太空中的日凌现象和星食现象会中断和影响卫星通信

低时延卫星互联网

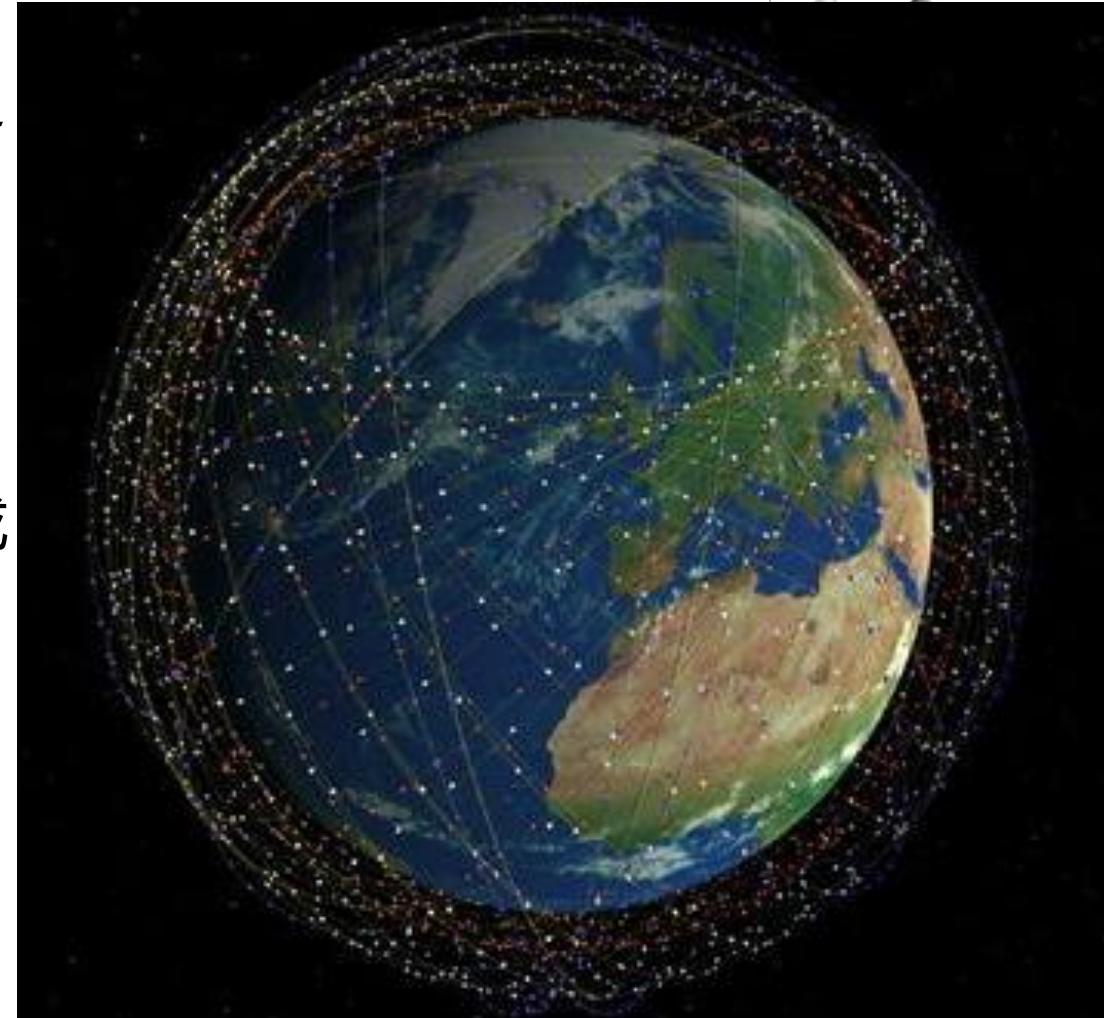
敢想敢干！



典型的低轨道卫星系统 (LEO)

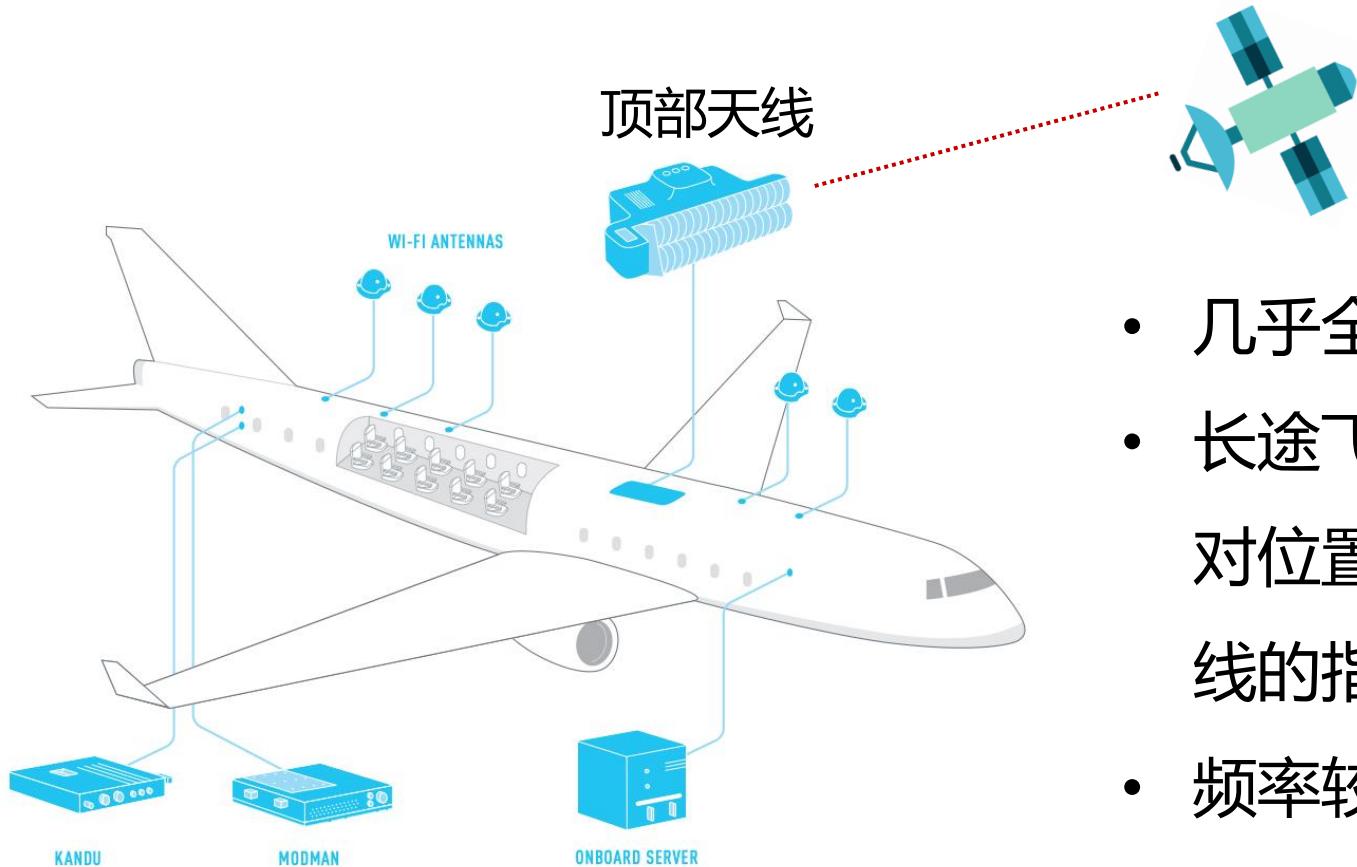
➤ SpaceX Starlink “星链”

- 2015年，马斯克宣布SpaceX要将约1.2万颗通信卫星发射到轨道，称为“星链”（Starlink）
- 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
- 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9月，SpaceX发射了51颗1.5版本的新卫星进入轨道，已发射卫星数超过1790
- 目前星链卫星互联网服务用户已超过14万，用户可以达到150 Mb/s，延迟在20ms到40ms





飞机上网的方式之卫星



- 几乎全球可用，摆脱基站限制
- 长途飞行中，顶部天线和不同卫星的相对位置发生变化，需要不断调节顶部天线的指向
- 频率较高（几十 GHz），数据传输速率峰值在 30 至 100 Mbps 之间

飞机借助卫星上网



小结：卫星通信

➤ 基本概念

- 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
- 特点1：覆盖范围广，接收设备较为便携
- 特点2：传播时延长，传播损耗大，受大气层影响大

➤ 同步卫星通信（高轨道）

➤ 典型的低轨道卫星通信系统：Starlink



本节内容

3.1 物理层基本概念

3.2 数据通信基础

3.3 传输介质

3.4 卫星通信

3.5 数字调制与多路复用

1. 基带传输
2. 通带传输
3. 频分复用
4. 时分复用与
统计时分复用
5. 码分复用



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移其频谱，传输方式可分两类：

➤ 基带传输

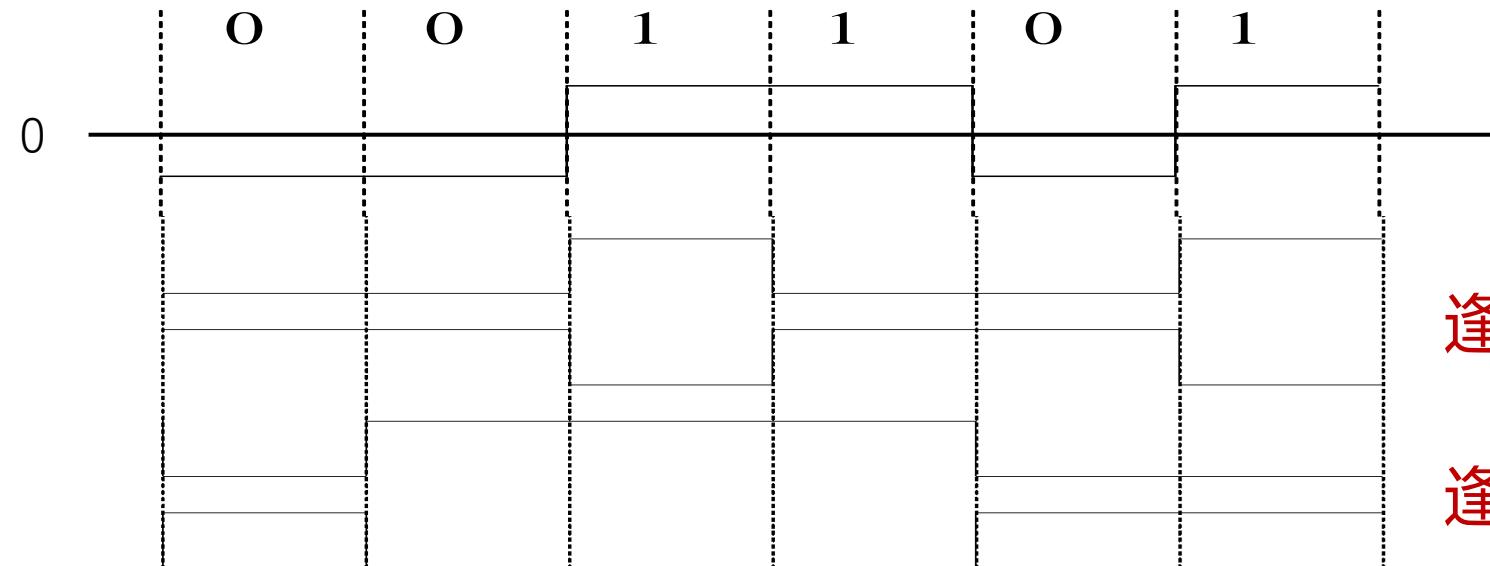
- 指未对载波调制的待传信号称为基带信号，它所占的频带称为基带。基带传输，指一种不搬移基带信号频谱的传输方式
- 基带传输是一种最简单最基本的传输方式，一般用低电平表示“0”，高电平表示“1”
- 适用范围：低速和高速的各种情况
- 限制：因基带信号所带的频率成分很宽，所以对传输线有一定要求

➤ 频带传输

- 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



- 研究数据在信号传输过程中如何进行编码(变换)
- 不归零制码 (NRZ: Non-Return to Zero)
 - 原理: 用两种不同的电平分别表示二进制信息 “0”和 “1”, 低电平表示 “0”, 高电平表示 “1”
 - 缺点: 难以分辨一位的开始和结束, 发送方和接收方必须有时钟同步



问题怎么办?

逢 “1” 变化NRZ

逢 “0” 变化NRZ

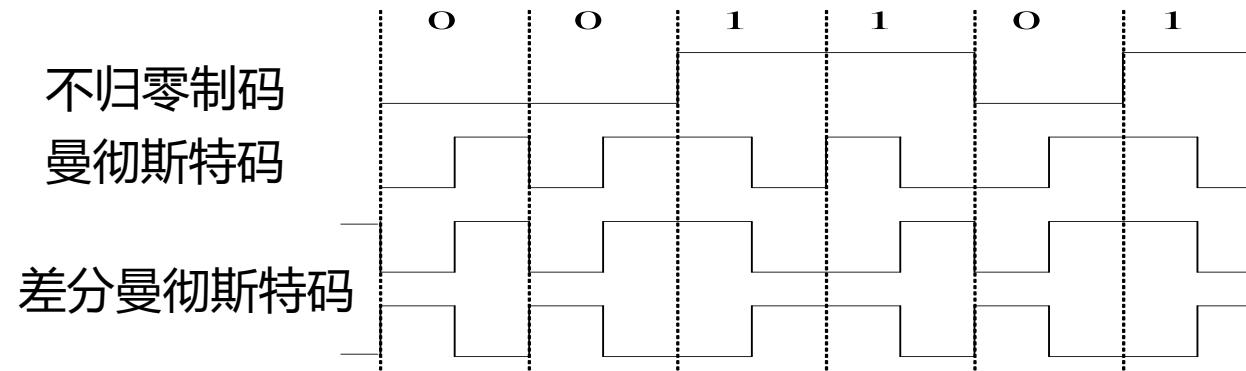


➤ 曼彻斯特码 (Manchester) , 也称相位编码

- 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。每位中间的跳变即可作为数据, 又可作为时钟, 能够自同步

➤ 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





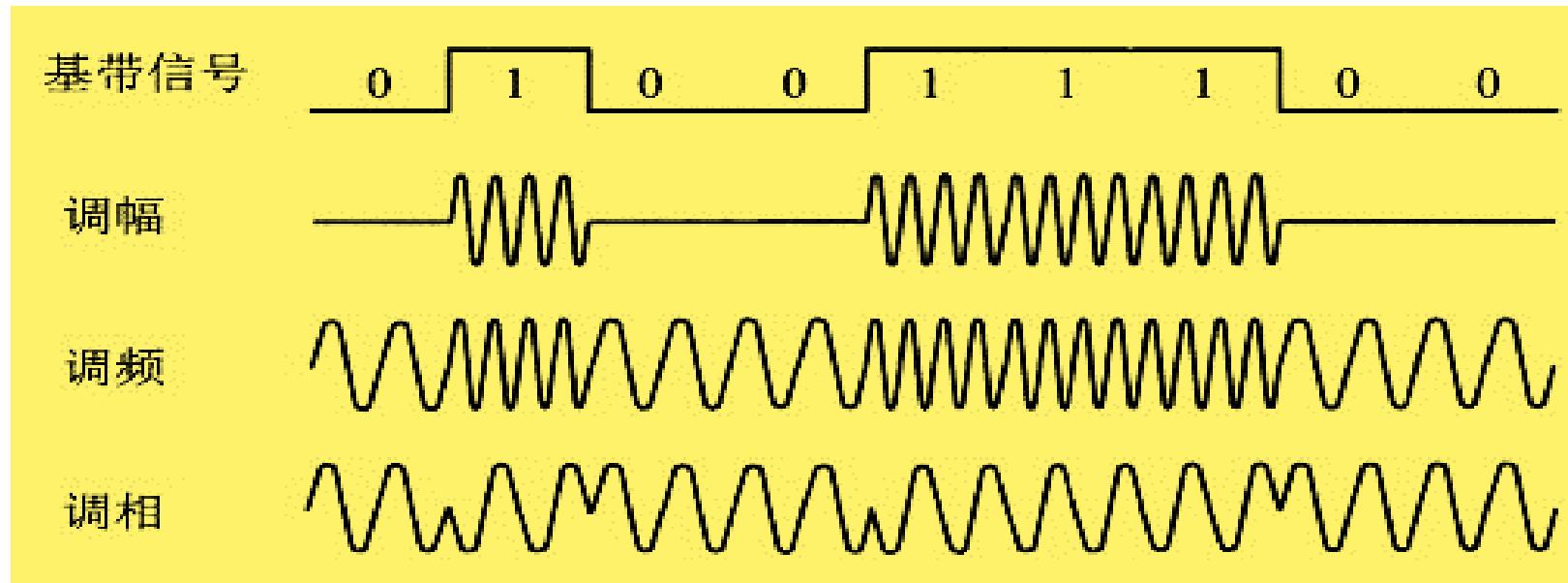
➤数字数据的模拟传输，也称频带传输

- 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)



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

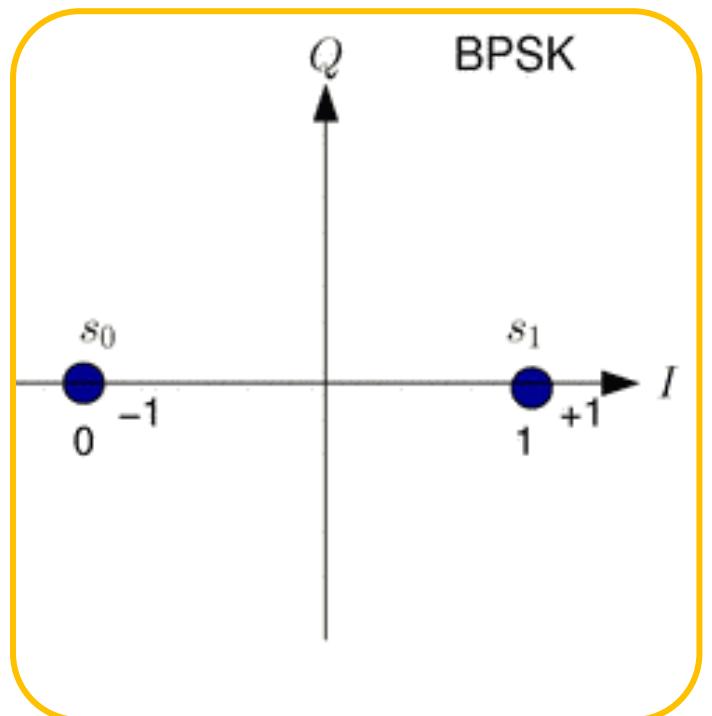
- 幅移键控法（调幅） Amplitude-shift keying (ASK)
 - 幅移就是把频率、相位作为常量，而把振幅作为变量
- 频移键控法（调频） Frequency-shift keying (FSK)
 - 频移就是把振幅、相位作为常量，而把频率作为变量
- 相移键控法（调相） Phase-shift keying (PSK)
 - 相移就是把振幅、频率作为常量，而把相位作为变量



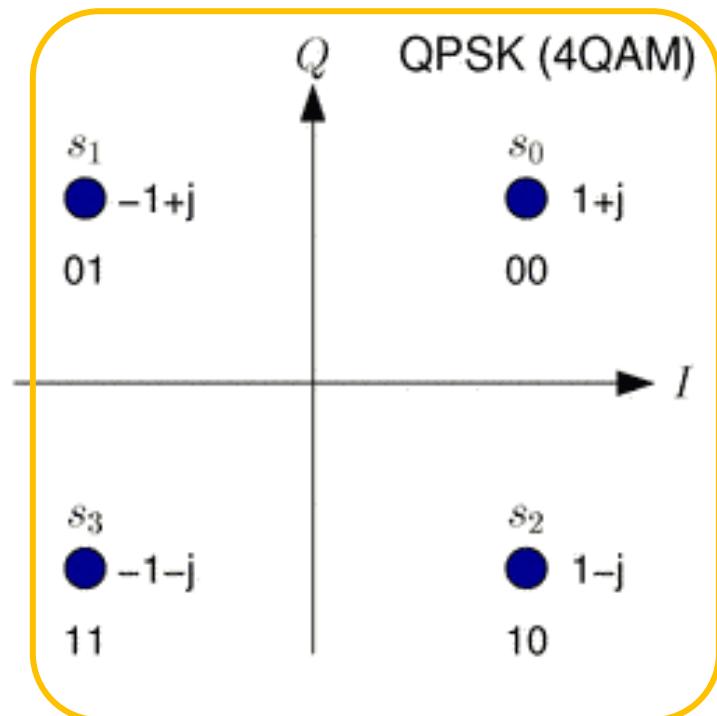


频带传输调制技术

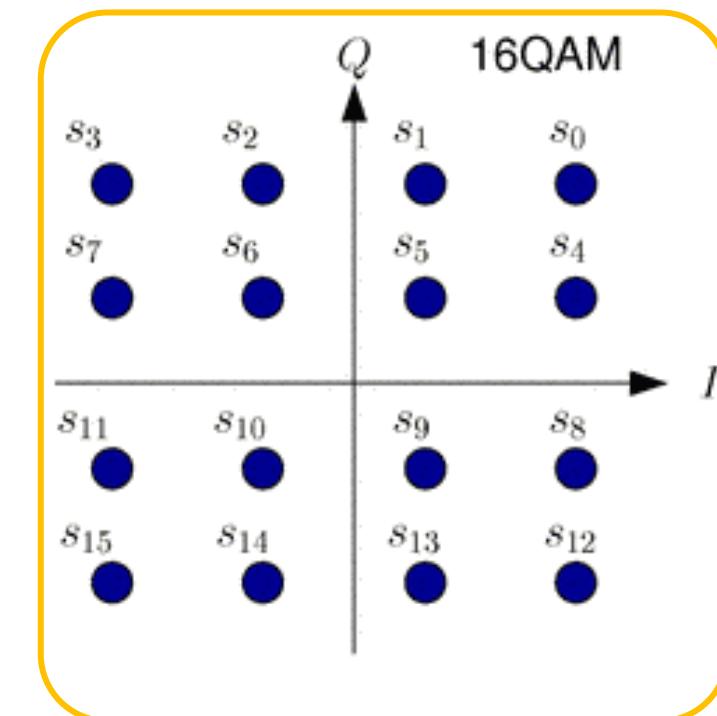
常见不同进制调制方式举例



BPSK使用了基准的正弦波和相位反转的波浪，使一方为0，另一方为1，从而可以同时传送接受2值(1比特)的信息



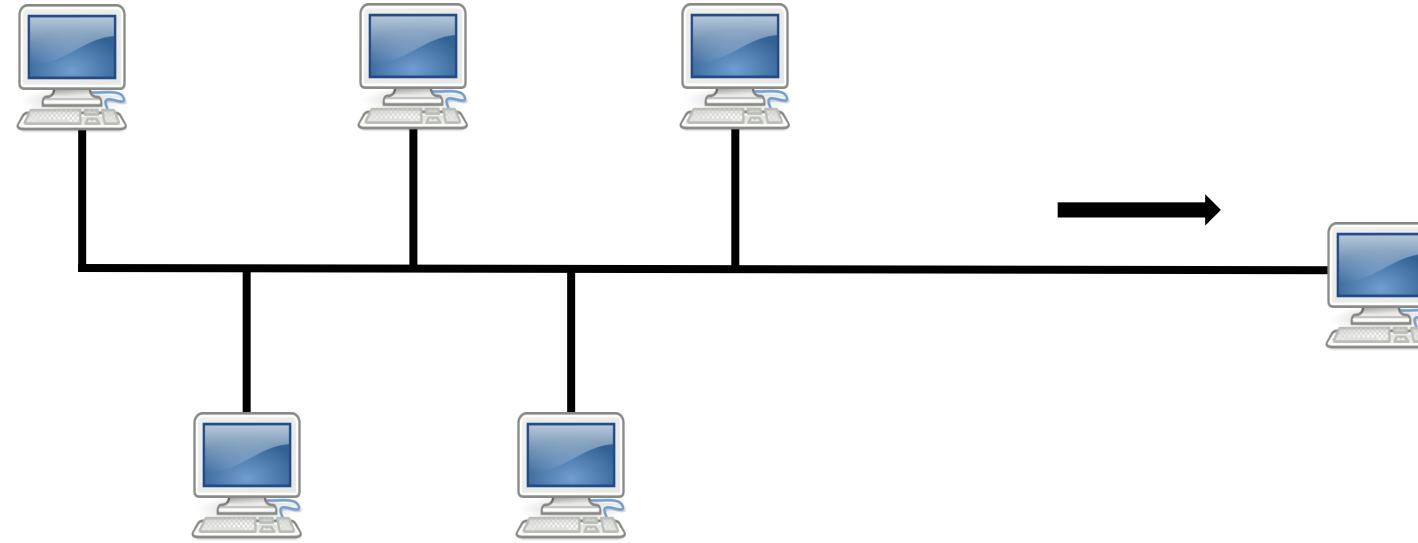
QPSK是一种四进制相位调制采用移相方式QPSK，每个点2比特信息，具有良好的抗噪特性和频带利用率通信业务



QAM全称正交幅度调制是一种数字调制方式，产生的方法有正交调幅法和复合相移，16QAM是指包含16种符号的QAM调制方式



思考



如何共用一条信道资源?

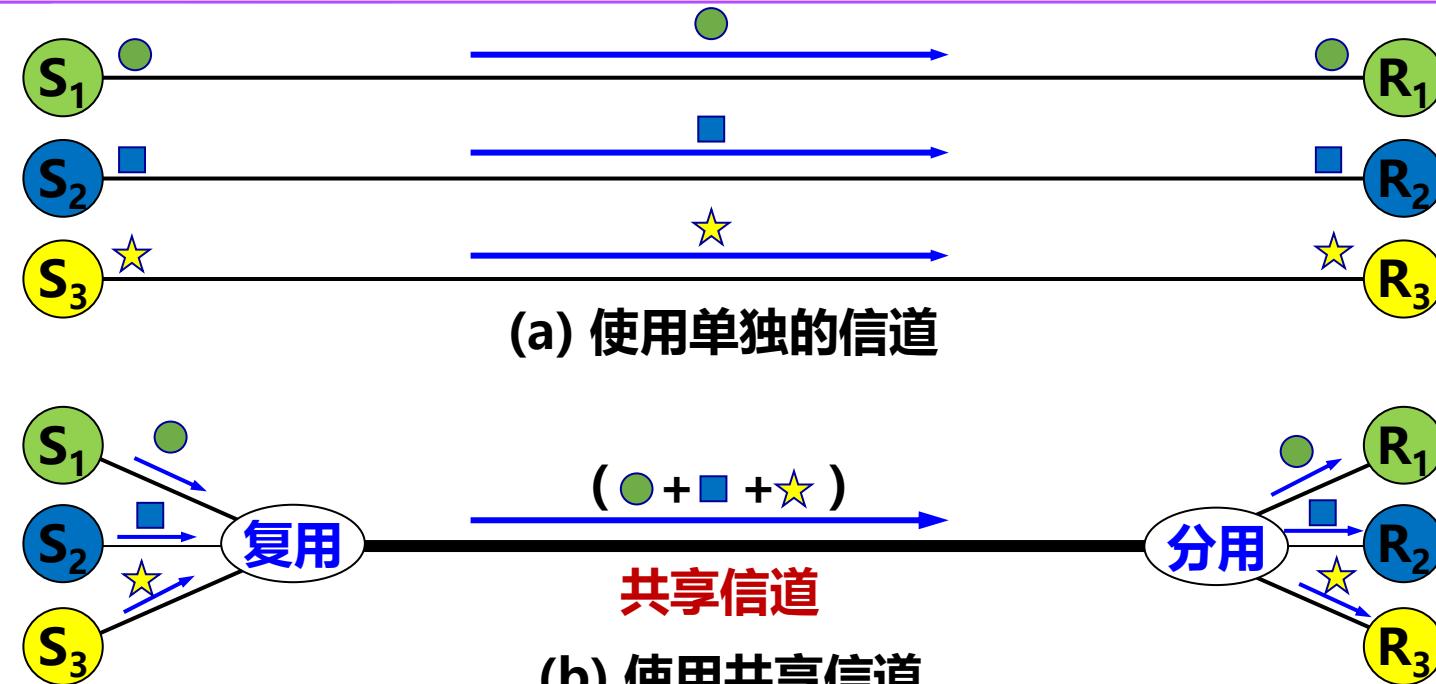


什么是复用技术?

- 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。

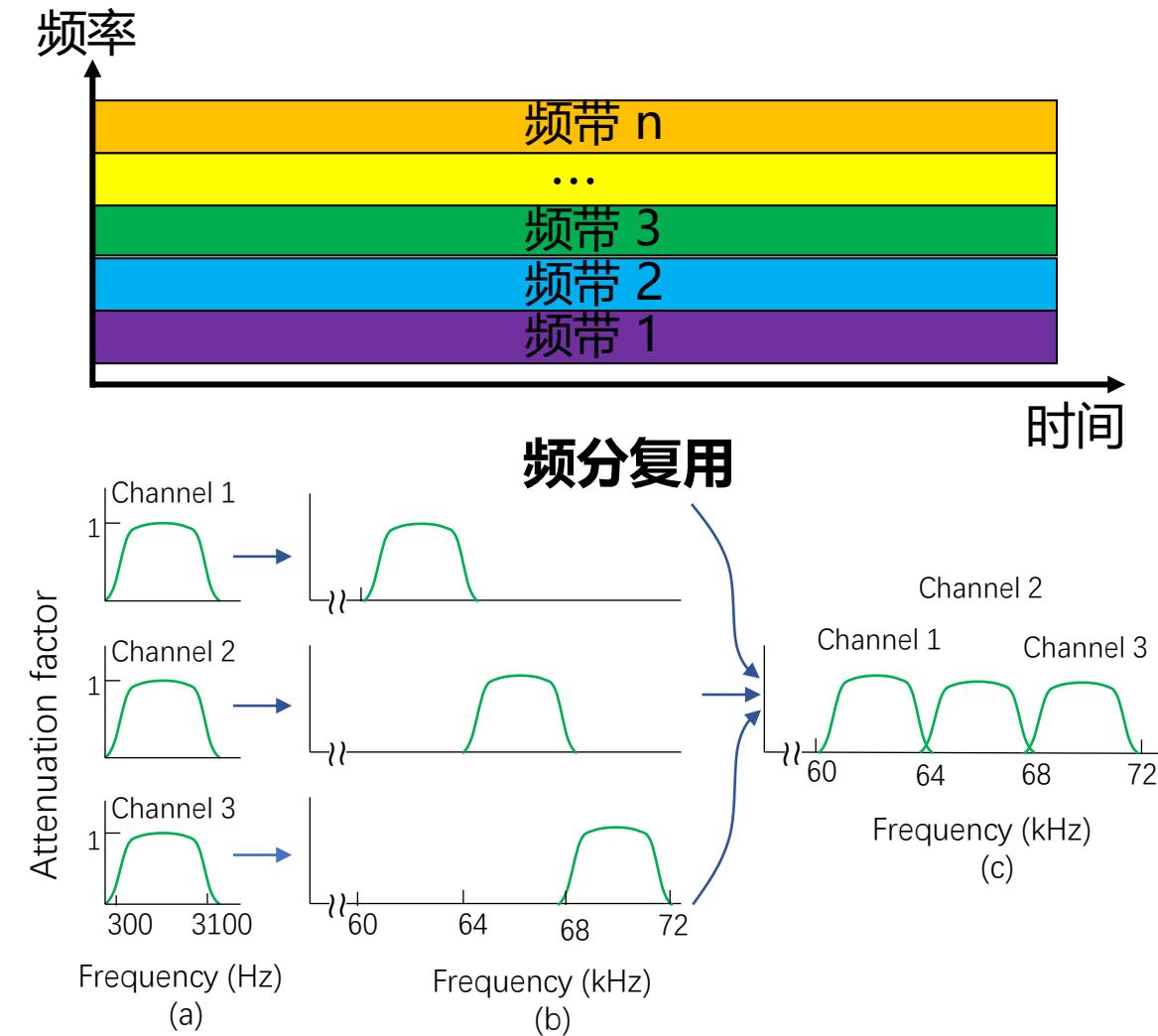
复用示意图





频分复用(FDM)

- 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**)

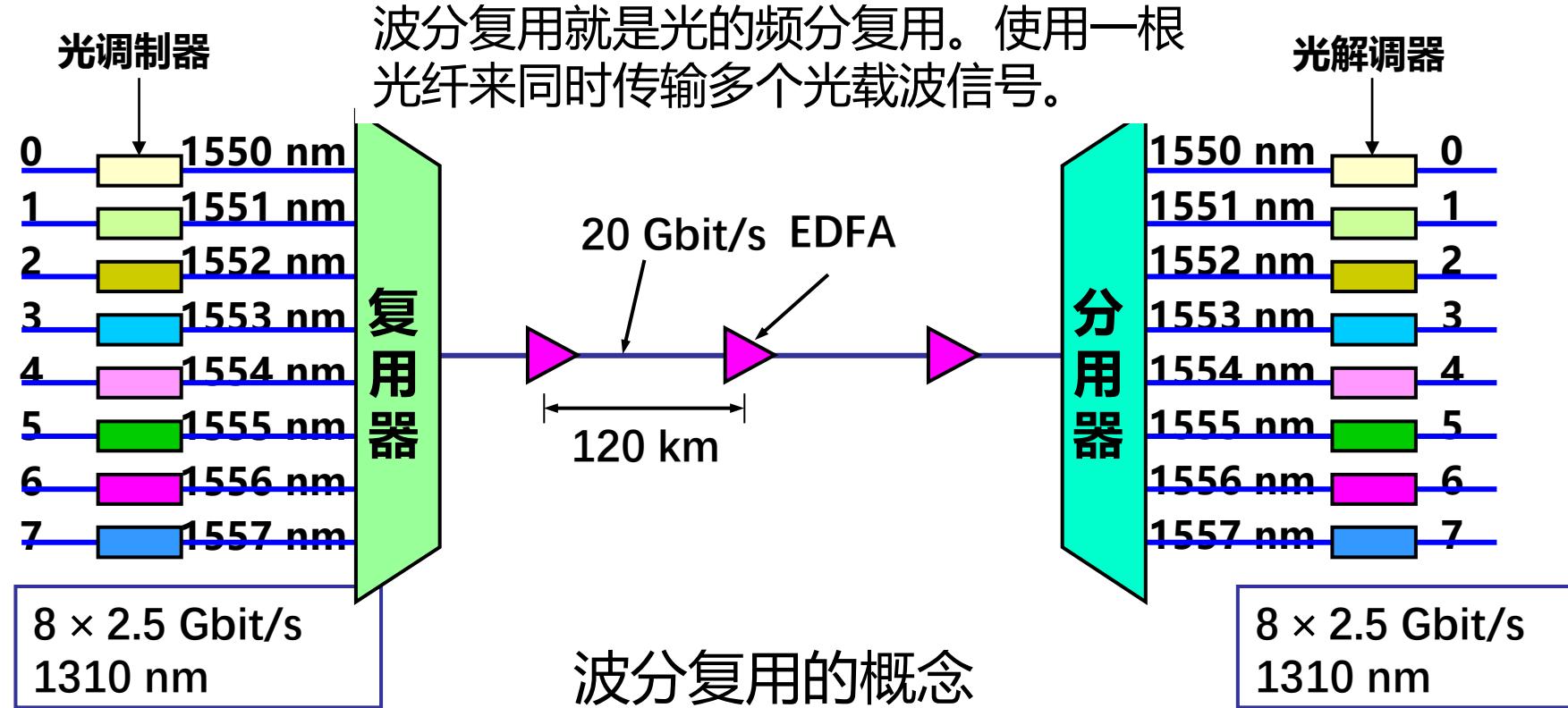


(a) 原始频带 (b) 叠加到不同频率上的频带 (c) 复用信道



波分复用(WDM)

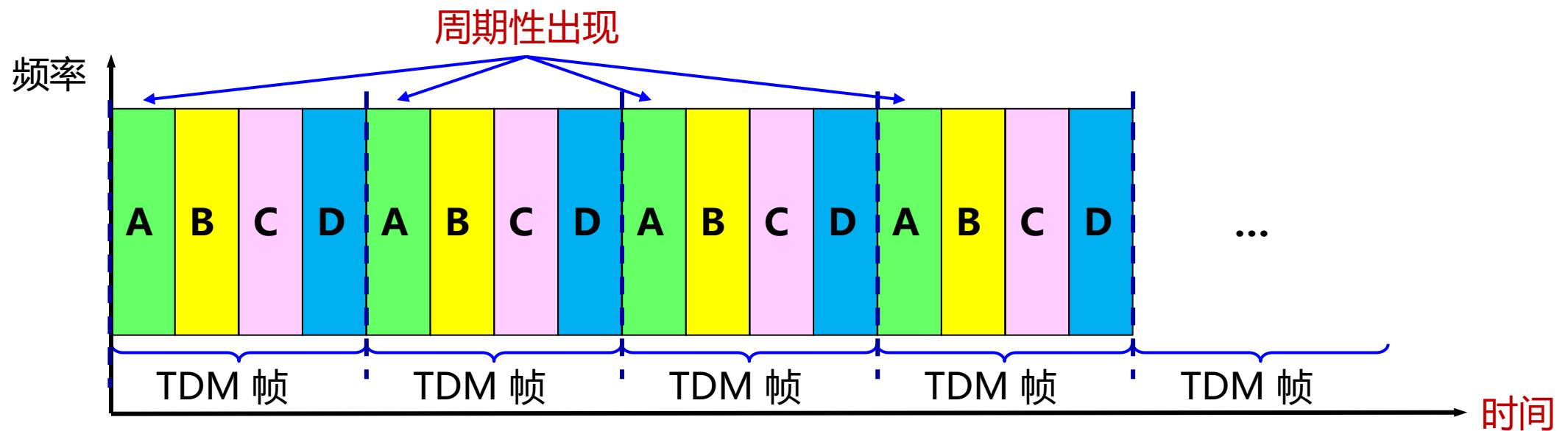
- **波分复用** (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 是利用多个激光器在单条光纤上同时发送多束不同**波长**激光的技术





时分复用(TDM)

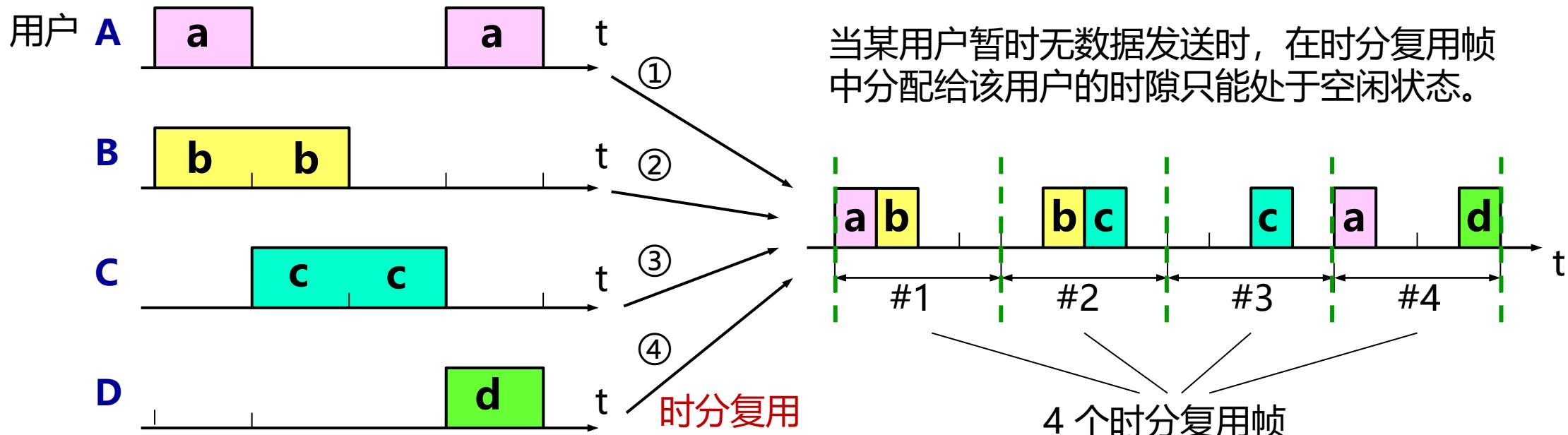
- 时分复用(Time Division Multiplexing, TDM) 将时间划分为一段段等长的时分复用帧 (TDM帧)
- 每一个时分复用的用户在每一个 TDM 帧中占用固定序号的时隙
- 每一个用户所占用的时隙是周期性地出现 (其周期就是TDM帧的长度) 的。
- TDM 信号也称为等时 (isochronous) 信号。
- 时分复用的所有用户在不同的时间占用同样的频带宽度





时分复用(TDM)

➤**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。

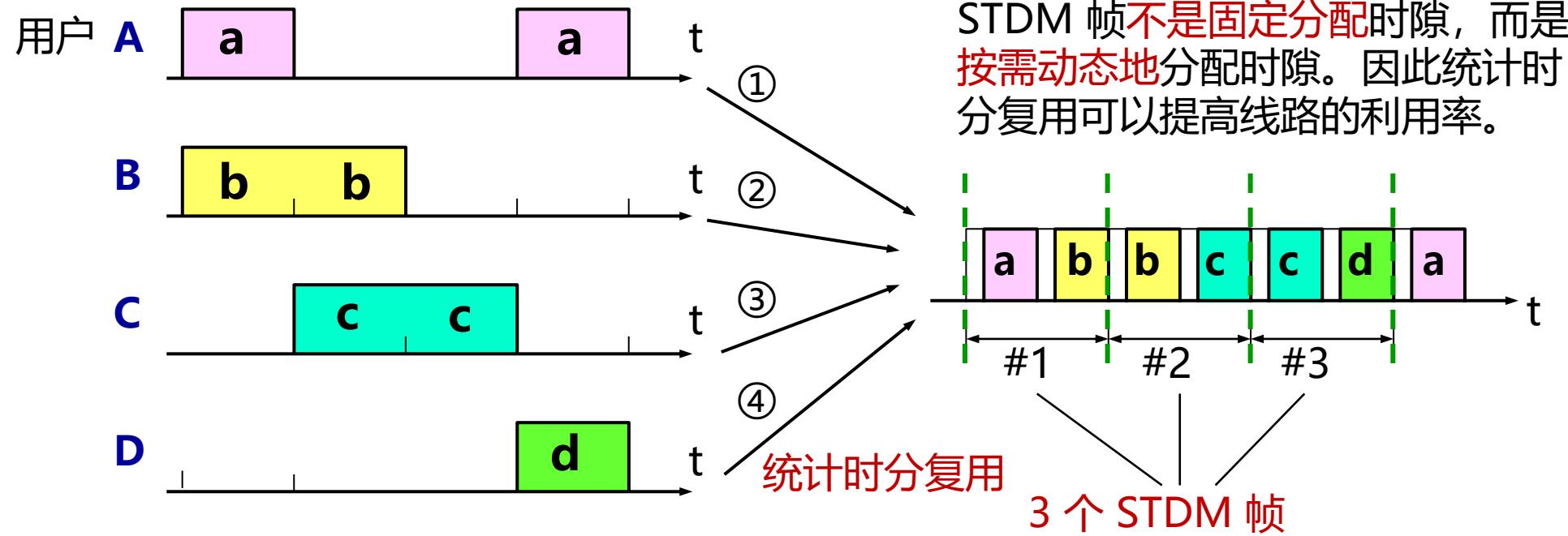


时分复用可能会造成线路资源的浪费



统计时分复用 (STDM)

- **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



码分复用(CDMA)



计算机网络教案社区

- 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
- 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。
 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。



码分复用(CDMA)

码片序列的正交关系

- 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)
- 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 (inner product) 等于 0

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

例如：

$$\begin{aligned} S: & (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1) \\ T: & (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1) \end{aligned}$$

- 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



➤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?

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

➤求解

- $A^*M=1/8*(1-1+3+1-1+3+1+1)=1$ 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



小结：多路复用技术

➤ 频分复用

- 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

➤ 时分复用

- 将时间划分为一段段时分复用帧，分配给不同用户
- 统计时分复用（时分复用帧长度按需分配）

➤ 波分复用

- 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

➤ 码分复用

- 用一组包含互相正交的码字的码组携带多路信号



总结

➤ 物理层的四个特性

- 机械特性，电气特性，功能特性，过程特性

➤ 数据通信基础

- 理想信道的奈克斯特定理，白噪声下的香农定理 $H \log_2(1 + S/N)$ (bps)

➤ 传输介质

- 导引型：双绞线，同轴电缆，光纤，电力载波
- 非导引型：无线电波，光通信

➤ 卫星通信：同步卫星和低轨卫星

➤ 数据编码

- 基带传输：NRZ(逢1变，逢0变)，曼彻斯特码，差分曼彻斯特码
- 频带传输：调频、调幅和调相，载波 $A \sin(\omega t + \varphi)$

➤ 多路复用技术

- 频分复用，时分复用/统计时分复用，波分复用，码分复用



作业

- 《Computer Networks-5th Edition》章节末习题
 - (CHAPTER 1 : 1.1, 1.10, 1.11)
 - CHAPTER 2 : 2.1, 2.4, 2.20, 2.25
- 截止时间：(下) 下周三晚11:59，提交网络学堂



致谢



计算机网络教案社区



熊轲

北京交通大学



赵阿群

北京交通大学



王健

北京交通大学



刘强

北京交通大学



孙延涛

北京交通大学



梁满贵

北京交通大学



崔勇

清华大学

- 《计算机网络：自顶向下方法(原书第7版)》，库罗斯 罗斯，机械工业出版社，2018年6月
- 《计算机网络（第5版）》，Tanenbaum & Wetherall，清华大学出版社，2012年3月
- 《计算机网络（第7版）》，谢希仁，电子工业出版社，2017年1月
- 《计算机网络教程（第6版）》，吴功宜，电子工业出版社，2018年3月
- 《计算机网络（第3版）》，徐敬东、张建忠，清华大学出版社，2013年6月
- 《宽带接入技术》，通信行业国家职业资格认证培训授课专用讲义
- 《EPON技术交流》.ppt，华为

特别致谢：
部分内容取材于此