

第 2 章 物理层



第 2 章 物理层



- 2.1 物理层的基本概念
- 2.2 数据通信的基础知识
- 2.3 物理层下面的传输媒体
- 2.4 信道复用技术
- 2.5 数字传输系统
- 2.6 物理层协议举例

第 2 章 物理层



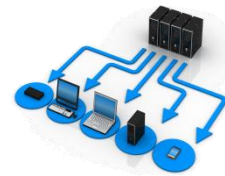
- **2.1 物理层的基本概念**
- **2.2 数据通信的基础知识**
- **2.3 物理层下面的传输媒体**
- **2.4 信道复用技术**
- **2.5 数字传输系统**
- **2.6 物理层协议举例**

2.1 物理层的基本概念



- 物理层考虑的是怎样才能在连接计算机的各种传输媒体上**传输数据比特流**，而不是指具体的**传输媒体**。
- 物理层的作用是要尽可能地**屏蔽**掉不同**传输媒体**和**通信手段**的差异，使数据链路层感觉不到这些差异。
- 用于物理层的协议也常称为物理层**规程** (procedure)。

物理层的主要任务



主要任务：确定与传输媒体的接口的一些特性。

- **机械特性：**指明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。
- **电气特性：**指明在接口电缆的各条线上出现的电压的范围。
- **功能特性：**指明某条线上出现的某一电平的电压表示何种意义。
- **过程特性：**指明对于不同功能的各种可能事件的出现顺序。

第 2 章 物理层



- 2.1 物理层的基本概念
- 2.2 数据通信的基础知识
- 2.3 物理层下面的传输媒体
- 2.4 信道复用技术
- 2.5 数字传输系统
- 2.6 物理层协议举例

2.2 数据通信的基础知识



■ 2.2.1 数据通信系统的模型

■ 数据通信的基本概念

■ 2.2.2 数字信号编码

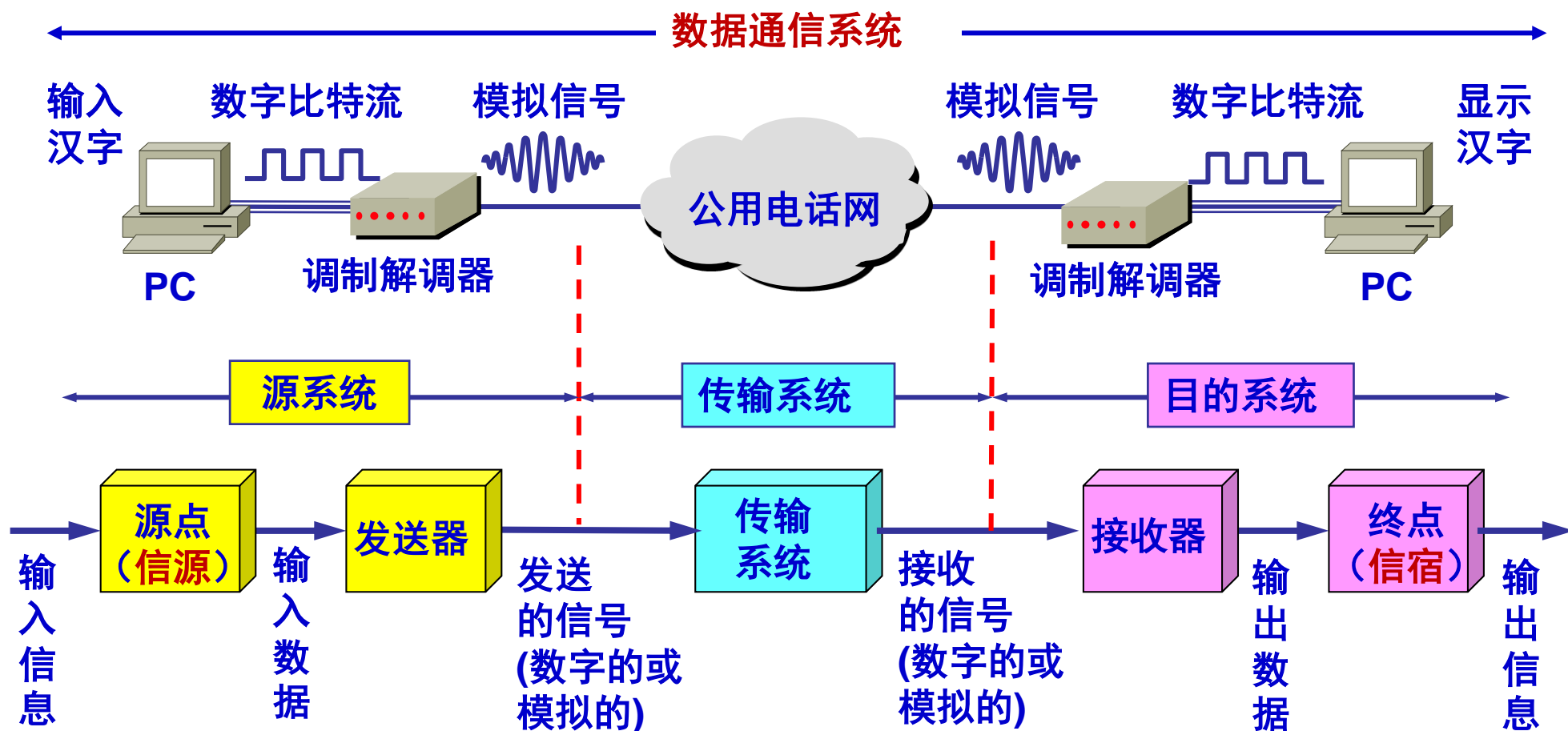
■ 2.2.3 数字调制技术

■ 2.2.4 信道的极限容量

数据通信系统的模型



例：两台计算机通过普通电话机的连线，再经过公用电话网进行通信



数据通信系统的模型

数据通信系统



■ 源系统

- **源点（信源）**：源点设备产生要传输的数据，例如计算机键盘输入汉字通过计算机产生输出的数字比特流。
- **发送器**：数字比特流要经过发送器编码后才能在传输系统中传输。例如：**调制器**

■ 传输系统

- 传输系统可以是传输线，也可以是复杂的网络系统。

■ 目的系统

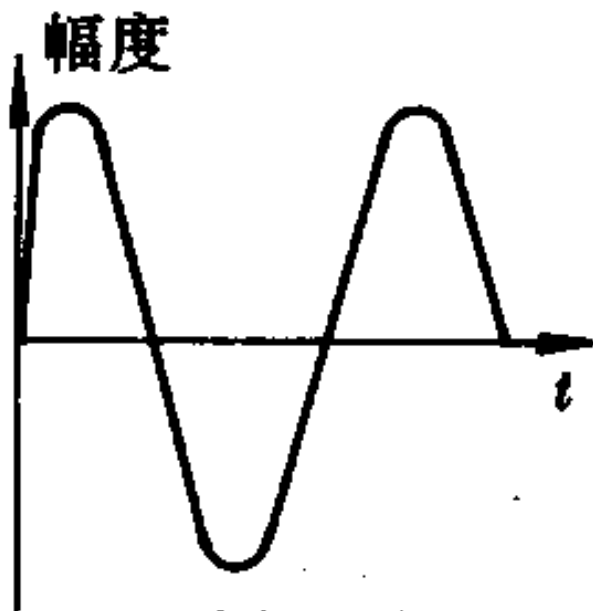
- **终点（信宿）**：终点设备将数字比特流转换成信息输出，例如把汉字显示在屏幕上。
- **接收器**：接收器把来自传输线路上的模拟信号进行解调，还原出数字比特流。例如：**解调器**

常用术语

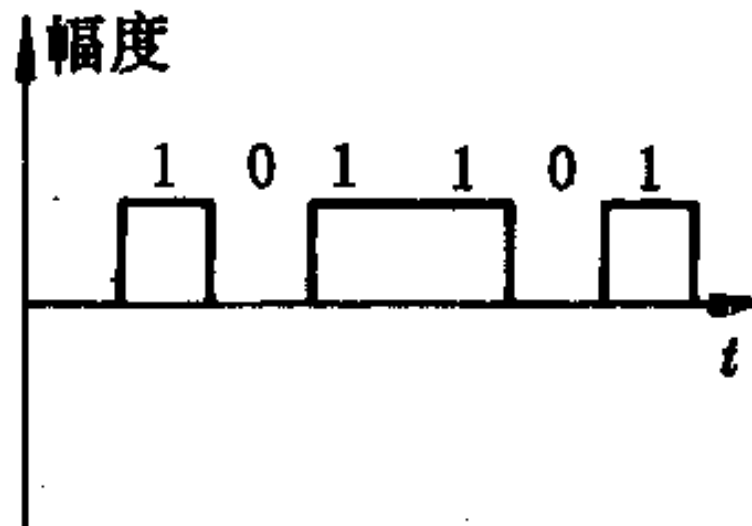


- **数据 (data)** — 运送消息（语音、文字、图像等）的实体。
- **信号 (signal)** — 数据的电气的或电磁的表现。数据在信道中以电信号的形式传送，电信号分为：模拟信号和数字信号。
 - **模拟信号 (analogous signal)** — 代表消息的参数的取值是连续的
 - **数字信号 (digital signal)** — 代表消息的参数的取值是离散的。
 - **码元 (code)** — 在使用时间域（或简称为时域）的波形表示数字信号时，代表不同离散数值的基本波形。
 - 使用二进制编码时，只有两种不同的码元（代表0和1）
- **调制** —— 把数字信号转换为模拟信号的过程。
- **解调** —— 把模拟信号转换为数字信号的过程。

模拟信号与数字信号



(a)

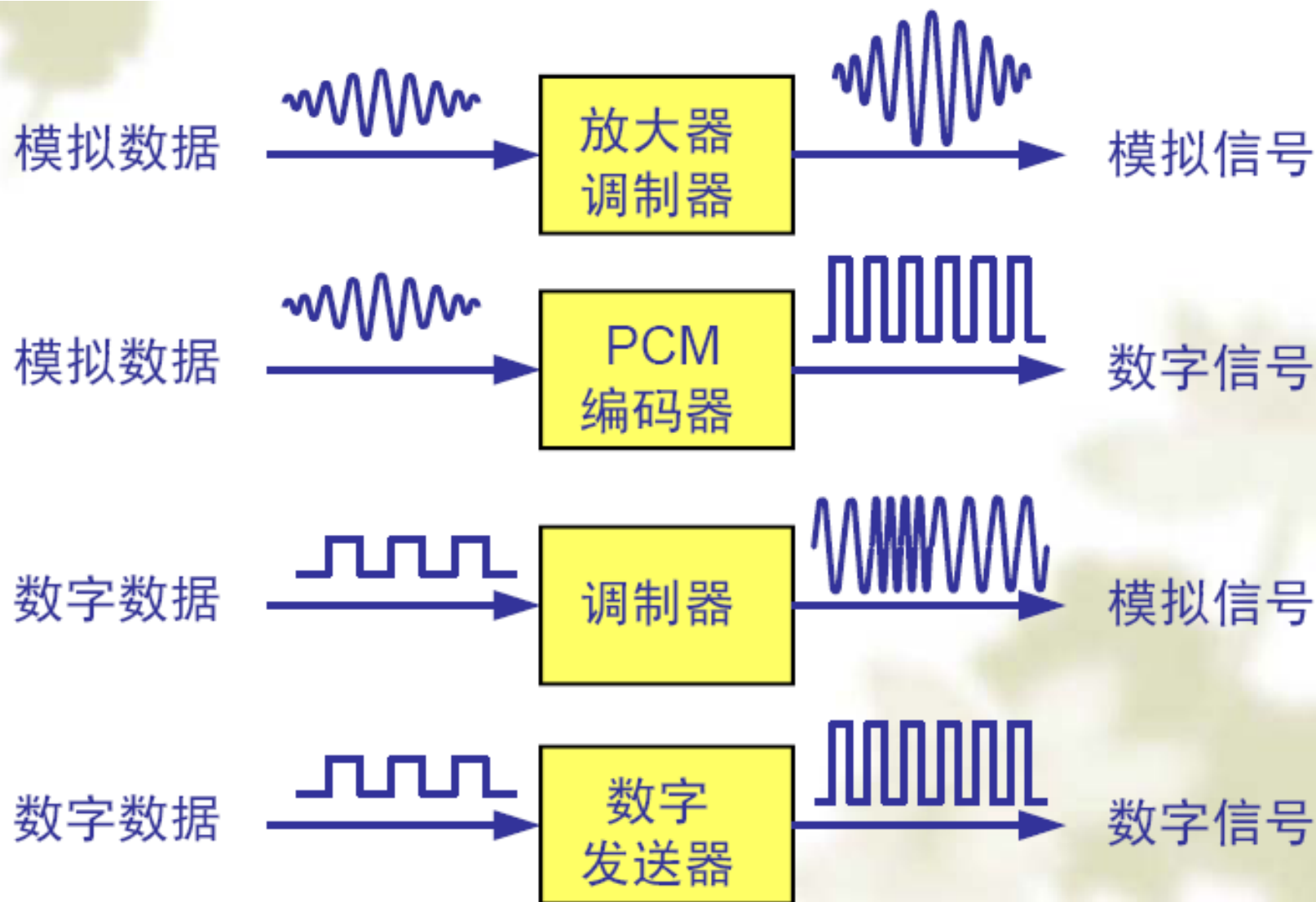


(b)

图 2.2 模拟信号与数字信号

(a) 模拟信号 (b) 数字信号

模拟的和数字的 数据、信号



不同组合



- 模拟数据、模拟信号
 - 最早的电话系统
- 模拟数据、数字信号
 - 模拟数据数字化后，可以使用先进的数字传输和交换设备，如现代的电话系统。
- 数字数据、模拟信号
 - 有些传输媒体只适合传输模拟信号，如光纤和无线信道。
- 数字数据、数字信号
 - 数字数据编码成数字信号的设备，比起数字到模拟设备更简单、更廉价。

有关信道的几个基本概念



- **信道(channel)** —— 一般用来表示向**某一个方向**传送信息的媒体。
 - 一条通信电路往往包含发送信道和接收信道。
- **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。例：无线电广播
- **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。

有关信道的几个基本概念



- 在计算机提供的二进制数字信号与电话网提供的模拟信号之间进行转换，这类技术统称为**调制/解调技术**。
- **基带信号**（即基本频带信号）——来自信源的信号，就是将数字信号 1 或 0 直接用两种不同的电压来表示，然后送到线路上去传输基带信号。
- 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)。

有关信道的几个基本概念



■ 调制分为两大类：

- **基带调制**：仅对基带信号的波形进行变换，使它能够与信道特性相适应。变换后的信号仍然是基带信号。把这种过程称为编码 (coding)。
- **带通调制**：使用载波 (carrier) 进行调制，把基带信号的频率范围搬移到较高的频段，并转换为模拟信号，这样就能够更好地在模拟信道中传输（即仅在一段频率范围内能够通过信道）。
- **带通信号**：经过载波调制后的信号。

2.2 数据通信的基础知识

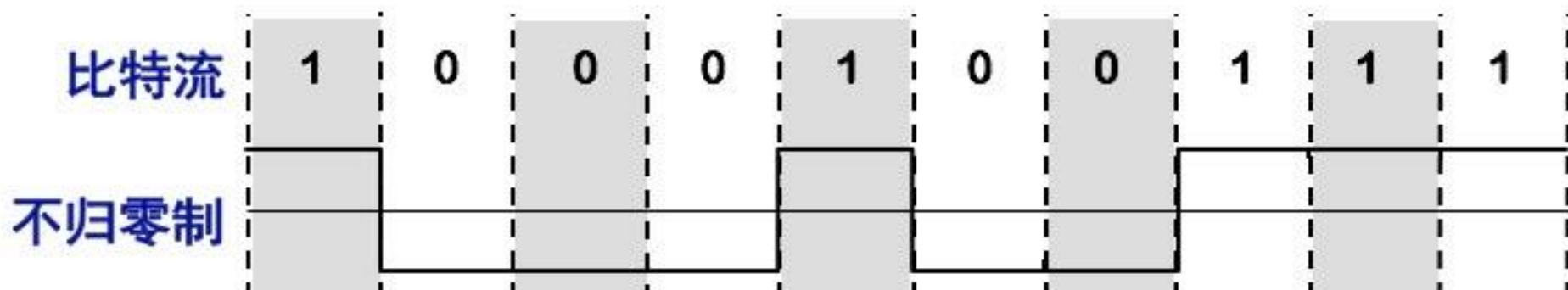


- 2.2.1 数据通信的基本概念
- 2.2.2 数字信号编码
- 2.2.3 数字调制技术
- 2.2.4 信道的极限容量

2.2.2 常用编码方式



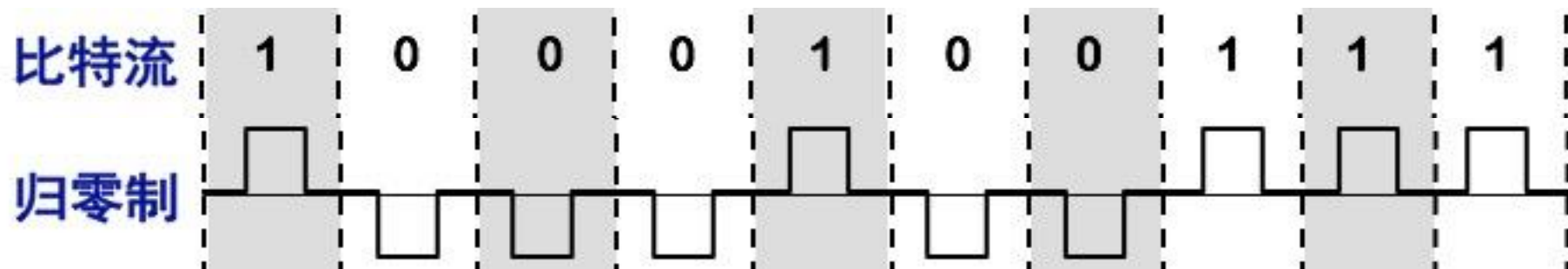
- **不归零码**：正电平代表 1，负电平代表 0。
 - 在一个码元的全部时间内，电压保持恒定
 - 连续发送多个“1”码或“0”码时，码元之间没有间隙，不容易区分



2.2.2 常用编码方式



- **归零码：**正脉冲代表 1，负脉冲代表 0。
 - 在一个码元的全部时间内，非零电压的持续时间小于一个码元的时间
 - 在一个码元的后半部分时间内，电压总是归于零的
 - 好处：解决了不归零码在连续发送“1”码或“0”码不容易区分的问题。



2.2.2 常用编码方式

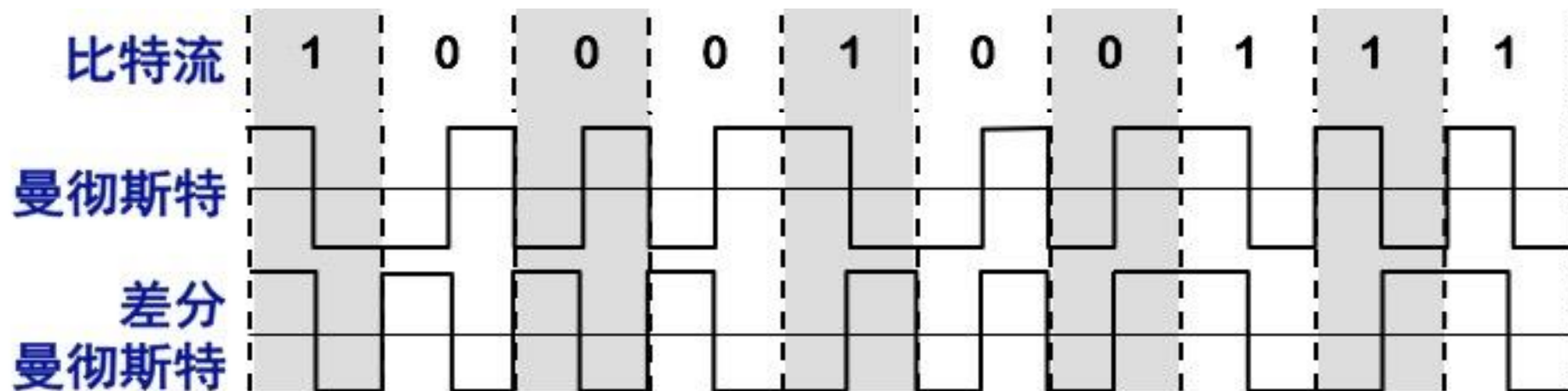


■ 曼彻斯特编码：

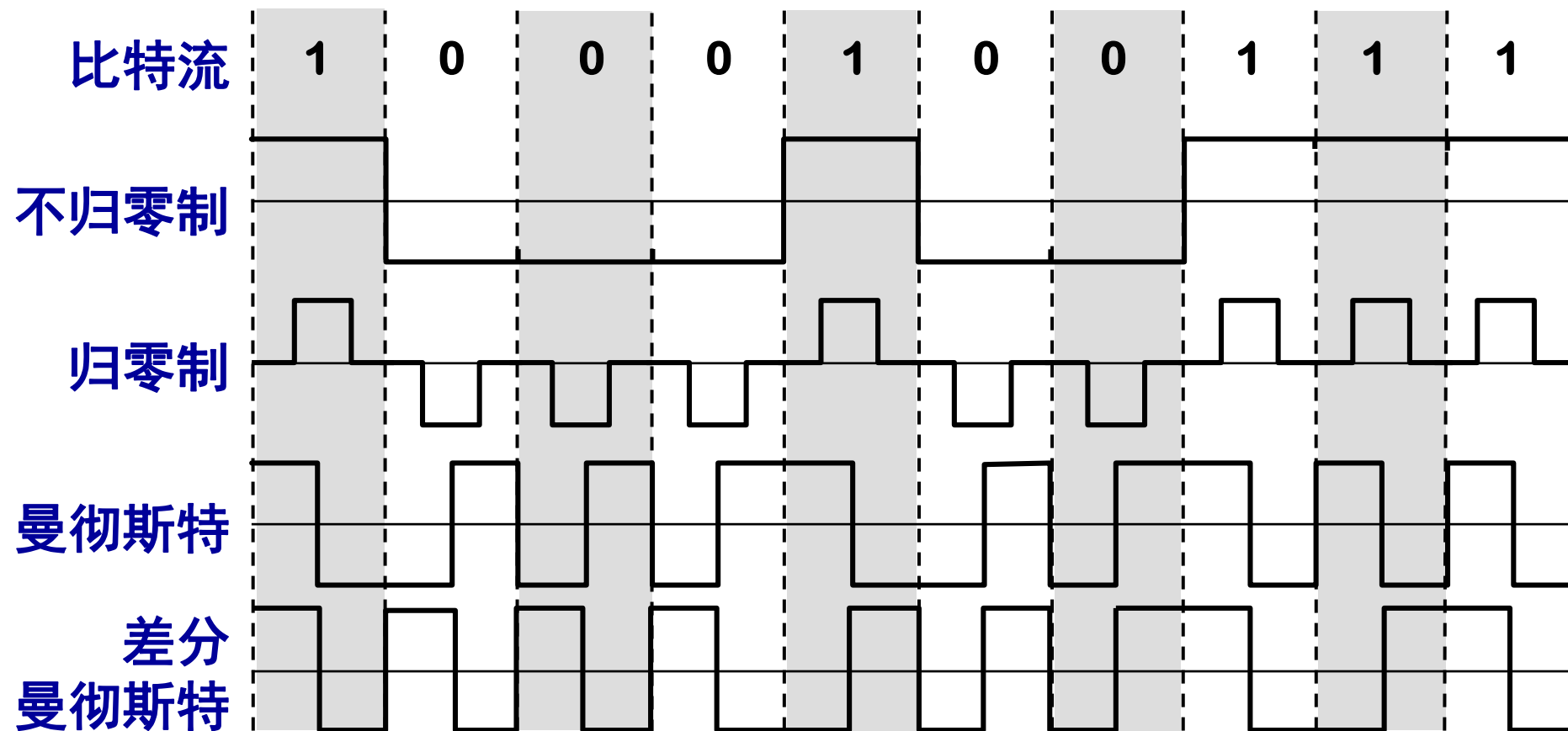
- 位周期中心的向上跳变代表 0，位周期中心的向下跳变代表 1。但也可反过来定义。

■ 差分曼彻斯特编码：

- 在每一位的中心处始终都有跳变。
- 利用每个码元的开始时有无跳变来表示“0”或“1”。
- 位开始边界有跳变代表 0，没有跳变代表 1



2.2.2 常用编码方式



数字信号常用的编码方式

2.2.2 常用编码方式



- 从信号波形中可以看出，曼彻斯特编码和差分曼彻斯特编码产生的信号频率比不归零制高。
- 从自同步能力来看，不归零制不能从信号波形本身中提取**信号时钟频率**（这叫作没有自同步能力），**而曼彻斯特编码和差分曼彻斯特编码具有自同步能力。**

2.2 数据通信的基础知识



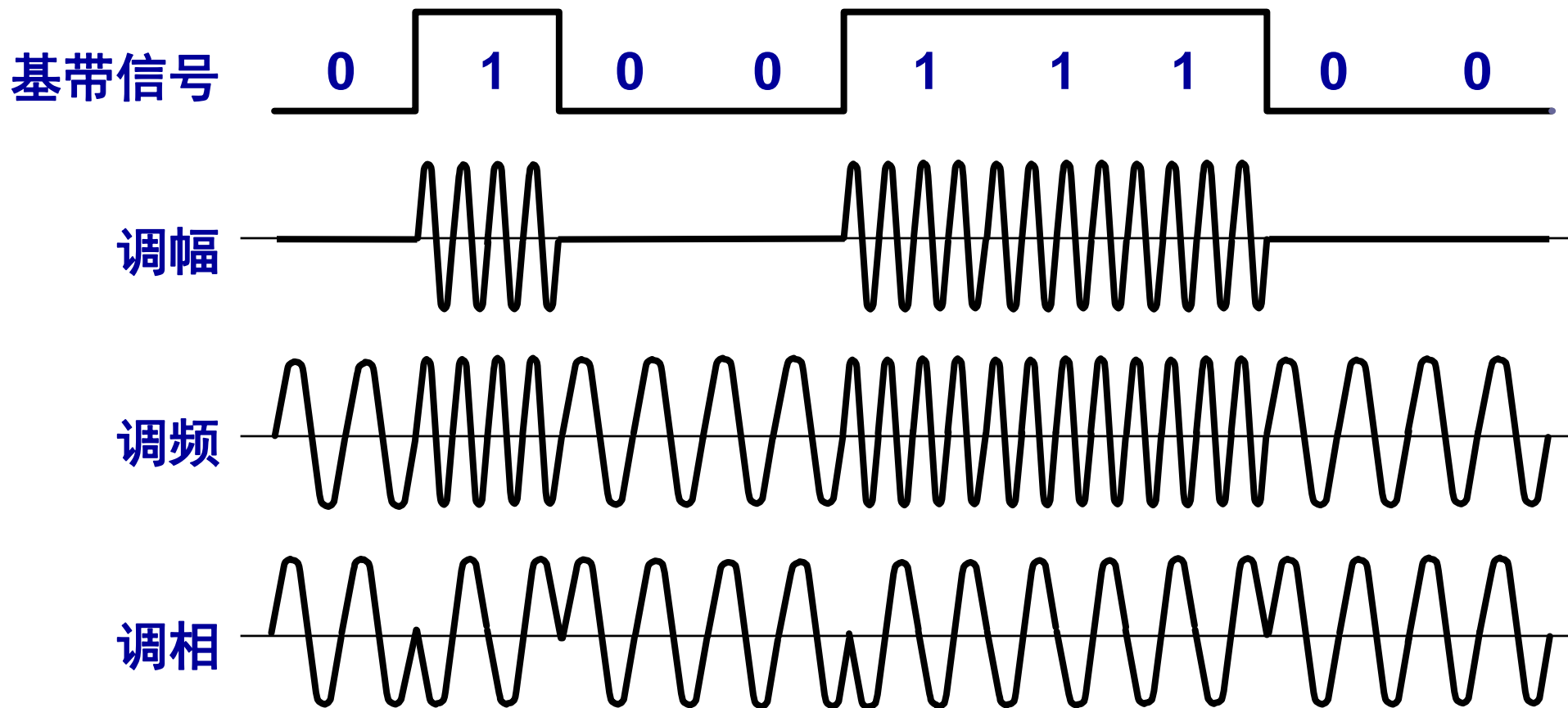
- 2.2.1 数据通信的基本概念
- 2.2.2 数字信号编码
- **2.2.3 数字调制技术**
- 2.2.4 信道的极限容量

2.2.3 基本的带通调制方法



- 选取一个适合于在线路上传输的**正弦波**作为载波，让载波的某些特性（**幅度**、**频率**、**相位**）随基带信号的变化而变化（即波形变换）。
- 最基本的**二元制调制**方法有以下几种：
 - **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。

2.2.3 基本的带通调制方法



最基本的三种调制方式

2.2.3 基本的带通调制方法



- **调幅(AM):**
 - 实现起来简单, 但抗干扰性能差
- **调频(FM):**
 - 抗干扰性能好, 但占用带宽较大
- **调相(PM):**
 - 抗干扰性能最好, 且相位的变化也可以同步发送器和接收器的时钟

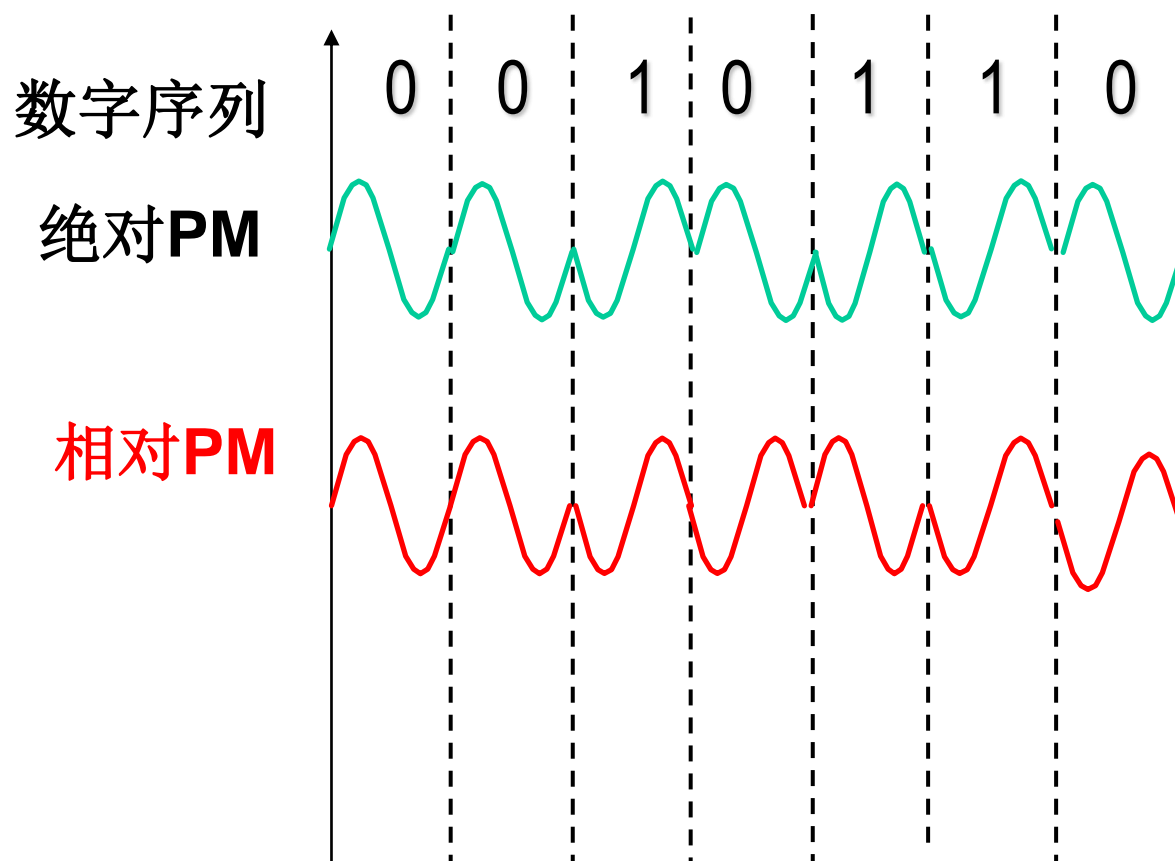
调相(PM)



■ 绝对PM与相对PM:

- 用载波的**相位(绝对值或变化)**来表示数据。
- 例如：0对应相位“0”，1对应相位180。
- 例如：发送的信号与前一个信号同相（相位不发生变化），则表示“0”；发送的信号与前一个信号反相（相位发生变化），则表示“1”。
- 注意：检测相位变化比检测相位值要容易。

调相(PM)



一个练习题



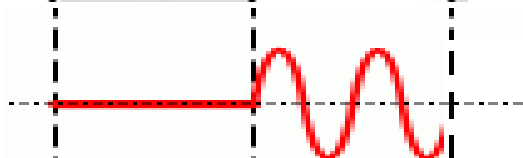
0 1 1 0 1 0 0 1

基带信号

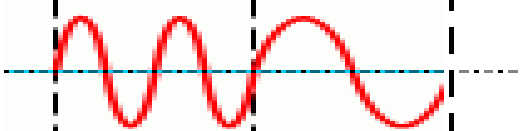
曼彻斯特



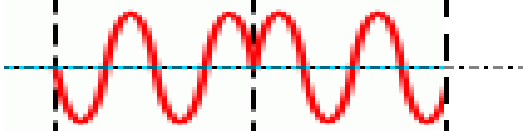
调幅



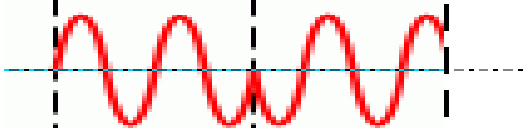
调频



绝对调相



相对调相



2.2.3 基本的带通调制方法



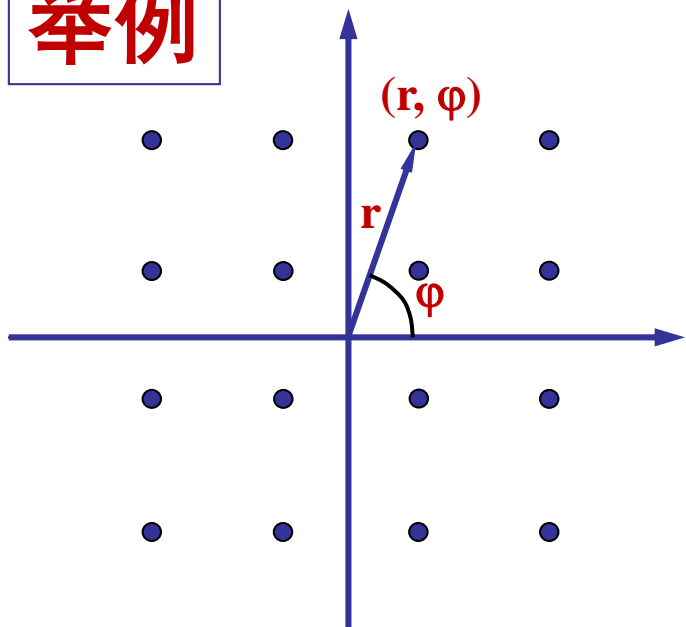
- 上面几种调制方式，一个码元仅包含2个状态（两种振幅、频率、相位），即1个码元携带1bit信息
- 想要获得更高的信息传输速率，如何让1个码元携带多位比特信息呢？
- 必需采用多元制混合调制方法

正交振幅调制 QAM



(Quadrature Amplitude Modulation)

举例



例如：

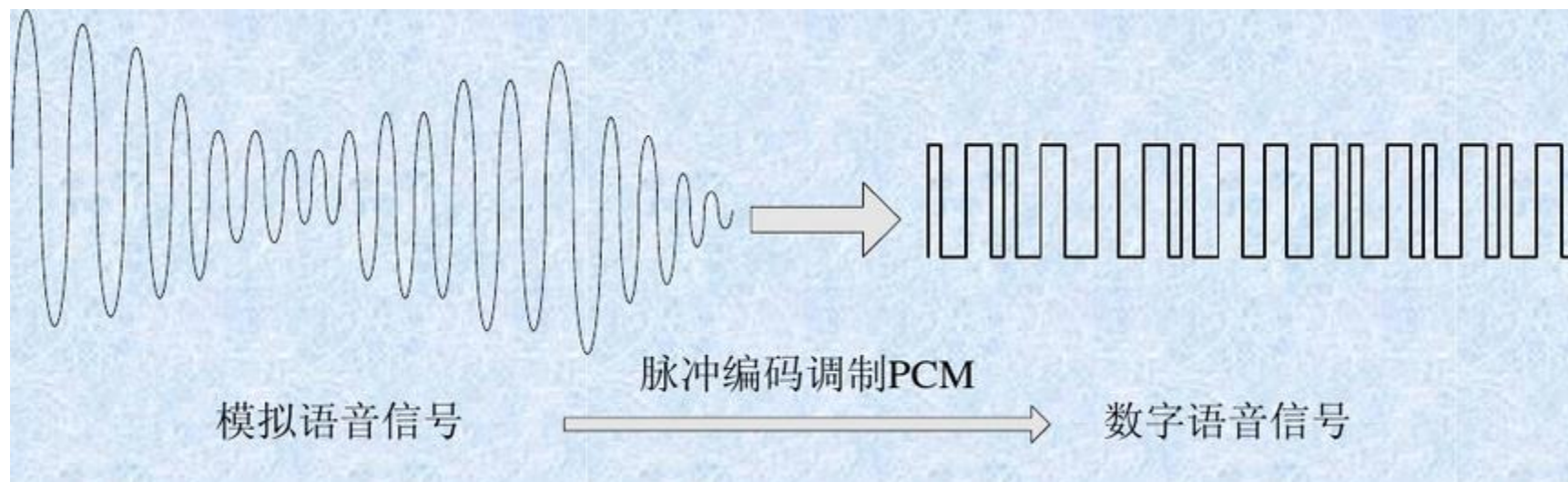
- 可供选择的相位有 12 种，而对于每一种相位有 1 或 2 种振幅可供选择。总共有 16 种组合，即 16 个码元。
- 由于 4 bit 编码共有 16 种不同的组合，因此这 16 个点中的每个点可对应于一种 4 bit 的编码。数据传输率可提高 4 倍。

不是码元越多越好。若每一个码元可表示的比特数越多，则在接收端进行解调时要正确识别每一种状态就越困难，出错率增加

脉冲编码调制PCM



典型应用：语音信号的数字化



脉冲编码调制PCM



- 话音、图像等模拟信号在时间上和取值上都是连续的，对其进行**数字信号编码**，是将其转换成一系列在时间和取值上都是离散的**二进制数码脉冲**，最常用的编码方法就是 **脉冲编码调制 PCM** (Pulse Code Modulation)
- 现在的**数字传输系统**均采用脉码调制 PCM 体制。
- PCM包括三个主要步骤：

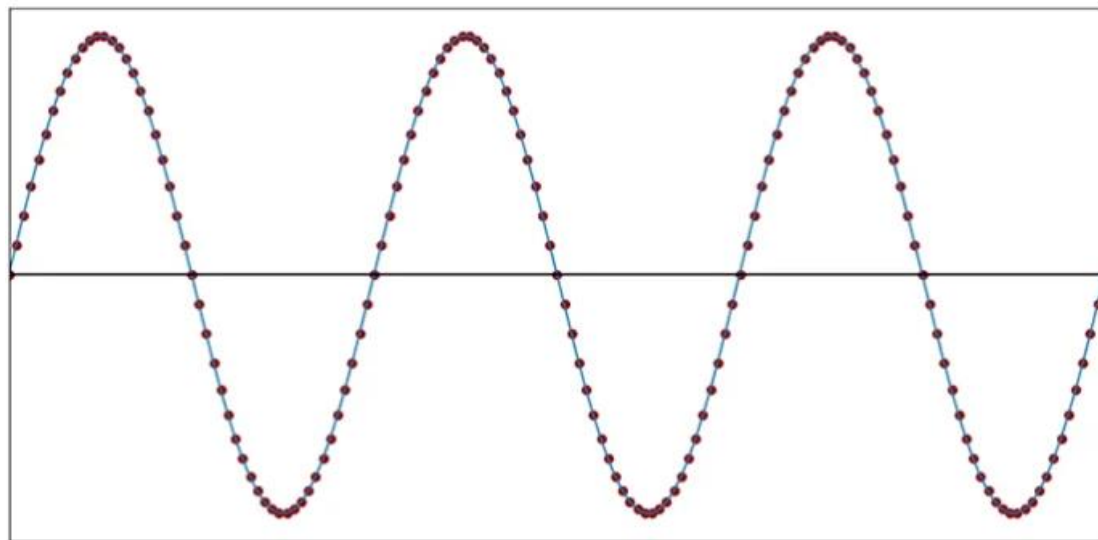
PCM将模拟信号转换为数字信号的过程：





■ 采样：实现时间上的离散化

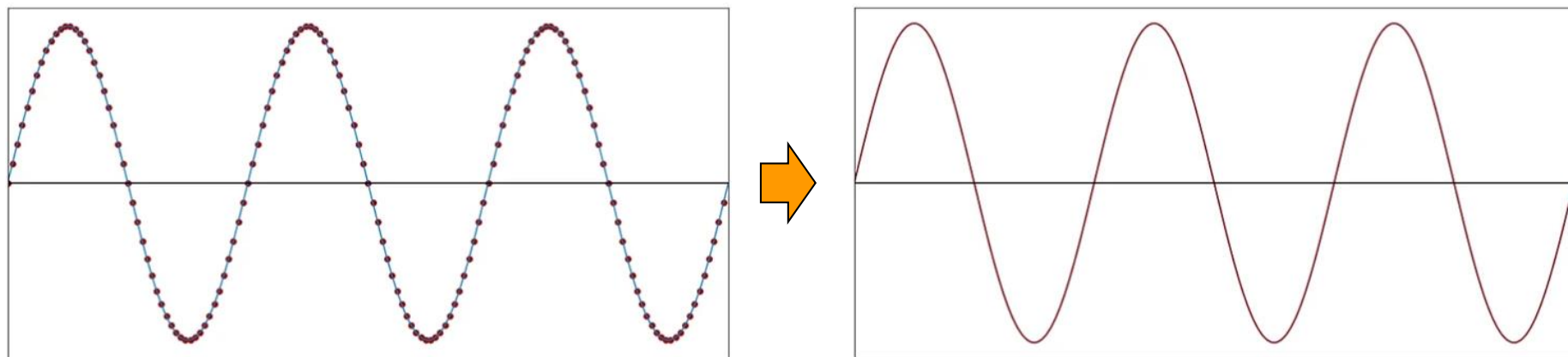
- 每隔一定时间间隔, 取模拟信号的当前值作为样本, 该样本代表了模拟信号在某一时刻的瞬时值。



每个圆圈代表一个采样时刻, 即测量模拟电压并将其转换成数字的精确时刻。



■ 从采样样本恢复原始信号示意图

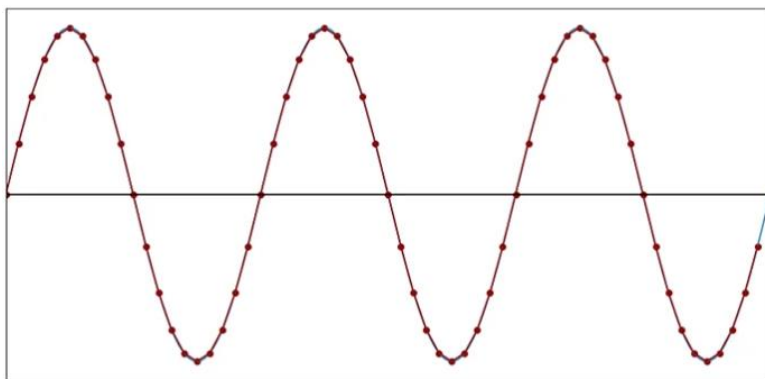


该图中正弦波的采样频率远高于信号频率

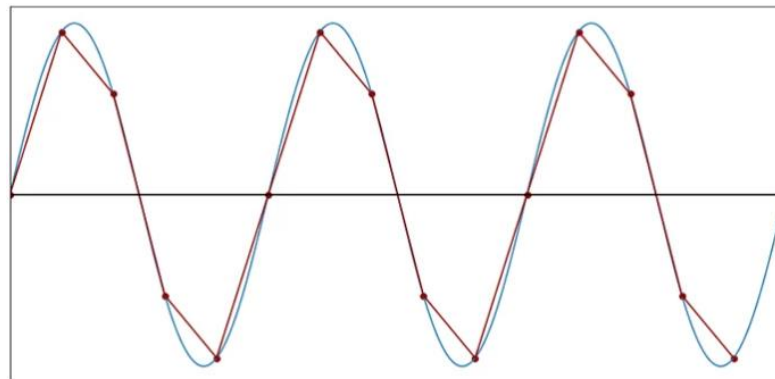


■ 采样频率如何设置？

- 随着我们降低采样频率，直线近似的外观与原始图像有所不同



每个周期20个样本 ($f_{SAMPLE} = 20f_{SIGNAL}$)



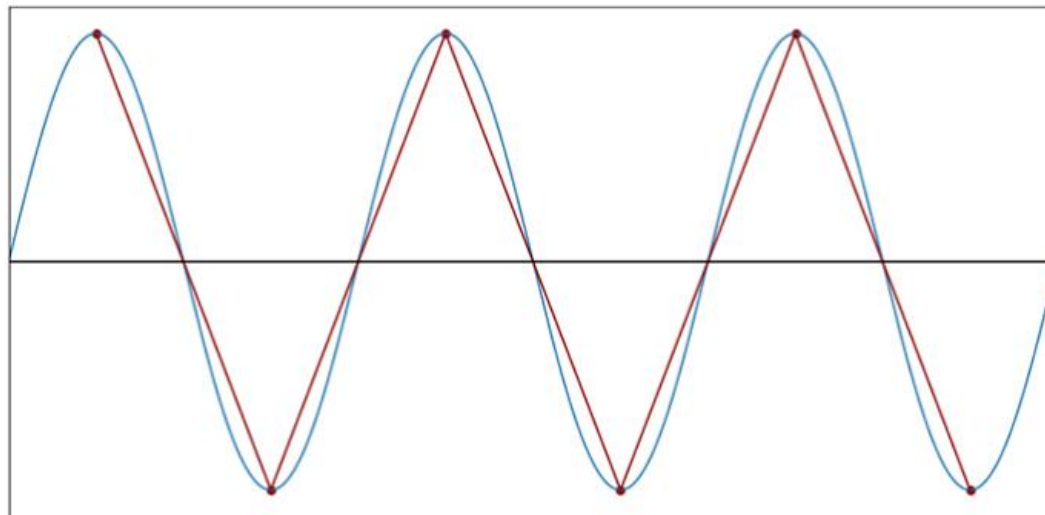
每个周期5个样本 ($f_{SAMPLE} = 5f_{SIGNAL}$)

采样



■ 采样频率如何设置？

- 至关重要的阈值：每个周期两个样本



每个周期2个样本 ($f_{SAMPLE} = 2f_{SIGNAL}$)

采样



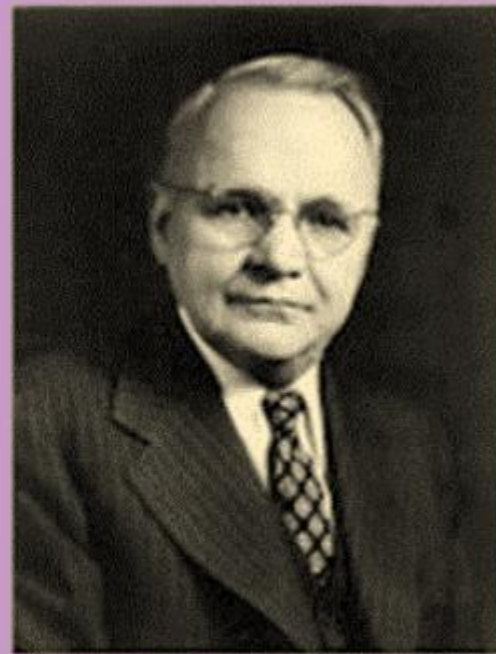
■ 采样的依据：奈奎斯特(Nyquist)采样定理（奈奎斯特-香农采样定理）

- 若对连续变化的模拟信号进行周期性的采样，如果采样速率用得到的样

- 话音信号带8KHz，即



Claude Shannon



Harry Nyquist

量



数字信号的形成



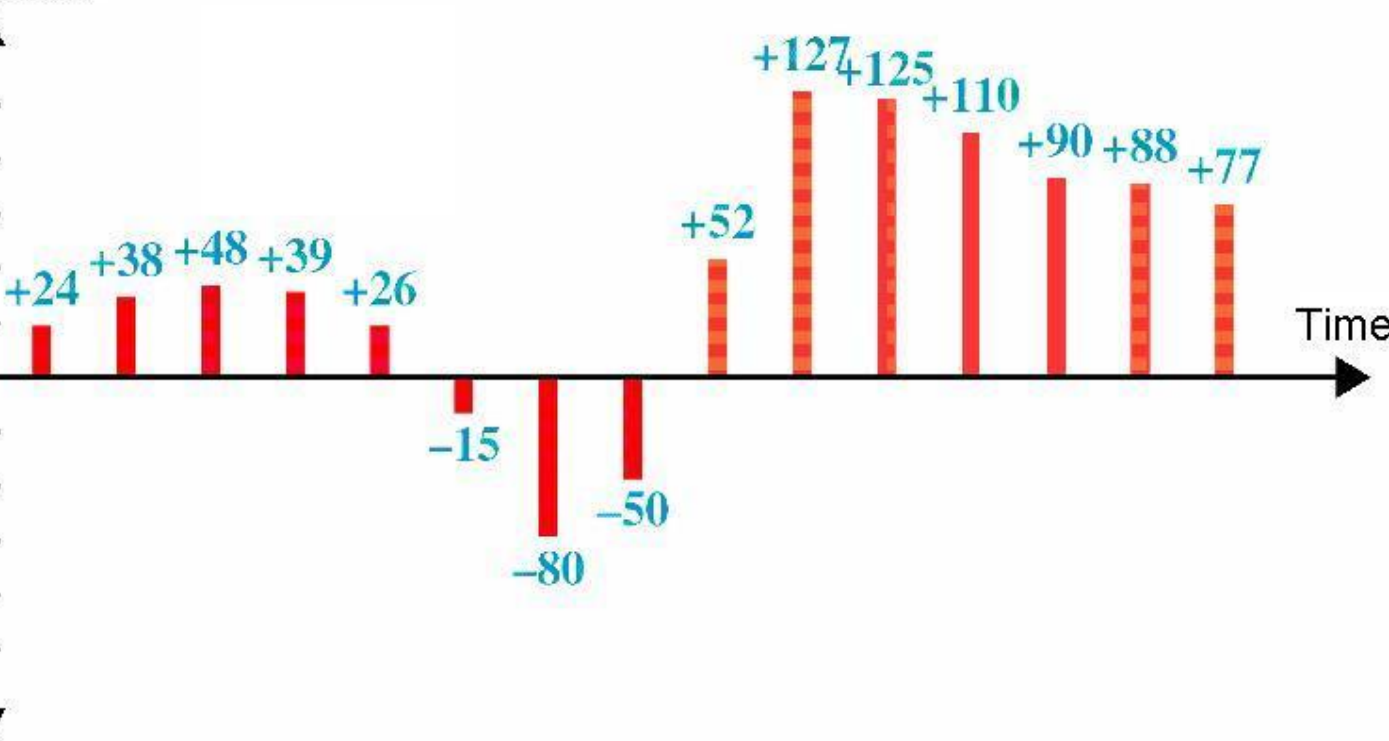
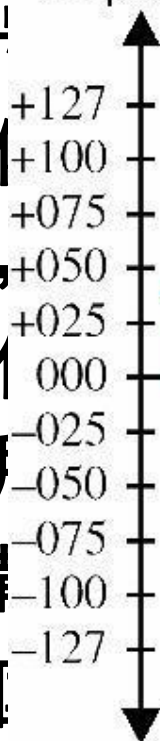
■ 量化:

通过抽样、量化后，信号不仅在时间上是离散的，
而且在取值上也是离散的

■ 抽样信号是时间轴上离散的信号，但仍然呈模拟

■ 信
■ 具
■ 级
■ 量
■ 有
■ 离
■ 我
位。

Amplitude



等
上
然

8

编码



- **编码**：将量化后的采样值用一定位数的二进制数码来表示

+024	00011000	-015	10001111	+125	01111101
+038	00100110	-080	11010000	+110	01101110
+048	00110000	-050	10110010	+090	01011010
+039	00100111	+052	00110110	+088	01011000
+026	00011010	+127	01111111	+077	01001101

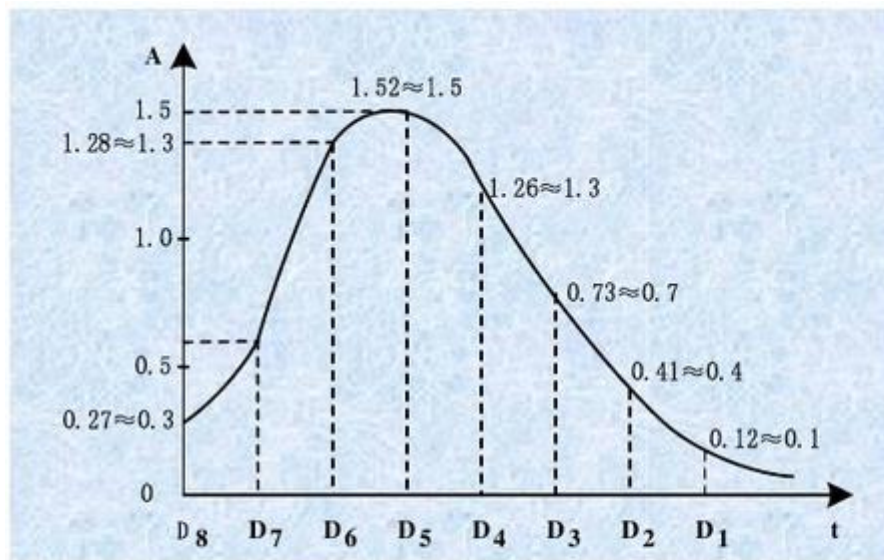
的

中

Sign bit
+ is 0 - is 1

目前的标准编码速率为64KB/S。

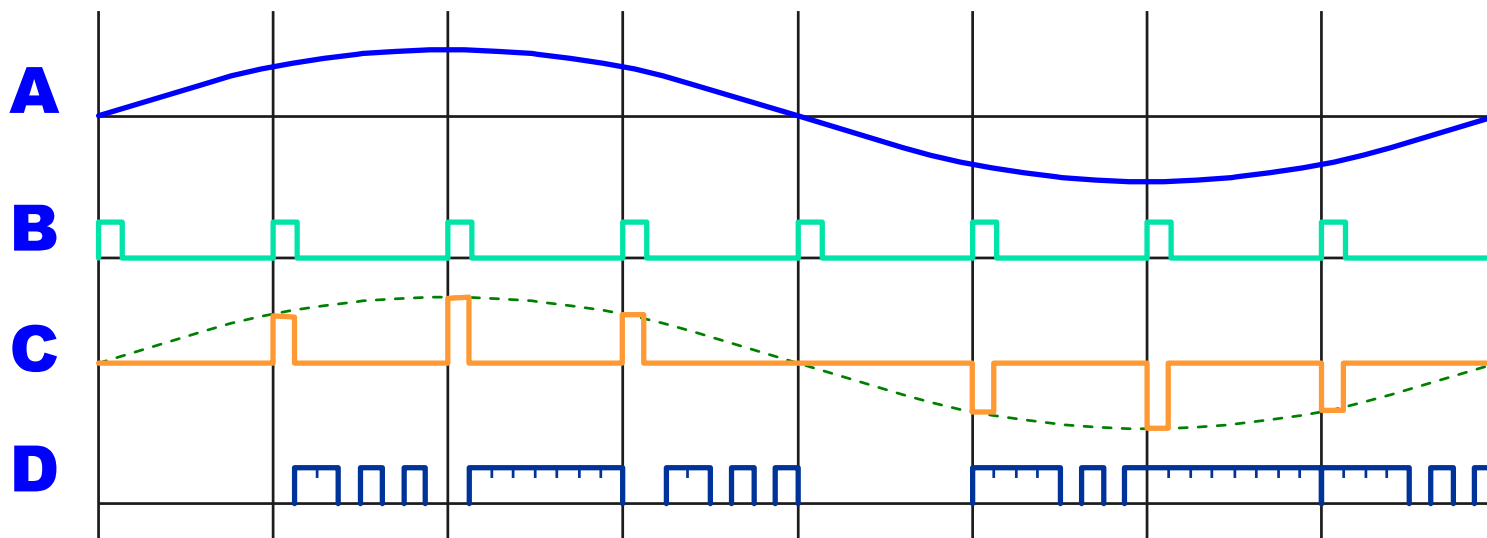
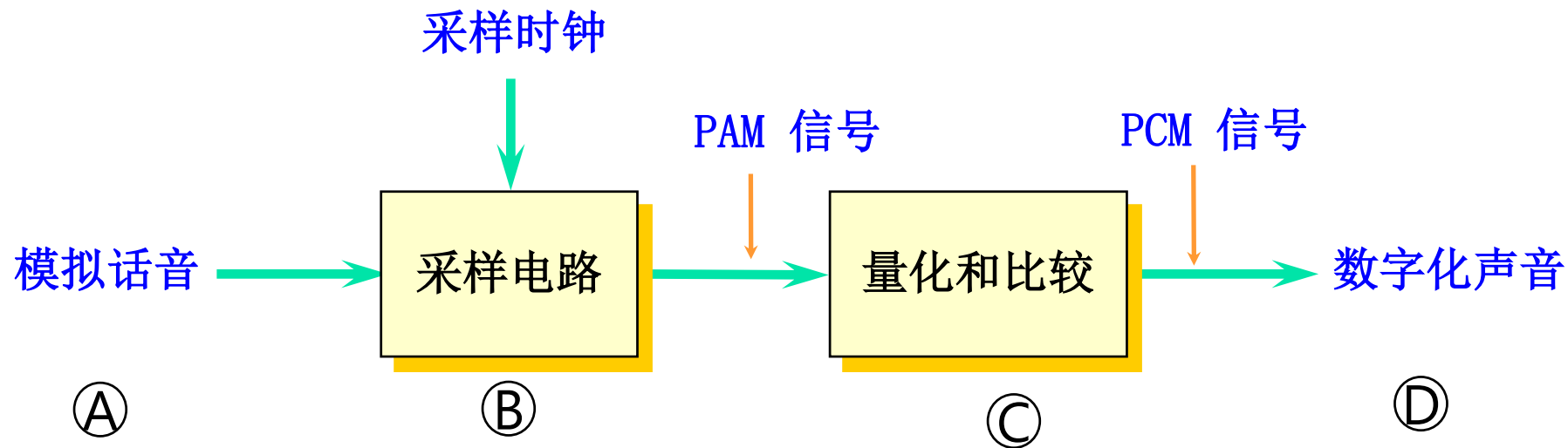
采样、量化、编码



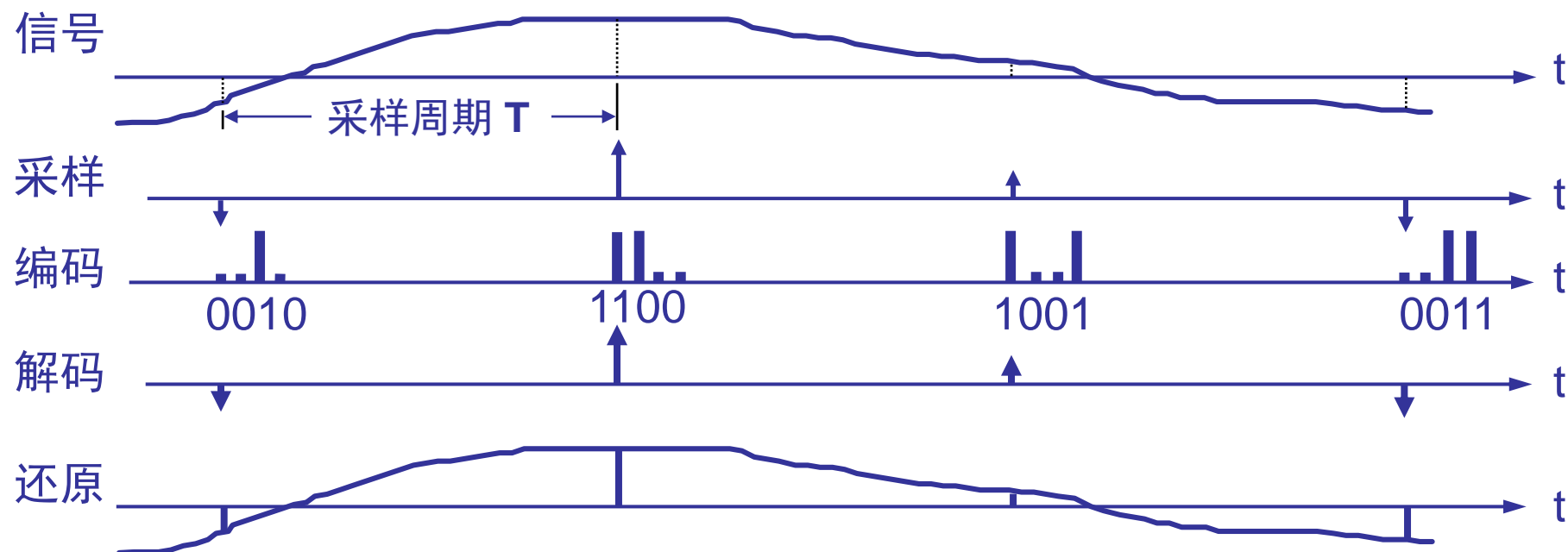
样本	量化级	二进制编码	编码信号
D ₁	1	0001	
D ₂	4	0100	
D ₃	7	0111	
D ₄	13	1101	
D ₅	15	1111	
D ₆	13	1101	
D ₇	6	0110	
D ₈	3	0011	



模拟→数字 (PCM)



PCM示意图



一个练习题



- 假设模拟信号的最高频率为4MHz，采样频率必须不小于（____），才能使得到的样本信号不失真，如果每个采样信号量化为128个等级，则信道数据速率是（_____）。

2.2 数据通信的基础知识



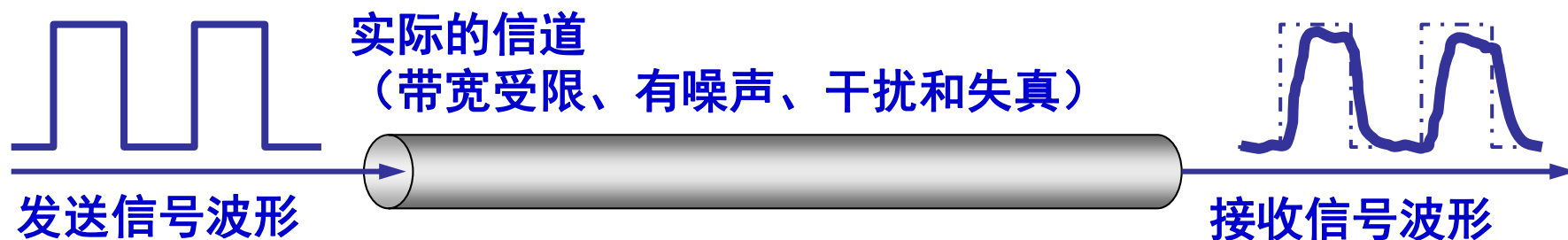
- 2.2.1 数据通信的基本概念
- 2.2.2 数字信号编码
- 2.2.3 数字调制技术
- 2.2.4 信道的极限容量

2.2.4 信道的极限容量

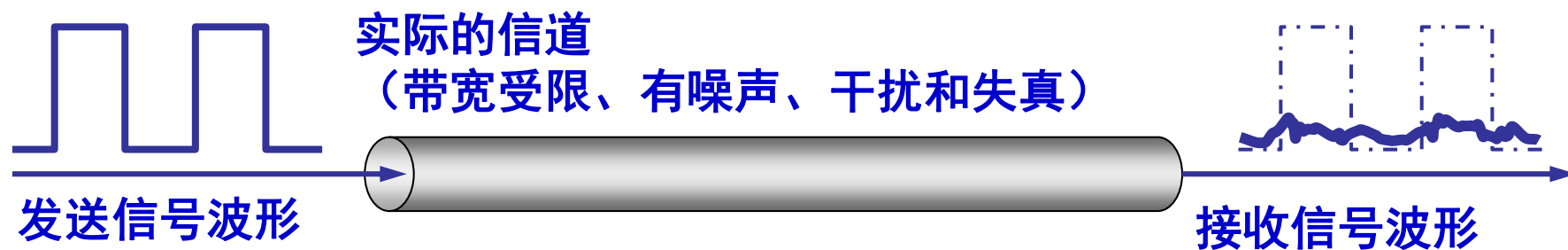


- 任何实际的信道都不是理想的，在传输信号时会产生各种失真以及带来多种干扰。

有失真，但**可识别**



失真大，**无法识别**



2.2.4 信道的极限容量



- 码元传输速率越高，或信号传输距离越远，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。
- 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

(1) 信道能够通过的频率范围



- 具体的信道所能通过的频率范围（信道的带宽Hz）总是有限的。信号中的许多高频分量往往不能通过信道。
- **理想低通信道**：信号的所有低频分量，只要频率不超过某个上限，都能够不失真地通过信道。
- **理想带通信道**：信号的频率在某个范围之间的频率分量能够不失真地通过信道，其它分量不能通过。
- 1924年，**奈奎斯特 (Nyquist)** 就推导出了著名的**奈氏准则**。他给出了在假定的理想条件下，为了避免**码间串扰**，码元的传输速率的上限值。



奈奎斯特

奈氏(Nyquist)准则



理想低通信道的最高码元传输速率 = $2W$ Baud

(无噪声、带宽受限)

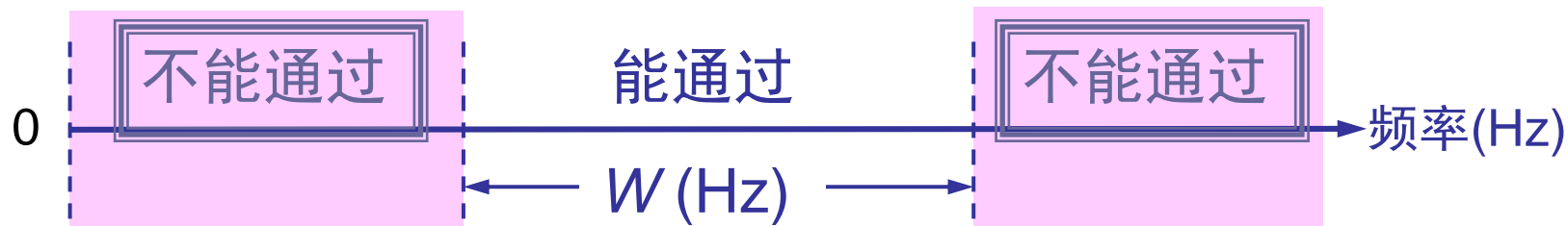


- W 是理想低通信道的带宽，单位为赫(Hz)
- 每赫带宽的理想低通信道的最高码元传输速率是每秒 2 个码元
- Baud 是**波特**，是**码元**传输速率的单位，1 波特为**每秒**传送 1 个码元（即，码元/秒）

另一种形式的奈氏准则



理想带通特性信道的最高码元传输速率 = W Baud



- W 是理想带通信道的带宽，单位为赫(Hz)
- 每赫带宽的理想带通信道的最高码元传输速率是每秒 1 个码元

奈氏准则之结论



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

如果信道的频带越宽，也就是能够通过的信号高频分量越多，那么就可以用更高的速率传送码元而不出现码间串扰。

比特率与波特率



- **比特率：数据传输速率，单位“比特/秒”**
- **波特率：码元传输速率，单位“码元/秒”**
- **若码元的状态数为2时，可用一种状态表示“1”，另一种状态表示“0”。此时比特率=波特率（即每秒钟传输的二进制位数等于每秒钟传输的码元数）。**
- **若码元的状态数为4时，四种状态分别表示为“00”，“01”，“10”，“11”。则一个码元可以携带两位二进制数，此时比特率=2*波特率。**
- **一般情况：若码元状态数为N，则比特率和波特率的关系为：**

$$s = \text{Blog}_2 N$$

要点



- 数据的传输速率 “**比特/秒**” 与码元的传输速率 “**波特**” 在数量上有一定的关系。
- 若1码元携带1bit信息量，则 比特率=波特率
- 若1 个码元携带 n bit的信息量， **M Baud** 的码元传输速率所对应的信息传输速率为 $M \times n$ b/s。

(2) 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。
- 但噪声的影响是相对的。如果信号相对较强，那么噪声的影响就相对较小。
- **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。

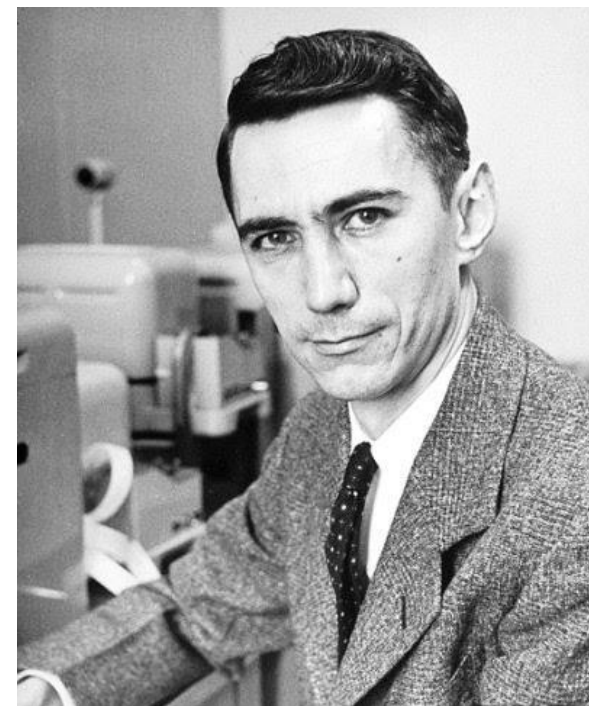
(2) 信噪比



- 1984年，香农 (Shannon) 用信息论的理论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**（**香农公式**）。
- 信道的极限信息**传输速率 C**可表达为：

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

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。



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。
- 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。
- 若信道带宽 W 或信噪比 S/N 没有上限（当然实际信道不可能是这样的），则信道的极限信息传输速率 C 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。

请注意



- 对于频带宽度已确定的信道，如果信噪比不能再提高了，并且码元传输速率也达到了上限值，那么还有办法提高信息的传输速率。
- **这就是：**用编码的方法让每一个码元携带更多比特的信息量。
- 通信领域的专家致力于寻找新的信号编码和调制方法

一个练习题



- 设信道的带宽为4000Hz，调制为4种不同的码元，根据Nyquist定理，理想低通信道的数据速率为_____bps。

第 2 章 物理层



- 2.1 物理层的基本概念
- 2.2 数据通信的基础知识
- 2.3 物理层下面的传输媒体
- 2.4 信道复用技术
- 2.5 数字传输系统
- 2.6 物理层协议举例

2.3 物理层下面的传输媒体

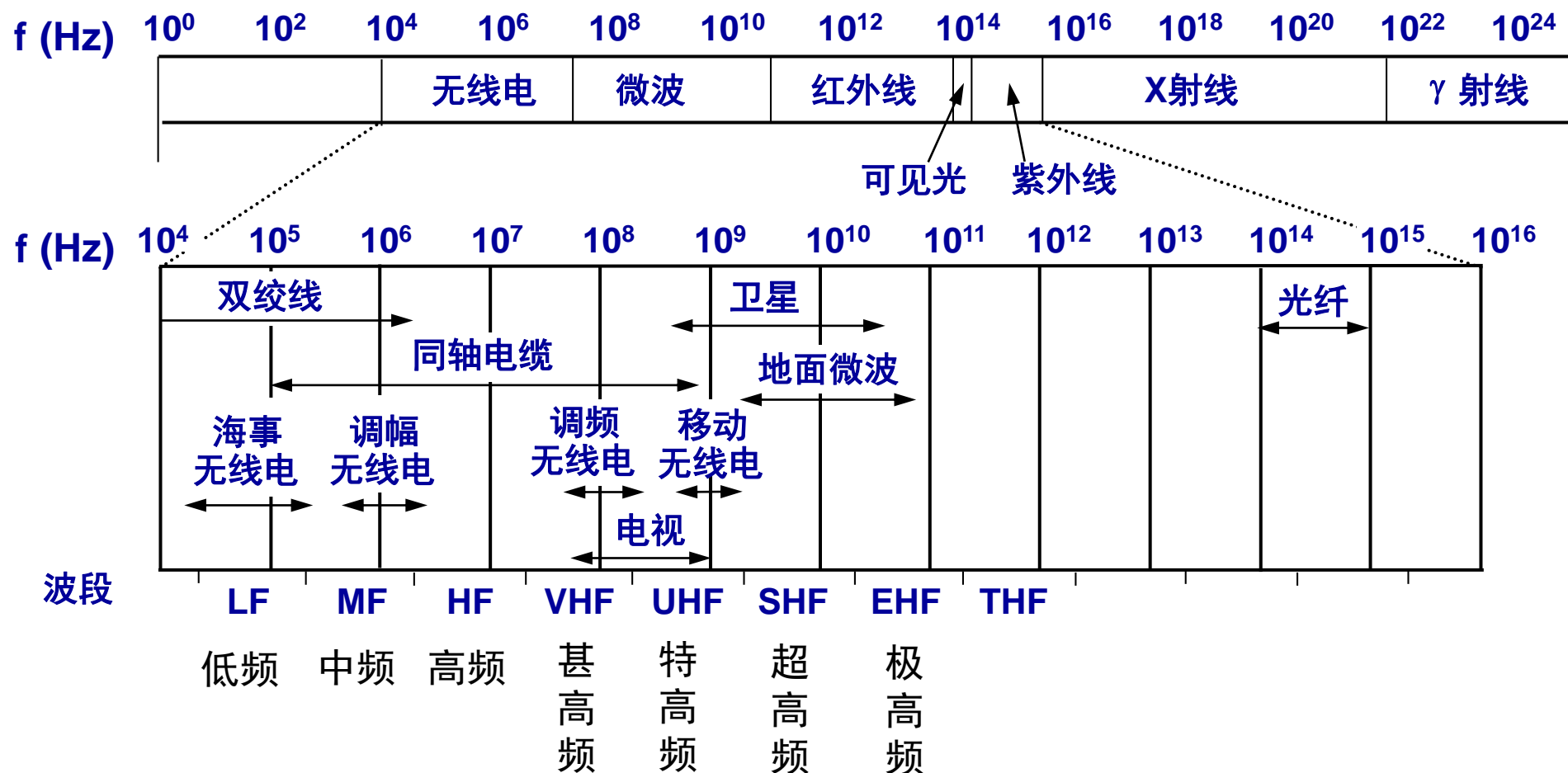


- **传输媒体也称为传输介质或传输媒介**，它就是数据传输系统中在发送器和接收器之间的物理通路。
- 传输媒体可分为两大类，即**导引型传输媒体**和**非导引型传输媒体**。
- 在导引型传输媒体中，电磁波被导引沿着固体媒体（铜线或光纤）传播。
- 非导引型传输媒体就是指**自由空间**。在非导引型传输媒体中，电磁波的传输常称为**无线传输**。

2.3 物理层下面的传输媒体



电信领域使用的电磁波的频谱：



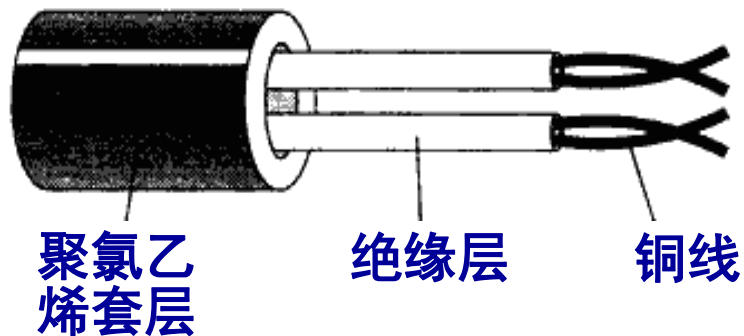
2.3.1 导引型传输媒体



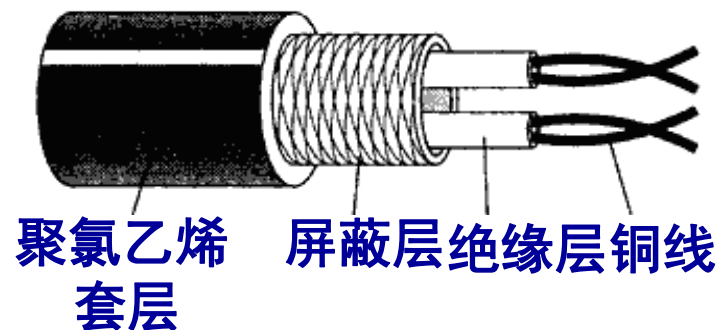
■ 双绞线

- 古老但最常用的传输媒体。
- 电话系统使用的就是双绞线。
- 绞合可减少对相邻双绞线的电磁干扰。
- 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。
- 带宽依赖于线的粗细和传输距离；
- 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)

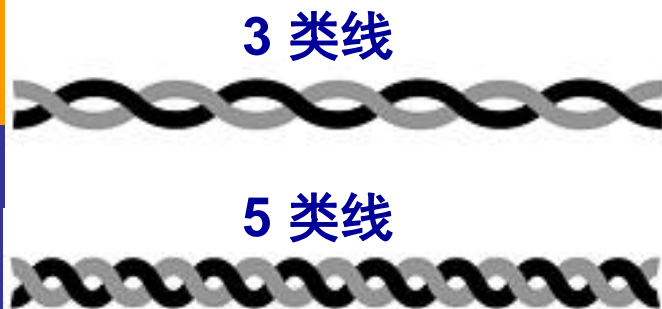
2.3.1 导引型传输媒体



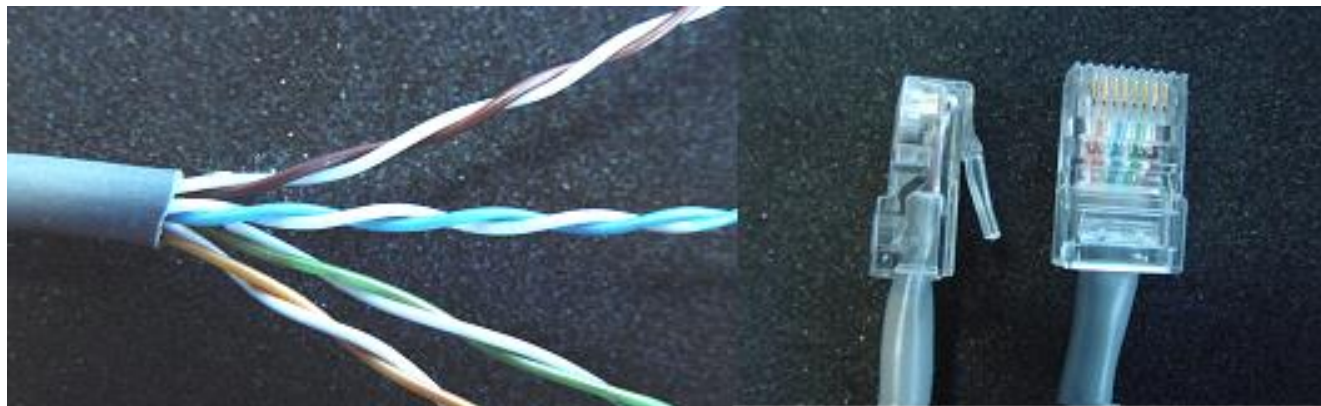
(a) 无屏蔽双绞线



(b) 屏蔽双绞线



(c) 不同的绞合度的双绞线



UTP线缆内部4对线组成

双绞线标准



- 1991年，美国电子工业协会 EIA 和电信行业协会联合发布了一个用于室内传送数据的无屏蔽双绞线和屏蔽双绞线的标准 **EIA/TIA-568**。
- 1995年将布线标准更新为 **EIA/TIA-568-A**。
- 此标准规定了 **5 个种类的 UTP 标准**（从 1 类线到 5 类线）。
- 对传送数据来说，现在最常用的 UTP 是5类线（Category 5 或 CAT5）。

双绞线标准



常用的绞合线的类别、带宽和典型应用

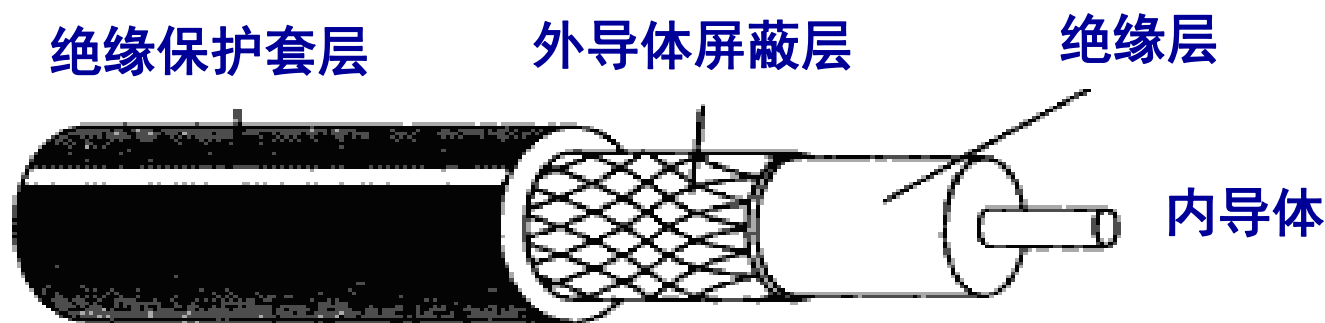
绞合线类别	带宽	线缆特点	典型应用
3	16 MHz	2对4芯双绞线	模拟电话；曾用于传统以太网（10 Mbit/s）
4	20 MHz	4对8芯双绞线	曾用于令牌局域网
5	100 MHz	与4类相比增加了绞合度	传输速率不超过100 Mbit/s的应用
5E（超5类）	125 MHz	与5类相比衰减更小	传输速率不超过1 Gbit/s的应用
6	250 MHz	与5类相比改善了串扰等性能	传输速率高于1 Gbit/s的应用
7	600 MHz	使用屏蔽双绞线	传输速率高于10 Gbit/s的应用

2.3.1 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。



同轴电缆的结构

2.3.1 导引型传输媒体



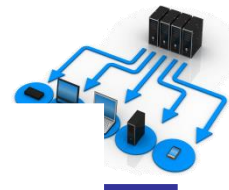
■ 同轴电缆

■ 基带同轴电缆

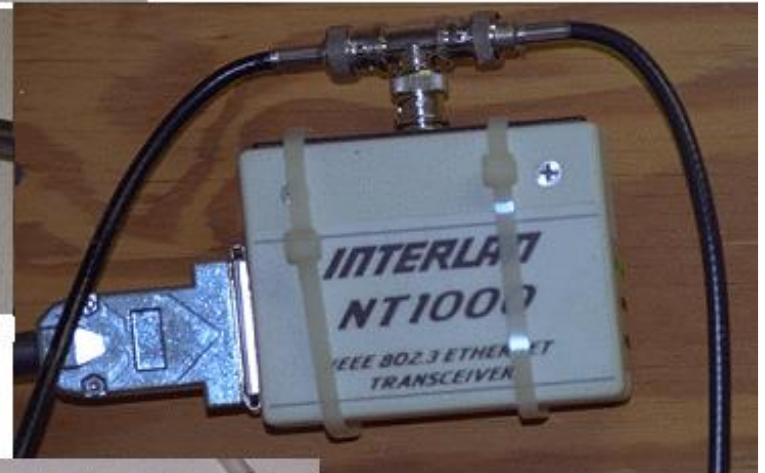
- **50 Ω 用于数字传输**
- 以10Mb/s可将基带数字信号，粗缆传送500米，细缆传送180米
- 局域网发展初期常用

■ 宽带同轴电缆

- **75 Ω 用于模拟传输**
- 高质量同轴电缆带宽接近1GHz
- 有线电视常用



与计算机的连接要用T型分接头



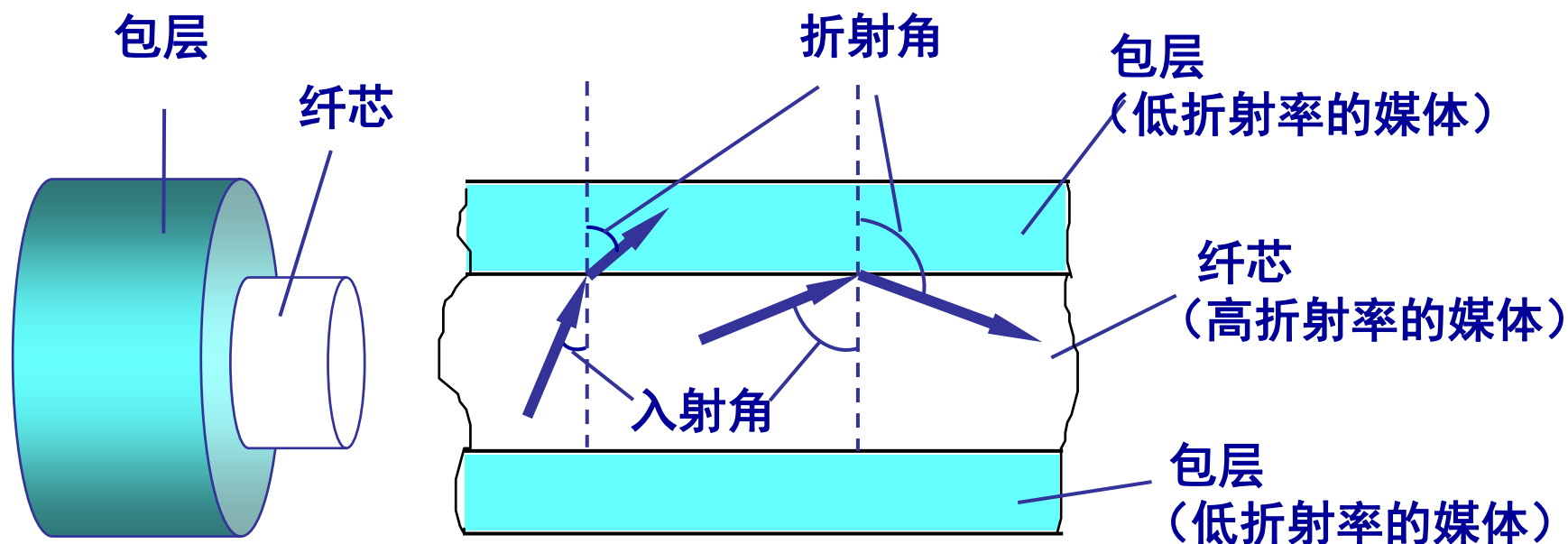
2.3.1 导引型传输媒体



■ 光缆

- 光纤是光纤通信的传输媒体。
- 光纤由非常透明的石英玻璃拉成细丝，主要由纤芯和薄层构成双层通信圆柱体，纤芯很细直径只有8至100um，纤芯和包层具有不同的折射系数。
- 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。

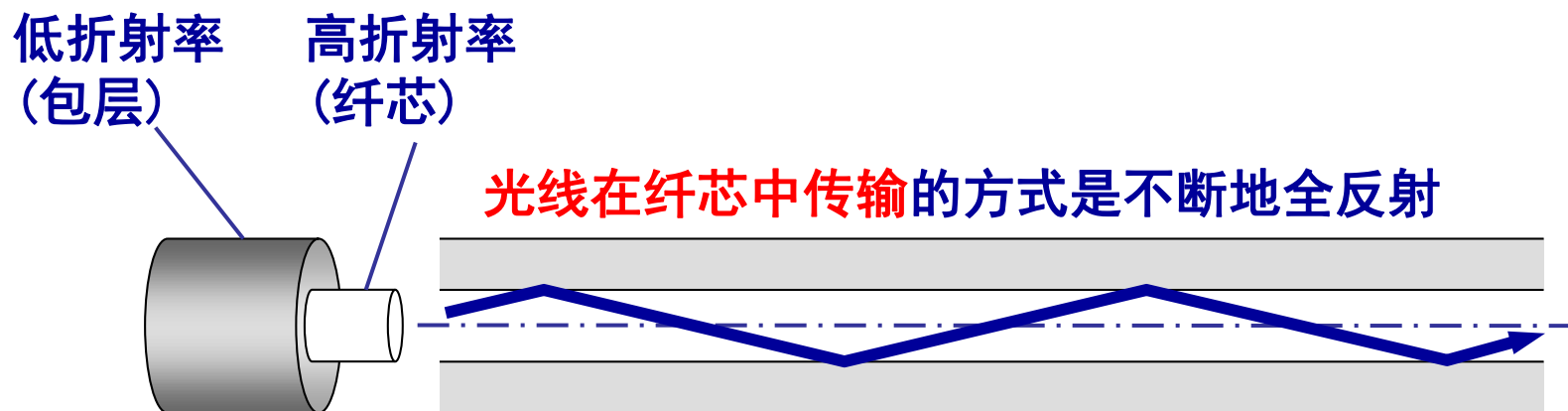
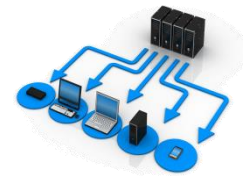
光线在光纤中的折射



光线在光纤中的折射

当光线从高折射率的媒体射向低折射率的媒体时，其折射角将大于入射角。因此，如果入射角足够大，就会出现全反射，光也就沿着光纤传输下去。

光纤的工作原理



光波在纤芯中的传播

只要从纤芯中射到纤芯表面的光线的入射角大于某个临界角度，就可产生全反射。

多模光纤与单模光纤



■ 多模光纤

- 可以存在多条不同角度入射的光线在一条光纤中传输。这种光纤就称为**多模光纤**
- 传输中光脉冲会逐渐展宽，造成失真，适合短距离传输

■ 单模光纤

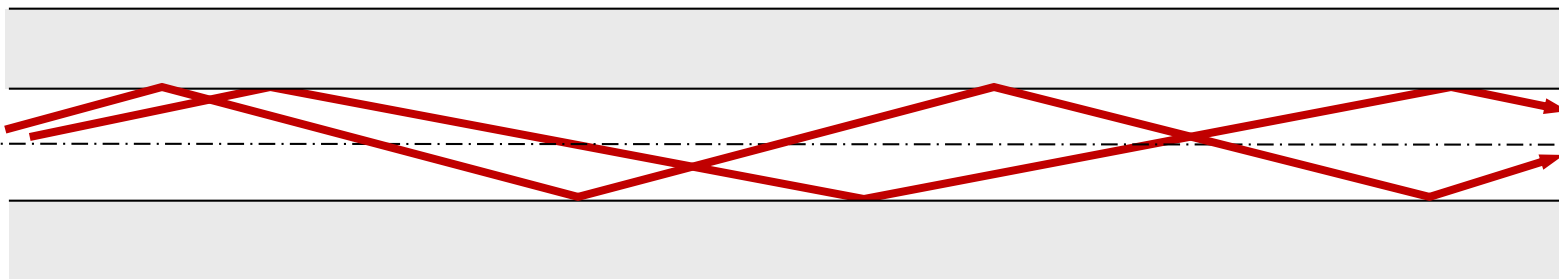
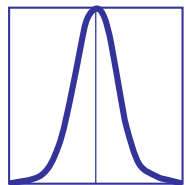
- 若光纤的直径减小到只有一个光的波长，则光纤就像一根波导那样，它可使光线一直向前传播，而不会产生多次反射。这样的光纤称为**单模光纤**
- 使用昂贵的半导体激光源，光脉冲的衰耗小，适合长距离传输

多模光纤与单模光纤

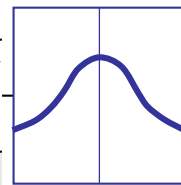


多模光纤

输入脉冲

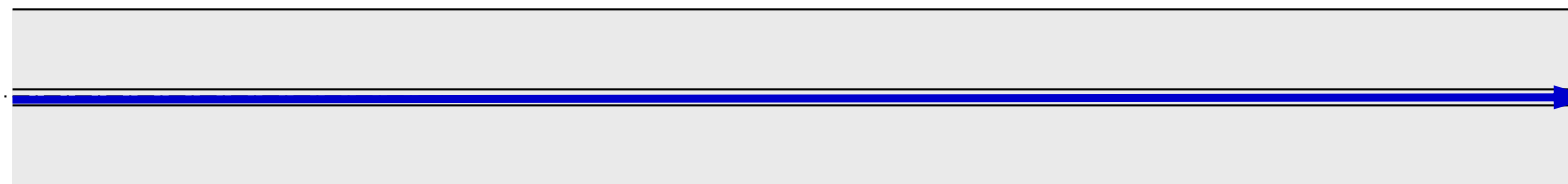
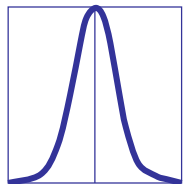


输出脉冲

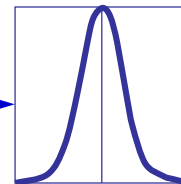


单模光纤

输入脉冲



输出脉冲



多模光纤(a) 和 单模光纤(b) 的比较

光纤通信中使用的光波的波段



- 常用的三个波段的中心分别位于 **850 nm**（多模），**1300 nm**（多模和单模） 和 **1550 nm**（单模）。
- 所有这三个波段都具有 **25000~30000 GHz** 的带宽，可见光纤的通信容量非常大。

光纤优点

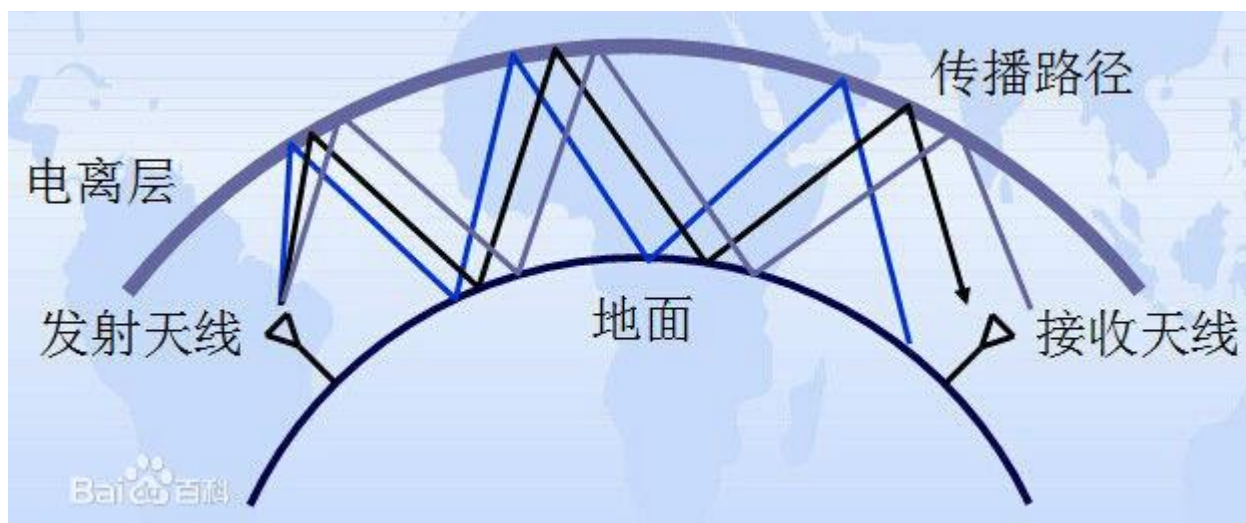


- (1) 通信容量非常大。
- (2) 传输损耗小，中继距离长。
- (2) 抗雷电和电磁干扰性能好。
- (3) 无串音干扰，保密性好。
- (4) 体积小，重量轻。

2.3.2 非导引型传输媒体



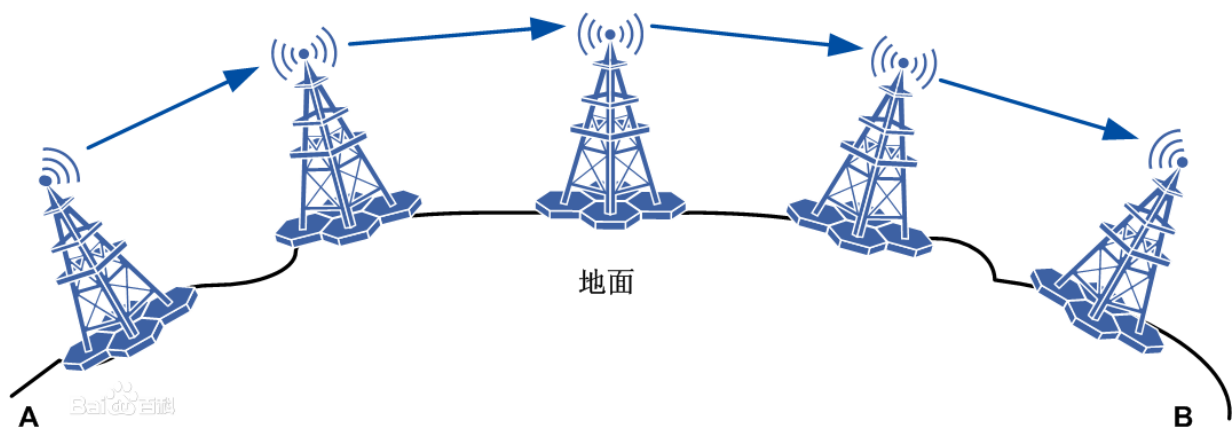
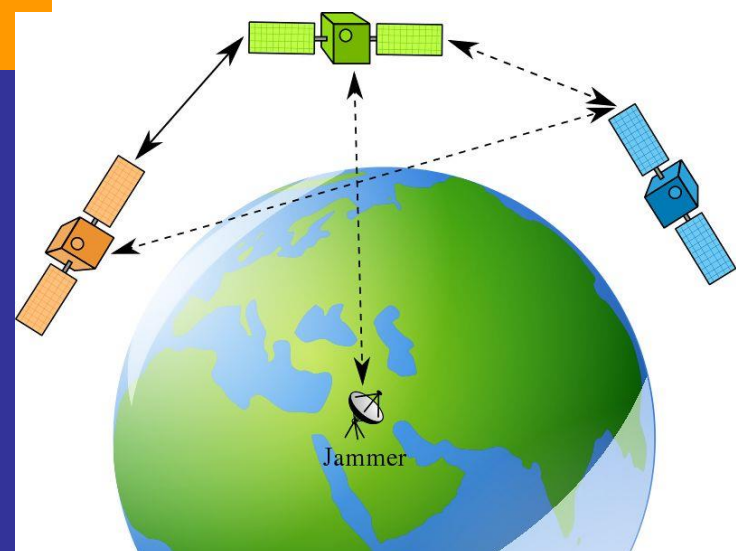
- 将自由空间称为“非导引型传输媒体”。
- 无线传输所使用的频段很广。
- **短波通信**（即高频通信）主要是靠电离层的反射，但短波信道的通信质量较差，传输速率低。
 - 波长在100米~10米之间，频率范围3兆赫~30兆赫



2.3.2 非导引型传输媒体



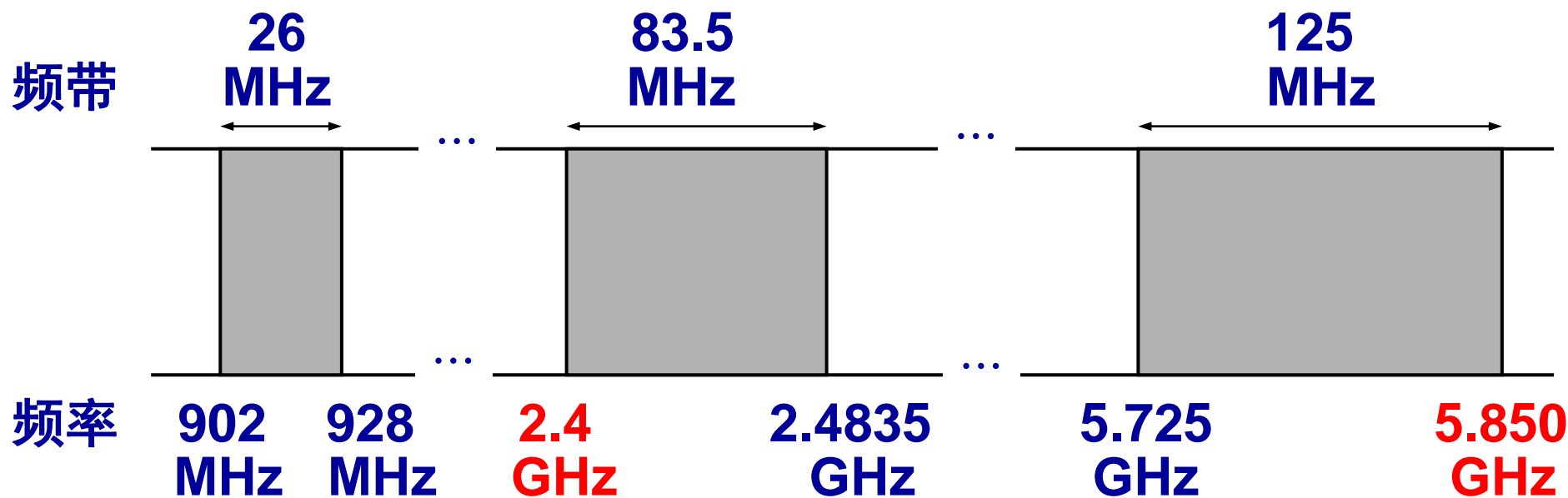
- **微波通信**由于地球表面的弯曲，信号的直线传输有限，需要建微波中继站。
 - 波长为1m至0.1mm，频率范围是300 MHz~300 GHz
- 传统微波通信有两种方式：
 - 地面微波接力通信
 - 卫星通信





无线局域网使用的 ISM 频段

要使用某一段无线电频谱进行通信，通常必须得到本国政府有关无线电频谱管理机构的许可证。但是，也有一些无线电频段是可以自由使用的，正好满足计算机**无线局域网**的需求。例如：ISM（工业、科学、医学）频段。



无线局域网使用的 ISM 频段

第 2 章 物理层



- 2.1 物理层的基本概念
- 2.2 数据通信的基础知识
- 2.3 物理层下面的传输媒体
- 2.4 信道复用技术
- 2.5 数字传输系统
- 2.6 物理层协议举例

2.4 信道复用技术

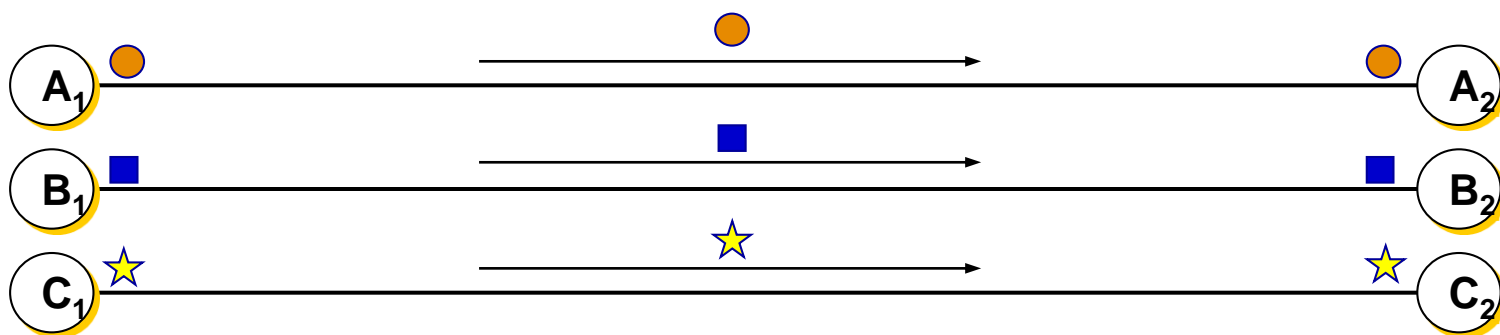


- 2.4.1 频分复用
- 2.4.2 时分复用
- 2.4.3 波分复用
- 2.4.4 码分复用

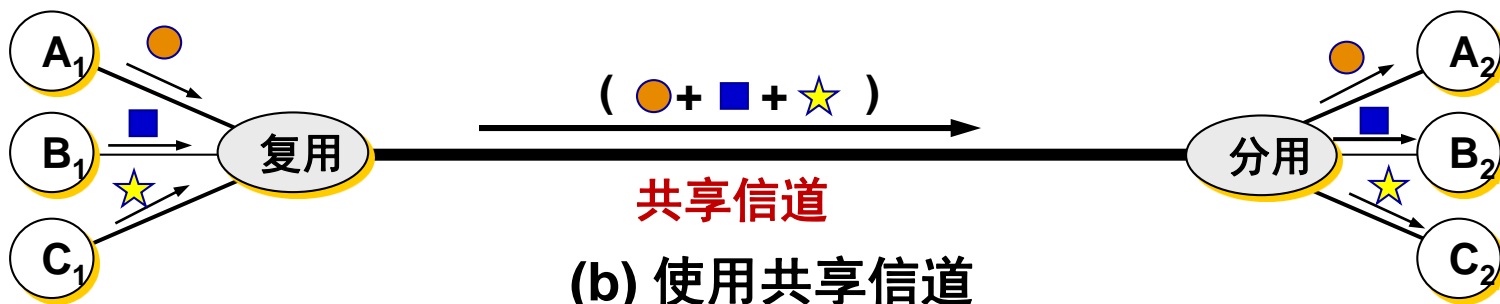
2.4 信道复用技术



复用 (multiplexing) 是将多路信号组合在一条物理信道上进行传输，在接收端再将各路信号分离开来，提高通信线路的利用率。



(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)

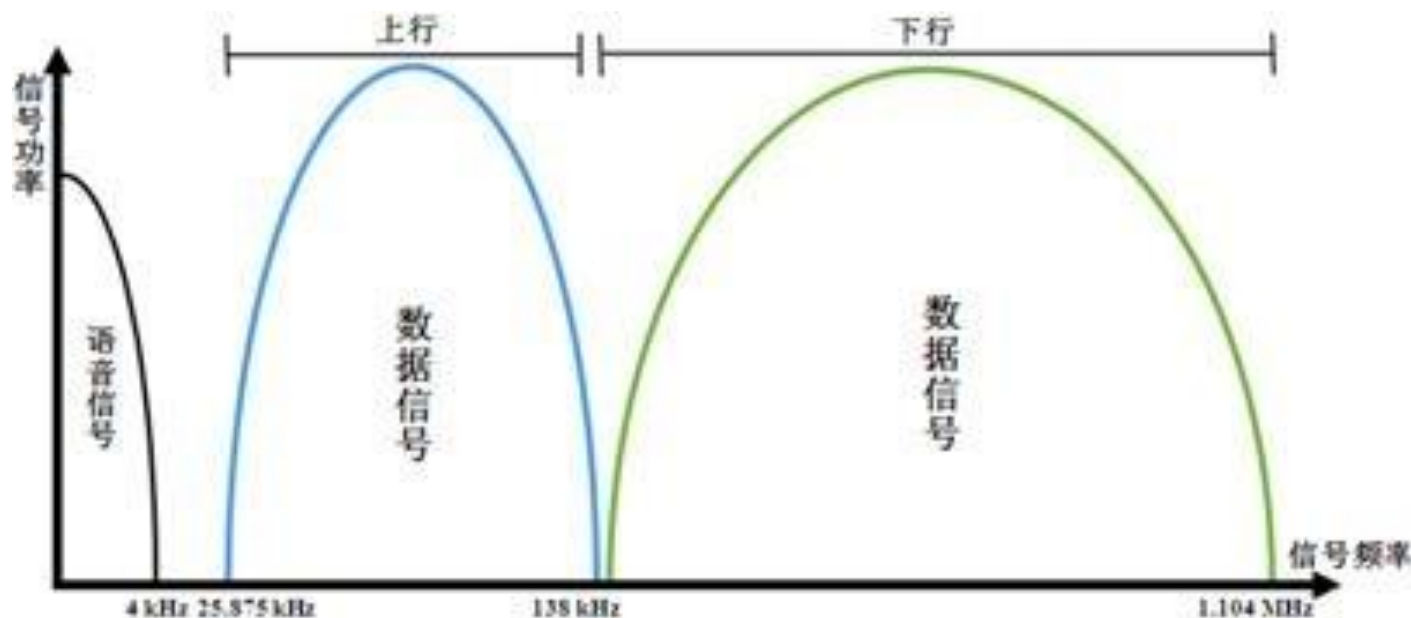
- 将整个带宽分为多份，用户在分配到一定的频带后，在通信过程中自始至终都占用这个频带。
- **频分复用**的所有用户在同样的时间**占用不同的带宽资源**（请注意，这里的“带宽”是频率带宽而不是数据的发送速率）。



ADSL技术



- ADSL (非对称数字用户线路)
- 利用现有电话线(实际带宽1.1 MHz)实现宽带网络连接
- 非对称 (Asymmetric)的含义：下行速率大于上行



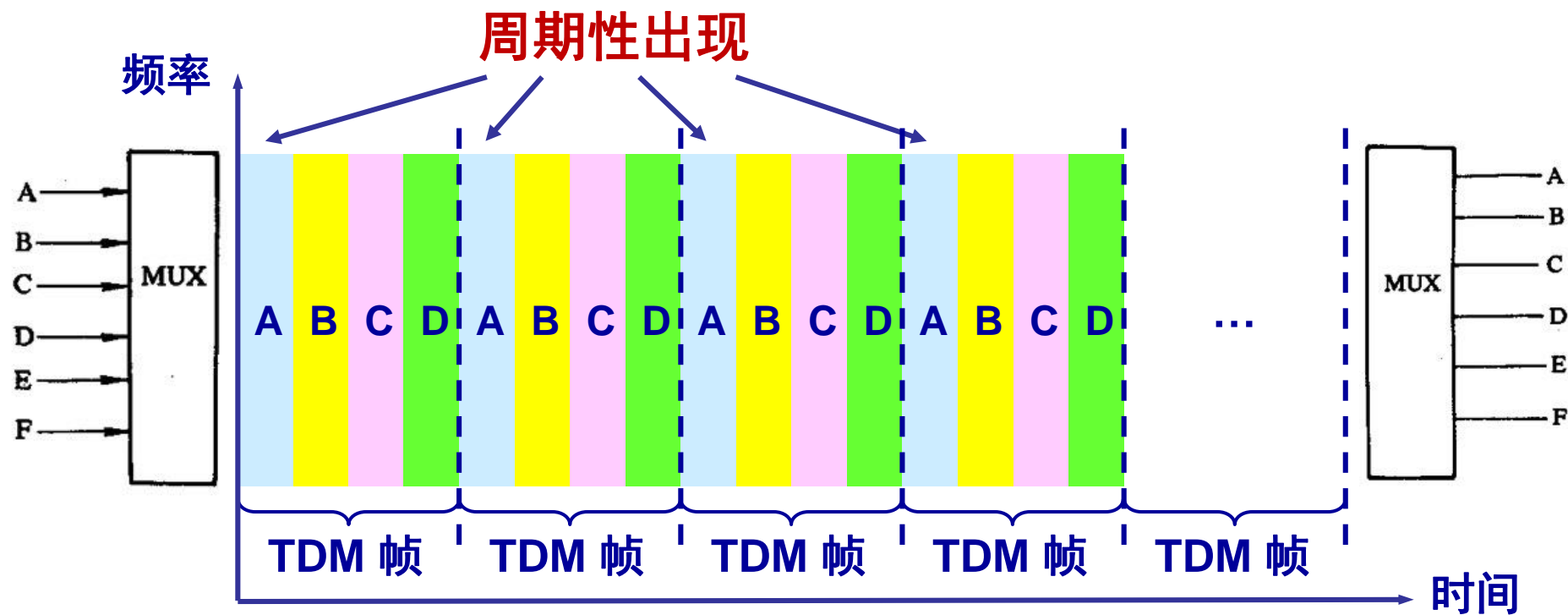
时分复用TDM (1)



(Time Division Multiplexing)

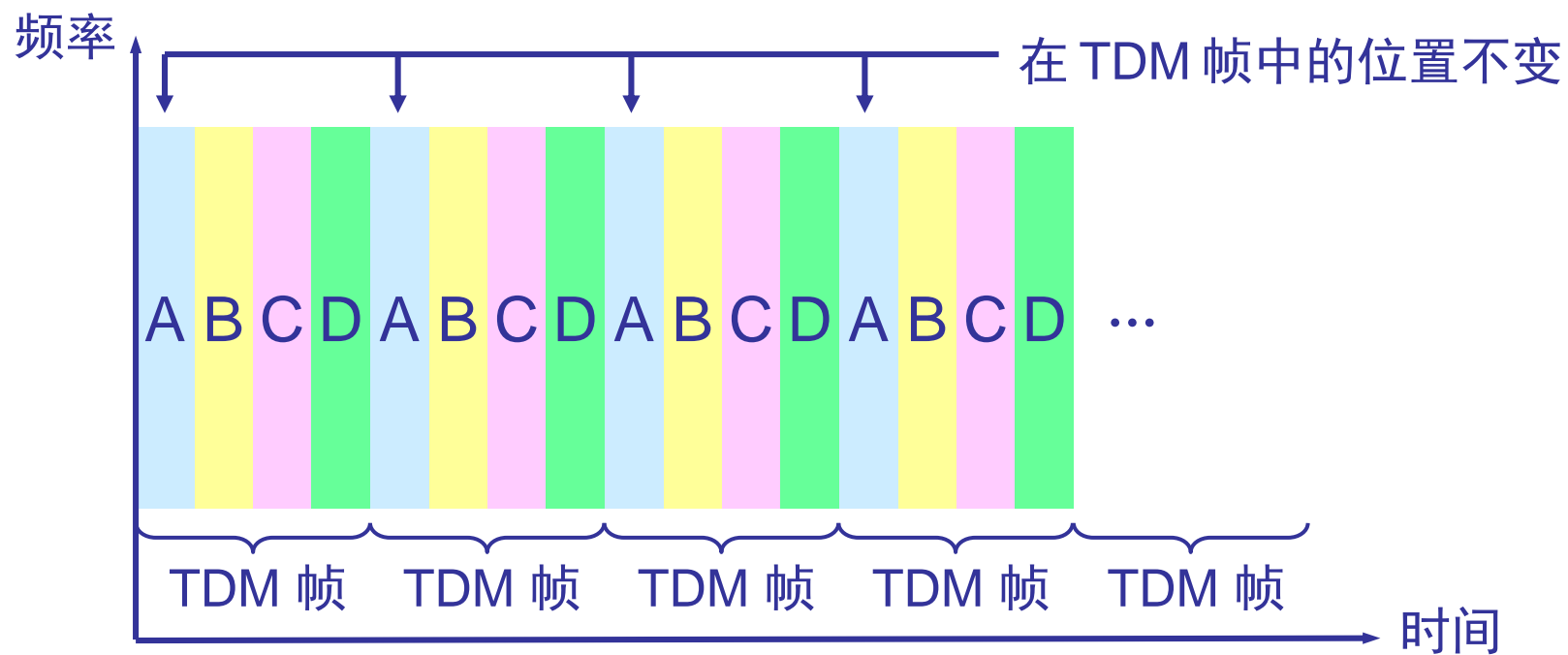
- 时分复用的所有用户是在不同的时间占用同样的频带宽度。
- 同步TDM（普通TDM）是将时间划分为一段段等长的时分复用帧（TDM 帧），每个用户占用的时隙周期性出现。即：信号源与时隙序号固定，即同步。
 - 时间片的分配事先约定，且固定不变。
 - 优点：控制简单，接收设备根据预约的时间片分配方案，将收到的数据分发到不同的输出线路上。
 - 缺点：当某个信号源没有数据时，仍然占用时间片，不能充分利用信道。

时分复用TDM

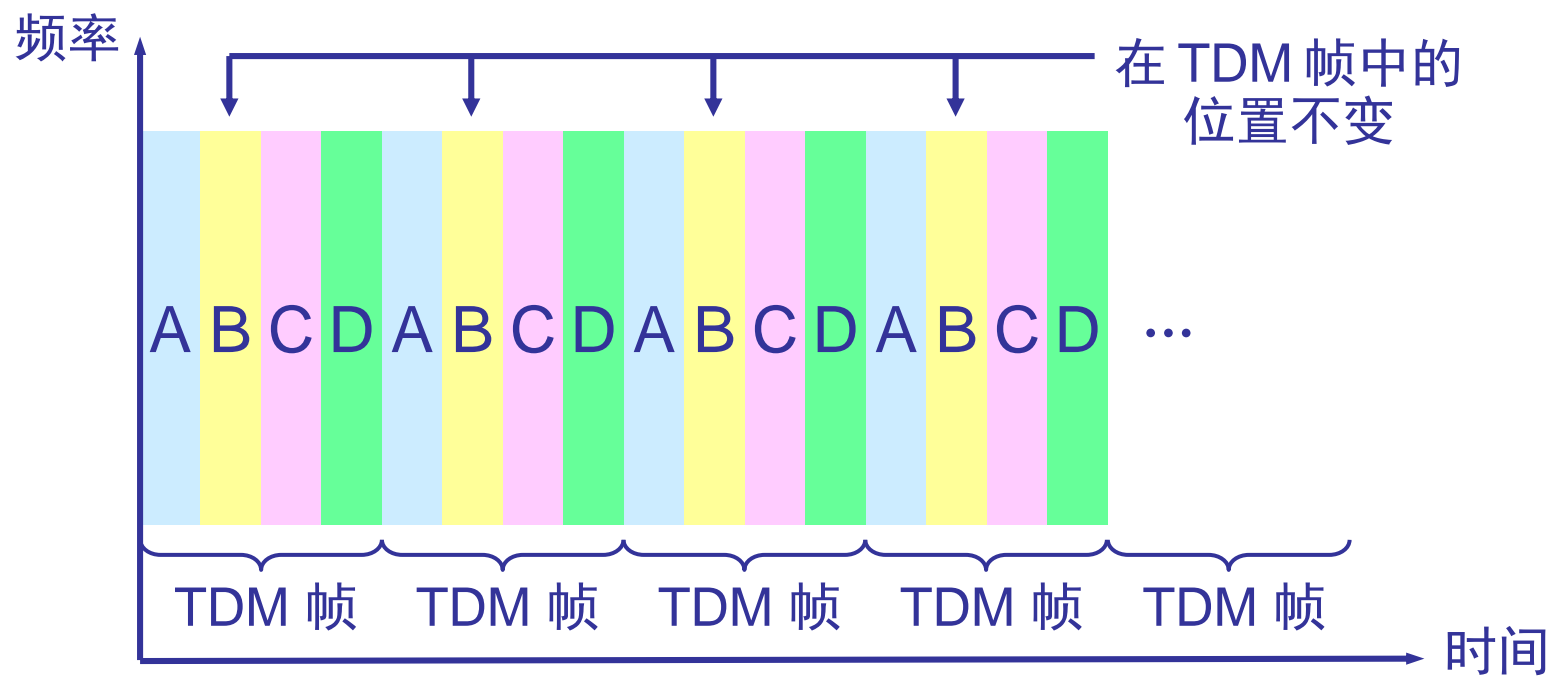
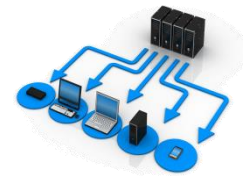


时分复用

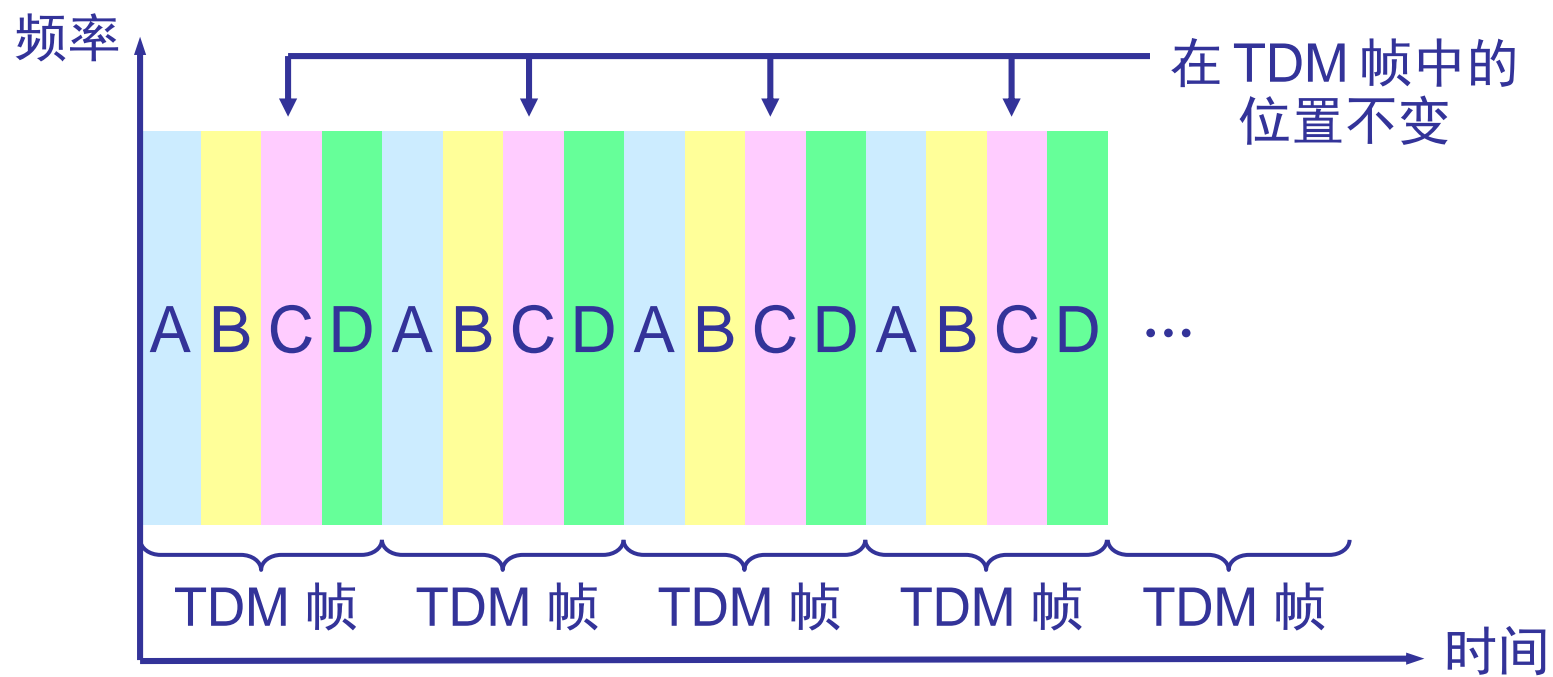
时分复用



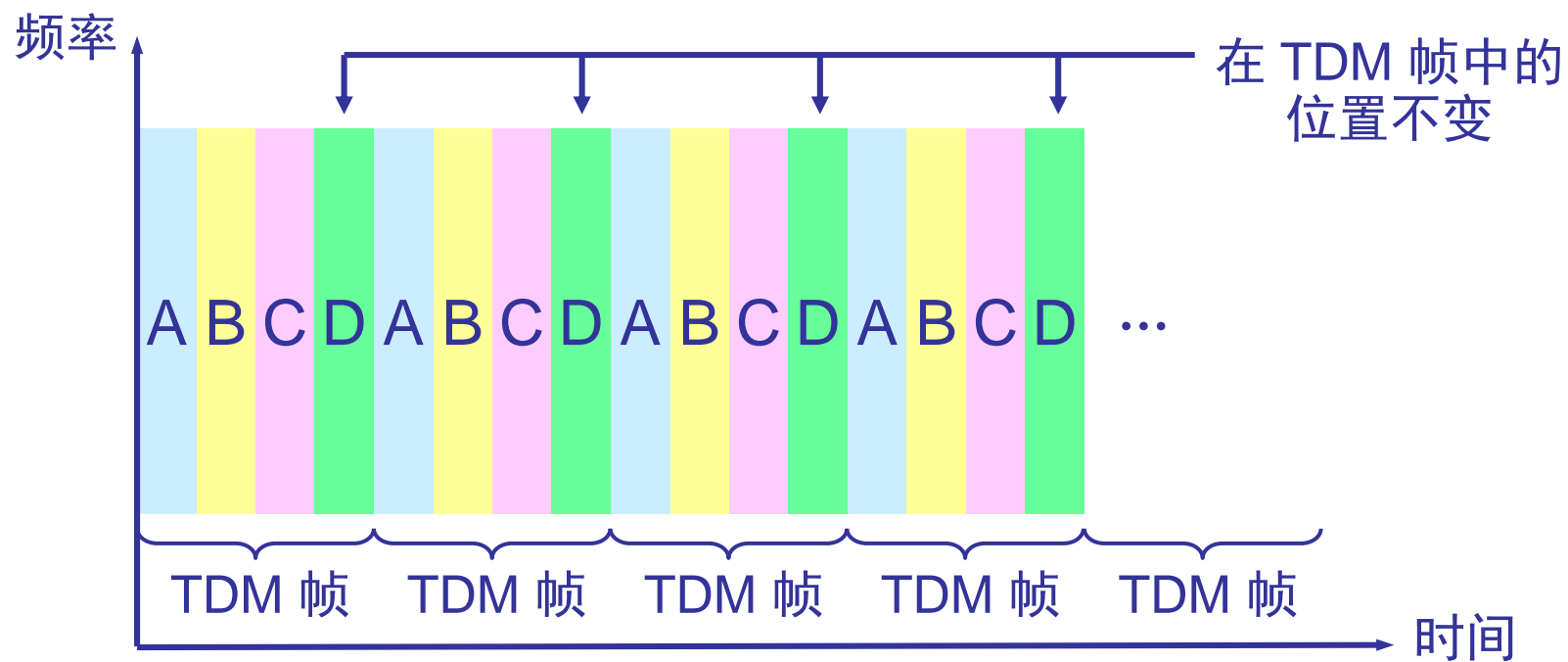
时分复用



时分复用



时分复用

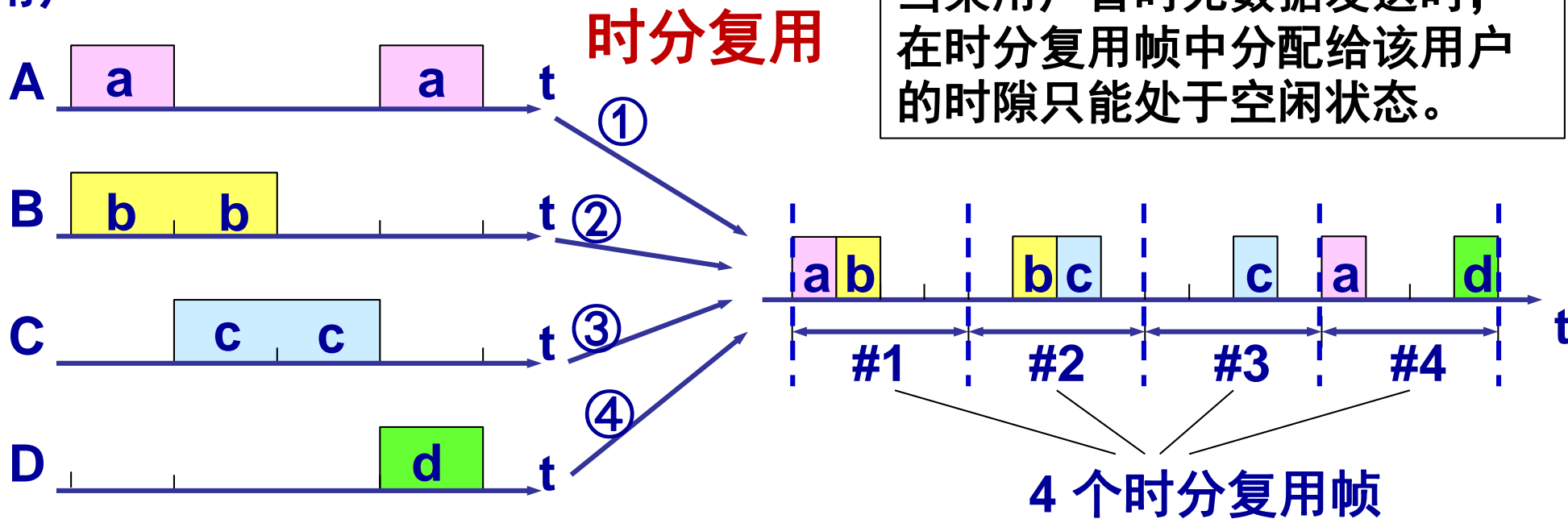


时分复用可能会造成线路资源的浪费



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性质，用户对分配到的子信道的利用率一般是不高的。

用户



时分复用可能会造成线路资源的浪费

时分复用TDM（2）



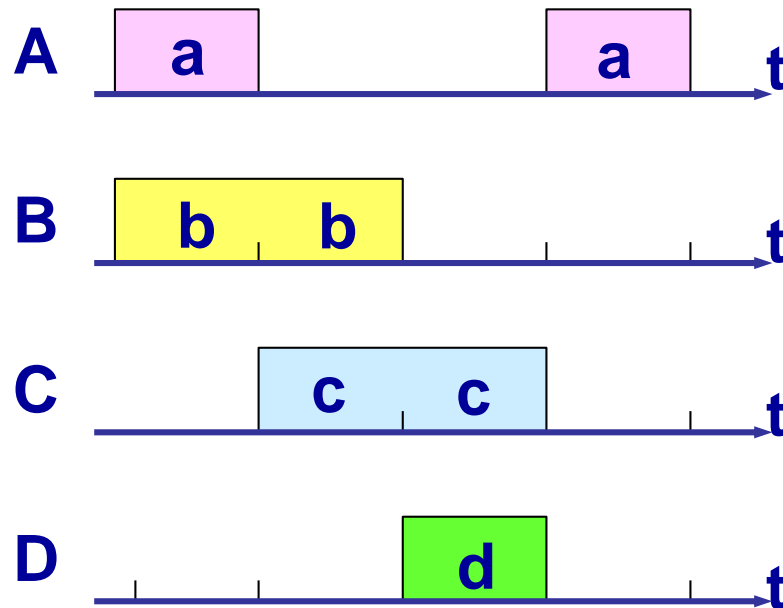
■ 统计时分复用STDM（异步TDM）

- 时间片按需分配，需要发送数据的信号源提出申请，才能获得时间片。即：公共信道的时隙实行“**按需分配**”，对那些需要传送信息或正在工作的终端（信号源）才分配时隙，可以使得所有时隙都能够饱满地得到使用，可以使得服务的终端数大于时隙的个数，提高信道的利用率。
- 特点：可以充分利用信道，但控制比较复杂。
- 例如下图：4个低速用户，每个TDM帧2个时隙，且每个时隙有相应的用户地址信息。

统计时分复用 STDM (Statistic TDM)

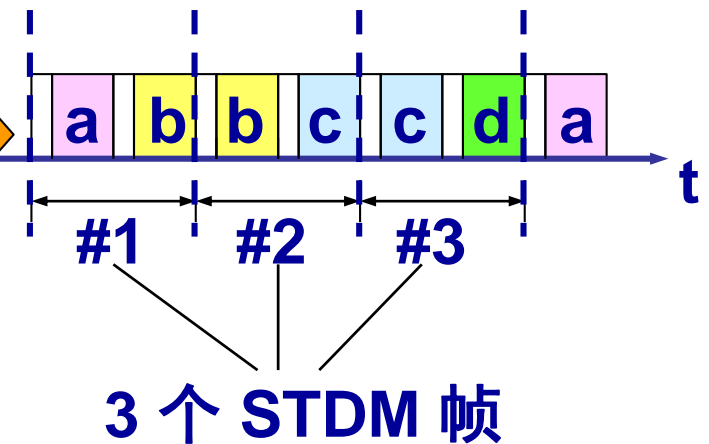


用户



集中器

STDM 帧不是固定分配时隙，而是按需动态地分配时隙。因此统计时分复用可以提高线路的利用率。



统计时分复用的工作原理

TDM使用举例



- 电话系统中为了有效地利用传输线路，可将多个话路的PCM信号用时分复用 TDM (Time Division Multiplexing)的方法装成时分复用帧，然后发送到线路上。
- **北美体制：**用于北美和日本的电话系统T1信号(1.544Mbps)。
- **欧洲体制：**我国电信部门使用的E1传输系统(2.048Mbps)。

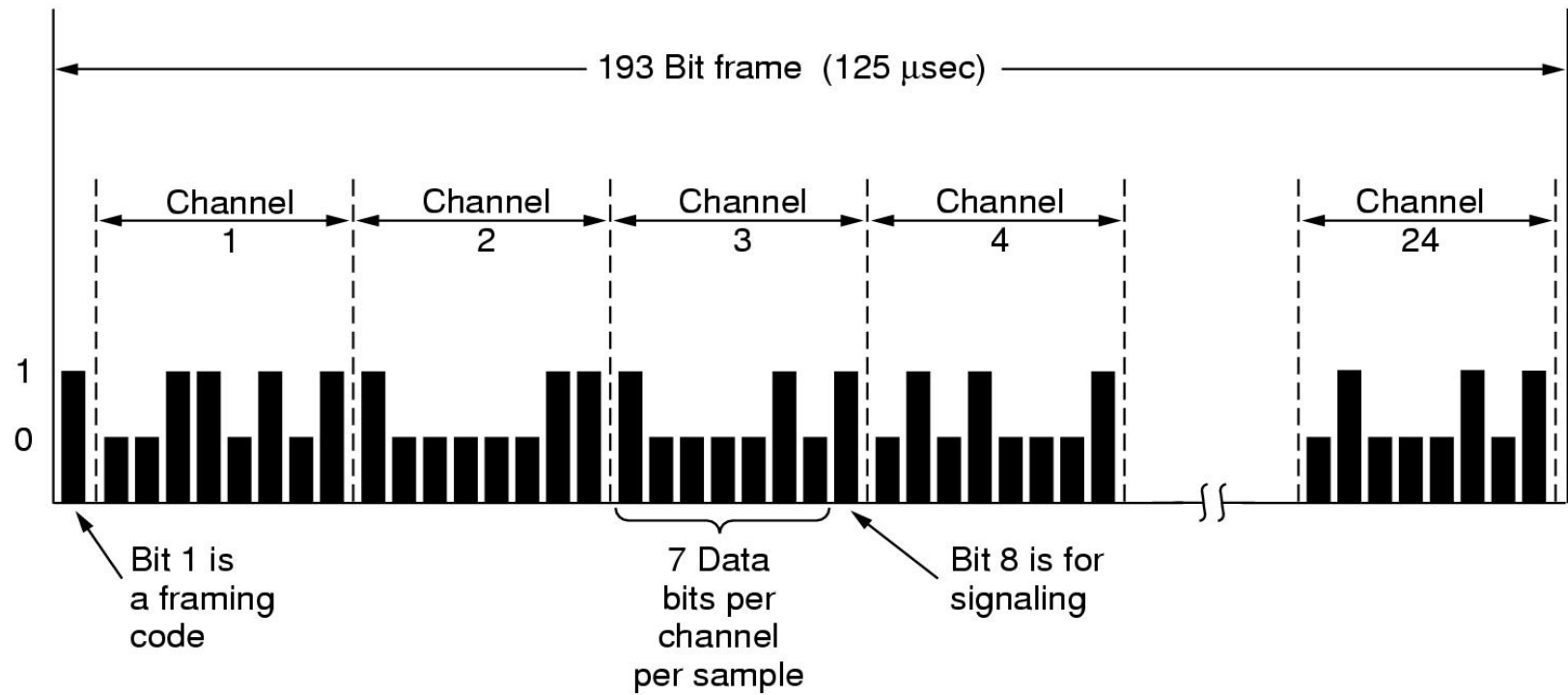
T1电话系统



■ T1电话系统

- 每路电话的带宽为3400Hz，每秒8000次速率对模拟信号采样；
- 每个采样值被编码成7bit的数字信号，在加上1bit的控制信号；
- 24路信号组成一帧；
- 外加上1个帧同步比特；
- 一帧共有： $(7+1)*24+1=193\text{bit}$ ；
- 每秒传送8000帧，总数据速率为 $8000*193=1.544\text{Mbps}$

T1信道

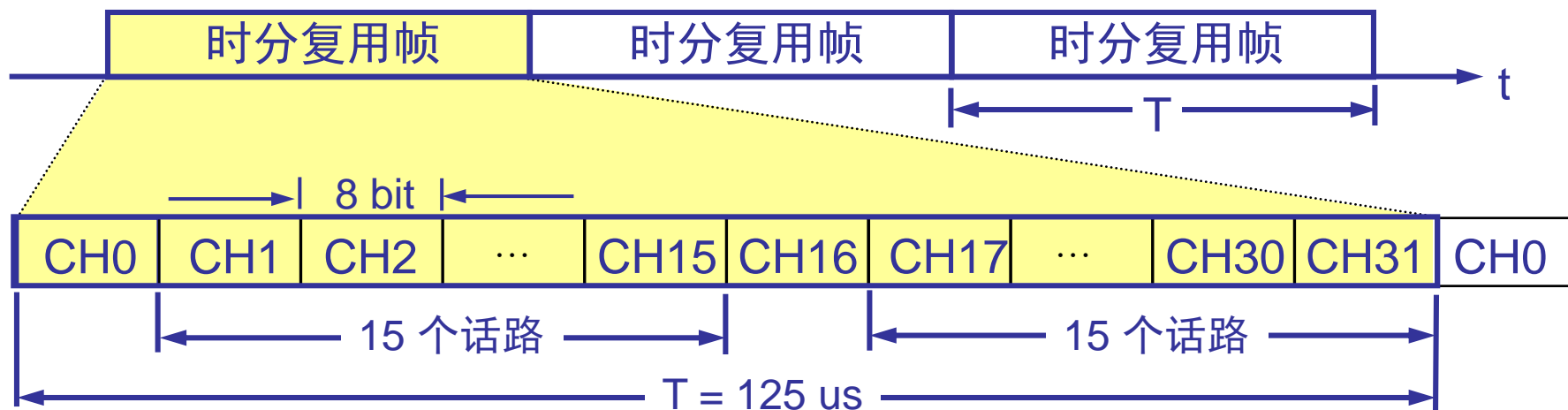


E1信道



- 一个时分复用帧共划分32个相等的时隙，即32路信号分时复用一条通道；
- 每个时隙8bit；
- 其中CH0作帧同步，CH16传送信令，剩下的30路传送话音。
- 采样频率为每秒8000次；
- 总的速率速率为： $8 \times 32 \times 8000 = 2.048 \text{ Mbps}$

E1 的时分复用帧



2.4.2 波分复用 WDM



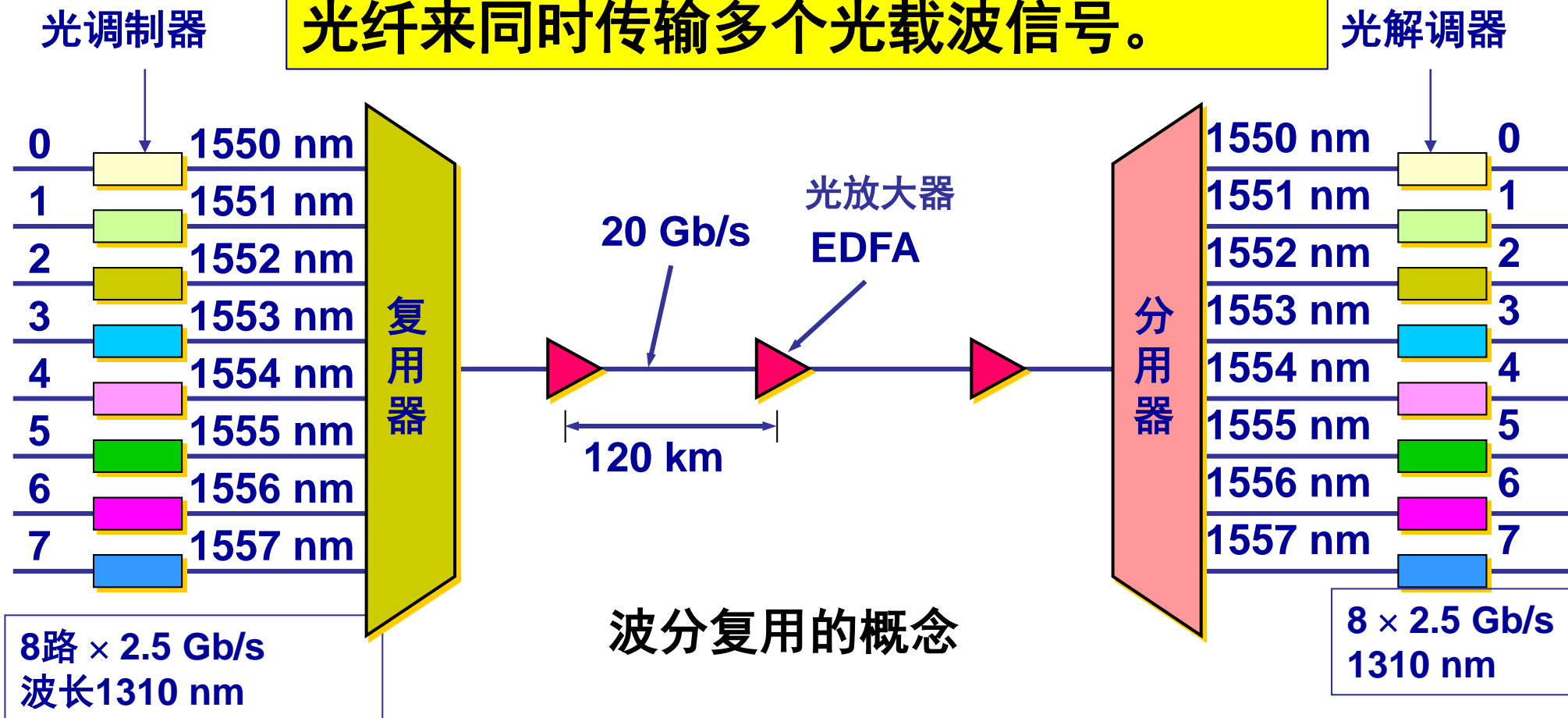
(Wavelength Division Multiplexing)

- 同FDM类似，主要用于光纤通信中；**波分复用就是光的频分复用。**
 - 不同的信号源使用不同频率（波长）的光波来传输数据，各路光经过一个棱镜（或衍射光栅），合成一个光束在光纤上传输；在接收端再将各路光波分开。
- **密集波分复用DWDM**（Dense WDM）：技术的发展一根光纤上复用的光载波信息路数越来越多，例如80或更多路数。

2.4.2 波分复用 WDM (Wavelength Division Multiplexing)



波分复用就是光的频分复用。使用一根光纤来同时传输多个光载波信号。



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)**
- 每个用户在**同样的时间**使用**同样的频带**进行通信。
- 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。
- 特别在无线局域网中，采用CDMA可提高话音质量、数据传输可靠性、增大通信系统容量（是GSM的4~5倍），降低手机的平均发射功率。

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)。设 $m=8$
- 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 00011011。
 - 发送比特 1 时，就发送序列 00011011，
 - 发送比特 0 时，就发送序列 11100100。
- 按惯例，0写成-1，1写成+1，S 站的码片序列：
(-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)

码片序列实现了扩频



- 假定S站要发送信息的数据率为 b bit/s。由于每一个比特要转换成 m 个比特的码片，因此 S 站实际上发送的数据率提高到 mb bit/s，同时 S 站所占用的频带宽度也提高到原来数值的 m 倍。
- 这种通信方式是**扩频**(spread spectrum)**通信**。

CDMA的一个重要特性



- 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** (inner product) 等于 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举例



- 向量 S 为 $(-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)$ ，向量 T 为 $(-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)$ 。
- 把向量 S 和 T 的各分量值代入(2-4)式就可看出这两个码片序列是正交的。
- 向量 S 和 T 的码片反码的向量内积也是0。

正交关系的另一个重要特性



- 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。

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

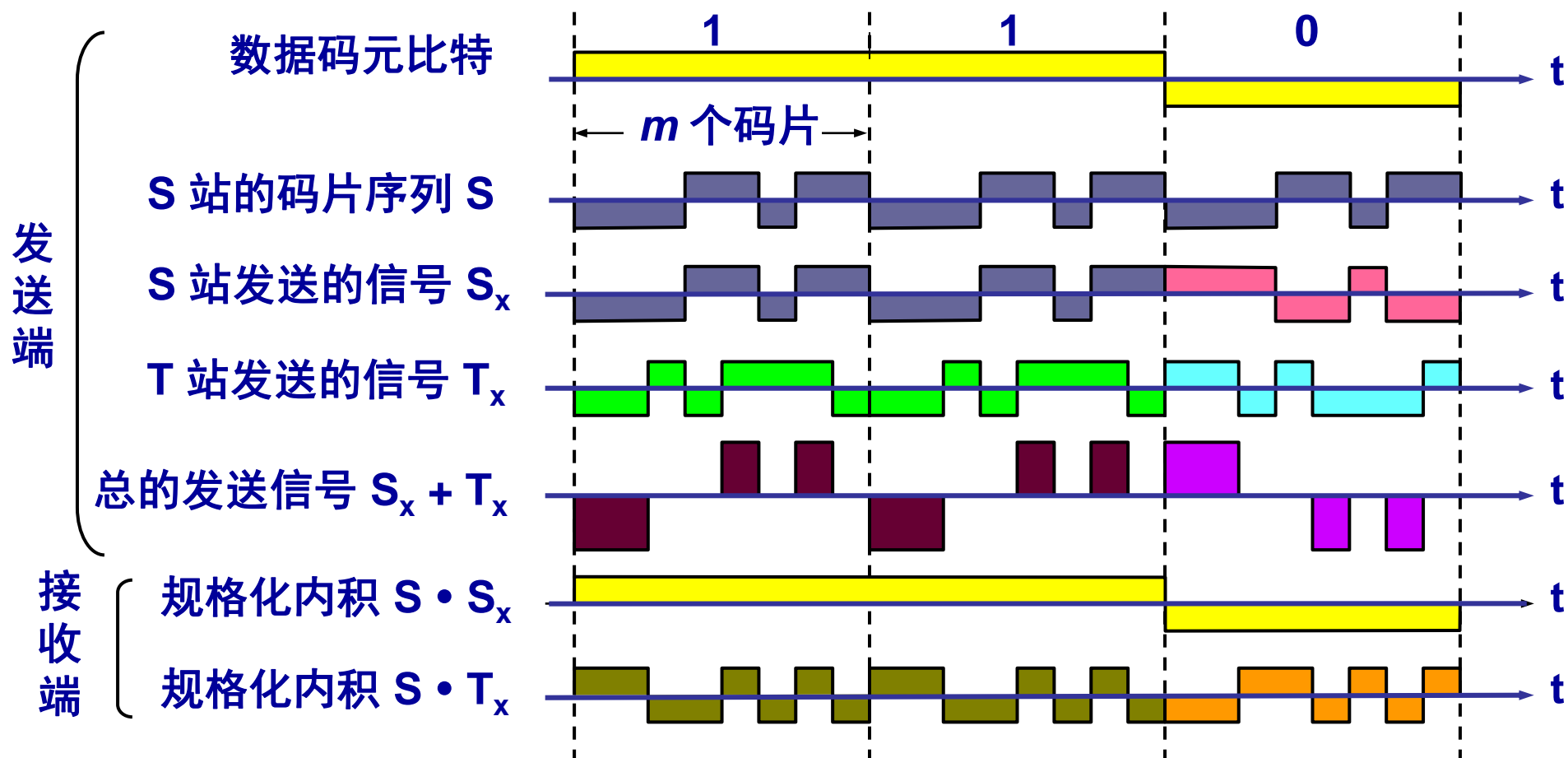
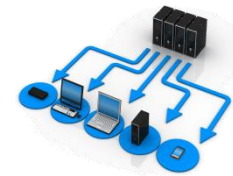
- 一个码片向量和该码片反码的向量的规格化内积值是 -1。

CDMA工作原理



- 每个站各自发送扩频信号，在接收端形成**叠加**的信号。
- 当接收站打算接收S站的信号时，就用S站的码片序列与收到的叠加信号求规格化内积：
 - 若**S站有信号发送**，则内积结果为1(发送数据1)或-1（发送数据0）。
 - 若**S站没有信号发送**，则内积结果为0。

CDMA 的工作原理



第 2 章 物理层



- 2.1 物理层的基本概念
- 2.2 数据通信的基础知识
- 2.3 物理层下面的传输媒体
- 2.4 信道复用技术
- **2.5 数字传输系统**
- 2.6 物理层协议举例

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。
- 因此，目前长途干线大都采用时分复用 PCM 的数字传输方式。模拟线路只剩下用户电话机到市话交换机之间几公里长的用户线上。
- 光纤成为长途干线最主要的传输媒体。

2.5 数字传输系统



- 由于历史上的原因，PCM 有两个互不兼容的国际标准：
 - 北美的 24 路 PCM（简称为 T1）
 - 欧洲的 30 路 PCM（简称为 E1）
- 我国采用的是欧洲的 E1 标准。
- E1 的速率是 2.048 Mbit/s，而 T1 的速率是 1.544 Mbit/s。
- 当需要有更高的数据率时，可采用复用的方法。

旧的数字传输系统存在许多缺点



最主要的是以下两个方面：

■ 速率标准不统一

- 如果不对数字传输速率进行标准化，国际范围的**基于光纤高速数据传输**就很难实现。

■ 不是同步传输

- **同步通信**要求接收端时钟频率和发送端时钟频率一致。发送端发送连续的比特流。
- **异步通信**时不要求接收端时钟和发送端时钟同步。发送端发送完一个字节后，可经过任意长时间间隔再发送下一个字节。
- 为了节约经费，各国的数字网主要是采用**准同步**方式，给时分复用和分用带来许多麻烦。
- 当数据传输的速率很高时，**收发双方的时钟同步**就成为很大的问题。

同步光纤网 SONET



- 1988年，美国推出数字传输标准，叫**同步光纤网 SONET** (Synchronous Optical Network)，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，其传输基本速率为51.84Mb/s
 - 对电信号，第 1 级**同步传送信号** STS-1 (Synchronous Transport Signal)的传输速率是 51.84 Mbit/s。
 - 对光信号称为第 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(国际电信联盟电信标准分局)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 Mbit/s
466.560	OC-9/STS-9	STM-3	
622.080	OC-12/STS-12	STM-4	622 Mbit/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 Gbit/s
4976.640	OC-96/STS-96	STM-32	
9953.280	OC-192/STS-192	STM-64	10 Gbit/s
39813.120	OC-768/STS-768	STM-256	40 Gbit/s

SONET与SDH的关系



- SDH与SONET之间差别很小。
- SONET主要用于北美和日本，SDH主要用于欧洲和中国。
- SONET的基本速率为51.84Mb/s，而SDH的基本速率为155.52Mb/s。
- SONET/SDH，采用TDM技术，是同步系统，由主时钟控制，时钟精度 10^{-9} 。
 - SONET和PCM的采样速率一样，为每秒8000帧；
 - 对于SONET的第1级同步传送信号STS-1每帧的长度为810字节，共 810×8 bit。
 - 一个STS- n 帧的长度是STS-1帧长的 n 倍。

SONET / SDH 标准的意义



- 使不同的数字传输体制在 STM-1 等级上获得了统一。并将此基础上的更高的数字传输速率作为国际标准。
- 第一次真正实现了数字传输体制上的世界性标准。
- 已成为公认的新一代理想的传输网体制。
- SDH 标准也适合于微波和卫星传输的技术体制。

第 2 章 物理层



- 2.1 物理层的基本概念
- 2.2 数据通信的基础知识
- 2.3 物理层下面的传输媒体
- 2.4 信道复用技术
- 2.5 数字传输系统
- 2.6 物理层协议举例

物理层的主要任务



主要任务：确定与传输媒体的接口的一些特性。

- **机械特性：**指明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。
- **电气特性：**指明在接口电缆的各条线上出现的电压的范围。
- **功能特性：**指明某条线上出现的某一电平的电压表示何种意义。
- **过程特性：**指明对于不同功能的各种可能事件的出现顺序。

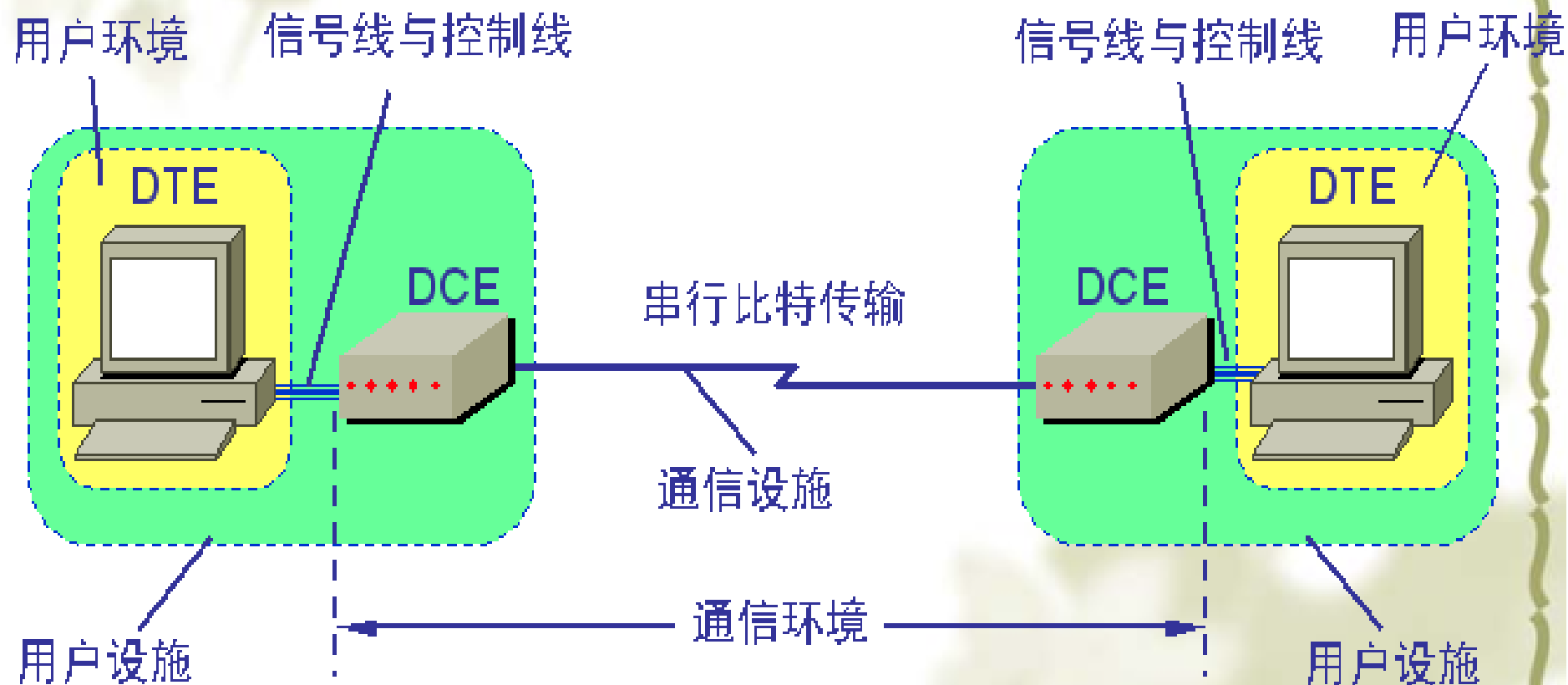
2.6 物理层标准举例



■ EIA-232-E 接口标准

- EIA-232-E是美国电子工业协会EIA制定的，在1991年修改发布的著名物理层**异步通信接口标准**，是DTE和DCE间的接口标准
- **DTE (Data Terminal Equipment)** 是数据终端设备，是具有一定的数据处理能力和发送、接收数据能力的设备。
 - DTE可以是计算机、终端或是一个I/O设备。
 - DTE是针头（俗称公头）
- **DCE (Data Circuit-terminating Equipment)**是数据电路终接设备，它在 DTE 和传输线路之间提供信号变换和编码的功能，并且负责建立、保持和释放数据链路的连接。
 - 典型的DCE是一个调制解调器(modem)
 - DCE是孔头（俗称母头）

DTE 通过 DCE 与通信传输线路相连



EIA-232-E接口标准



■ 机械特性

- 使用25芯标准连接器。插头用于DTE，插座用于DCE侧；

■ 电气特性

- 采用-15V~-3V表示逻辑“1”电平；+3V~+15V表示逻辑电平“0”；
- 接口传输速率有50, 75, 110, 150, 300...4800, 9600, 19200bps, 传输距离不超过15m；

■ 功能特性

- 定义25芯中的20根为信号线，包括地线、数据线、控制线和定时信号线。另外5根为备用，没有定义。
- 最常用的信号线为10根，引脚及功能见下图。

EIA-232/V.24 的信号定义





■ 过程特性

- EIA232规定了DTE和DCE之间的信号时序的应答关系和操作过程。
- DTE和DCE之间发送数据的工作过程：
 - 1、当终端DTE准备发送数据时，置CD(20)为ON状态；Modem响应此信号，置CC(6)置为ON状态，表示Modem就绪；
 - 2、DTE置CA(4)，为ON状态，向本地Modem发送数据；本地Modem通过电话线向远程Modem发送载波信号，通知远程Modem准备接收数据，同时置CB(5)为ON状态；远程Modem检测到载波后，置CF(8)为ON；
 - 3、DTE检测到CB(5)为ON后，就在BA(2)上发送数据；远程DTE用BB(3)接收数据；
 - 4、DTE发送完后，置CA(4)为OFF；

RS-449接口标准

- EIA-232接口标准有两个主要的缺点：
 - 数据传输速率的上限为20kb/s；
 - 连接电缆的最大长度不超过15m；
- EIA制定了新的RS-449标准，它由 3 个标准组成。即：
 - RS-449：规定机械、功能和规程特性，为37根引脚。
 - RS-423-A：规定非平衡传输时的电气特性。
 - RS-422-A：规定平衡传输时的电气特性。
- 典型的RS-449的传输速率可达到48~168kb/s.



总结



- 物理层的基本概念
- 信道、数字信号、模拟信号
- 编码（基带调制）方式
- 调制（带通调制）技术
- 信道容量：
 - 码元传输速率 \leftarrow 奈奎斯特准则
 - 信噪比 \leftarrow 香农公式
- 信道复用技术
 - 频分、时分、波分、码分