

# 第2章 数据通信基础

**主讲：章明**

# 本章主要内容

- 数据通信的基本概念
- 数据传输
- 数据交换技术
- 差错控制技术
- 传输介质

数据通信基本概念	数据通信系统基本结构		
	信息、数据、信号		
	数据通信的主要技术指标		
数据传输方式	串行通信、并行通信		
	单工通信、半双工通信、全双工通信		
	基带传输、频带传输、宽带传输		
数据的同步技术	异步传输、同步传输		
数据编码技术	数字数据信号	模拟传输	幅移键控 ASK、频移键控 FSK、相移键控 PSK
		数字传输	不归零码 NRZ、曼彻斯特编码、差分曼彻斯特编码
	模拟数据信号	模拟传输	调幅、调频、调相
		数字传输	脉冲编码调制 PCM
多路复用技术	时分多路复用、频分多路复用、波分多路复、码分多路复用		
数据交换技术	电路交换、报文存储转发交换、报文分组存储转发交换（数据报方式、虚电路方式）		
传输介质	传输介质类型与特点		
差错控制技术	检错码、纠错码和差错控制机制		

# 本章学习目标

- **掌握数据通信的基本概念；**
- **掌握数据传输的基本形式及编码技术**
- **了解多路复用的分类及各自特点；**
- **掌握三种数据交换方式**

# 第2章 数据通信基础

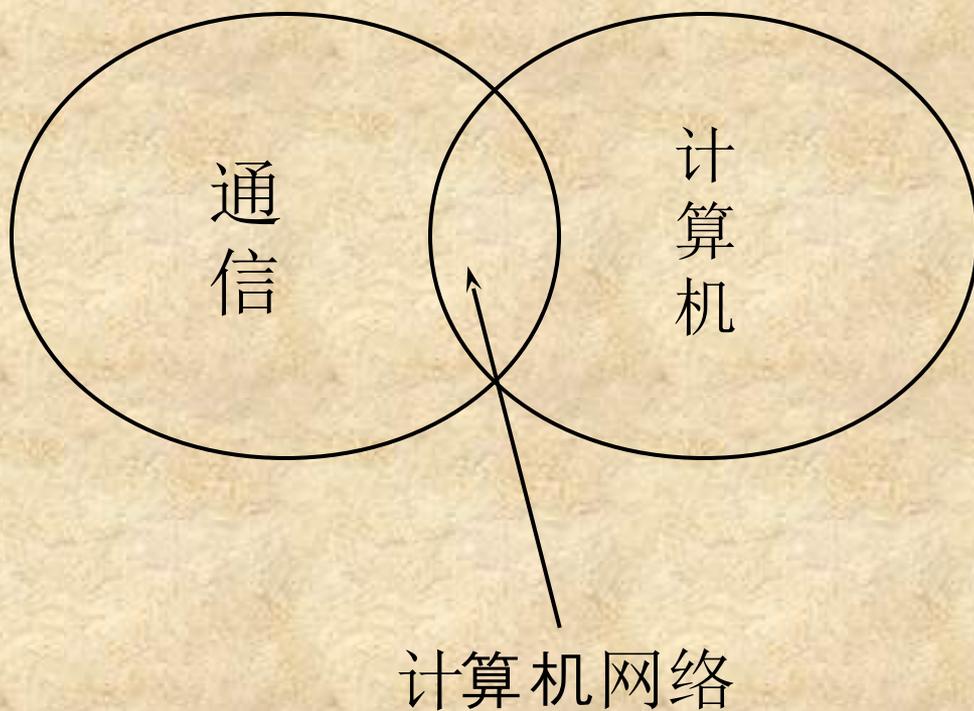
- 2.1 基本概念
- 2.2 数据的传输
- 2.3 数据交换技术
- 2.4 差错控制技术
- 2.5 传输介质

# 2.1 基本概念

- 2.1.1 信息、数据和信号
- 2.1.2 数据通信系统模型
- 2.1.3 数字通信、数字通信和模拟通信
- 2.1.4 数据通信的技术指标
- 2.1.5 数据通信技术
- 2.1.6 数据通信过程

# 数据通信基础

计算机网络是计算机技术与通信技术相结合的产物。

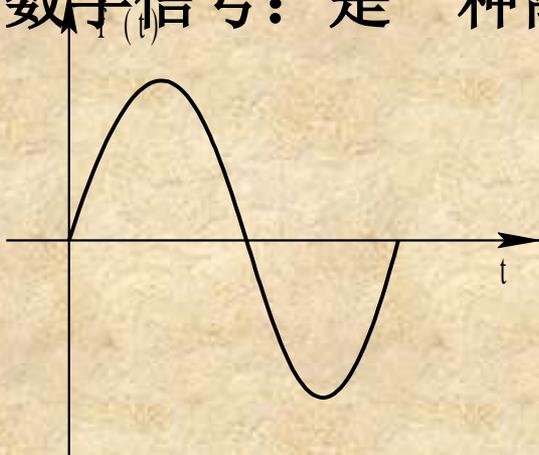


## 2.1.1 信息、数据和信号

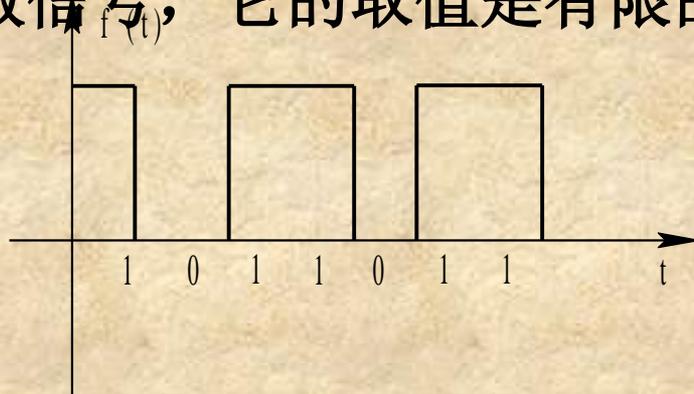
- 通信的目的是交换信息。
- **信息**则是数据的具体内容和解释，有具体含义。
- 信息的载体可以是多媒体，包含语音、音乐、图形图像、文字和数据等。计算机的终端产生的信息一般是字母、数字和符号的组合。为了传送这些信息，首先要将每一个字母、数字或括号用二进制代码表示。

## 2.1.1 信息、数据和信号

- 被传输的二进制代码称为**数据**（Data），是信息的表示形式。
- **信号**是数据在传输过程中的电信号的表示形式。主要形式有：
  - 模拟信号：连续变换的电信号，它的取值可以是无限个。
  - 数字信号：是一种离散信号，它的取值是有限的。



(a) 模拟信号



(b) 数字信号

## 2.1.1 信息、数据和信号

### 模拟与数字的特点

模拟：

波动性；  
持续变化；  
反映事物的本

质；

在电信业已被

广泛

使用超过 100

年；

数字：

离散性；  
跃变性；  
设备性能先

进，

较为便宜；

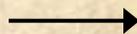
# 2.1.1 信息、数据和信号

## 模拟与数字的特点

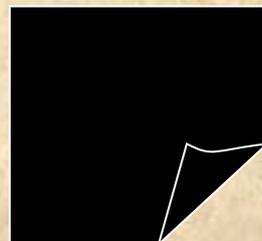
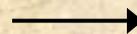
信息

数据

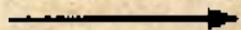
信号



雪  
六角形  
凉  
白色

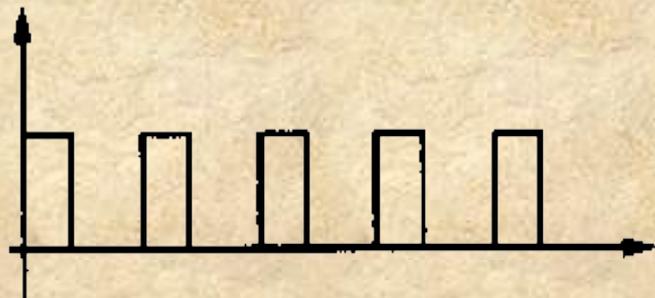


信息



horse

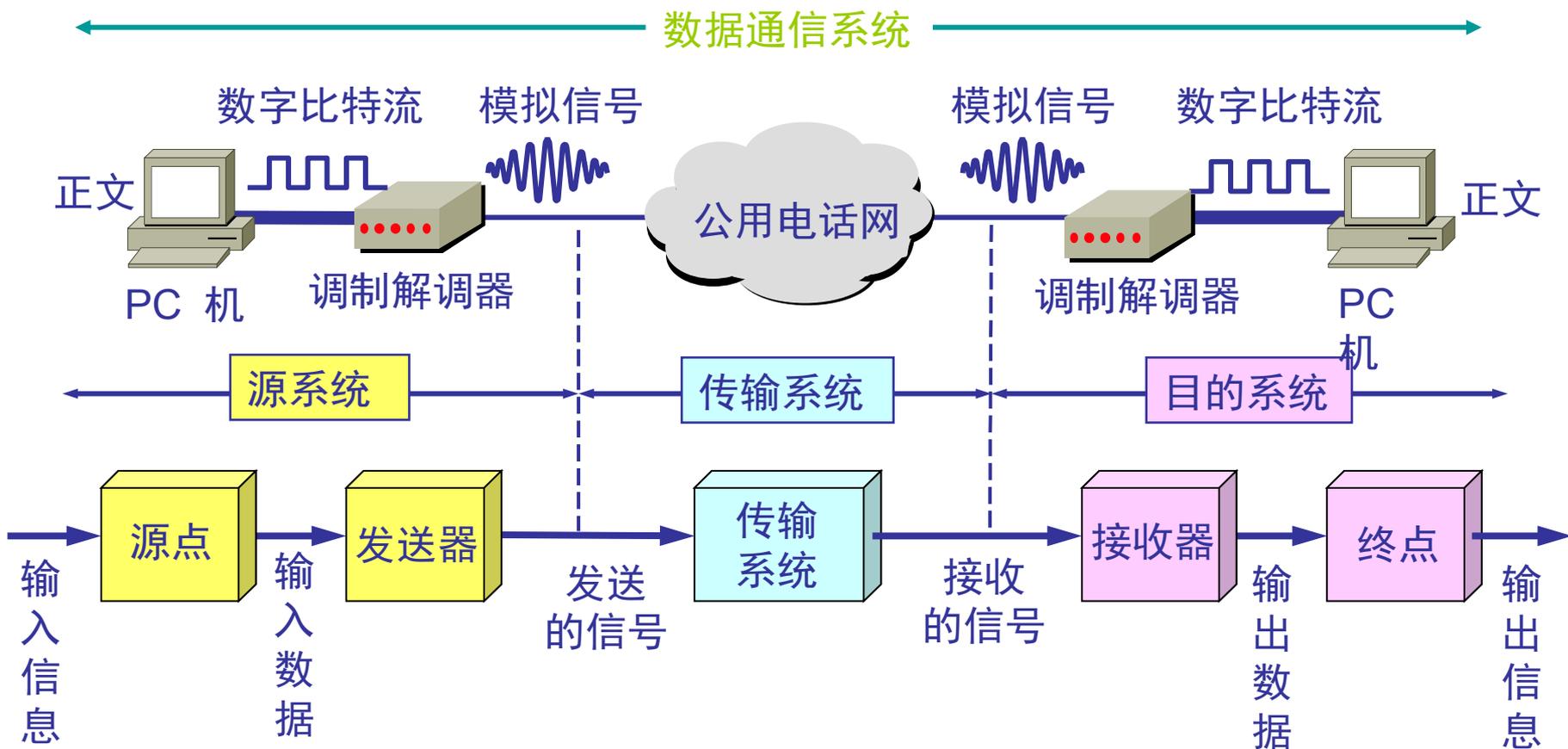
数据



信号

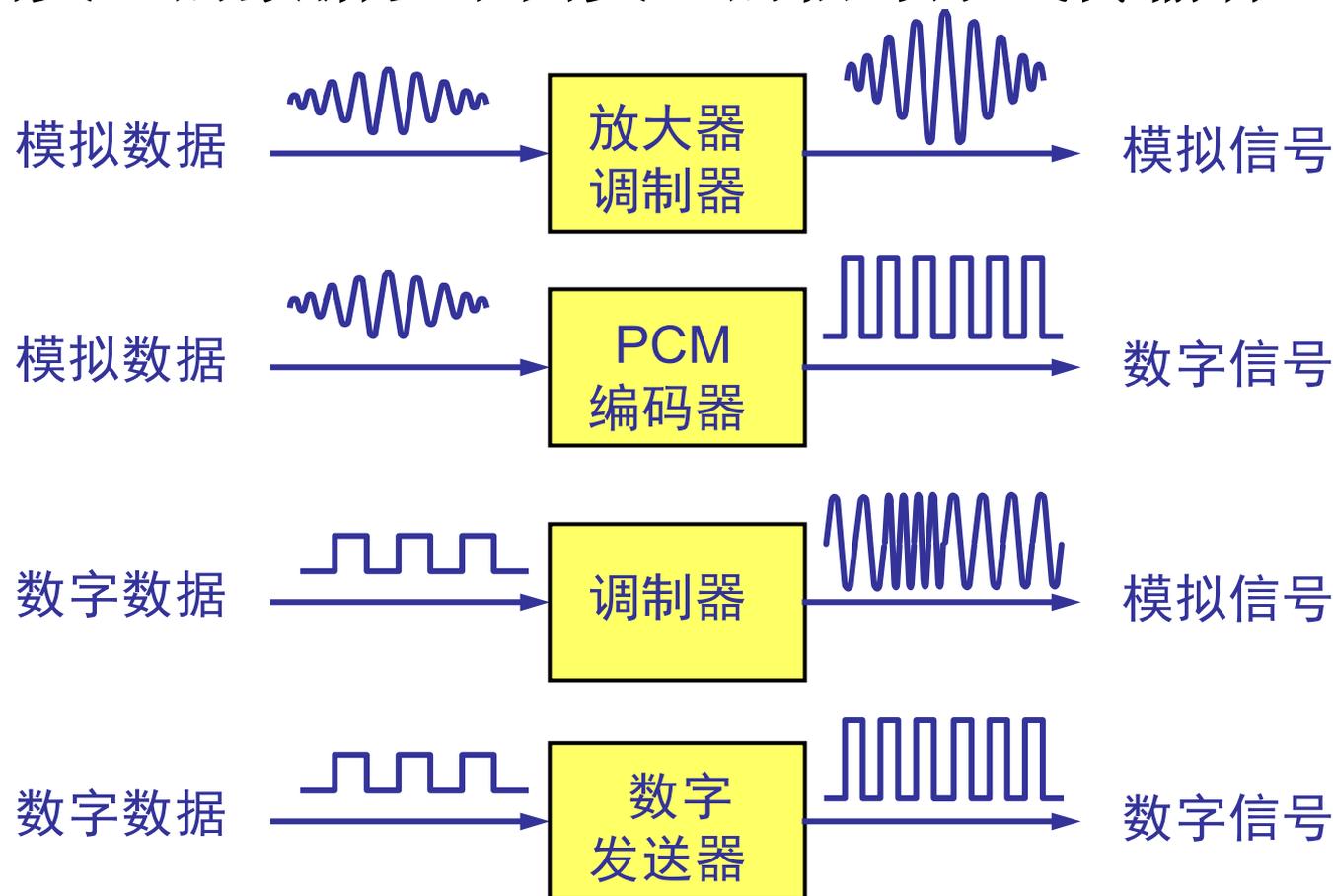
# 2.1.2 数据通信系统的模型

数据通信系统是指通过通信线路和通信控制处理设备将分布在各处的数据终端设备连接起来，执行数据传输功能的系统。



## 2.1.3. 数据通信、数字通信和模拟通信

不同类型的数据以不同类型的信号形式传输有 4 种组合



## 2.1.4 数据通信的技术指标

### 1. 信道带宽与信道容量

- **信道带宽**是指信道中传输的信号在不失真的情况下所占用的频率范围，通常称为信道的**通频带**，单位用赫兹（**Hz**）表示。
- 信道带宽是由信道的物理特性所决定的，例如，电话线路的频率范围在 **300 ~ 3400Hz**，则它的带宽 **300 ~ 3400Hz**。
- **信道容量**是衡量一个信道传输数字信号的重要参数。**信道容量**是指单位时间内信道上所能传输的最大比特数，用每秒比特数（**bps**）表示。当传输的信号速率超过信道的最大信号速率时，就会产生失真。

# 1. 信道带宽与信道容量

- 通常，信道容量和信道带宽具有正比的关系，带宽越大，容量越高，所以要提高信号的传输率，信道就要有足够的带宽。
- 从理论上讲，增加信道带宽是可以增加信道容量的，但在实际上，信道带宽的无限增加并不能使信道容量无限增加，其原因是在一些实际情况下，信道中存在噪声或干扰，制约了带宽的增加。
- 无噪声信道和有噪声信道的最大传输速率与信道带宽的关系，有两个重要的准则，即奈奎斯特定理和香农定理。

# 1. 信道带宽与信道容量

- 奈奎斯特 (Nyquist) 定理

- 1942 年, H.Nyquist 证明: 如果一个任意信号通过带宽为  $W$  的理想低通滤波器, 在理想的条件下 (即无噪声), 有限带宽为  $W$  的信道, 其最大的数据传输速率  $C$  (信道容量) 为

$$C=2W\log_2N \quad (\text{b/s})$$

(2.1)

- 式中  $N$  是离散性信号或电平个数。
- 这就是著名的奈奎斯特 (Nyquist) 公式, 也称奈奎斯特 (Nyquist) 定理或取样定理。例如, 一个无噪声带宽为 2000 Hz 的信道不能传送速率超过 4000 b/s 的二进制数字信号。

# 1. 信道带宽与信道容量

- 奈奎斯特 (Nyquist) 定理

- 例 1 对一个无噪声的 **3000Hz** 信道，若传送二进制信号，试问可允许的数据传输速率是多少？

- 解 由于传送的二进制信号是“1”、“0”两个电平，所以  $N=2$ ；又因为  $W=3000\text{Hz}$ ，则信道容量，即数据传输速率  $C=2W/\log_2 N=6000\text{b/s}$ 。

$\log_2 n$ 以2为底数的是怎么算？ $\log_2$ 为底数的算法是： $\text{LOG}_2(N)$

相当于2的多少次方（立方）等于N 例： $\text{LOG}_2(8)=3$  相当于，2的3次方等于8

- 例 2 一个无噪声的话音带宽为 **4000Hz**，采用 **8** 相调制解调器传送二进制信号，试问信道容量是多少？

- 解 由于 **8** 相调制解调器传送二进制信号的离散信号数为 **8**，即  $N=8$ ，则信道容量，即数据传输速率  $C=2 \times 4000 / \log_2 8 = 24\text{kb/s}$ 。

# 1. 信道带宽与信道容量

- 香农 (C-Shannon) 定理

- 1948 年，香农 (C-Shannon) 把奈奎斯特的定理进一步扩展到了信道受到随机噪声干扰的情况，即香农定理。
- Claude Shannon 认为，在有噪声的环境中，信道容量将与信噪功率比有关。

根据香农 (Shannon) 定理，在给定带宽为  $W$ 、信噪功率比为  $S/N$  的信道中，最大数据传输速率  $C$  为

$$C = W \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

- 式中， $S/N$  常用分贝形式来表示，为信噪功率比，其计算公式如下：

$$\frac{S}{N} = 10 \lg \frac{\text{信号功率 } P_1}{\text{噪声功率 } P_2} \quad (\text{dB})$$

## 2.1.4.3 信道带宽与信道容量

- 香农 (C·Shannon) 定理
  - 由香农定律可知，在信道容量不变时增加带宽就允许降低信噪比。如果通信系统扩展到宽带上，就可以在保持误码率性能以及保证信道容量达到预期水平的情况下降低信噪比。

# 1 信道带宽与信道容量

- 例： 一个数字信号通过两种物理状态，经信噪比为 **20dB** 的 **3kHz** 带宽信道传送，其数据率不会超过多少？

- 解 按 **Shannon** 定理，在信噪比为 **20dB** 的信道上，信道最大容量为

$$C = W \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

- 已知信噪比电平为 **20dB**，信噪功率比 **S/N** 用分贝表示，其计算公式如下

$$\frac{S}{N} = 10 \lg \frac{\text{信号功率 } P_1}{\text{噪声功率 } P_2} \quad (\text{dB})$$

- 则信噪功率比 **S/N=100**，由此得

$$C = 3000 \times \log_2 (1 + 100) = 3000 \times 6.66 = 19.98 \text{ kb/s}$$

- 即数据率不会超过 **19.98kb/s**。

## 2. 数据传输速率

- 数据通信速率（传输速率）：数据传输速率是指通信系统单位时间内传输的二进制代码的位（比特）数，因此又称比特率，单位用位 / 秒（**bit per second**）表示，记作 **b/s** 或 **bps**。

数据传输速率的高低，由每位数据所占的时间决定，一位数据所占的时间宽度越小，则其数据传输速率越高。设  $T$  为传输的电脉冲信号的宽度或周期， $N$  为脉冲信号所有可能的状态数，则数据传输速率为：

$$R_s = \frac{1}{T} \log_2 N (\text{bps})$$

式中， $\log_2 N$  是每个电脉冲信号所表示的二进制数据的位数（比特数）。如电信号的状态数  $N=2$ ，即只有“0”和“1”两个状态，则每个电信号只传送 1 位二进制数据，此时， $R_s = \frac{1}{T}$ 。

## 2. 数据传输速率

- **调制速率**：又叫**波特率**或**码元速率**，它是数字信号经过调制后的传输速率，表示每秒种所能传送的码元数量，即调制后模拟电信号每秒钟的变化次数，它等于调制周期的倒数，单位为**波特（Baud）**。若用  $T$ （秒）表示调制周期，则调制速率为：

$$R_b = \frac{1}{T}$$

（**Baud**）

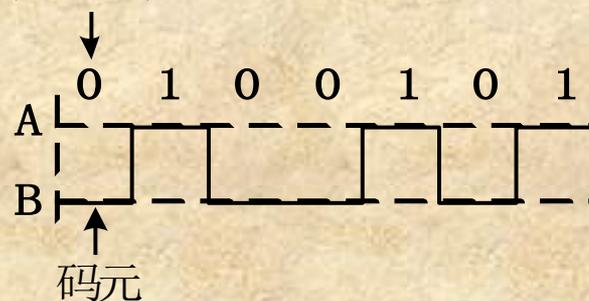
因此可以得出调制速率和数据传输速率的对应关系式

$$R_s = \frac{1}{T} \log_2 N = R_b \log_2 N(\text{bps})$$

# 码元速率和信息速率

- 一般来说，对于采用  $M$  进制电平传输信号时，信息速率  $R_b$  和码元速率  $R_B$  之间的关系是：
- $R_b = R_B \log_2 M$

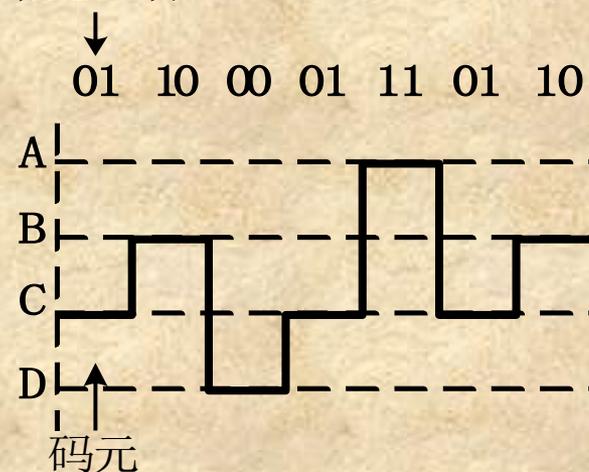
信息比特



二进制信号  
两级电平

1个码元=1个信息比特

信息比特



四进制信号  
四级电平

1个码元=2个信息比特

# 3. 误码率

- 误码率是衡量数据传输系统正常工作状态下传输可靠性的重要参数。误码率是指二进制码元在数据传输系统中被传错的概率。

$$\text{误码率 } P_e = \frac{\text{传输出错的码元数}}{\text{传输的总码元数}}$$

- 在实际的数据传输系统中，电话线路在 **300 ~ 2400bps** 传输速率时，平均误码率在  **$10^{-2} \sim 10^{-6}$**  之间，在 **4800 ~ 9600bps** 传输速率时平均误码率在  **$10^{-2} \sim 10^{-4}$**  之间。而计算机通信的平均误码率要求低于  **$10^{-9}$** 。

# 4. 时延

时延是指一个报文或分组从一个网络（或一条链路）的一端传输到网络另一端所需的时间。通常来讲，时延是由以下几个不同的部分组成：

## （1）发送时延（传输时延）

发送时延是结点在发送数据时使数据块从结点进入传输介质所需的时间，也就是从数据块的第一个比特开始发送数据算起，到最后一个比特发送完毕所需的时间，又称为传输时延，其计算公式为：

$$\text{发送时延} = \text{数据块长度} / \text{数据传输速率}$$

例如：一个 **10MB** 数据块在传输速率为 **1Mbps** 的信道上发送，则发送时延为  $(10 \times 2^{20} \times 8) / 2^{20} = 80(\text{s})$ ，也就是要用 1 分多钟的时间才能把这样的数据块发送完毕。

# 4. 时延

## (2) 传播时延

传播时延是电磁波在信道上需要传播一定的距离而花费的时间，其计算公式为：

传播时延 = 信道长度 / 信号在信道上的传播速率

电磁波在真空（空气）中的传播速率为  $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ，在电缆中的传播速率要比在真空中的略低，约为  $2.4 \times 10^8 \text{m/s}$ ，在光纤中的传播速率约为  $2.0 \times 10^8 \text{m/s}$ 。例如： $1000 \text{km}$  长的光纤线路带来的传播时延大约为  $10^6 / 2.0 \times 10^8 = 5(\text{ms})$ 。

## (3) 处理时延

处理时延是指数据在交换结点为存储转发而进行一些必要的处理所花费的时间。其中结点缓存队列中分组排队所经历的时延是处理时延中的重要组成部分，有时可用排队时延作为处理时延。处理时延的长短主要由当时网络中的通信量决定。当网络中的通信量过大时，还有可能造成队列溢出、数据丢失的情况。

# 2.1.5 数据通信技术

## 1. 数据传输形式

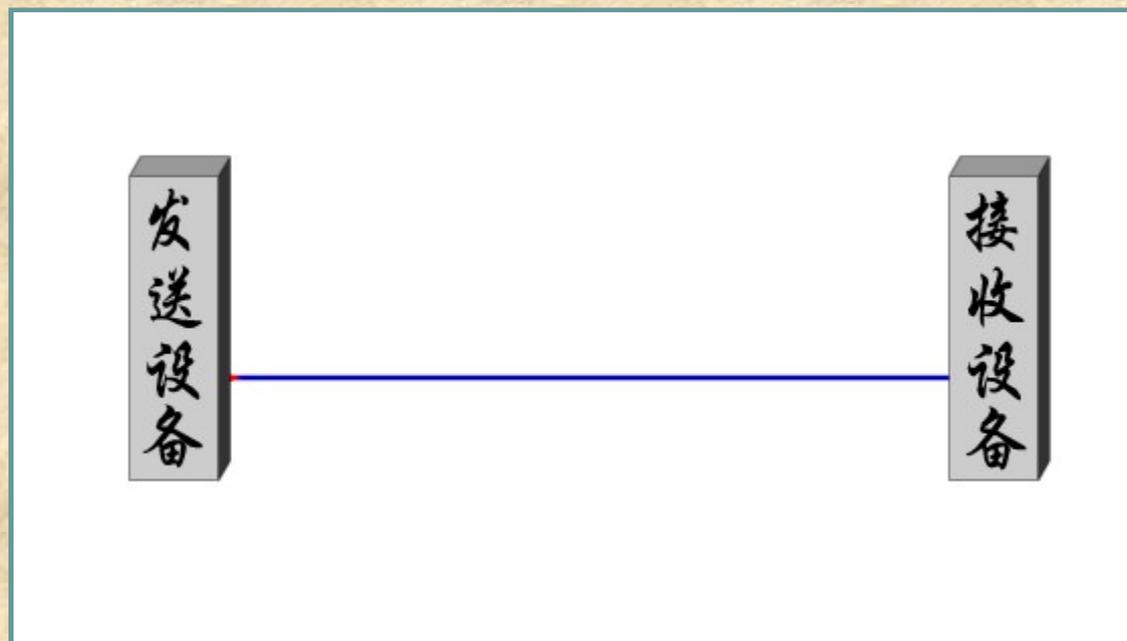
### (1) 并行通信

- 数据以成组的方式在多个并行信道上同时进行传输。
- 并行通信的优点是速度快，但发端与收端之间有若干条线路，导致费用高，仅适合于近距离和高速率的通信。



## (2) 串行通信

数据流以串行方式在一条信道上传输，由于计算机内部都采用并行通信，因此，数据在发送之前，要将计算机中的字符进行并 / 串变换，在接收端再通过串 / 并变换，还原成计算机的字符结构，才能实现串行通信。



## (2) 串行通信

通常串行传输顺序为由低位到高位，传完这个字符再传下一个字符，因此收、发双方必须保持**字符同步**，以使接收方能够从接收的数据比特流中正确区分出与发送方相同的字符，这是串行传输必须解决的问题。

- 串行传输的优点是收、发双方只需要一条传输信道，易于实现，成本低，但速度比较低。
- 是目前远程通信主要采用的一种传输方式。

## 2. 数据传输的同步技术

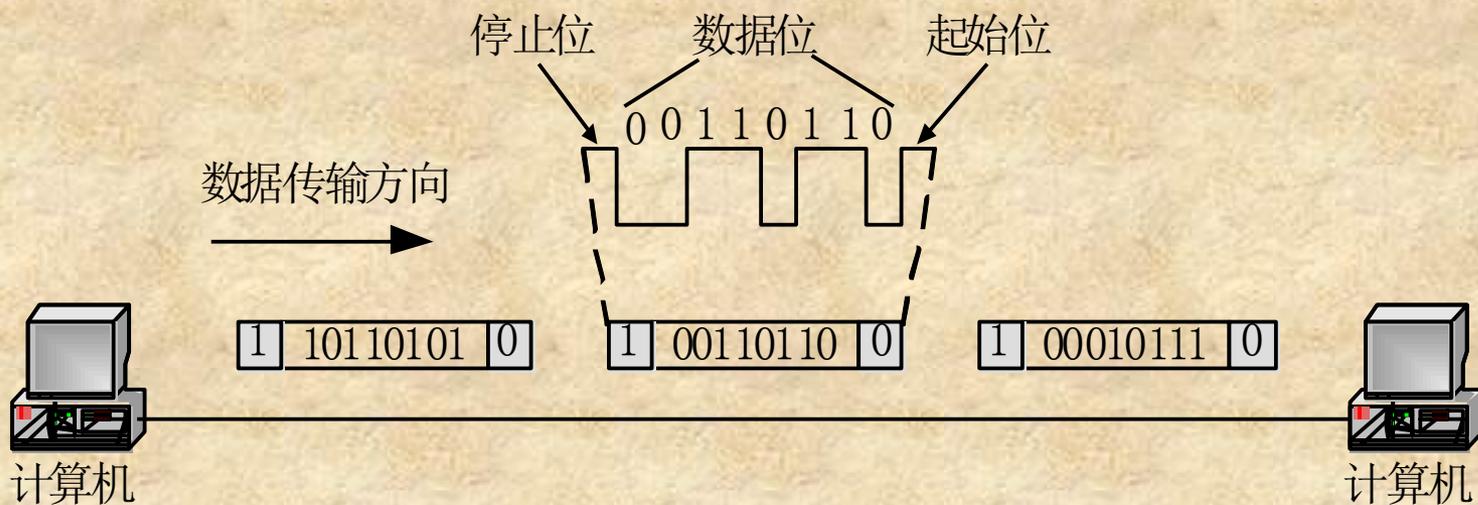
在通信中，接收端要按发送端所发送的每个码元或数据块的重复频率以及起止时间来接收数据，这样才能保证接收的数据与发送的数据一致，这就是所谓的“**同步**”。在通信时，接收端要校准自己的时间和重复频率，以便和发送端保持一致，这一过程称为“**同步过程**”。

## 2. 数据传输的同步技术

- **同步**就是要接收方按照发送方发送的每个码元 / 比特起止时刻和速率来接收数据，否则，收发之间会产生误差，即使是很小的误差，随着时间增加的逐步累积，也会造成传输的数据出错。
- 使用的同步技术有两种：
  - 异步传输方式方式
  - 同步传输方式方式

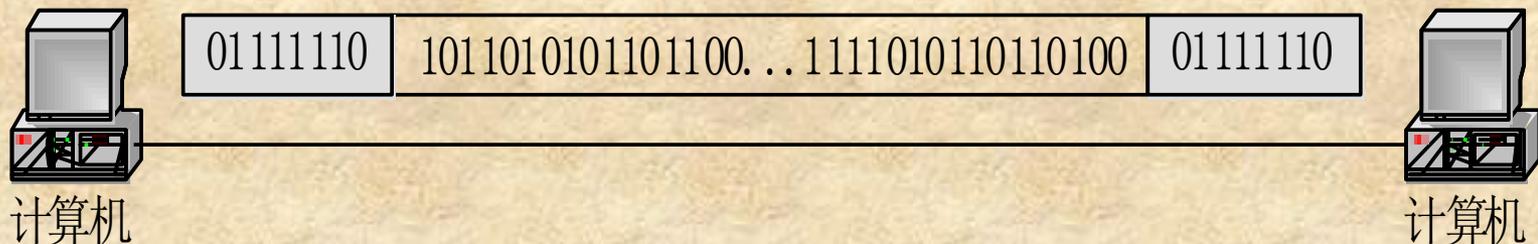
# (1) 异步传输方式

- 在异步传输方式中，每传送 1 个字符（7 位或 8 位）都要在每个字符码前加 1 个起始位，以表示字符代码的开始，在字符代码和校验码后面加 1 或 2 个停止位，表示字符结束。接收方根据起始位和停止位来判断一个新字符的开始。从而起到通信双方的同步作用。
- 异步方式实现比较容易，但每传输一个字符都需要多使用 2 ~ 3 位，所以适合于低速通信。



## (2) 同步传输方式

- 同步传输方式的信息格式是一组字符或一个二进制位组成的数据块（帧）。对这些数据，不需要附加起始位和停止位，而是在发送一组字符或数据块之前先发送一个同步字符 **SYN**（以 **01101000** 表示）或一个同步字节（**01111110**），用于接收方进行同步检测，从而使收发双方进入同步状态。在同步字符或字节之后，可以连续发送任意多个字符或数据块，发送数据完毕后，再使用同步字符或字节来标识整个发送过程的结束。
- 在同步传送时，由于发送方和接收方将整个字符组作为一个单位传送，且附加位又非常少，从而**提高了数据传输的效率**。所以这种方法一般用在高速传输数据的系统中，比如计算机之间的数据通信。



# 同步传输方式

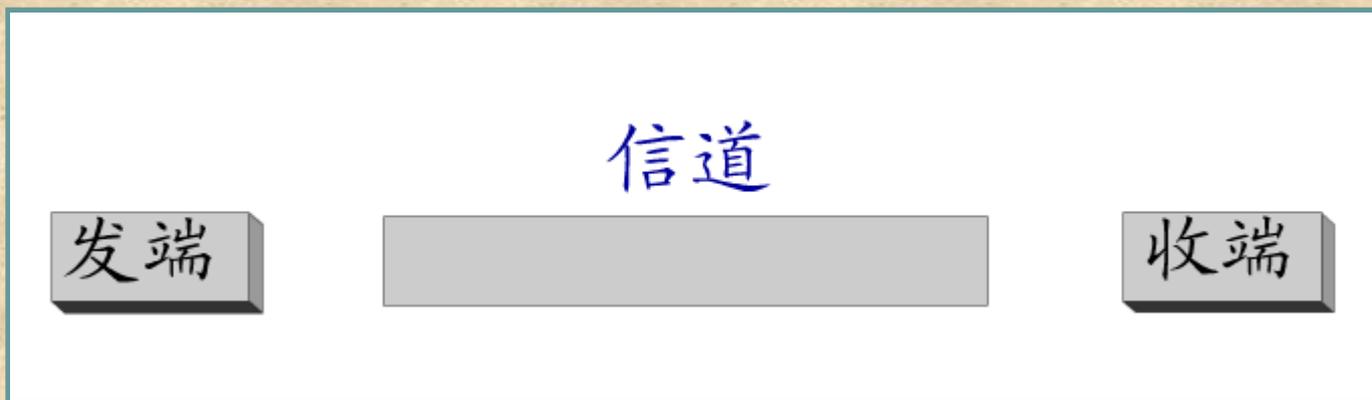
- 同步传输方式下以**固定的时钟节拍**来发送数据信号，字符间顺序相连，既无间隙也无插入字符（以数据帧为传送单位 -- 数据帧 / 次）。收发双方的时钟与传输的每一位严格对应，以达到**位同步**；在开始发送一帧数据之前先发送固定长度的帧同步字符，再发送数据帧，最后发送帧终止字符，这样来保证**字符同步**和**帧同步**。
- 每两帧之间发送空白字符。接收方收到数据后必须首先识别同步时钟，在近距离传输中可**另加一条数据线**来实现同步，在远距离传输过程中必须加入**时钟同步信号**来解决同步问题。
- 同步传输有较高的传输效率，但实现起来较复杂，常用于高速传输中。

# 3. 数据通信的方向

## (1) 单工方式

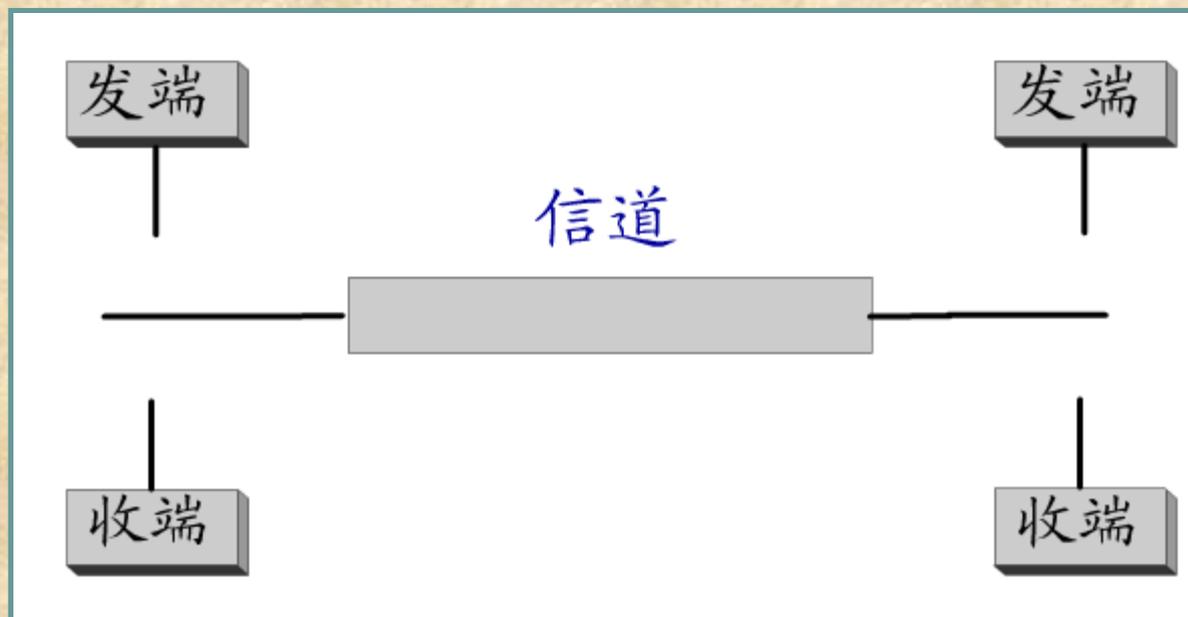
单工方式指通信信道是单向信道，数据信号仅沿一个方向传输，发送方只能发送不能接收，接收方只能接收而不能发送，任何时候都不能改变信号传送方向。

- 无线电广播和电视都属于单工通信。



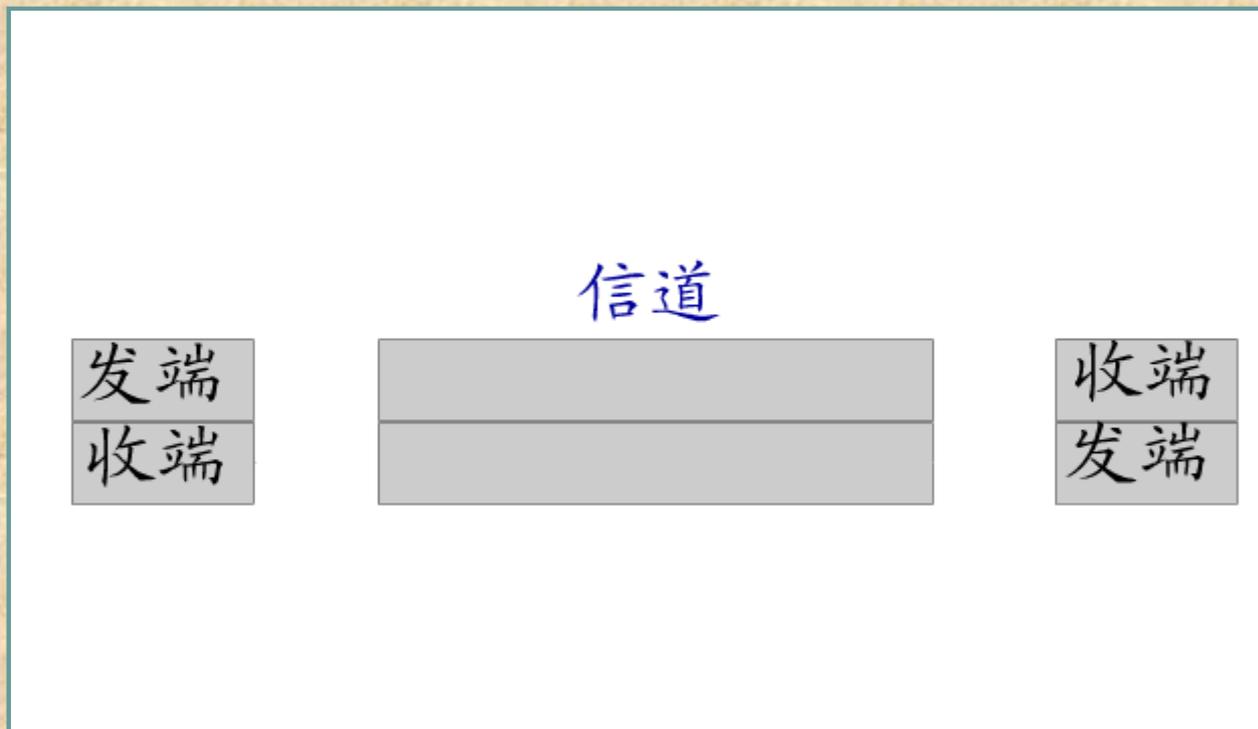
## (2) 半双工通信

- 半双工通信是指信号可以沿两个方向传送，但同一时刻一个信道只允许单方向传送，即两个方向的传输只能交替进行，而不能同时进行。当改变传输方向时，要通过开关装置进行切换。
- 半双工信道适合于会话式通信，比如公安系统使用的“对讲机”和军队使用的“步话机”。



## (3) 全双工通信

- 全双工通信是指数据可以同时沿相反的两个方向作双向传输。比如，电话通话。



## 2.2 数据传输

### 2.2.1 基带传输、频带传输和宽带传输

#### 1. 基带传输

- 就数字信号而言，它是一个离散的方波，“0”代表低电平，“1”代表高电平，这种方波固有的频带称为基带，方波信号称为基带信号，因此，基带实际上就是数字信号所占用的基本频带。
- 基带传输是在信道中直接传输数字信号，且传输媒体的整个带宽都被基带信号占用，双向地传输信息。

## 2. 频带传输

- 频带传输

- 所谓频带传输是指将数字信号调制成音频信号后再发送和传输，到达接收端时再把音频信号解调成原来的数字信号。可见，在采用频带传输方式时，要求发送端和接收端都要安装调制器和解调器。
- 在实现远距离通信时，经常借助于电话线路，此时就需要利用频带传输方式。利用频带传输，不仅解决了利用电话系统传输数字信号的问题，而且可以实现多路复用，以提高传输信道的利用率。

## 2. 频带传输

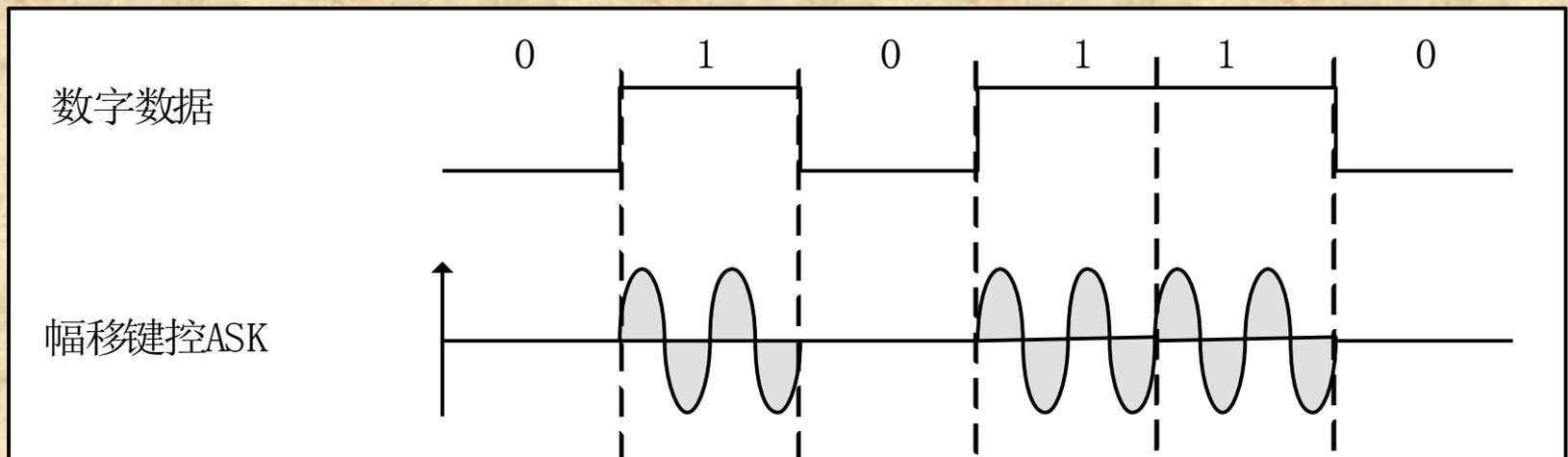


- 传统的电话通信信道是为传输语音信号设计的，用于传输音频 **300Hz ~ 3400Hz** 的模拟信号，不能直接传输数字数据。为了利用模拟语音通信的电话交换网实现计算机的数字数据的传输，必须首先将数字信号转换成模拟信号，也就是要对数字数据进行调制。
  - 发送端将数字数据信号变换成模拟数据信号的过程称为**调制**（**Modulation**），调制设备就称为调制器（**Modulator**）；
  - 接收端将模拟数据信号还原成数字数据信号的过程称为**解调**（**Demodulation**），解调设备就称为解调器（**Demodulator**）。
  - 若进行数据通信的发送端和接收端以双工方式进行通信时，就需要同时具备调制和解调功能的设备，称为调制解调器（**Modem**）。
- 对数字数据调制的基本方法有三种：幅移键控、频移键控和相移键控。



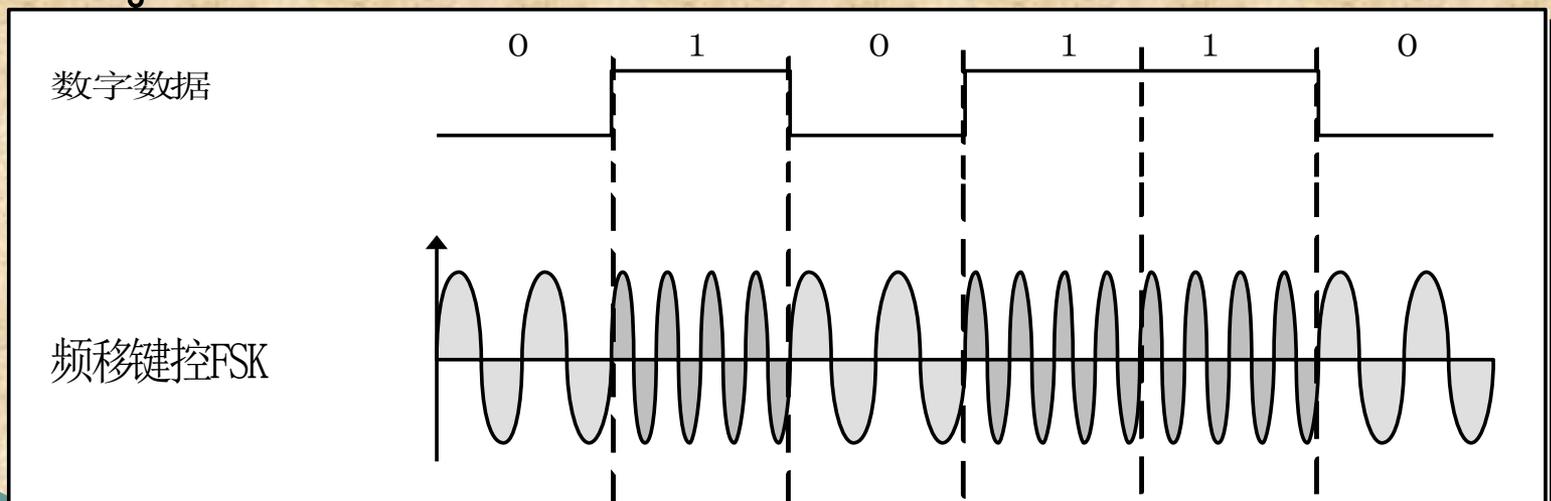
# 幅移键控、频移键控和相移键控

- 幅移键控 **ASK** ( **A**mplitude **S**hift **K**eying )
  - **ASK** 是通过改变载波信号的**幅度值**表示数字信号“1”、“0”，
  - 以幅度  $A_1$  表示数字信号的“1”，
  - 用载波幅度  $A_2$  表示数字信号的“0”（通常  $A_1$  取 1， $A_2$  取 0），而载波信号参数  $f$  和  $\varphi$  恒定。



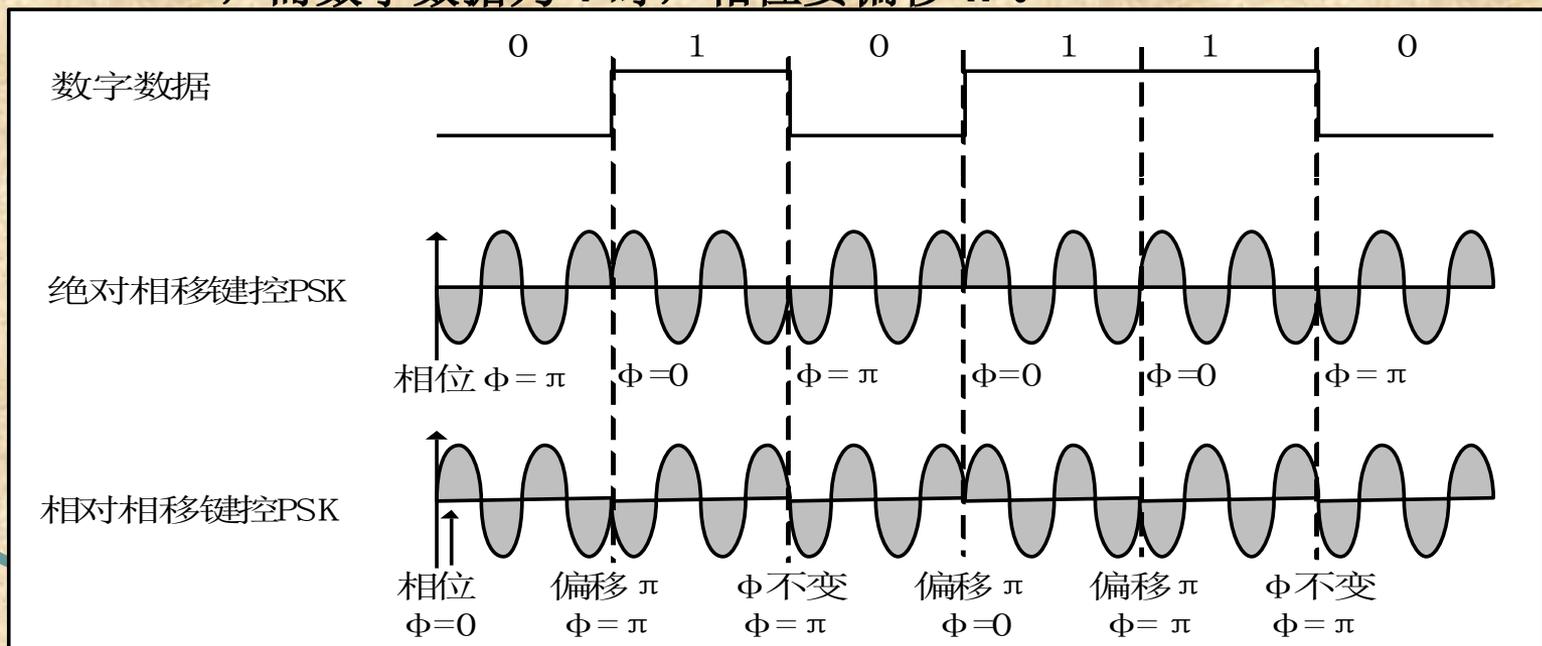
# 幅移键控、频移键控和相移键控

- 频移键控 FSK ( Frequency Shift Keying )
  - FSK 是通过改变载波**信号频率**的方法表示数字信号“1”、“0”，
  - 用  $f_1$  表示数字信号“1”，
  - 用  $f_2$  表示数字信号“0”，而载波信号的  $A$  和  $\varphi$  不变。



# 幅移键控、频移键控和相移键控

- 相移键控 **PSK** ( **Phase Shift Keying** )
  - **PSK** 是通过改变载波信号的**相位**值表示数字信号“1”、“0”，而载波信号的 **A** 和 **f** 不变。 **PSK** 包括两种类型：
    - 绝对调相
      - 绝对调相使用相位的绝对值， $\phi$  为 0 表示数字信号“1”， $\phi$  为  $\pi$  表示数字信号“0”。
    - 相对调相
      - 相对调相使用相位的相对偏移值，当数字数据为 0 时，相位不变化，而数字数据为 1 时，相位要偏移  $\pi$ 。



# 数字数据的数字信号编码

- 对于传输数字信号来说，最普通且最容易的方法是用两个不同的电压值来表示两个二进制值。例如，
  - 用无电压来表示 0，用恒定的正电压表示 1；
  - 也有用正电压表示 1，而用负电压表示 0。
- 常用的数字化编码有：
  - 不归零 NRZ(Non-Return to Zero) 编码
  - 曼彻斯特 (Manchester) 编码
  - 差分曼彻斯特 (Differential Manchester) 编码。这种编码技术的主要目的是实现通信双方数据传输的同步。

# 3. 数字数据的数字信号编码

- 数字数据的编码方式有三种：不归零码、曼彻斯特编码和差分曼彻斯特编码。
  - 不归零编码（**Non-Return to Zero**，**NRZ**）
    - **NRZ** 编码规定可用负电平表示逻辑“1”，用正电平表示逻辑“0”，反之亦然。
  - 曼彻斯特编码（**Manchester**）
    - 曼彻斯特编码是目前应用最广泛的编码方法之一，其特点是**每一位二进制信号的中间都有跳变**，若从低电平跳变到高电平，就表示数字信号“1”，若从高电平跳变到低电平，就表示数字信号“0”(见49幻灯片图)；
  - 差分曼彻斯特编码（**Difference Manchester**）
    - 差分曼彻斯特编码是对曼彻斯特编码的改进。其特点是每一位二进制信号的跳变依然提供收发端之间的同步，但每位二进制数据的取值，要根据其开始边界是否发生跳变来决定，若一个比特开始处存在跳变则表示“0”，无跳变则表示“1”。

# 3. 数字数据的数字信号编码

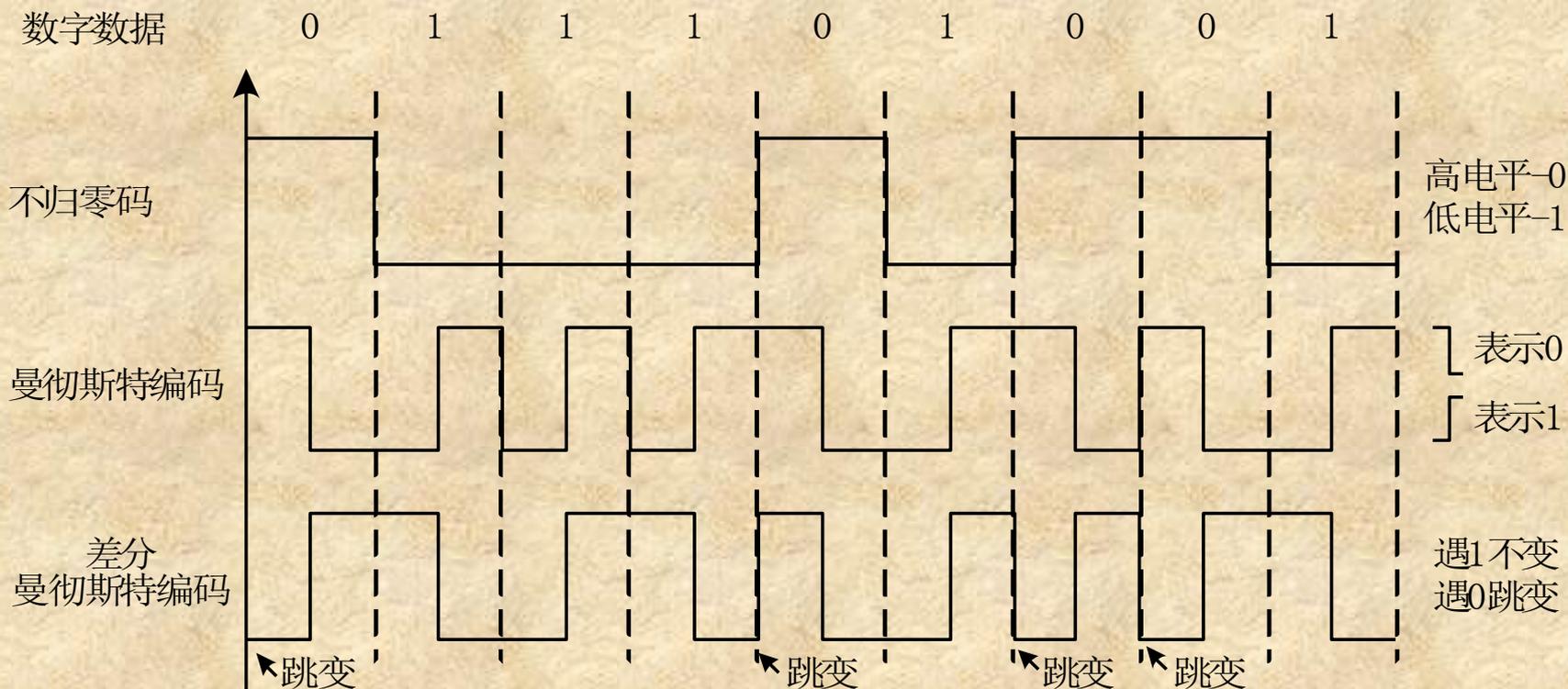
- **曼彻斯特编码 ( Manchester )**

- 在曼彻斯特编码中，用电压跳变的相位不同来区分 **1** 和 **0**，即用正的电压跳变表示 **0**；用负的电压跳变表示 **1**。因此，这种编码也称为**相位编码**。
- 由于跳变都发生在每一个码元的中间，接收端可以方便地利用它提取位同步时钟，因此，也称为**自同步编码**。通信双方利用每位中间的跳变来区分 **0** 和 **1** 的取值，并作为同步时钟信号。
- 在以太 (**Ethernet**) 局域网中采用的就是这种编码技术。

# 3. 数字数据的数字信号编码

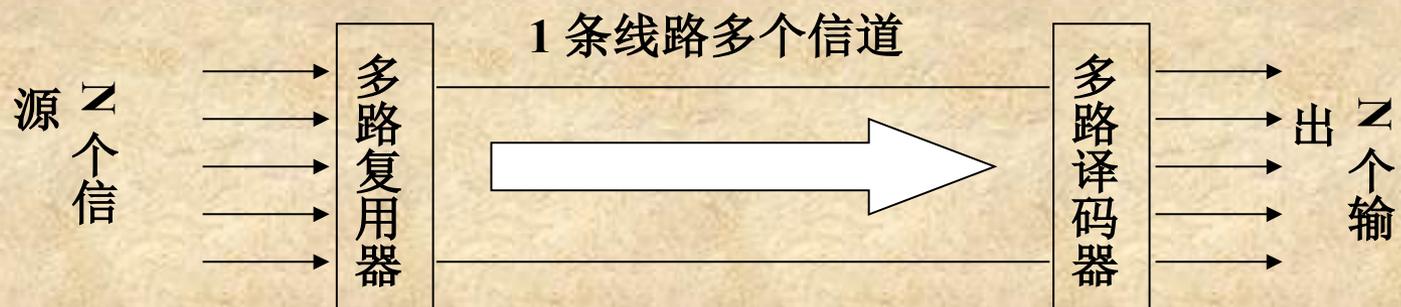
- 差分曼彻斯特编码 ( **Difference Manchester** r )
  - 差分曼彻斯特编码是在曼彻斯特编码基础上进行修改而得到的编码。其不同之处在于：每位中间的跳变只用作通信双方的同步时钟信号；而取值是 0 还是 1 则根据每一位起始处有无跳变来判断 ( 若有跳变则为 0 ；若无跳变则为 1 。 )
  - 这种编码的特点是每一位均用不同电平的两个半位来表示，因而始终能保持直流的平衡。
  - 令牌环 (Token-Ring) 局域网中采用的就是这种差分曼彻斯特编码。

# 数字数据编码的示例



## 2.2.3 多路复用技术

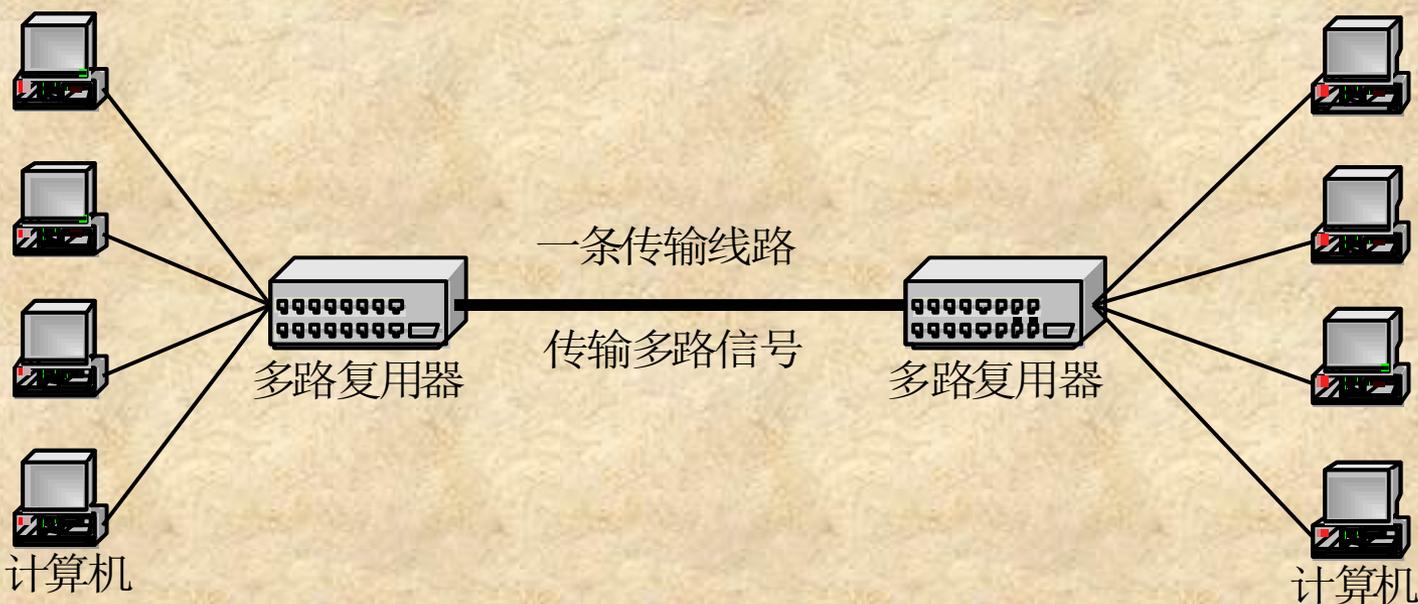
- 在长途通信中，常常用到一些带宽很大的传输介质，如同轴电缆、地面微波、卫星以及光纤等。它们的传输带宽很宽，**为了有效利用这些通信资源**，通常使用**复用技术**，在同一介质上，同时传输多个有限带宽信号的方法，被称为多路复用 (Multiplexing)，使得多路信号可以共同使用同一条线路，如图所示。



多路复用原理图

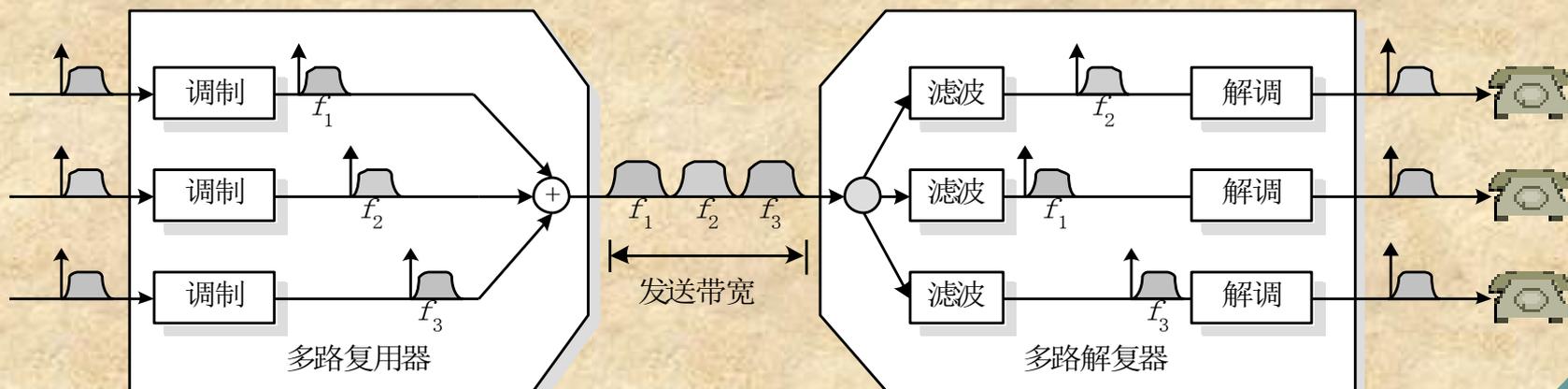
## 2.2.3 多路复用技术

- 信道复用的目的是让不同的计算机连接到相同的信道上，共享信道资源。
- 三种信道复用方式：频分复用 **FDM**、时分复用 **TDM**、波分复用 **WDM**。



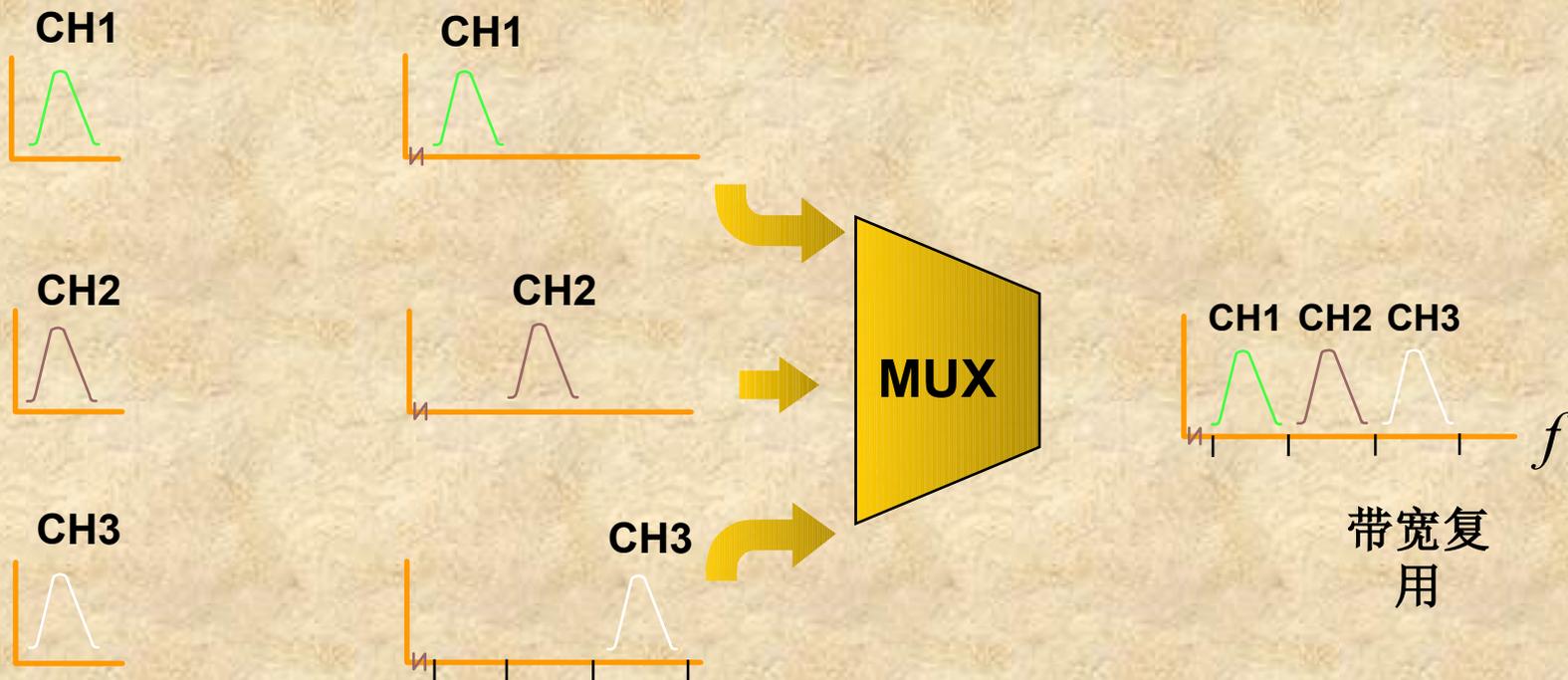
# 1. 频分多路复用 FDM

- 频分复用 (FDM) 是将信道分成若干个相等的频段，每个频段分给不同的用户，传输时，先将各个用户的信号调制到不同的频段，然后进行传输，接收的时候再按不同的频率接收。频分复用技术常用于模拟信号传输，如无线电广播、电视和载波电话等，必须与调制解调技术结合使用。
- FDM 是把信道的可用频带分成多个互不交叠的频段（带），每个信号占其中一个频段。接收时用适当的滤波器分离出不同信号，分别进行解调接收。



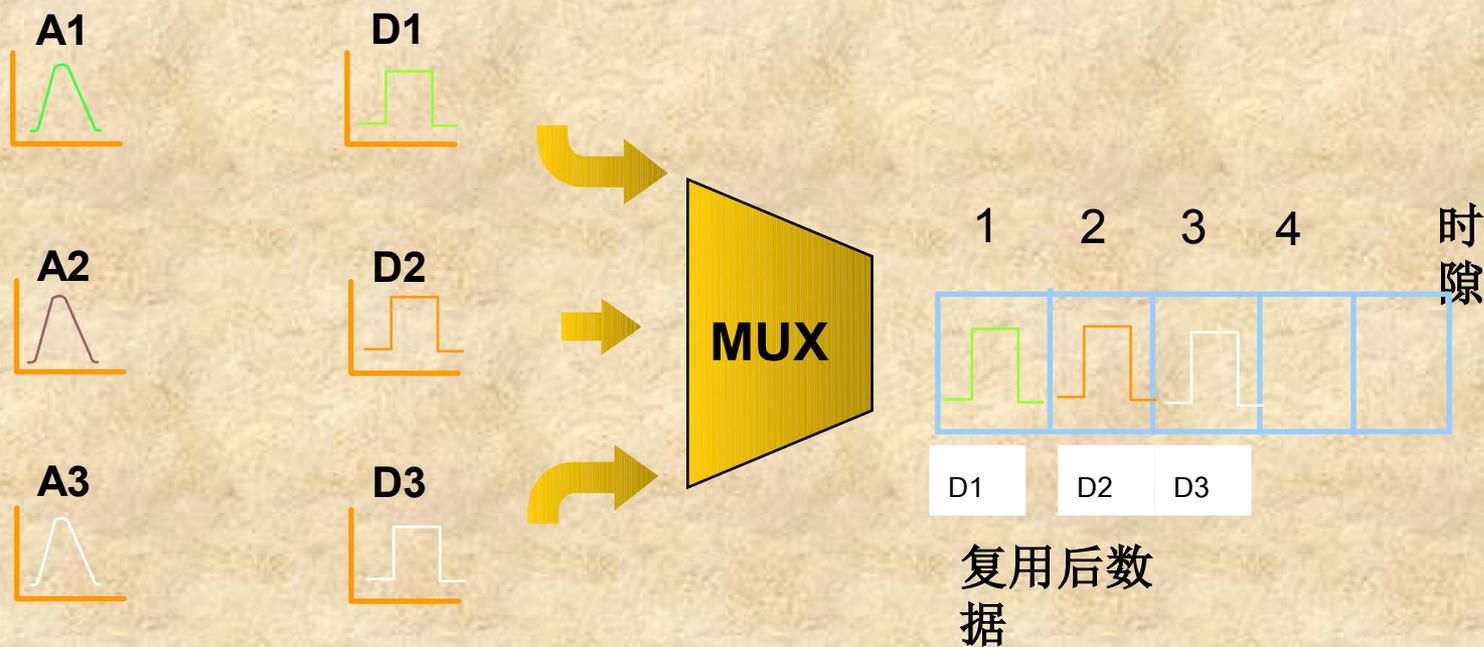
# 1. 频分多路复用 FDM

当信道带宽大于各路信号的总带宽时，可以将信道分割成若干个子信道，每个子信道用来传输一路信号，这就是频分多路复用（FDM）。



## 2. 时分多路复用 TDM

- 时分多路复用（Time Division Multiplexing, TDM）：当信道能达到的数据传输率大于各路信号的数据传输率总和时，可以将使用信道的时分成一个一个的时间片，按一定规则将这些时间片分配给各路信号，每一路信号只能在自己的时间片内独占信道进行传输。



# 3. 波分多路复用 WDM

- **WDM** 主要用于全光纤网组成的通信系统。波分复用就是光的频分复用。人们借用传统的载波电话的频分复用的概念，可以做到使用一根光纤来同时传输多个频率很接近的光载波信号，提高了光纤的传输能力。
- 最初，在一根光纤上只能复用两路光载波信号，随着技术的发展，在一根光纤上复用的路数越来越多。现在已达到在一根光纤上复用 **80** 路或更多路数的光载波信号，这种复用方式就是**密集波分复用 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)**。



## (2) 报文交换

- 整个报文 (Message) 作为一个整体一起发送。
- 在交换过程中, 交换设备将接收到的报文先存储, 待信道空闲时再转发出去, 一级一级中转, 直到目的地。这种数据传输技术称为存储 - 转发。
- 传输之前不需要建立端到端的连接, 仅在相邻结点传输报文时建立结点间的连接。——称为“无连接的 ( connectionless ) ”
- 缺点:
  - 报文大小不一, 造成存储管理复杂。
  - 大报文造成存储转发的延时过长;
  - 出错后整个报文全部重发。

## 2.3 数据交换技术

- 通信子网由传输线路和中间节点组成，当信源和信宿间没有线路直接相连时，信源发出的数据先到达与之相连的中间节点，再从该中间节点传到下一个中间节点，直至到信宿，这个过程称为**交换**。
- 交换系统的基本功能是提供用户通信接口之间的连接。在不同的交换方式中，其连接可以是物理的，也可以是逻辑的。
  - **物理连接**，是指用户通信过程中，不论用户有无信息传送，交换网络始终按预先分配的方法保持其专用的接续通路；
  - **逻辑连接**则只有在用户有信息传送时，才按需分配提供接续通路。因此，逻辑连接也称之为虚连接 (Virtual Connection)。

## 2.3 数据交换技术

- 交换方式分类
  - 由电信网分类可知，交换方式基本上分为三种：
    - 电路交换 (CS , Circuit Switch)
    - 报文交换 (MS , Message Switch)
    - 分组交换 (PS , Packet Switch) 。

## 2.3.1 电路交换

- 电路交换（ **Circuit Switching** ）
  - 也称为线路交换，是一种**直接**的交换方式，为一对需要进行通信的节点之间提供一条**临时**的**专用通道**，即提供一条专用的传输通道，既可以是物理通道又可以是逻辑通道（使用时分或频分复用技术）。
  - 这条通道是由节点内部电路对节点间传输路径经过适当选择、连接而完成的，是一条由多个节点和多条节点间传输路径组成的链路。

# 电路交换

所有电路交换的基本处理过程都包括呼叫建立、通话（数据传送）、电路拆除三个阶段。

## 1. 电路建立阶段

## 2. 数据传输

电路建立完成后，就可以在这条临时的专用电路上传输数据，通常为全双工传输。

## 3. 电路拆除

在完成数据传输后，源节点发出释放请求信息，请求终止通信，若目的节点接受释放请求，则发回释放应答信息。在电路拆除阶段，各节点相应地拆除该电路的对应连接，释放由该电路占用的节点和信道资源。

# 电路交换

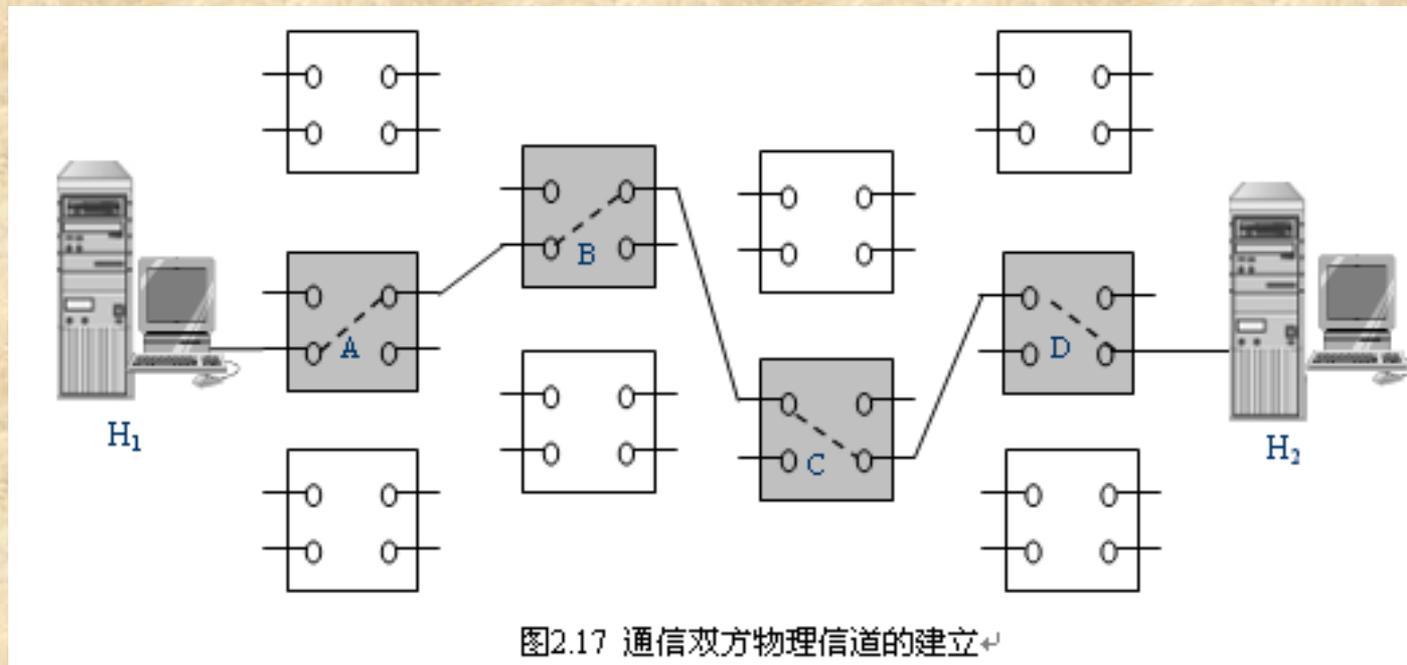
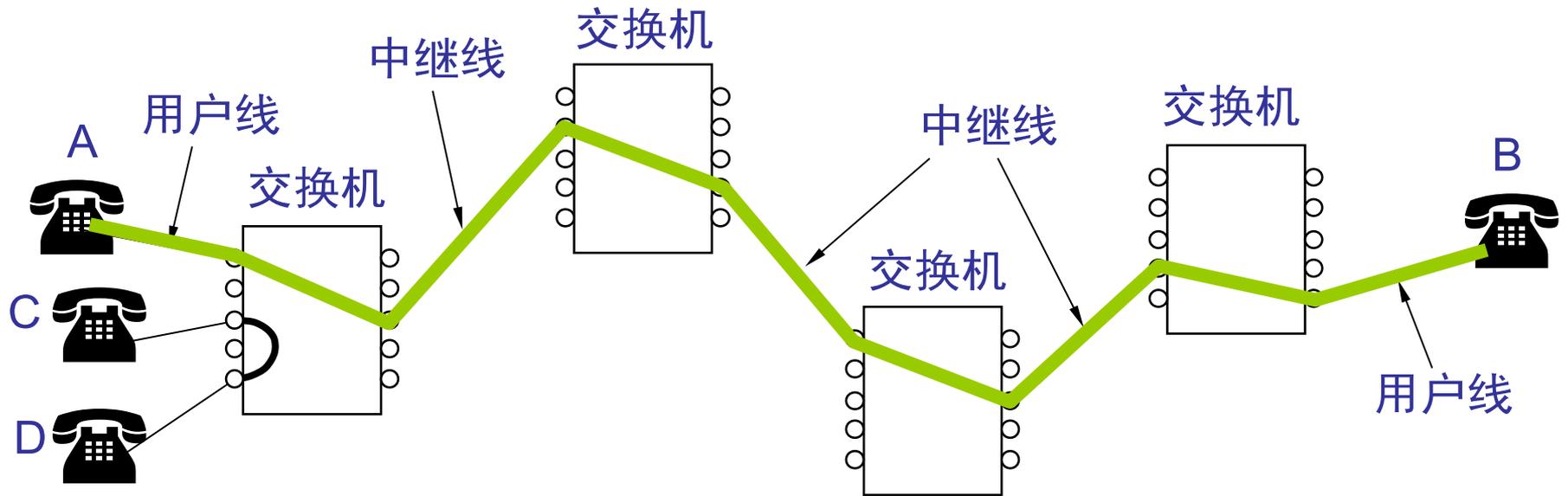


图 1 电路交换的基本处理过程

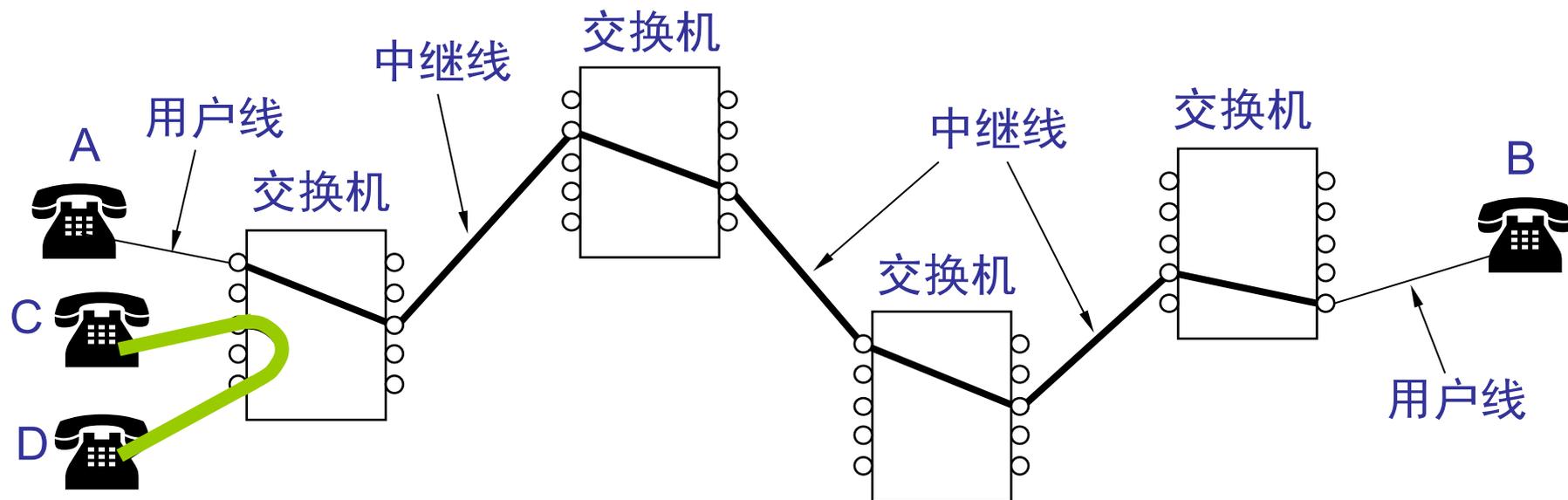
# 电路交换举例

- A 和 B 通话经过四个交换机
- 通话在 A 到 B 的连接上进行



# 电路交换举例

- C 和 D 通话只经过一个本地交换机
- 通话在 C 到 D 的连接上进行



# 电路交换的特点

- (1) 电路交换是一种实时交换，适用于实时要求高的话音通信 ( 全程的传输时间  $\leq 200\text{ms}$  ) 。
- (2) 在通信前要通过呼叫为主、被叫用户建立一条局间逻辑的端 - 端连接。如果呼叫请求数超过交换网的连接能力 ( 过负荷 ) ，用户会听到忙音。衡量电话交换服务质量的指标之一是呼叫损失率，简称为呼损率。
- (3) 电路交换预分配带宽，话路接通后，即使无信息传送也虚占电路。据统计，传送数字话音时电路利用率仅为 **36%** 。
- (4) 在传送信息时，没有任何差错控制措施，不利于传输可靠性要求高的突发性数据业务。采用电路交换方式的交换节点在建立的连接通路上通常只提供一种基本的传送速率 ( 如 **64kb/s** ) 。

## 2.3.2 报文交换和分组交换

- 存储转发交换（**Store and Forward Switching**）
  - 报文存储转发交换
  - 报文分组存储转发交换
    - 数据报
    - 虚电路

## 2.3.2 报文交换和分组交换

- 早在 20 世纪 40 年代，电报通信系统就采用了报文交换方式。
- 报文交换 (Message Switch) 与电路交换的工作原理不同，每个报文传送时，没有连接建立和释放这两个阶段。在报文交换节点接收一份份报文，予以存储，再按报文的报头 (内含收报人地址、流水号等) 进行转发。

# 1. 报文交换

- 对于数字数据通信，广泛使用报文交换技术；
- 在报文交换中，每一个报文由传输的数据和报头组成，报头中有源地址和目标地址。
- 节点根据报头中的目标地址为报文进行路径选择。并且对收发的报文进行相应的处理。

# 报文交换的特点

- 源节点和目标节点在通信时不需要建立一条专用的通路；
- 与电路交换相比，报文交换没有建立电路和拆除电路所需的等待和时延；
- 电路利用率高，节点间可根据电路情况选择不同的速度传输，能高效地传输数据；
- 要求节点具备足够的报文数据存放能力，一般节点由微机或小型机担当；
- 数据传输的可靠性高，每个节点在存储转发中，都进行差错控制，即检错和纠错。
- 由于采用了对完整报文的存储 / 转发，节点存储 / 转发的时延较大，不适用于交互式通信。

## 2.5.2.2 分组交换

- 分组交换属于“存储 / 转发”交换，它不像报文交换以报文为单位进行交换、传输，而是以更短的、标准的“报文分组”（**Packet**）为单位进行交换传输。
  - 假如 **A** 站有一份比较长的报文要发送给 **C** 站。则它首先将报文按规定长度划分成若干分组，每个分组附加上地址及纠错等其他信息，然后将这些分组顺序发送到交换网的节点 **C**。
- 分组交换又分为：
  - 数据报交换
  - 虚电路交换

# 数据报分组交换

- 交换网把进网的任一分组都当作单独的“小报文”来处理，而不管它属于哪个报文的分组，就像报文交换中把一份报文进行单独处理一样。这种分组交换方式简称为数据报传输方式，作为基本传输单位的“小报文”被称为数据报（**datagram**）。

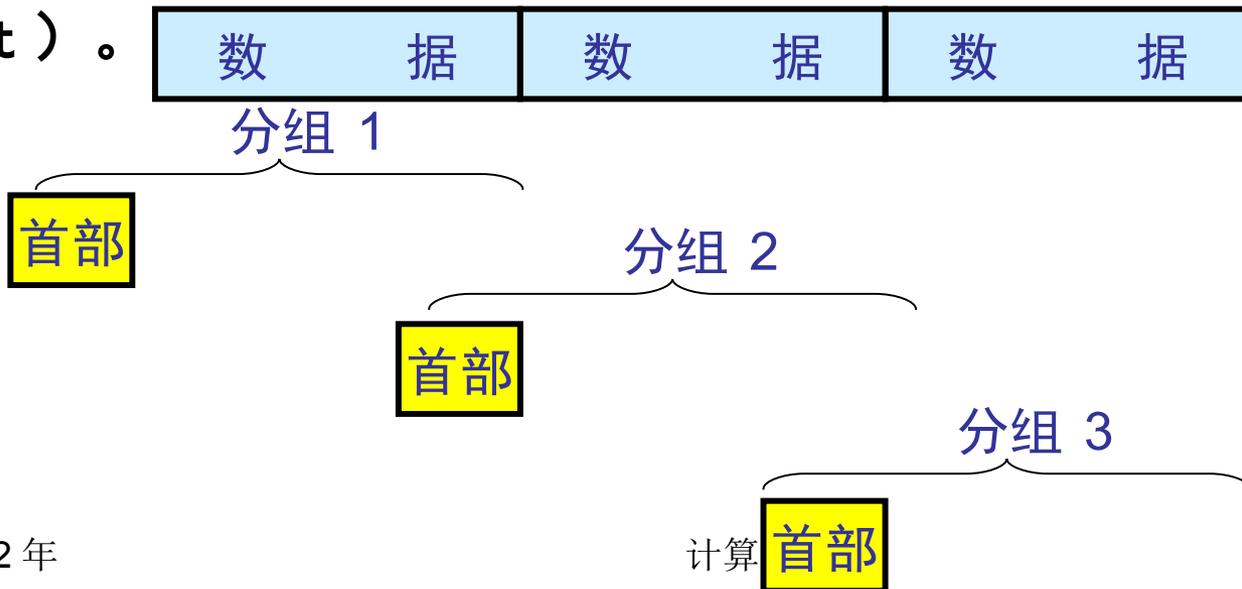
# ( 3 ) 报文分组交换

- 在发送端，先把较长的报文划分成较短的、固定长度的数据段。



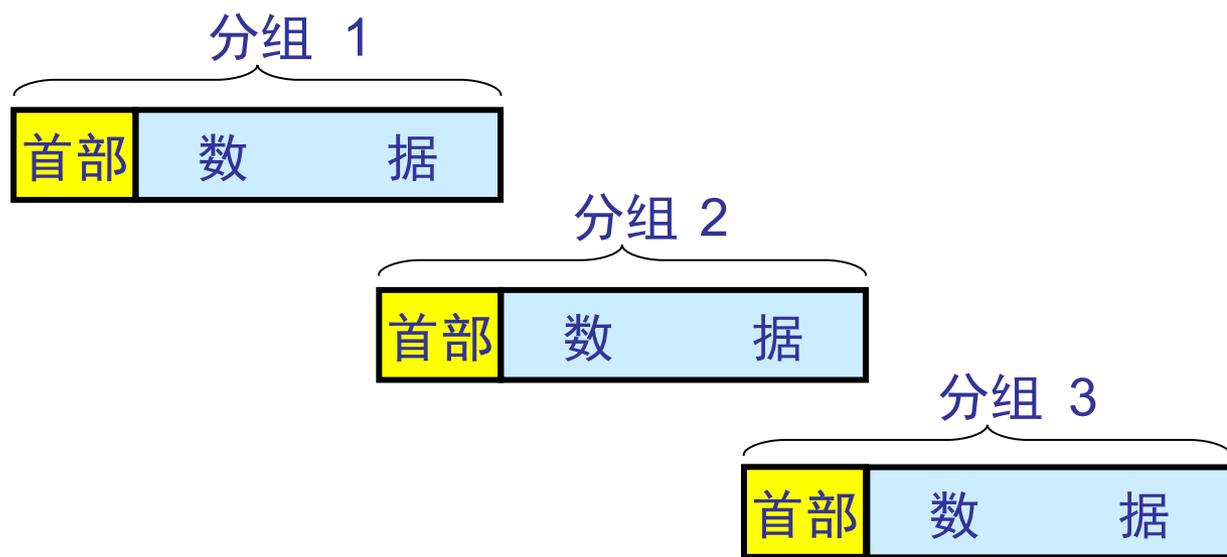
假定这个报文较长

- 每一个数据段前面添加首部 (header) 构成分组 (packet)。



# (3) 报文分组交换

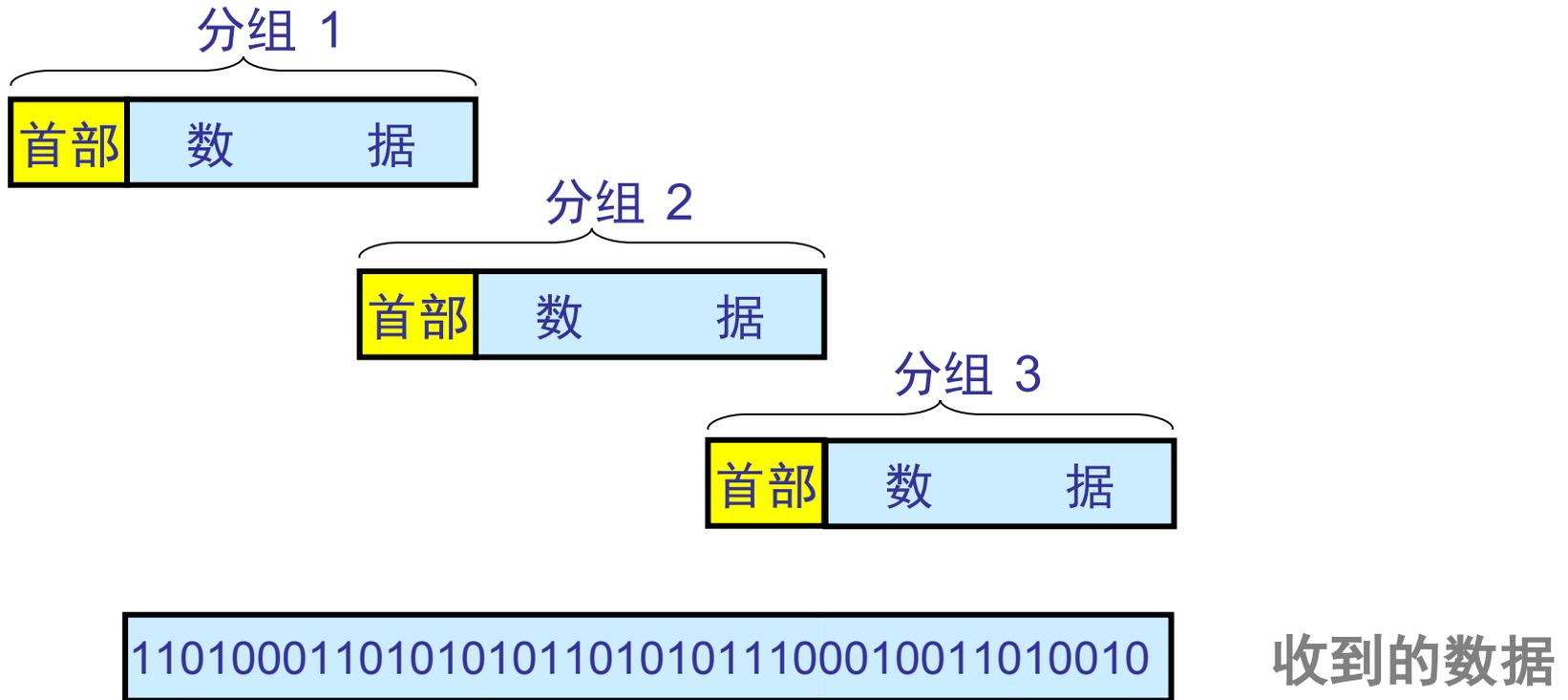
- 分组交换网以“分组”作为数据传输单元。
- 依次把各分组发送到接收端（假定接收端在左边）。



- 每一个分组的首部都含有地址等控制信息。
- 分组交换网中的结点交换机根据收到的分组的首部中的地址信息，把分组转发到下一个结点交换机。
- 用这样的存储转发方式，最后分组就能到达最终目的地。

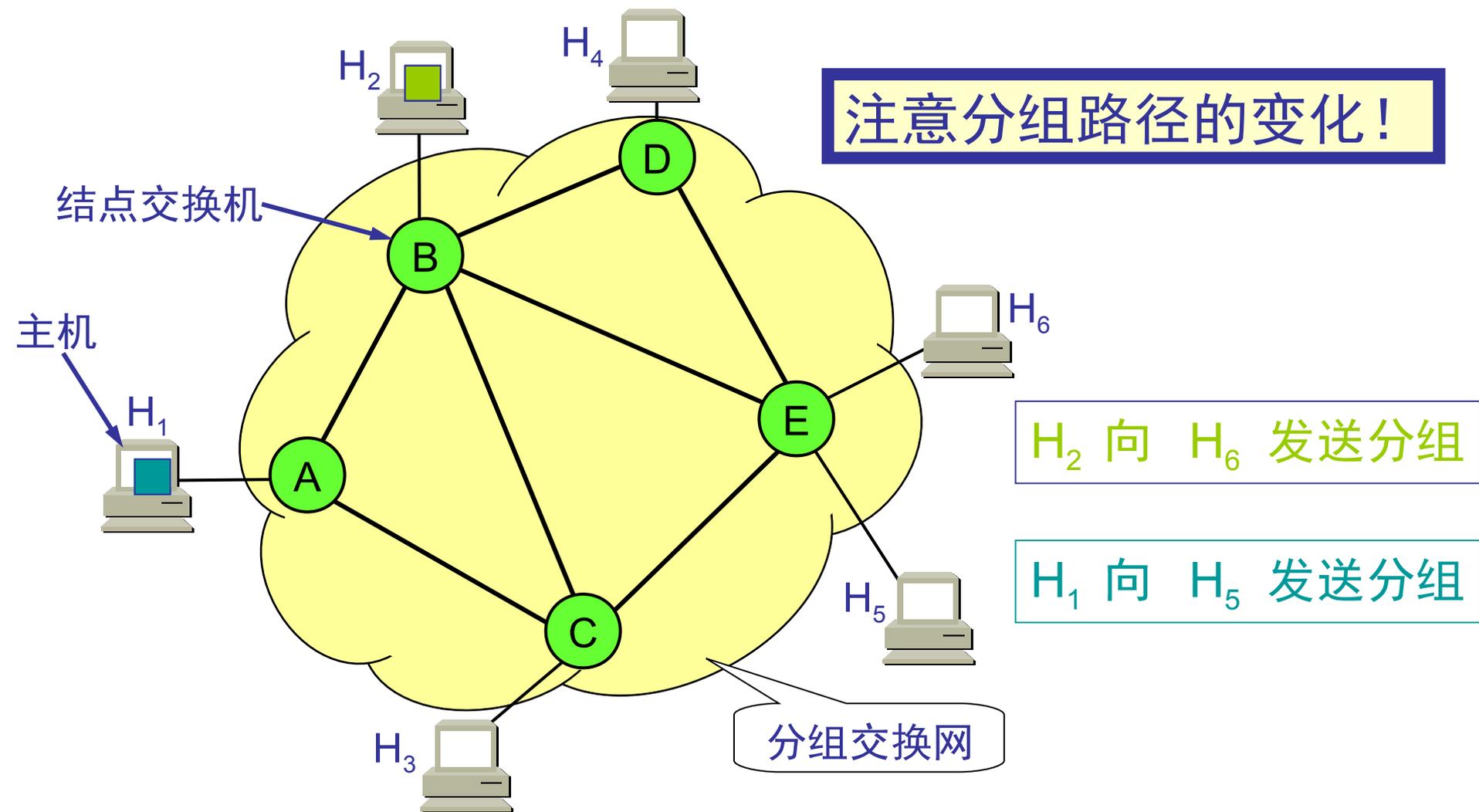
### (3) 报文分组交换

- 接收端收到分组后剥去首部还原成报文。

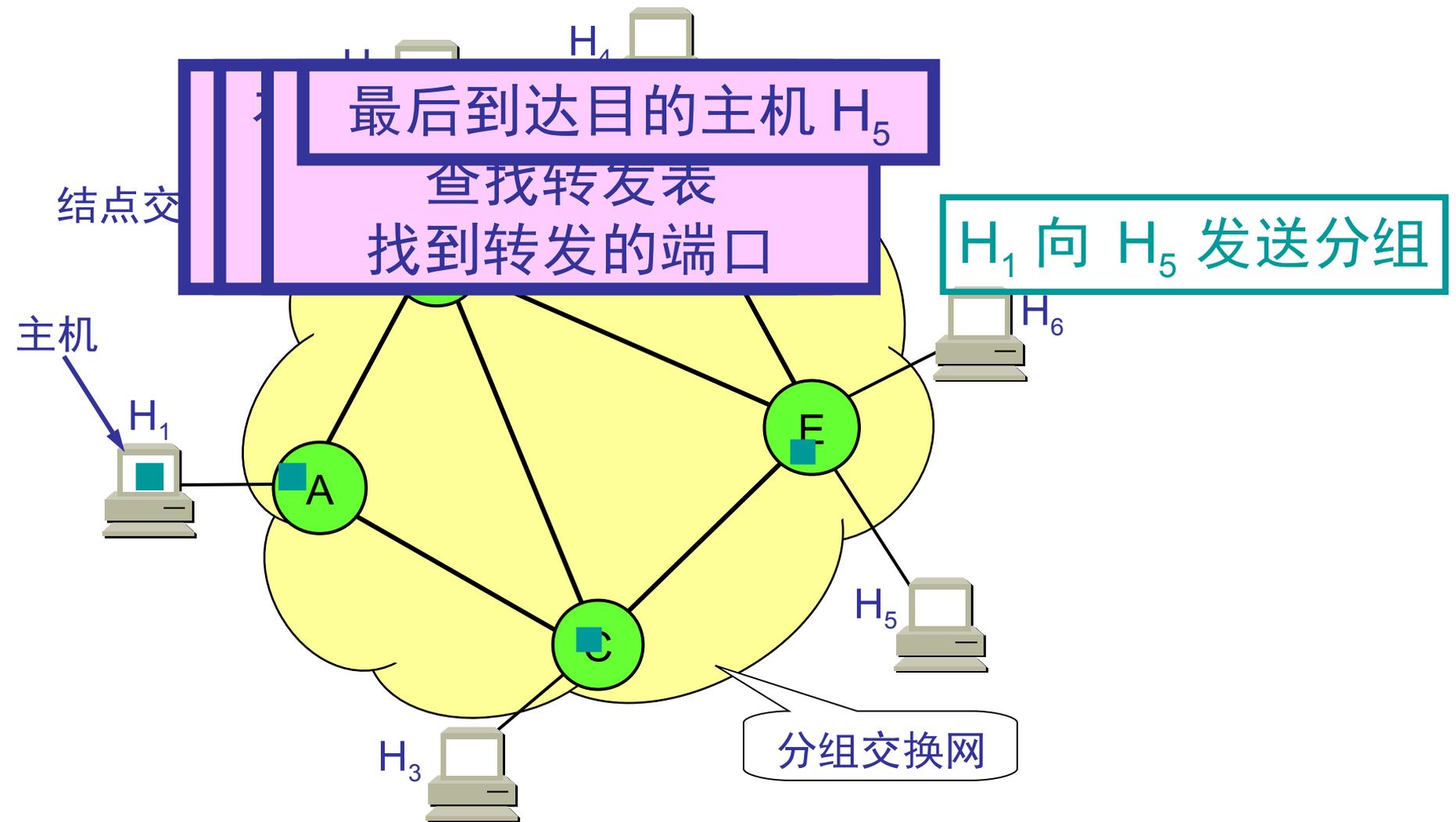


- 最后，在接收端把收到的数据恢复成为原来的报文。
- 这里我们假定分组在传输过程中没有出现差错，在转发时也没有被丢弃。

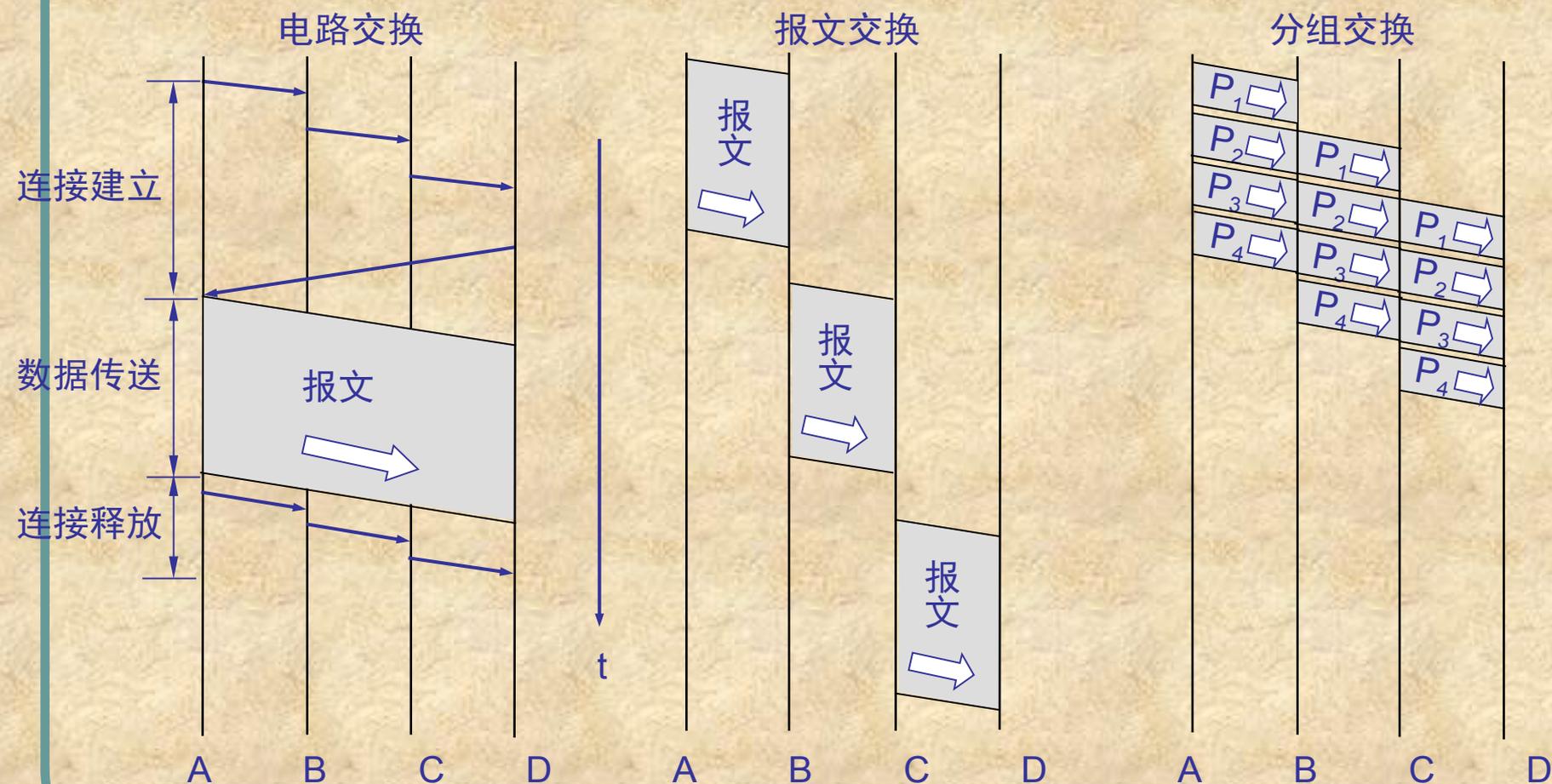
# 分组交换网的示意图



# 注意分组的存储转发过程

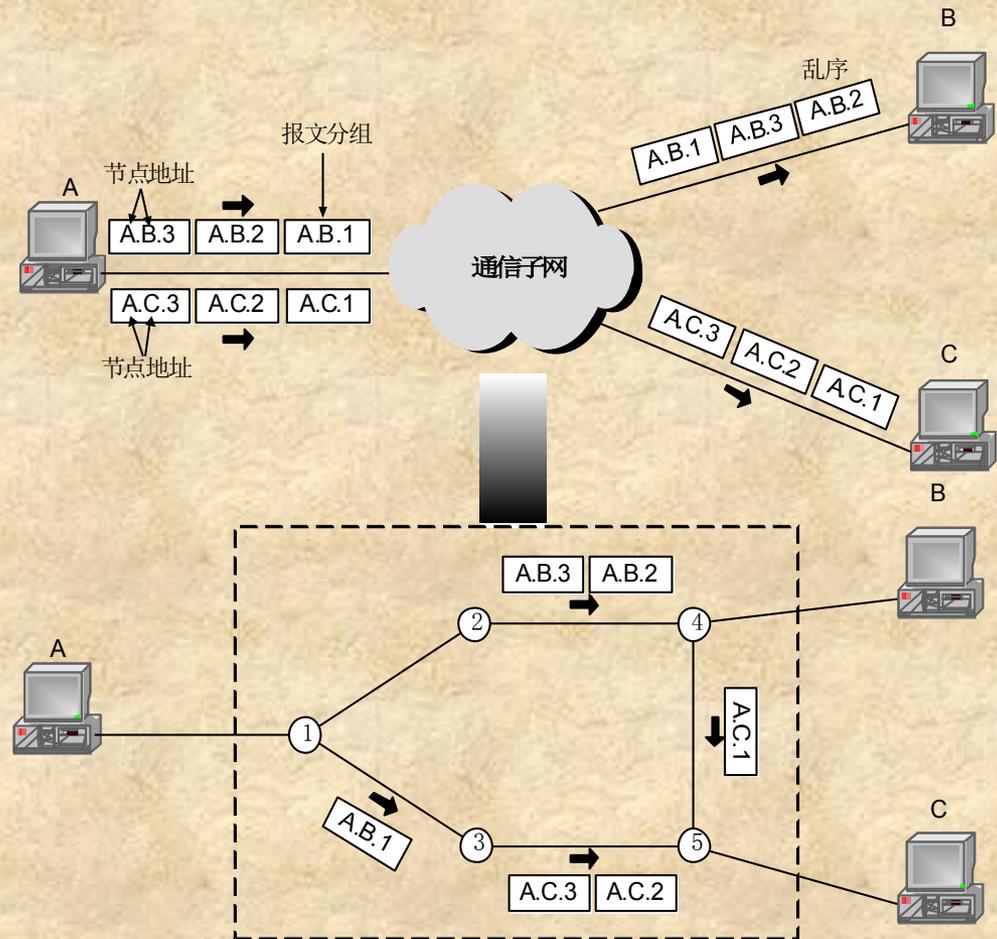


# 三种交换的比较



# 数据报分组交换的特点

- 同一报文的不同分组可以由不同的传输路径通过通信子网；
- 同一报文的不同分组到达目的节点时可能出现乱序、重复或丢失现象；
- 每一个报文在传输过程中都必须带有源节点地址和目的节点地址；
- 使用数据报方式时，数据报文传输延迟较大，适用于突发性通信，不适用于长报文、会话式通信。

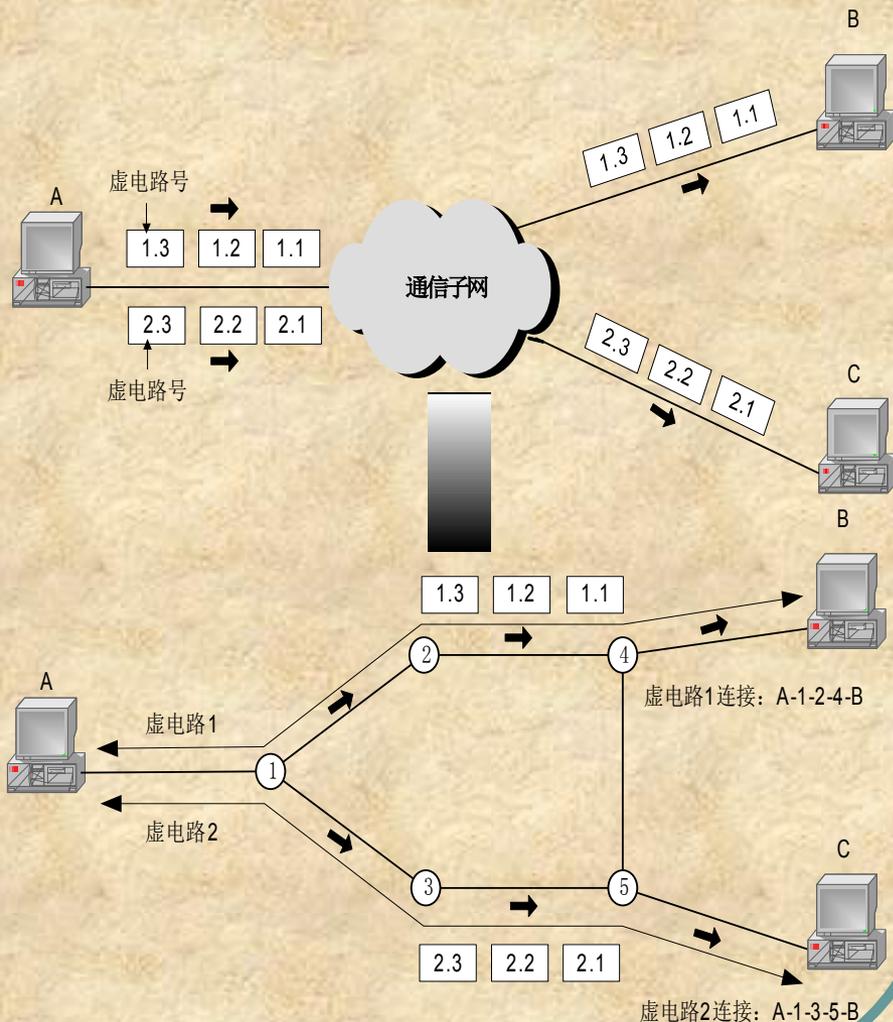


# 虚电路分组交换

- 虚电路就是两个用户的终端设备在开始互相发送和接收数据之前需要通过通信网络建立**逻辑**上的连接，所有分组都必须沿着事先建立的虚电路传输，用户不需要发送和接收数据时清除连接。
- 虚电路方式具有分组交换与线路交换两种方式的优点，在计算机网络中得到广泛的应用。

# 虚电路的特点

- 虚电路在每次报文分组发送之前，必须在源节点与目的节点之间建立一条逻辑连接，也包括虚电路建立、数据传输和虚电路拆除三个阶段。
- 报文分组不必带目的地址、源地址等辅助信息，只需要携带虚电路标识号。报文分组到达目的节点不会出现丢失、重复与乱序的现象；
- 报文分组通过每个虚电路上的节点时，节点只需要做差错检测，而不需要做路径选择。
- 通信子网中每个节点可以和任何节点建立多条虚电路连接。



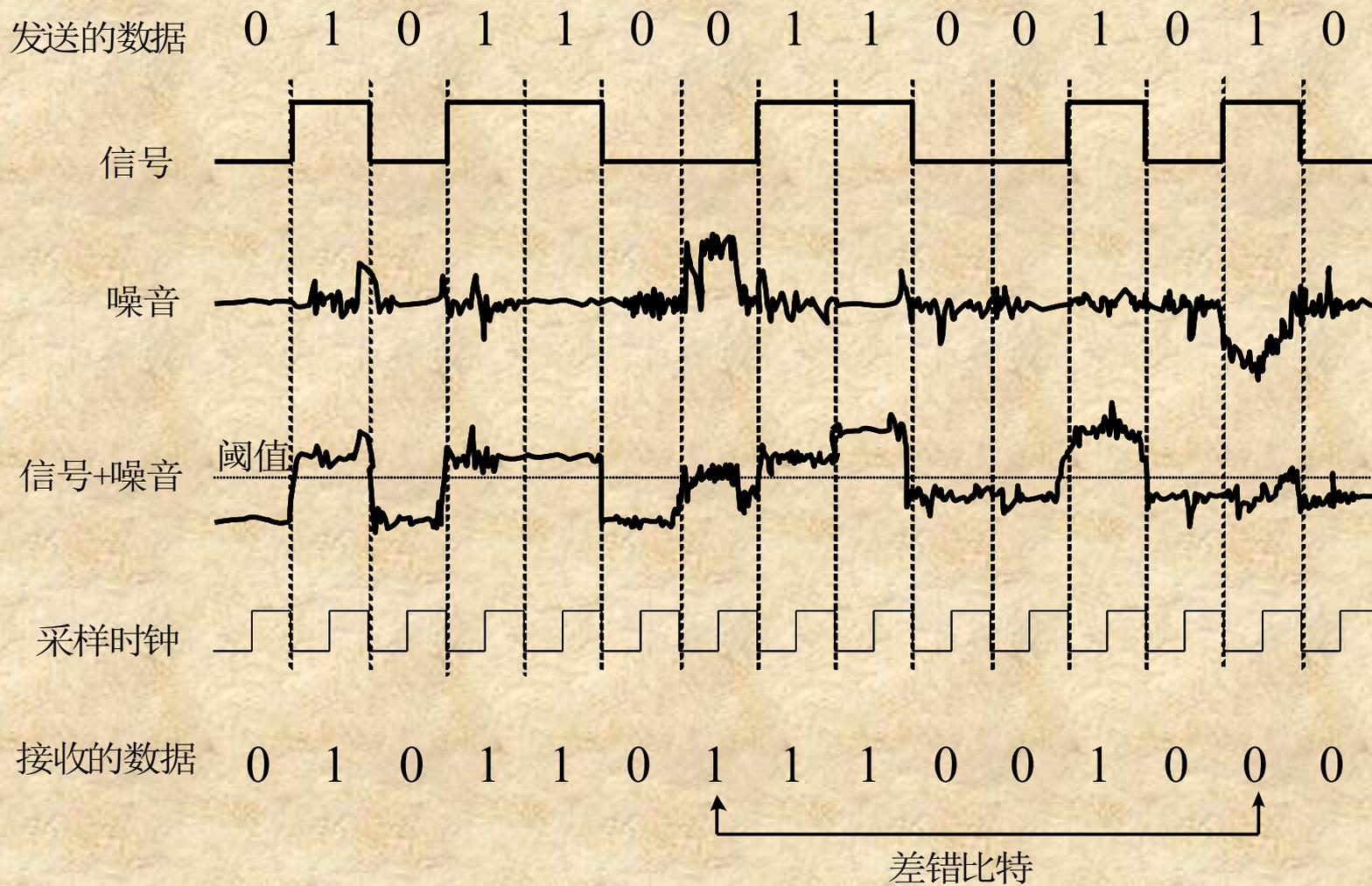
# 电路交换、报文交换和分组交换比较

连接策略	优点	缺点
电路交换	快速。适用于不允许传输延迟的情况	由于网络线路是专用的，所以其他路由不能使用。和电话通话一样，通信双方必须同时参与
报文交换	路由是非专用的，完成一个报文传输后，可以立刻被重新使用。接收方无须立即接受报文	通常报文需要用更长的时间，才能到达目的地。由于中间节点必须存储报文，所以报文过长，也会产生问题。报文尾部仍沿用原先设定的路由，而不管网络状况是否已经改变
分组交换	当发生阻塞时，分组交换网络的数据报方式会为报文的不同分组选择不同的路由，因此能更好地利用网络	由于每个分组被单独传送，费用将相应增加。必须为每个分组选择路由。在数据报方式中，分组可能不按次序到达

## 2.4 差错控制技术

- 根据数据通信系统的模型，当数据从信源发出，经过通信信道传输，由于信道总存在着一定的噪声，数据到达信宿端后，接收的信号实际上是数据信号和噪声信号的叠加。接收端在取样时钟作用下接收数据，并根据阈值电平判断信号电平。如果噪声对信号的影响非常大时，就会造成数据的传输错误，

# 数据通信中的实际情况



# 通信信道中的噪声

- 通信信道中的噪声分为热噪声和冲击噪声。
  - 热噪声
    - 是由传输媒体的电子热运动产生的，其特点是时刻存在，幅度小，干扰强度与频率无关，但频谱很宽，属于随机噪声。
    - 由热噪声引起的差错属于一种随机差错。
  - 冲击噪声
    - 是由外界电磁干扰引起的，与热噪声相比，冲击噪声的幅度较大，是引起差错的主要原因。冲击噪声持续时间与数据传输中每个比特的发送时间相比，可能较长，因而冲击噪声引起的相邻多个数据位出错呈突发性。
    - 冲击噪声引起的传输差错称为突发差错。

## 2.9.2 差错的控制

- 在数据通信中，原发送信息，不具备抗干扰性能，如果引入冗余度后，就可以使新的码组具有一定的抗干扰能力。
  - 例如，两个码元构成四种码组 00、01、10、11，无法检错，而使用三个码元，有用码组为 000、011、101 和 110；
- 目前差错控制常采用冗余编码方案，检测和纠正信息传输中产生的错误。
- 冗余编码思想就是：**把要发送的有效数据在发送时按照所使用的某种差错编码规则加上控制码（冗余码），当信息到达接收端后，再按照相应的校验规则检验收到的信息是否正确。**

# 差错编码

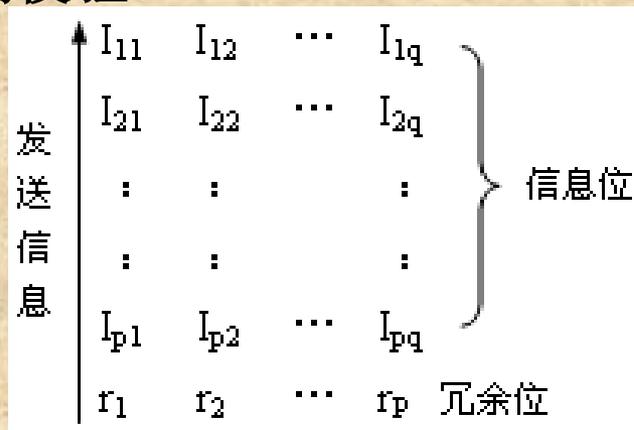
- 差错检测编码：
  - 奇偶校验码；
  - **CRC** 循环冗余码等；

# 奇偶校验码

奇偶校验是一种最基本的校验方法，其规则是在原始数据位后附加一个校验位，构成一个带有校验位的码组，使得码组中“1”的个数成为偶数（称为偶校验）或者奇数（称为奇校验），并把整个码组一起发送出去。

接收端在收到信号后，对每一个码组检查其中“1”的个数是否为偶数（对奇校验则检查“1”的个数是否为奇数），如果检查通过就认为收到的数据正确，否则发回一个信号给发送端，要求重新发送该数据。奇偶校验又可分为垂直奇偶校验、水平奇偶校验和水平垂直奇偶校验。

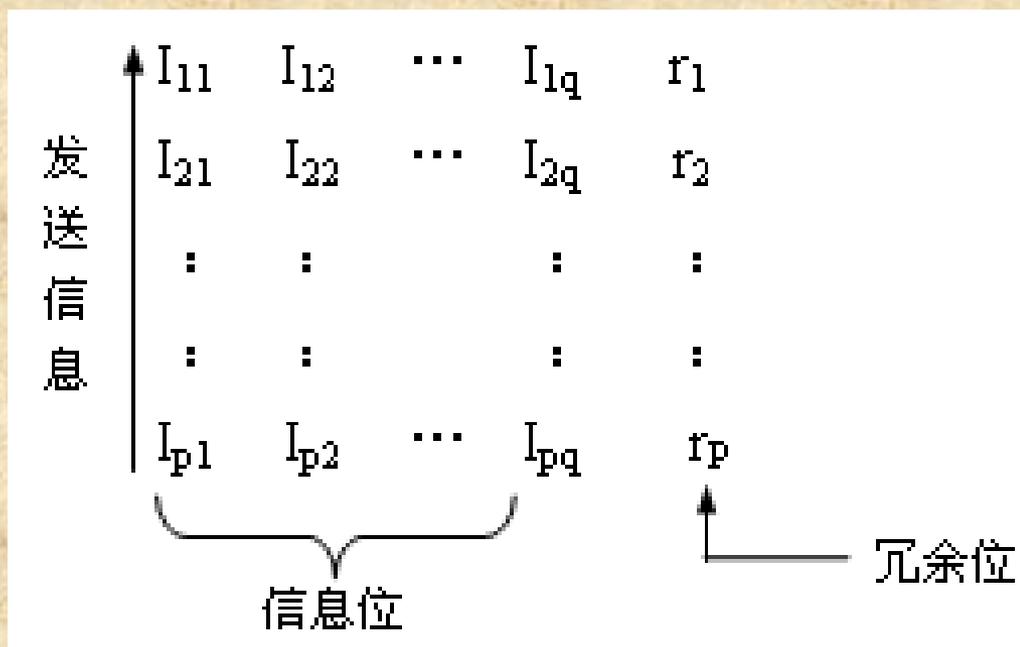
## (1) 垂直奇偶校验



# 奇偶校验码

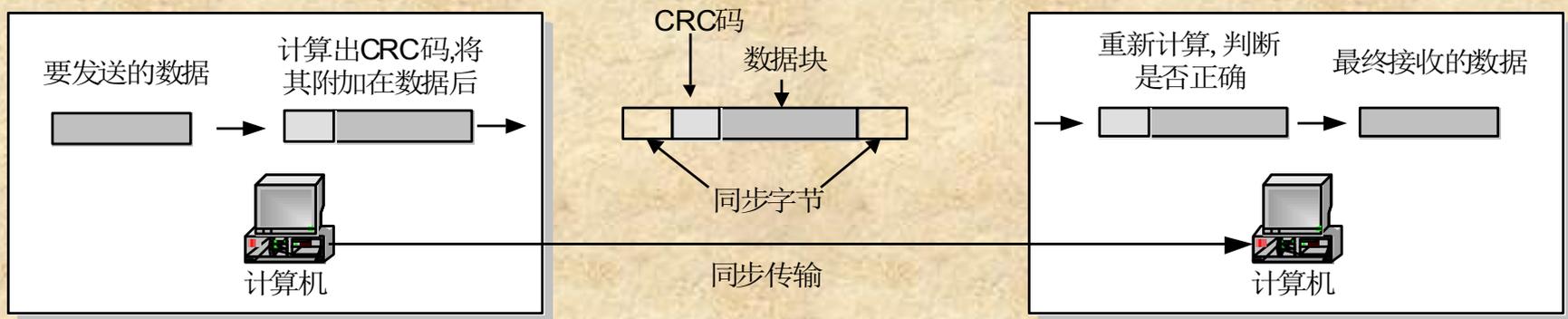
## (2) 水平奇偶校验

为了降低对突发错误的漏检率，可以采用水平奇偶校验的方法。水平奇偶校验又称为横向奇偶校验，它是对各个信息段的相应位横向进行编码，产生一个奇偶校验冗余位。



# 循环冗余码 CRC

- 循环冗余校验码（**Cycle Redundancy Check**，简称**CRC**）是一种被广泛采用的多项式编码。所谓多项式码，就是将二进制形式的码元看作是仅具有“0”或“1”两种取值的多项式的系数， $k$ 个码元看做是 $k$ 项多项式 $x^{k-1}+\dots+x^0$ 表达式的系数。例如101101对应的多项式是 $x^5+x^3+x^2+1$ ，而多项式 $x^5+x^3+x^2+x+1$ 对应的代码为101111。
- **CRC**的原理为：假设要传送的信息有 $k$ 位，则发送端会自动加上 $r$ 位的校验序列，然后再传送出去，这 $k+r$ 位数可以被某个事先设定好的数整除。当接收端收到数据后用原先那个设定好的数来除，若没有余数出现，则表示数据传送正确，相反地，若有余数出现，则表示数据传送有误。



# 循环冗余码 CRC

- **CRC** 码在发送端编码和接收端校验码时，都可以利用生成多项式  $G(x)$  来得到。  $K$  位要发送的信息可对应  $(k-1)$  次的多项式  $K(x)$ ，  $r$  位的冗余位则对应于一个  $(r-1)$  次的多项式  $R(x)$ ，由  $k$  位信息位加  $r$  位冗余位组成的  $n=k+r$  位码字则对应于一个  $(n-1)$  次的多项式  $p(x) = x^r \cdot m(x) + R(x)$ 。
- 由信息位产生冗余位的编码过程，就是已知  $m(x)$  求  $R(x)$  的过程。在 **CRC** 码中可以通过找到一个特定的  $r$  次多项式  $G(x)$ ，然后用  $x^r \cdot m(x)$  去除以  $G(x)$ ，得到的余式就是  $R(x)$ 。

# 循环冗余码 CRC

例如：要发送的信息位 **101011011**，双方约定  $G(x)=x^4+x^3+x^2+1$  作为生成多项式，求出 **CRC** 码的校验序列码，并验证收到的码字的正确性。

编码 信息序列 **101011011** 对应的码多项式为

$$K(x) = x^8 + x^6 + x^4 + x^3 + x + 1;$$

$$x^r \cdot m(x) = x^{12} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4, \text{ 对应的代码为}$$

**1010110110000**( 其实就是在原信息位 **101011011** 后加 4 个 0, 其中 4 为生成多项式  $G(x)=x^4+x^3+x^2+1$  的最高次幂 ); 生成多项式

$$G(x) = x^4 + x^3 + x^2 + 1 \text{ 对应的代码为 } 11101。$$

用模 2 除法进行 **1010110110000** 除以 **11101**，过程如图 2.22 所示，得到的最后余数 **0110** 就是冗余位，相应的  $R(x) = x^2 + x$ 。

$$\text{由于 } p(x) = x^r \cdot m(x) + R(x) =$$

$$x^{12} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x, \text{ 对应的要传输的 CRC 为}$$

**1010110110110**( 即在信息位 **101011011** 的后面加上 **0110**, 熟练后可直接在信息位后面加上冗余位得到要传输的码字。

# 循环冗余码 CRC

$$\begin{array}{r|l} & 11101 \quad 1110 \\ 11101 / & 101011011 \quad 0000 \\ & \underline{11101} \\ & 10001 \\ & \underline{11101} \\ & 11000 \\ & \underline{11101} \\ & 10111 \\ & \underline{11101} \\ & 10100 \quad 0 \\ & \underline{11101} \\ & 10010 \\ & \underline{11101} \\ & 11110 \\ & \underline{11101} \\ & 0110 \end{array}$$

图 2-22 长除法除法

# 循环冗余码 CRC

在接收方收到此码字后，再将此码字除以生成多项式  $G(x)$  所对应二进制位串 11101，若能整除，即余数为零，则表明传输中没有错，否则，表明传输有差错。

## 2.5 传输媒体（传输介质）

- 计算机网络传输媒体：
  - 有线
    - 双绞线
    - 同轴电缆
    - 光纤等
  - 无线
    - 无线电波
    - 微波
    - 红外线

## 2.5.1 双绞线

- 双绞线是由一对或多对绝缘铜导线组成，为了减少信号传输中串扰及电磁干扰（**EMI**）影响的程度，通常将这些线按一定的密度互相缠绕在一起。
- 双绞线是模拟和数字数据通信最普通的传输媒体，它的主要应用范围是电话系统中的模拟话音传输，最适合于较短距离的信息传输，当超过几千米时信号因衰减可能会产生畸变，这时就要使用中继器（**Repeater**）来放大信号和再生波形。
- 双绞线的价格在传输媒体中是最便宜的，并且安装简单，所以得到广泛的使用。
- 在局域网中一般也采用双绞线作为传输媒体。双绞线可分为非屏蔽双绞线 **UTP**（**Unshielded Twisted Pair**）和屏蔽双绞线 **STP**（**Shielded Twisted Pair**）。

- 双绞线既可以用于音频传输，也可以用于数据传输。按双绞线的性能，目前广泛应用的有五个不同的等级，级别越高性能越好。由于 **UTP** 的成本低于 **STP**，所以使用的更广泛。

(1) 按照 T568B 标准：1- 白橙、2- 橙、3- 白绿、4- 蓝、5- 白蓝、6- 绿、7- 白棕、8- 棕。

(2) 按照 T568A 标准：1- 白绿、2- 绿、3- 白橙、4- 蓝、5- 白蓝、6- 橙、7- 白棕、8- 棕

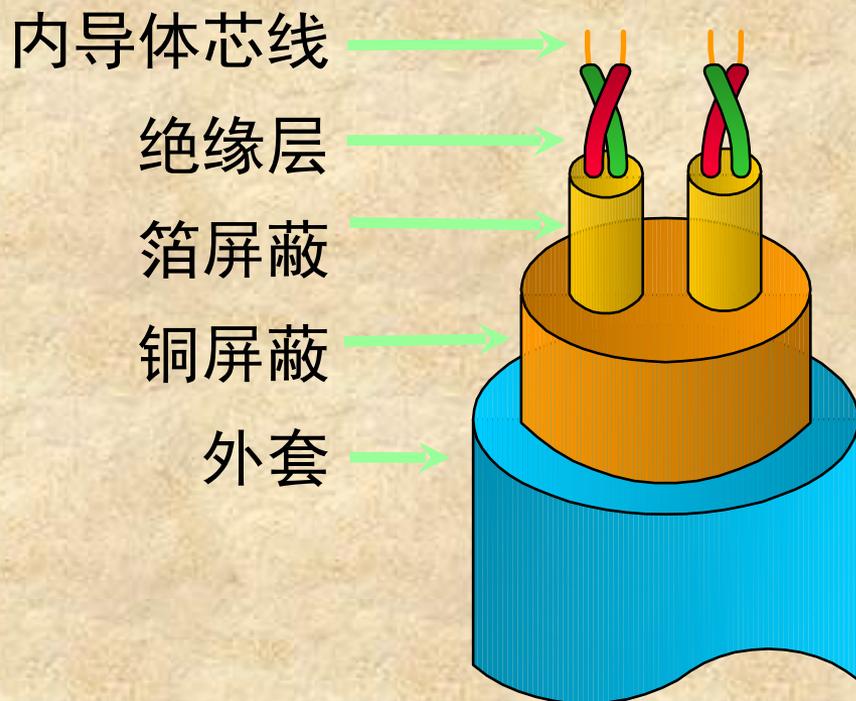
**1 和 2 必须是一对，用于发送数据；**

**3 和 6 必须是一对，用于接收数据**

# 双绞线

## 屏蔽双绞线 (STP)

- 以金属丝编制的屏蔽网以减少干扰和串音



## 非屏蔽双绞线 (UTP)

- 双绞线外没有任何附加屏蔽



# 双绞线的分类

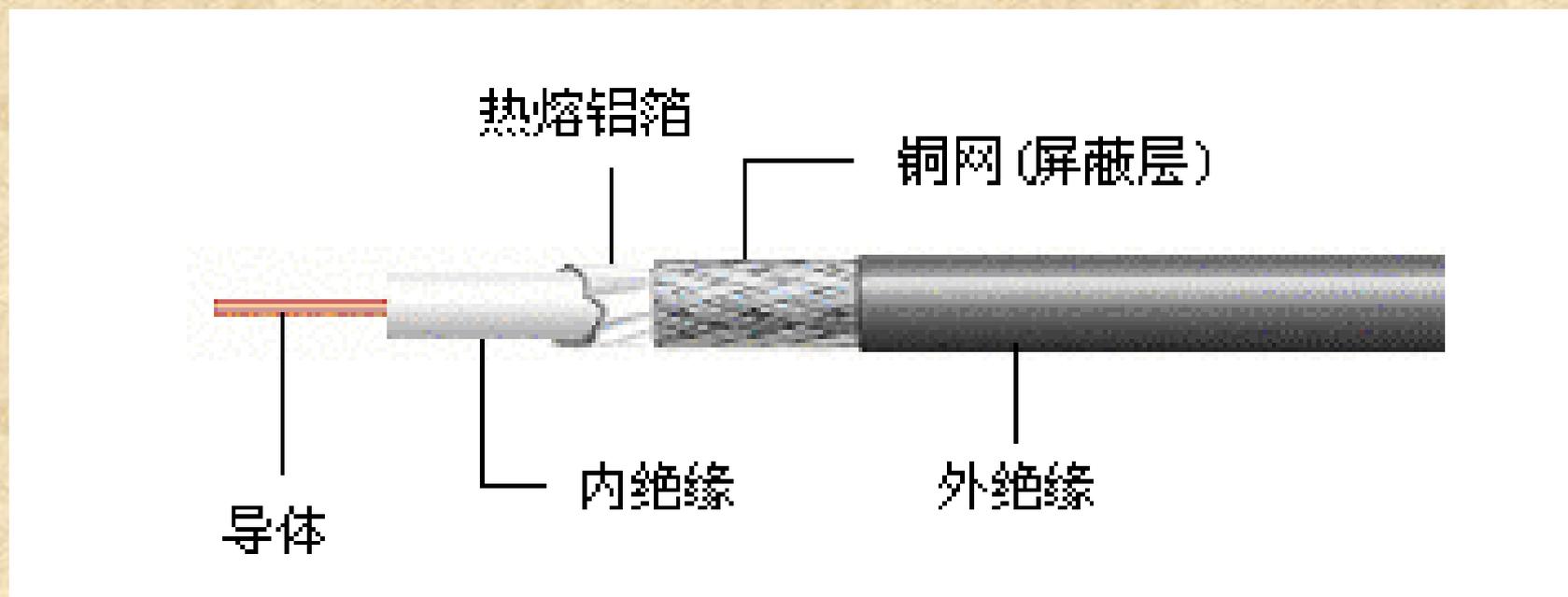
- 双绞线既可以用于音频传输，也可以用于数据传输。按双绞线的性能，目前广泛应用的有五个不同的等级，级别越高性能越好。由于 **UTP** 的成本低于 **STP**，所以使用的更广泛。 **UTP** 可以分为六类：
  - **1类 UTP**：主要用于电话连接，通常不用于数据传输。
  - **2类 UTP**：通常用在程控交换机和告警系统。 **ISDN** 和 **T1/E1** 数据传输也可以采用 2类电缆，2类线的最高带宽为 **1MHz**。
  - **3类 UTP**：又称为声音级电缆，是一类广泛安装的双绞线。3类 **UTP** 的阻抗为 **100 欧姆**，最高带宽为 **16MHz**，适合于 **10Mbps** 双绞线以太网和 **4Mbps** 令牌环网的安装，也能运行 **16Mbps** 的令牌环网。
  - **4类 UTP**：最大带宽为 **20MHz**，其它特性与 3类 **UTP** 完全一样，能更稳定的运行 **16Mbps** 令牌环网。
  - **5类 UTP**：又称为数据级电缆，质量最好。它的带宽为 **100MHz**，能够运行 **100Mbps** 以太网和 **FDDI**，5类 **UTP** 的阻抗为 **100 欧姆**。**5类 UTP** 目前已被广泛的应用。
  - **6类 UTP**：是一种新型的电纜，最大带宽可以达到 **1000MHz**，适用于低成本的高速以太网的骨干线路。

# 双绞线特点

- 结构简单，容易安装，普通 UTP 较便宜
- 有一定的传输速率
- 信号衰减较大，传输距离有限（100m）
- 有辐射，容易被窃听

# 同轴电缆

- 同轴电缆由同心的内导体、电绝缘体、屏蔽层、保护外套组成。



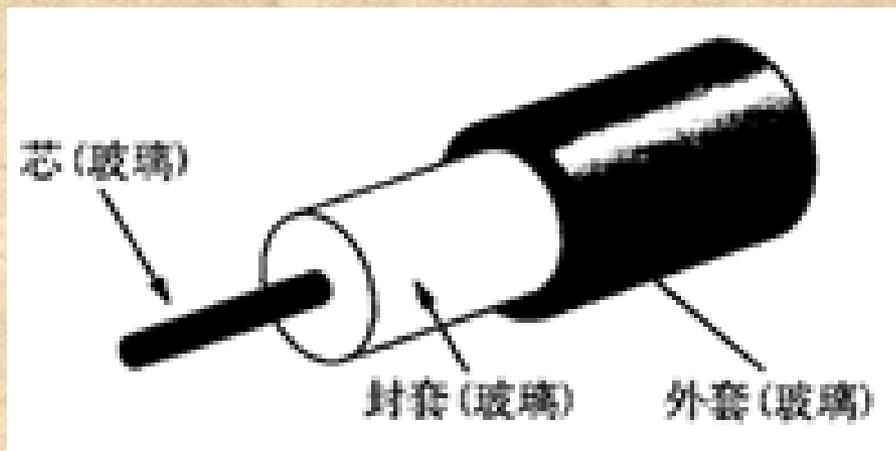
# 同轴电缆

- 特点

- 高带宽，传输率较高。
- 同轴电缆的带宽取决于电缆长度。1km 的电缆可以达到  $1\text{Gb/s} \sim 2\text{Gb/s}$  的数据传输速率。
- 损耗较低，传输距离较远（200m, 500m）。
- 辐射低，保密性好，抗干扰能力强。
- 架设安装方便，容易分支。
- 宽带电缆可实现多路复用传输。
- 目前，同轴电缆大量被光纤取代，但仍广泛应用于有线电视和某些局域网。

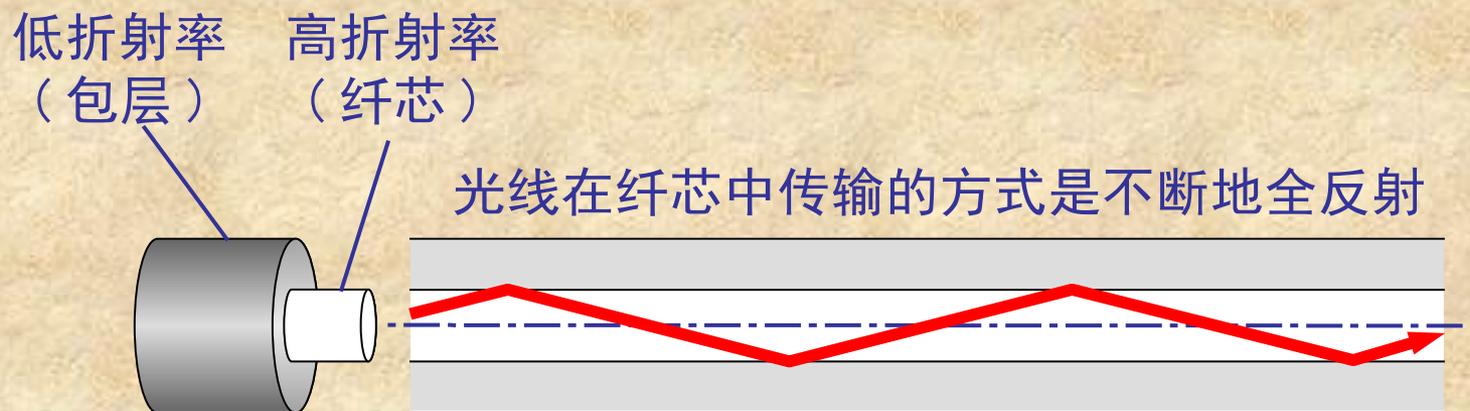
# 光纤

- 光纤所用材料为玻璃，外层有包层和缓冲涂覆层



# 光纤

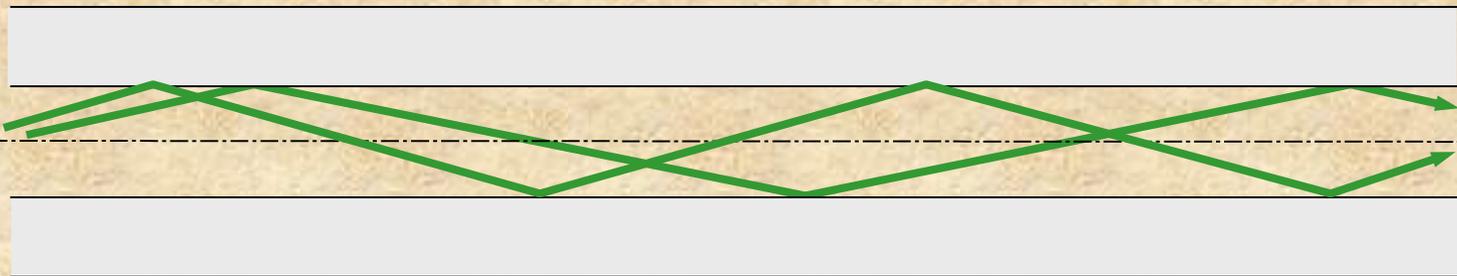
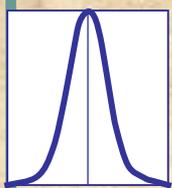
- 原理：基于光在两种介质交界面上的全反射现象，把以光形式出现的能量约束在波导内，并引导光沿着轴线平行的方向传播。



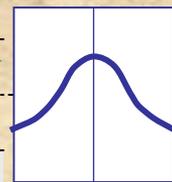
# 光纤

- **多模光纤**：芯径大，多个入射角，光源可以用 LED，成本低。

输入脉冲

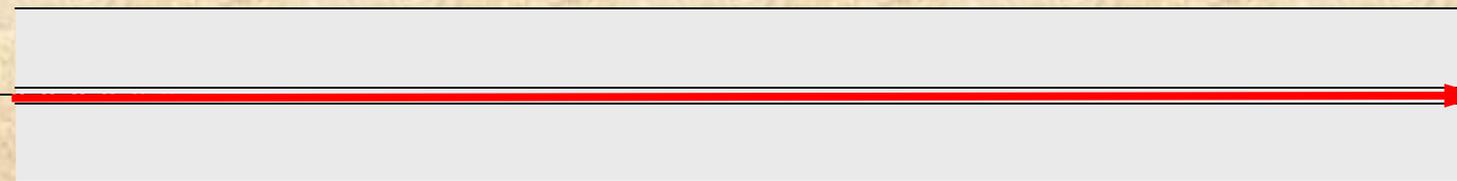
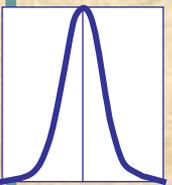


输出脉冲

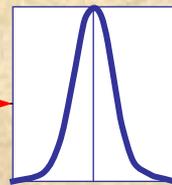


- **单模光纤**：芯径小，只有一个入射角，光源必须用激光，成本高，带宽高。

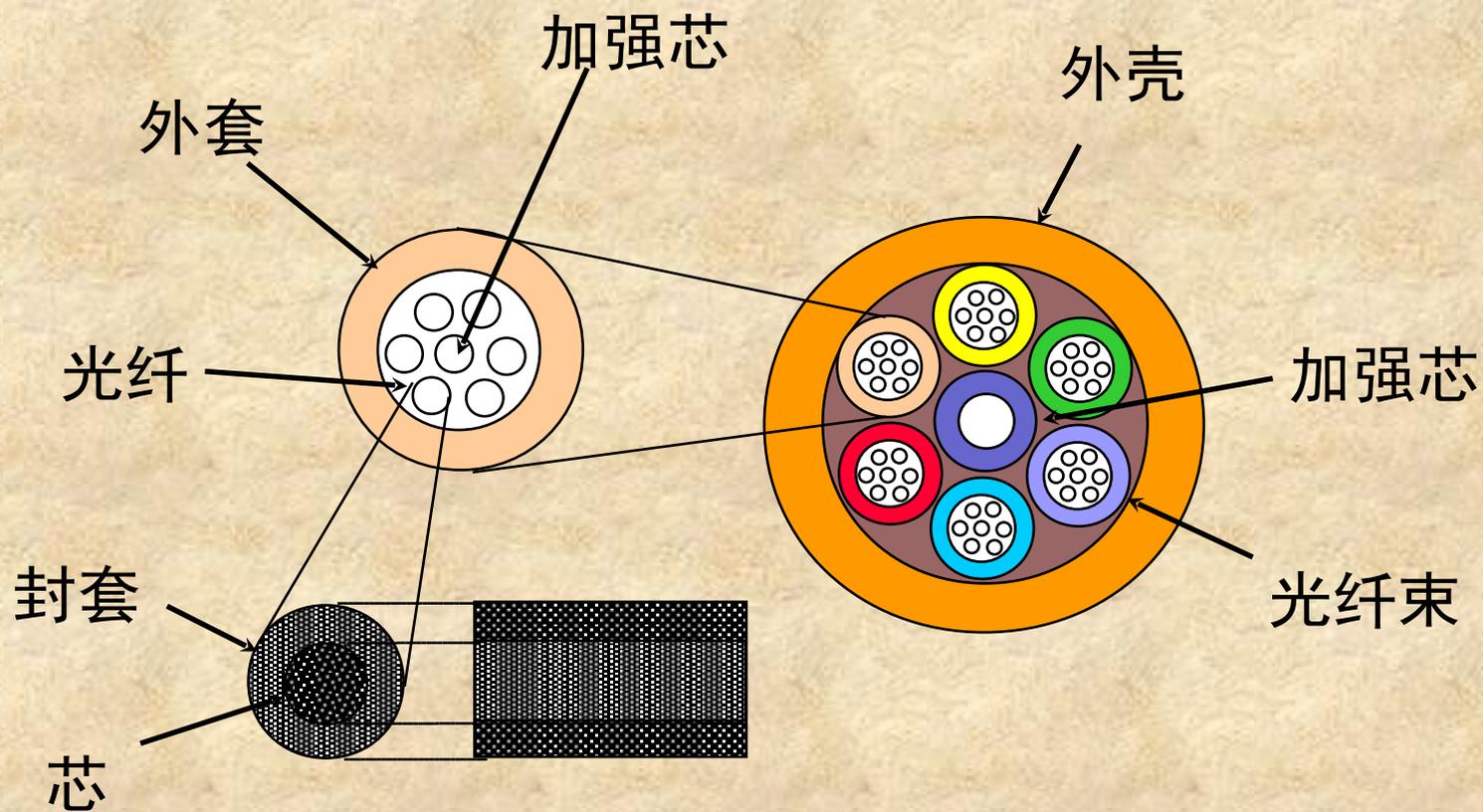
输入脉冲



输出脉冲



# 高密度多芯光缆剖面结构



# 光纤

- 特点

- 衰减少，无中继传输距离远
- 带宽宽，传输速率高，传输能力强
- 不受电磁干扰，抗干扰能力强，无辐射，保密性好
- 重量轻，容量大，十分适合多媒体通信
- 光纤断裂的检测和修复都很困难。

## 2. 无线传输介质

- 无线电
- 微波
- 激光和红外通信
- 卫星通信

### 无线介质的特点

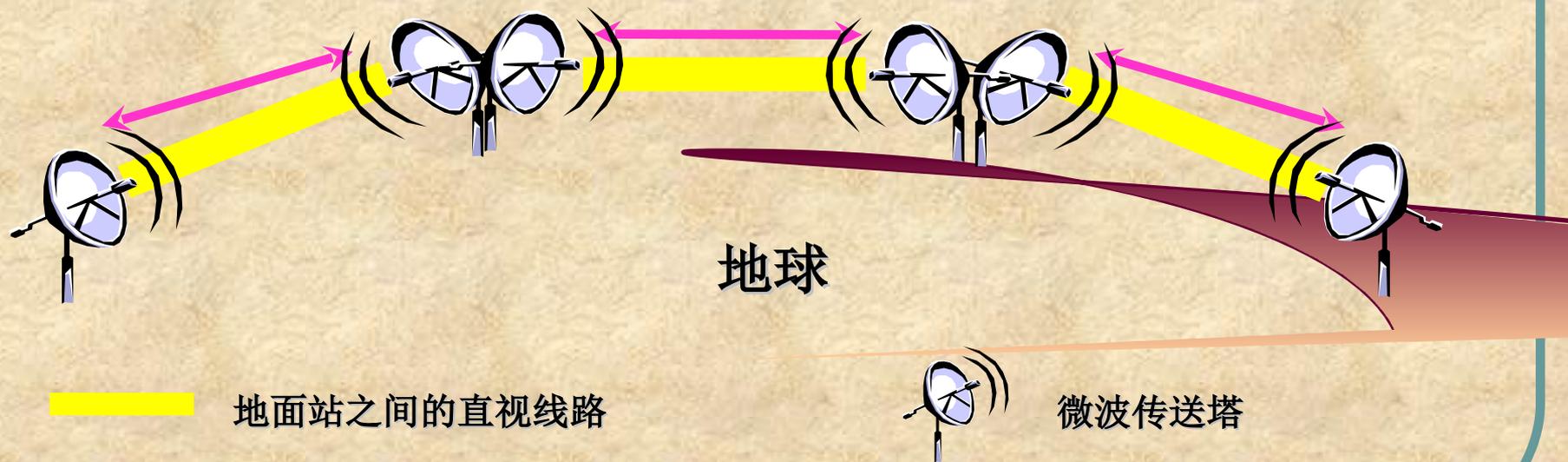
- 使用电磁波或光波携带信息
- 无需物理连接
- 适用于长距离或不便布线的场合
- 易受干扰

## 2.5.4 微波信道

- 根据距离的远近和对通信速率的要求，可以选用不同的有线介质，但是，若通信线路要通过一些高山、岛屿或河流时，铺设线路就非常困难，而且成本非常高，这时候就可以考虑使用无线电波在自由空间的传播实现多种通信。
- 无线电微波通信在数据通信中占有重要地位。微波的频率范围为 **300MHz ~ 300GHz**，但主要是使用 **2 ~ 40GHz** 的频率范围。微波在空间主要是**直线传播**。由于微波会穿透电离层而进入宇宙空间，因此它不像短波通信可以经电离层反射传播到地面上很远的地方。
- 微波通信有两种主要的方式：
  - 地面微波接力通信
  - 卫星通信

# 地面微波接力

- 在物理线路昂贵或地理条件不允许的情况下适用；
- 通过地球表面的大气传播，易受到建筑物或天气的影响；
- 两个地面站之间传送，距离为 50 -100 km ；



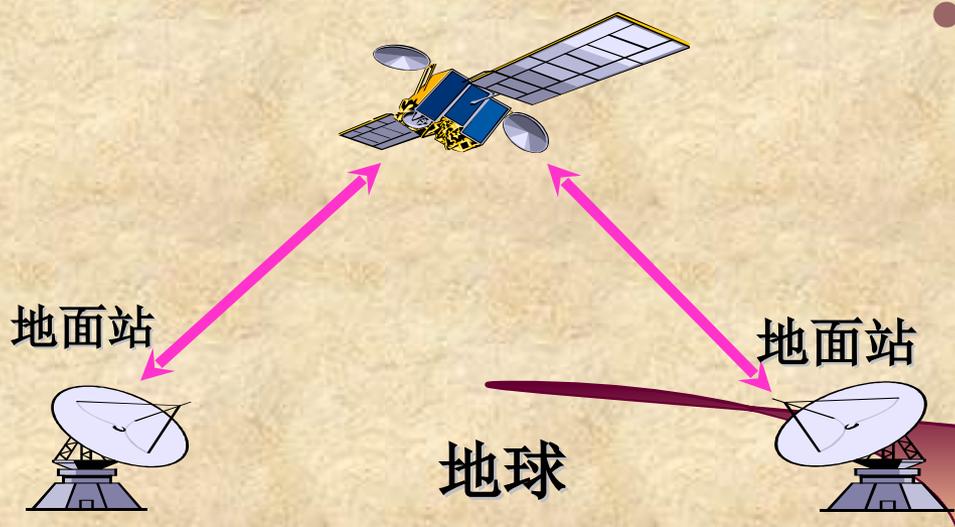
# 微波接力

- 微波波段频率很高，其频段范围也很宽，因此其通信信道的容量很大。
- 微波通信受外界干扰比较小，传输质量较高。
- 与相同容量和长度的电缆载波通信比较，微波接力通信建设投资少，见效快。

# 微波接力的特点

- 微波接力通信也存在如下的一些缺点：
  - 相邻站之间必须直视，不能有障碍物（“视距通信”）。有时一个天线发射出的信号也会分成几条略有差别的路径到达接收天线，因而造成失真。
  - 微波的传播有时也会受到恶劣气候的影响。
  - 与电缆通信系统比较，微波通信的隐蔽性和保密性较差。
  - 对大量中继站的使用和维护要耗费一定的人力和物力。

# 卫星通信

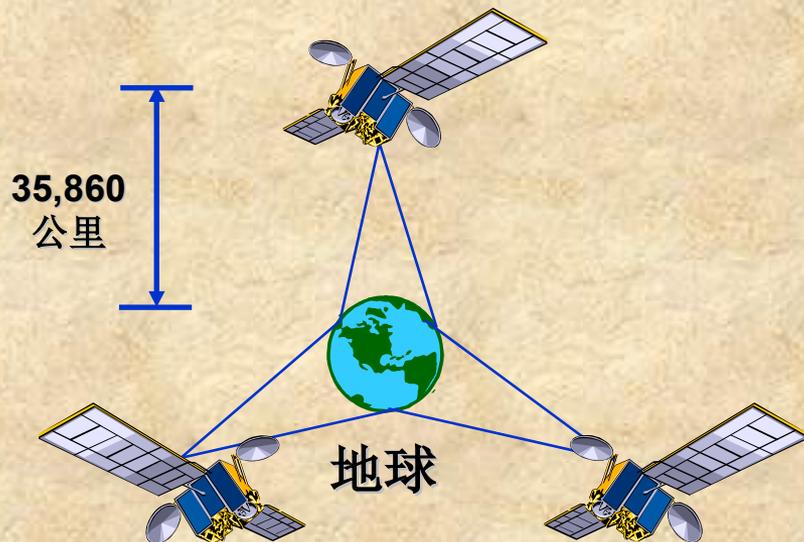


- C 波段 4/6 GHz
  - 上行 5.925 ~ 6.425 GHz
  - 下行 3.7 ~ 4.2 GHz
- KU 波段 11/14 GHz
  - 上行 14 ~ 14.5 GHz
  - 下行 11.7 ~ 12.2 GHz

- 优点：
  - 通信距离远，在电波覆盖范围内，任何一处都可以通信，且通信费用与通信距离无关。
  - 受陆地灾害影响小，可靠性高；
  - 易于实现广播通信和多址通信；
- 缺点：
  - 通信费用高，延时较大；
  - 10GHz 以上雨衰较大；
  - 易受太阳噪声的干扰；

# 地球同步卫星

- 从技术角度上讲，只要在地球赤道上空的同步轨道上，等距离地放置三颗相隔 **120** 度的卫星，就能基本上实现全球的通信。
- 为了避免产生干扰，卫星之间的相隔不能小于 **2** 度，因此，整个赤道上空只能放置 **180** 个同步卫星。一个典型的卫星通常拥有 **12 ~ 20** 个转发器。每个转发器的频带宽度为 **36** 或 **72MHz**。



# 常用传输媒体的比较

传输媒体	速率	传输距离	抗干扰性	价格	应用	示例
双绞线	模拟 300-3400Hz; 数字 10-100Mbps	几十公里	可以	低	模拟传输 数字传输	用户环线 LAN
50Ω同轴 电缆	10M	1 公里内	较好	略高于 TP	基带数字信号	LAN
75Ω同轴 电缆	300-450MHz	100 公里	较好	较高	模拟传输, 可 分多信道混合 传输电视、数 据及 CD 音频	CATV
光纤	100M-几千 Mbps	30 公里	很好	较高	远距离传输	长话线路, 主 干网
短波	几十-几百 bps	全球	一般, 通 信质量差	较低	远程低速通信	广播
地面微波 接力	4-6GHz	几百公里	很好	低于同容量 和长度的电 缆	远程通信	电视
卫星	4~14GHz	三万六千多 公里	很好	费用与距离 无关	远程通信	电视、电话、 数据