

The background of the slide features a large, light gray watermark of the Tsinghua University seal. The seal is circular and contains the university's name in English, "TSINGHUA UNIVERSITY", around the perimeter. In the center, there is a traditional Chinese architectural motif, likely representing the Bell Tower, with the founding year "1911" inscribed below it.

## 第三章

# 数据通信基本原理



# 主要内容

---

- 数据通信基础理论
  - 傅立叶分析
  - 有限带宽信号
  - 信道的最大数据传输速率
- 数据通信技术
  - 数据通信系统的基本结构
  - 传输和传输方式
  - 数据编码技术
  - 多路复用技术
  - 交换技术



# 数据通信基础理论

## ■ 主要内容

- 研究信号在通信信道上传输时的数学表示及其所受到的限制

## ■ 傅立叶分析

- 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）
- 也可以表示成频率的函数（频域观）
- 对于理解数据传输来讲，信号的频域观比时域观更重要



# 数据通信基础理论（续）

## ■ 时域观

- 从时间函数的角度来看，电磁信号分为模拟信号和数字信号
- 模拟信号的信号强度随着时间平滑变化，或者说信号中没有突变或不连续的地方。
- 数字信号的信号强度在一段时间内保持一个恒定值，然后又变成另外一个恒定值。

## ■ 频域观

- 基本定义
  - 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



# 傅立叶分析

## ■ 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

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

$$f = 1/T$$

基本频率

$$a_n, b_n$$

**n**次谐波项的正弦和余弦振幅值



# 傅立叶分析 (续)

- 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  $a_n$

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

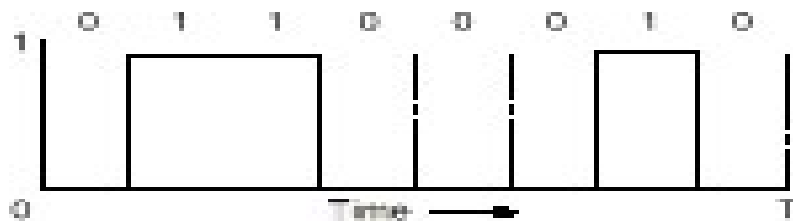
- 用  $\cos(2\pi kft)$  乘等式两边, 并从 0 到  $T$  积分, 可得  $b_n$

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



## 傅立叶分析（续）

- 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 (续)

■ 其傅立叶分析的系数为

$$\blacksquare a_n = \frac{1}{\pi n} [\cos(\pi n/4) - \cos(3 \pi n/4) + \cos(6 \pi n/4) - \cos(7 \pi n/4)]$$

$$\blacksquare b_n = \frac{1}{\pi n} [\sin(3\pi n/4) - \sin(\pi n/4) + \sin(7 \pi n/4) - \sin(6 \pi n/4)]$$

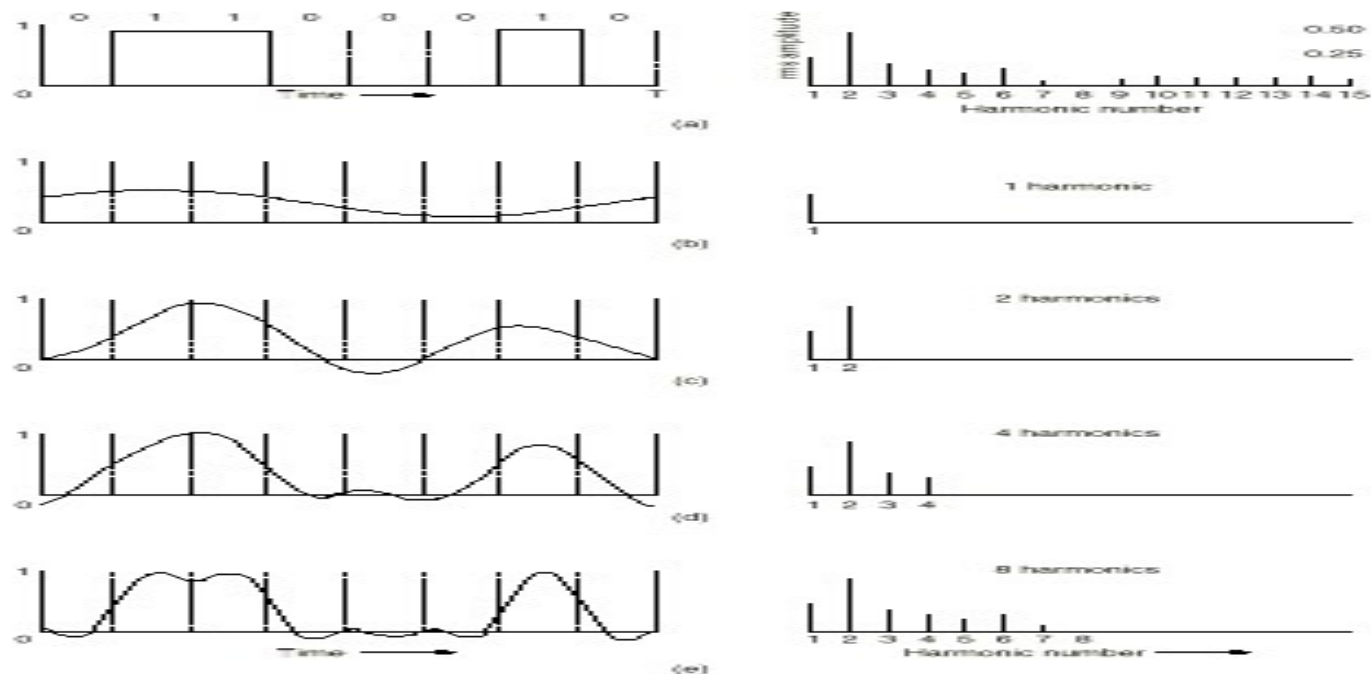
$$\blacksquare c = 3/8$$





# 傅立叶分析（续）

- 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



**Fig. 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**) 是一个信号所包含的频率的范围
  - 图2-1 (e) 中信号的频谱从 $f$ 到 $8f$
- 信号的绝对带宽等于频谱的宽度
  - 图2-1 (e) 中信号的带宽为 $8f - f = 7f$
- 许多信号的带宽是无限的，然而信号的主要能量集中在相对窄的频带内，这个频带被称为有效带宽，或带宽 (**bandwidth**)
- 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



# 有限带宽信号（续）

- 信号在信道上传输时的特性
  - 对不同傅立叶分量的衰减不同，引起输出失真
  - 信道有截止频率 $f_c$ ,  $0 \sim f_c$ 的振幅衰减较弱,  $f_c$ 以上的振幅衰减厉害, 这主要由信道的物理特性决定,  $0 \sim f_c$ 是信道的有限带宽
  - 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



# 有限带宽信号（续）

- 波特率（**baud**）和比特率（**bit**）的关系
  - 波特率：每秒钟信号变化的次数，也称调制速率
  - 比特率：每秒钟传送的二进制位数
  - 波特率与比特率的关系取决于信号值与比特位的关系
    - 例：每个信号值可表示3位，则比特率是波特率的3倍；  
每个信号值可表示1位，则比特率和波特率相同



## 有限带宽信号（续）

- 对于比特率为  $B$  **bps** 的信道，发送**8**位所需的时间为  **$8/B$** 秒，若**8**位为一个周期  $T$ ，则一次谐波的频率是： **$f_1 = B/8$  Hz**
- 能通过信道的最高次谐波数目为： **$N = f_c / f_1$** 
  - 音频线路的截止频率为**3000Hz**  
 **$N = f_c / f_1 = 3000 / (B/8) = 24000 / B$**



## 有限带宽信号 (续)

| Bps   | T (msec) | First harmonic (Hz) | # Harmonics sent |
|-------|----------|---------------------|------------------|
| 300   | 26.67    | 37.5                | 80               |
| 600   | 13.33    | 75                  | 40               |
| 1200  | 6.67     | 150                 | 20               |
| 2400  | 3.33     | 300                 | 10               |
| 4800  | 1.67     | 600                 | 5                |
| 9600  | 0.83     | 1200                | 2                |
| 19200 | 0.42     | 2400                | 1                |
| 38400 | 0.21     | 4800                | 0                |

Fig. 2-2. Relation between data rate and harmonics.

- 结论：即使对于完善的信道，有限的带宽限制了数据的传输速率



# 信道的最大数据传输速率

- **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**
- **奈魁斯特定理**
  - **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**



# 信道的最大数据传输速率（续）

- **1948年**，香农(**C. Shannon**)把奈魁斯特的的工作扩大到信道受到随机（热）噪声干扰的情况
- 随机噪声出现的大小用信噪比（信号功率**S**与噪声功率**N**之比）来衡量， **$10\log_{10}S/N$** ，单位：分贝
  - 电话系统的典型信噪比为**30db**
- 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)**
  - 此式是利用信息论得出的，具有普遍意义
  - 与信号电平级数、采样速度无关
  - 此式仅是上限，难以达到





# 主要内容

---

- 数据通信基础理论
  - 傅立叶分析
  - 有限带宽信号
  - 信道的最大数据传输速率
- 数据通信技术
  - 数据通信系统的基本结构
  - 传输和传输方式
  - 数据编码技术
  - 多路复用技术
  - 交换技术

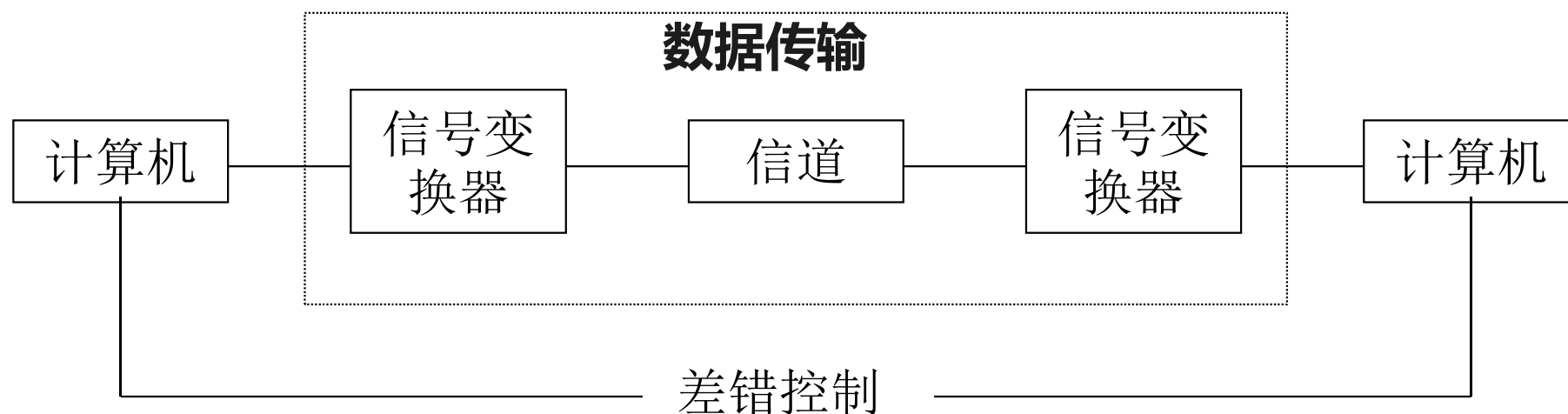


# 数据通信技术

## ■ 主要内容

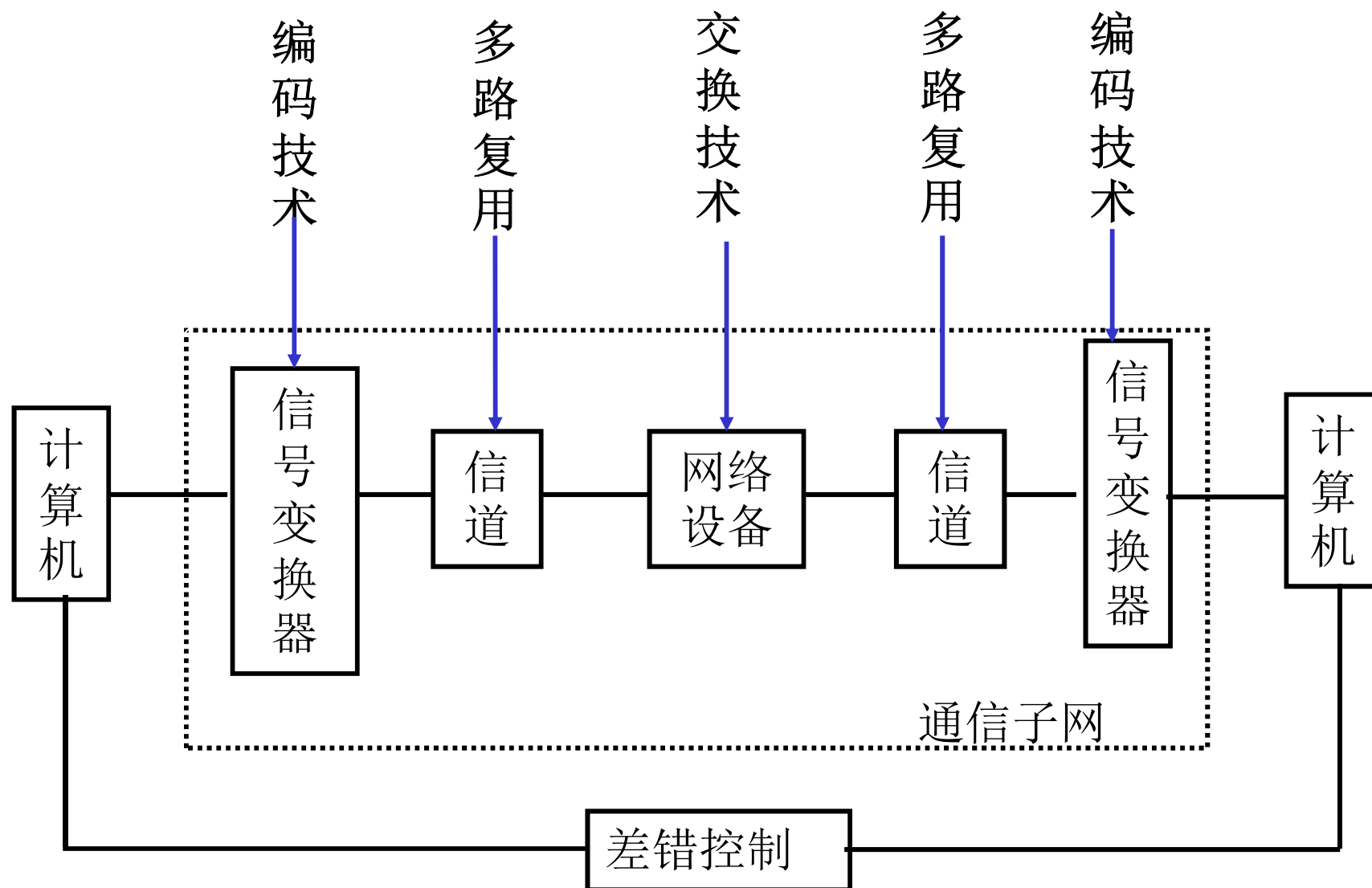
- 研究数据在通信信道上的各种传输方式及其所采用的技术

## ■ 数据通信系统的基本结构





# 数据通信技术





# 传输和传输方式

---

- 数字传输 / 模拟传输
- 并行传输 / 串行传输
- 点到点传输 / 点到多点传输
- 单工、半双工和全双工传输
- 同步传输 / 异步传输

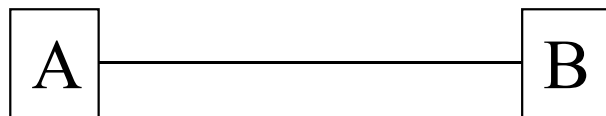


# 点到点传输/点到多点传输

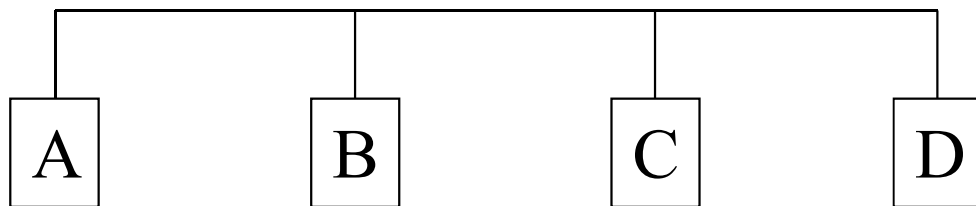
## ■ 连接方式

- 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

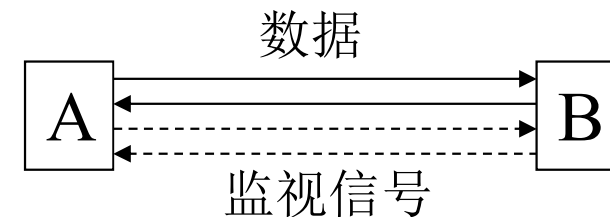
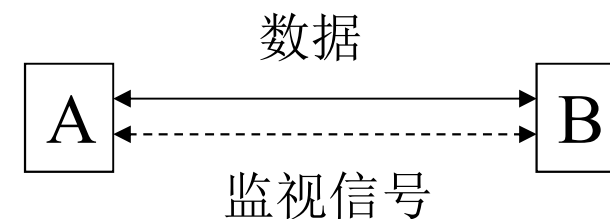
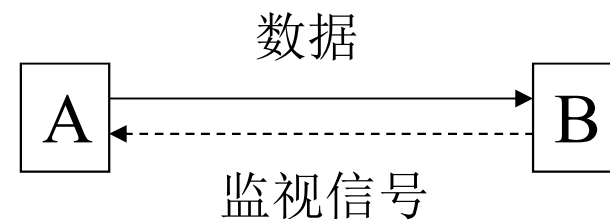




# 单工、半双工和全双工传输

## ■ 从信息传送方向和时间的关系角度研究

- **单工传输：信息只能单向传输，监视信号可回送**
- **半双工传输：信息可以双向传输，但在某一时刻只能单向传输**
- **全双工传输：信息可以同时双向传输**





# 同步传输/异步传输

## ■ 同步方式

- **目的：接收方必须知道每一位信号的开始及其持续时间，以便正确的采样接收**
- **以字符传输（字符为基本传输单位）为例，在基于字符的信息传送中，可以采用异步传输，也可以采用同步传输**



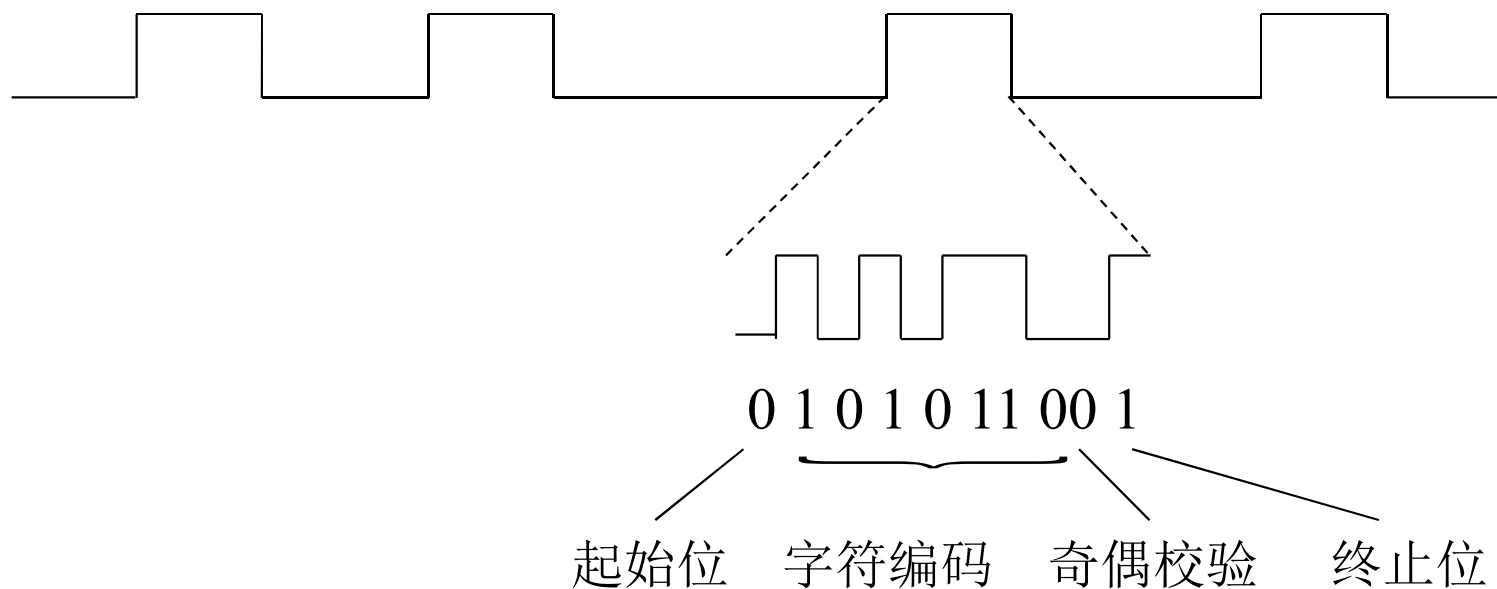
# 同步传输/异步传输（续）

- 异步传输（以字符传输为例）
  - 信息传送以字符为单位
  - 每个字符由发送方异步产生，有随机性
  - 字符一般采用5, 6, 7或8位二进制编码
  - 需要辅助位，每个字符可能需要用10位或11位才能传送，例如：
    - 起始位，1位
    - 字符编码，7位
    - 奇偶校验位，1位
    - 终止位，1 ~ 2位
  - 特点
    - 传输效率低
    - 主要用于字符终端与计算机之间的通信





# 同步传输/异步传输 (续)





# 同步传输/异步传输（续）

- 同步传输（以字符传输为例）
  - 信息传送以报文为单位
  - 传输开始时，以同步字符使收发双方同步
  - 从传输信息中抽取同步信息，修正同步，保证正确采样
  - 特点
    - 可以不间断地传输信息，传输效率较高
    - 字符间减少了辅助信息
    - 传输的信息中不能有同步字符出现，需要透明传输处理

|     |     |   |   |     |     |
|-----|-----|---|---|-----|-----|
| SYN | SYN | 信 | 息 | SYN | SYN |
|-----|-----|---|---|-----|-----|



# 同步传输/异步传输（续）

- 基于位的传输，一般采用同步传输
  - 信息以二进制位流为单位传送
  - 传输过程中收发双方以位为单位同步
  - 传输的开始和结束由特定的八位二进制位同步
  - 特点：传输效率高

|    |       |    |
|----|-------|----|
| 标记 | 二进制位流 | 标记 |
|----|-------|----|



# 数据编码技术

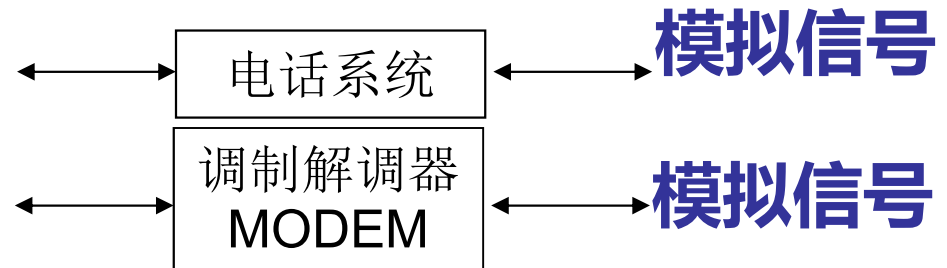
- 数据表示
  - 模拟数据 (Analog Data), 连续值
  - 数字数据 (Digital Data), 离散值
- 数据传输方式
  - 以信号作为载体
  - 模拟信号 (Analog Signals)
  - 数字信号 (Digital Signals)



# 信号发送方式

- 模拟信号发送（模拟信道）

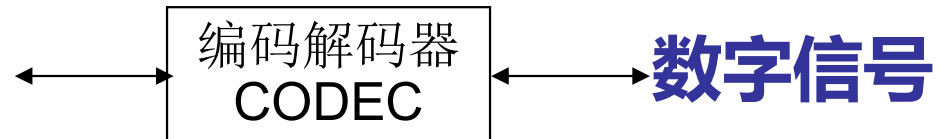
- 模拟数据(声音)



- 数字数据(二进制脉冲)

- 数字信号发送（数字信道）

- 模拟数据



- 数字数据(二进制脉冲)

- 数字信号发送的优点是：价格便宜，对噪声不敏感；缺点是：易受衰减，频率越高，衰减越厉害



# 数据编码技术

- 研究数据在信号传输过程中如何进行编码(变换)
- 数字数据的数字传输（基带传输）
  - **基带：基本频带，指传输变换前所占用的频带，是原始信号所固有的频带**
  - **基带传输：在传输时直接使用基带信号**
  - **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的要求**

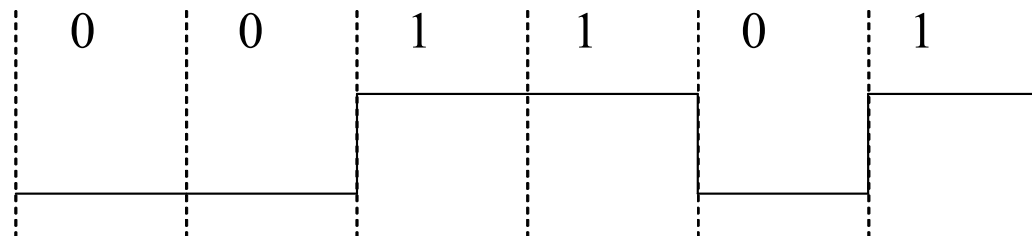


# 数据编码技术（续）

## ■ 常用的几种编码方式

### ■ 不归零制码（NRZ: Non-Return to Zero）

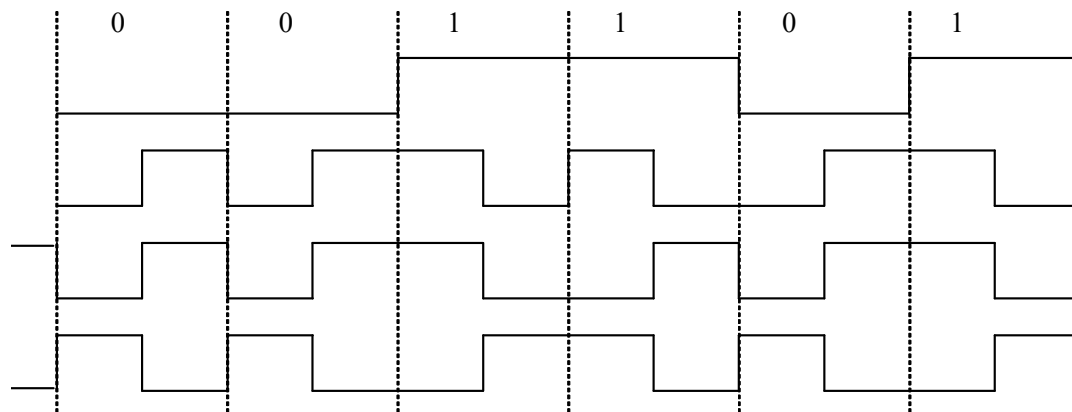
- 原理：用两种不同的电平分别表示二进制信息“0”和“1”，低电平表示“0”，高电平表示“1”
- 缺点：
  - 难以分辨一位的结束和另一位开始
  - 发送方和接收方必须有时钟同步
  - 若信号中“0”或“1”连续出现，信号直流分量将累加
- 结论：容易产生传播错误





# 数据编码技术（续）

- **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

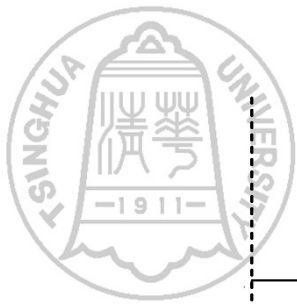






# 数据编码技术（续）

- 逢“1”变化的NRZ码
  - 原理：在每位开始时，逢“1”电平跳变，逢“0”电平不跳变
- 逢“0”变化的NRZ码
  - 原理：在每位开始时，逢“0”电平跳变，逢“1”电平不跳变



0 0 1 1 0 1

NRZ

曼彻斯特

差分曼彻斯特

逢“1”变化NRZ

逢“0”变化NRZ



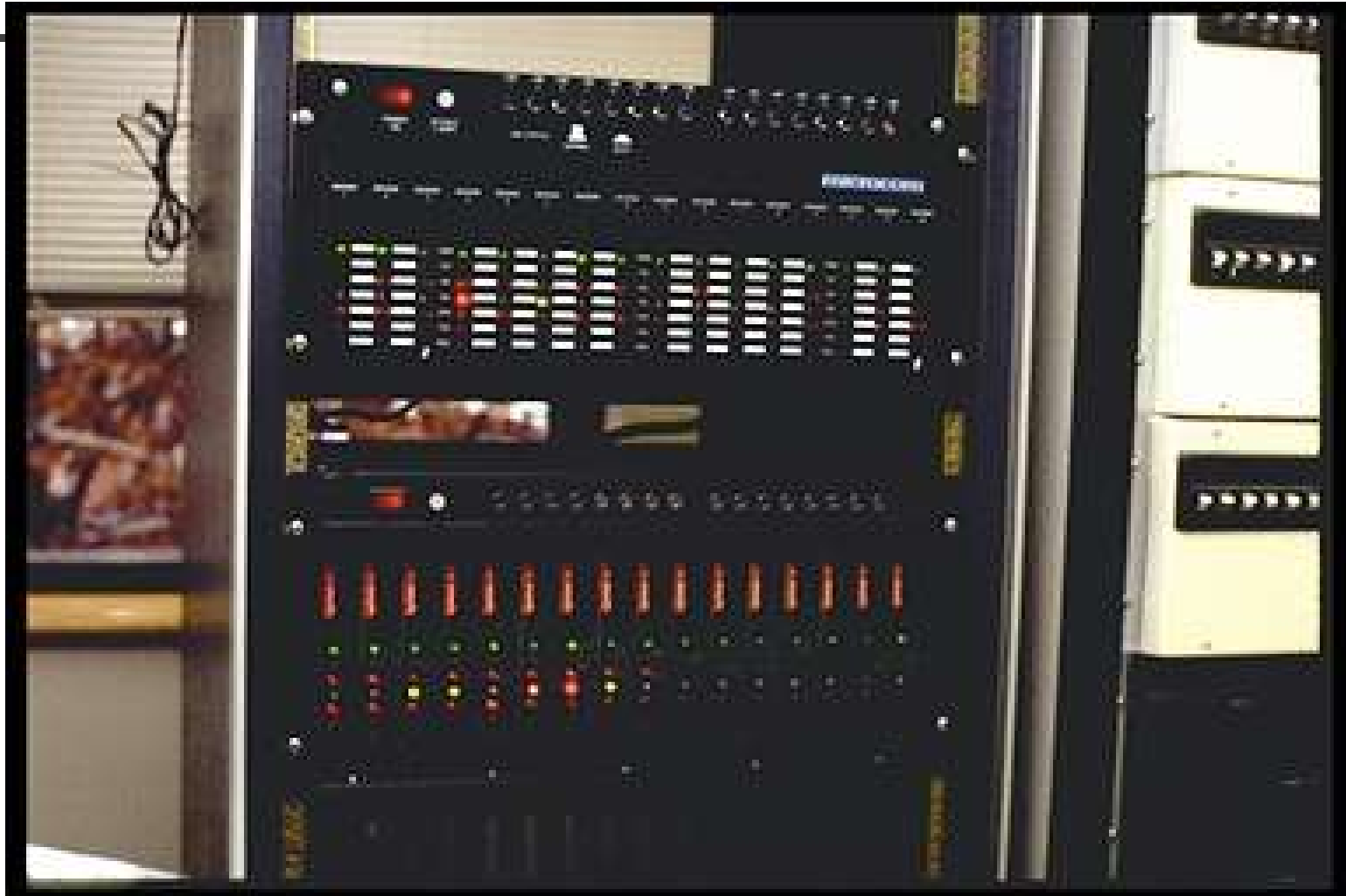
# 数字数据的模拟传输

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



- **Modem: RS-232**接口用来连接电脑，**RJ-11**用来连接电话线













# 数字数据的模拟传输（续）

- 根据载波  **$A\sin(\omega t + \varphi)$** 的三个特性：幅度、频率、相位，产生常用的三种调制技术：

- **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，即：

$$\begin{cases} \omega(t) = \omega_0 \\ \varphi(t) = \varphi_0 \\ A(t) = A_1, A_2, \dots, A_N \end{cases}$$

- **$A(t)$  取不同的值表示不同的信息码。例如： $A(t)$  取 $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_1$  表示 “0”， $A_2$ 表示 “1”**



# 数字数据的模拟传输（续）

## ■ 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，即：

$$\begin{cases} A(t) = A_0 \\ \varphi(t) = \varphi_0 \\ \omega(t) = \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N \end{cases}$$

- $\omega(t)$  取不同的值表示不同的信息码。例如： $\omega(t)$  取  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_1$  表示“0”， $\omega_2$  表示“1”



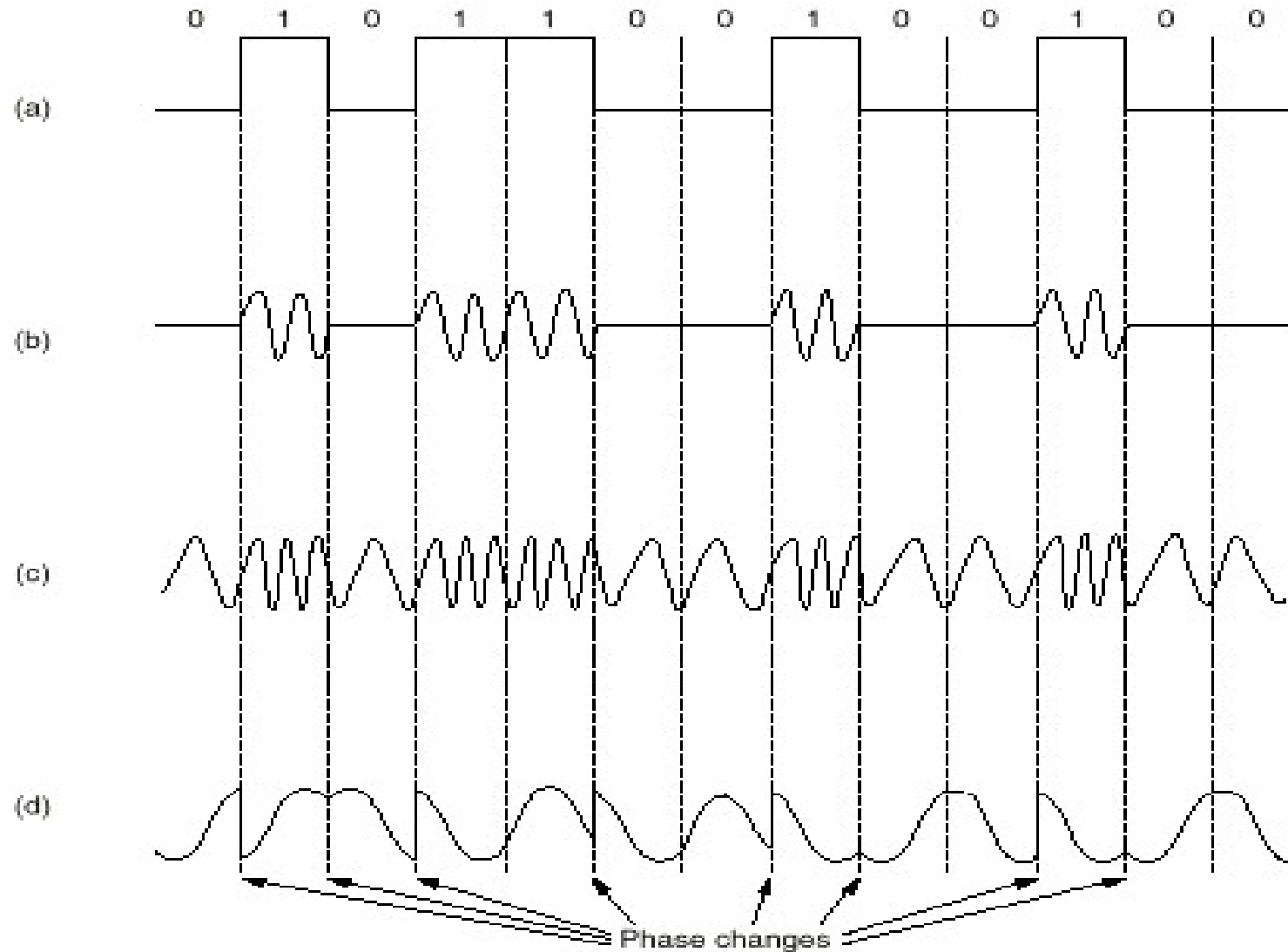
# 数字数据的模拟传输（续）

## ■ 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，即：

$$\begin{cases} A(t) = A_0 \\ \omega(t) = \omega_0 \\ \varphi(t) = \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N \end{cases}$$

- $\varphi(t)$  取不同的值表示不同的信息码。例如： $\varphi(t)$  取  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_1$  表示“0”， $\varphi_2$  表示“1”



**Fig. 2-18.** (a) A binary signal. (b) Amplitude modulation. (c) Frequency modulation. (d) Phase modulation.



# 模拟数据的数字传输

- 解决模拟数据数字化问题，也称为脉冲代码调制**PCM**（**Pulse Code Modulation**）
- 根据**Nyquist**原理进行采样
- 常用的**PCM**技术
  - 将模拟信号振幅分成多级（ $2^n$ ），每一级用  $n$  位表示
  - 例如：贝尔系统的 T1 载波将模拟信号分成128级，每次采样用7位二进制数表示



# 模拟数据的数字传输（续）

## ■ 差分脉冲代码调制

- **原理：不是将振幅值数字化，而是根据前后两个采样值的差进行编码，输出二进制数字**

## ■ $\delta$ 调制

- **原理：根据每个采样值与前一个值之间的差来决定输出二进制“1”或“0”**
- **缺点：编码速度跟不上变化太快的信号**

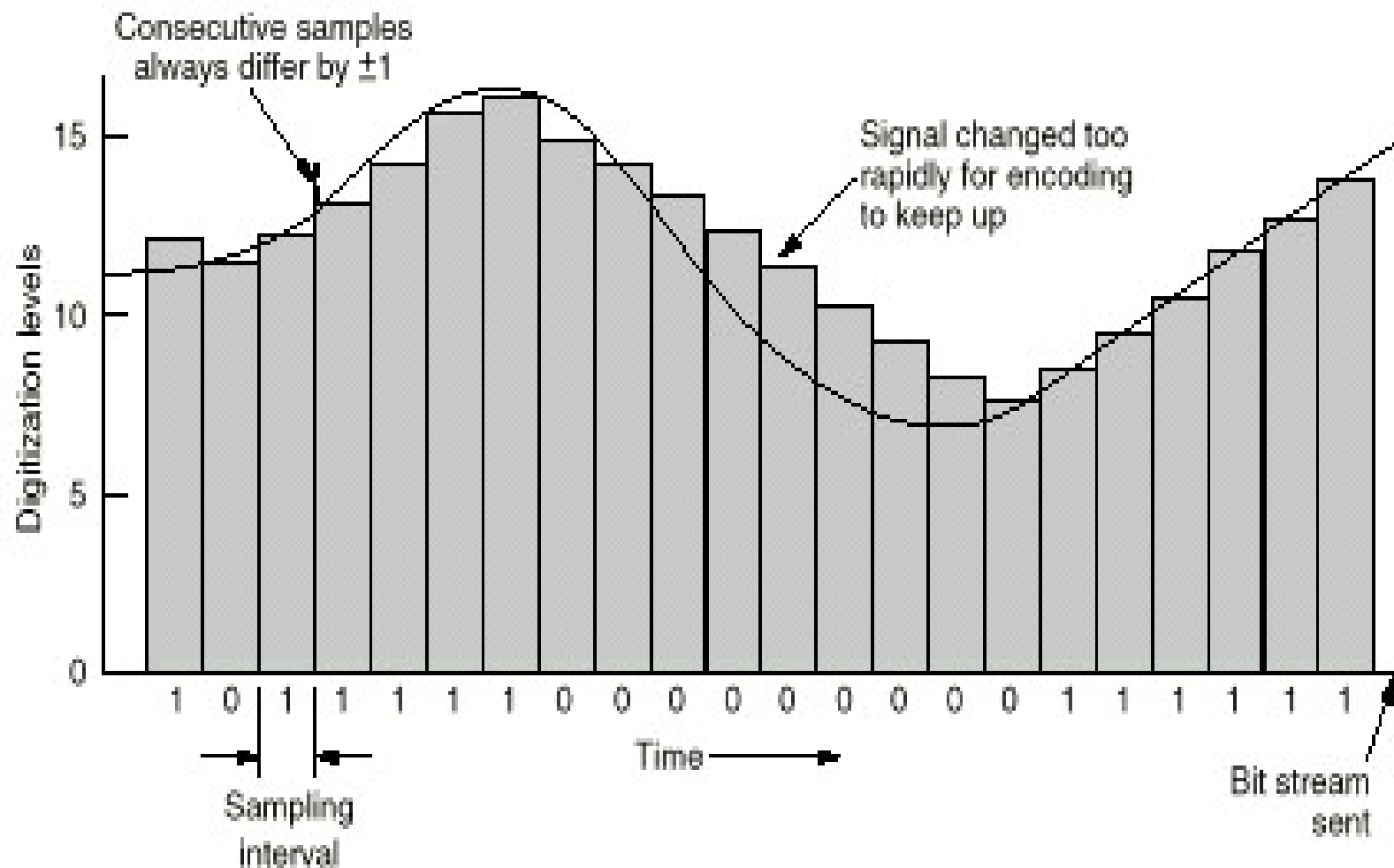
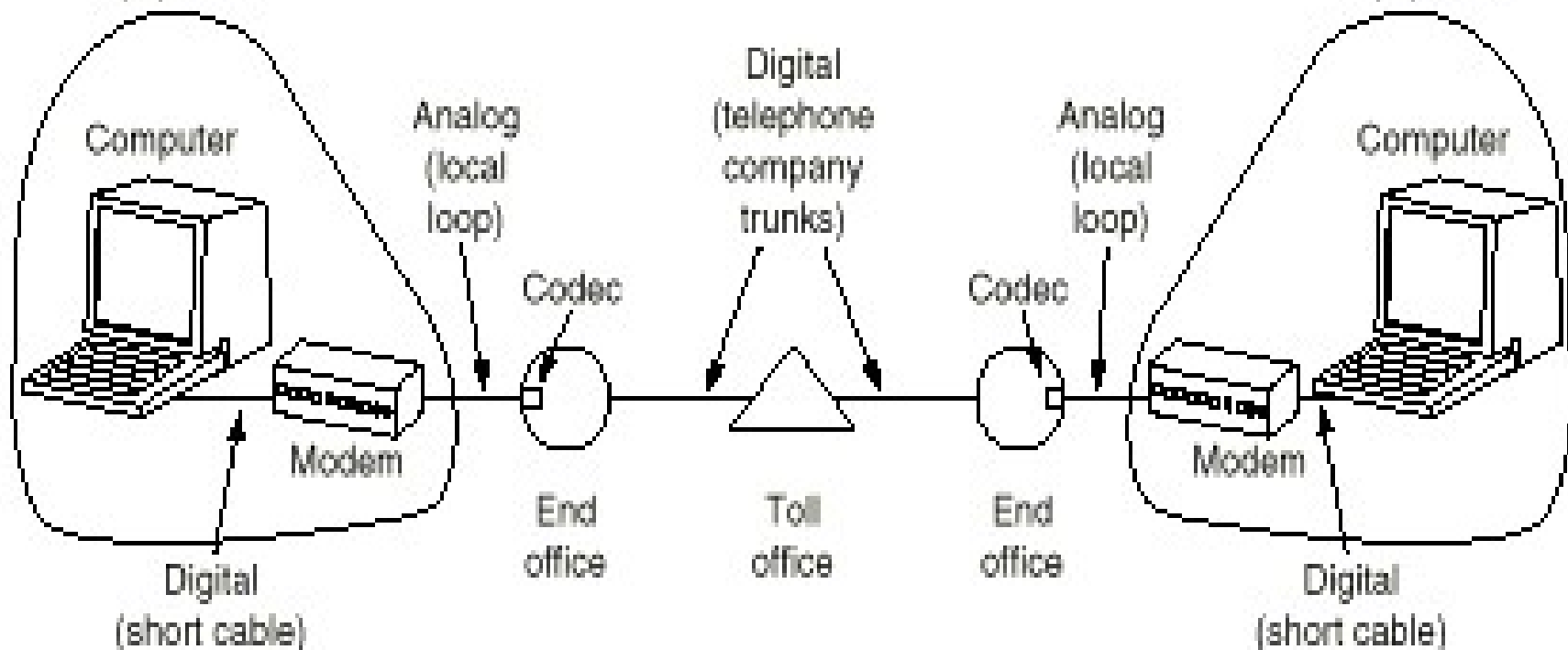


Fig. 2-27. Delta modulation.



Customer premises  
equipment



**Fig. 2-17.** The use of both analog and digital transmission for a computer to computer call. Conversion is done by the modems and codecs.





# 多路复用技术

- 由于一条传输线路的能力远远超过传输一个用户信号所需的能力，为了提高线路利用率，经常让多个信号同时共用一条物理线路
- 常用的有三种方法
  - **时分复用 TDM (Time Division Multiplexing)**
    - T1载波，分成 24 个信道
  - **频分复用 FDM (Frequency Division Multiplexing)**
  - **波分复用 WDM (Wavelength Division Multiplexing)**



# 时分复用 TDM

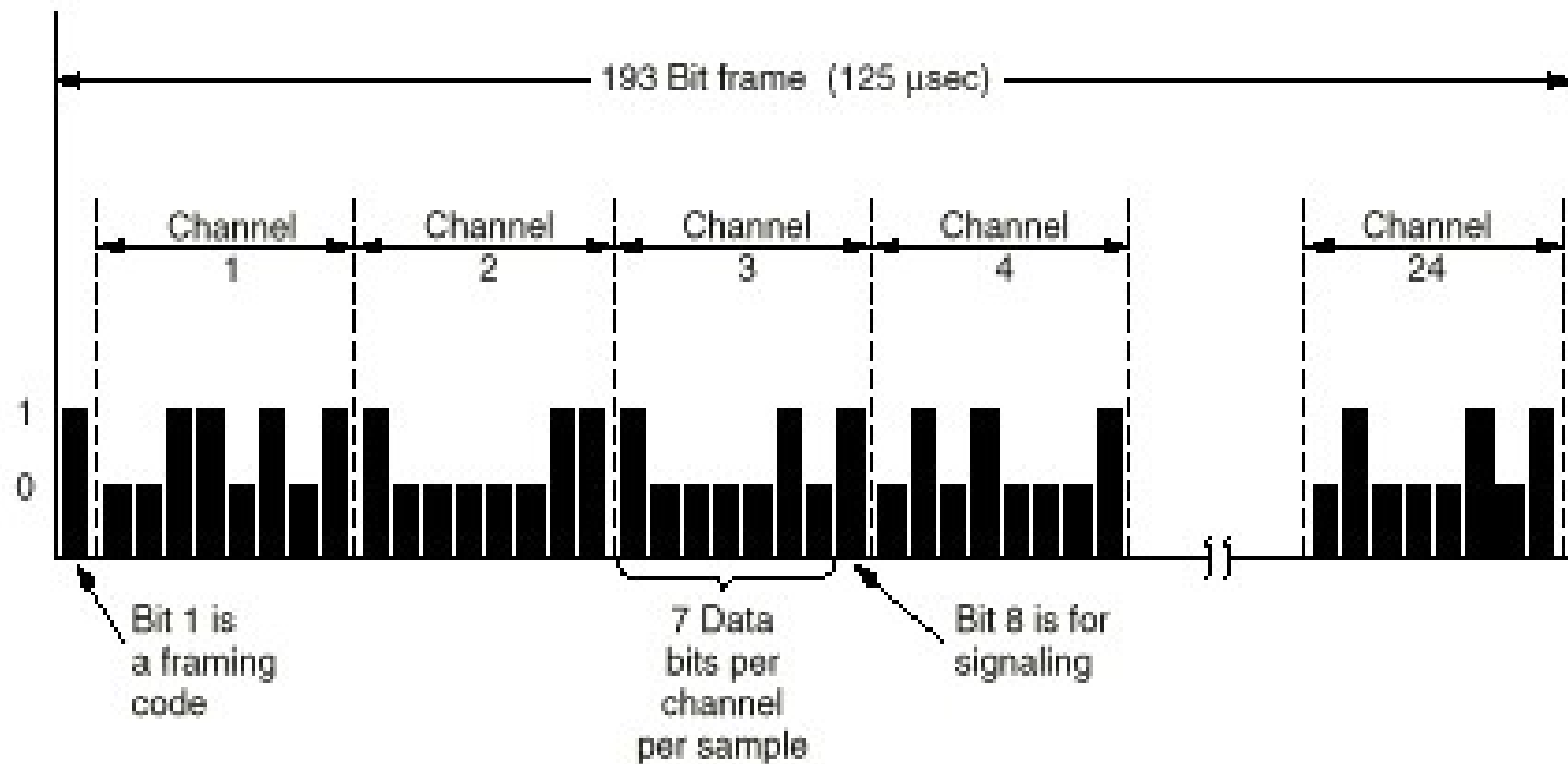
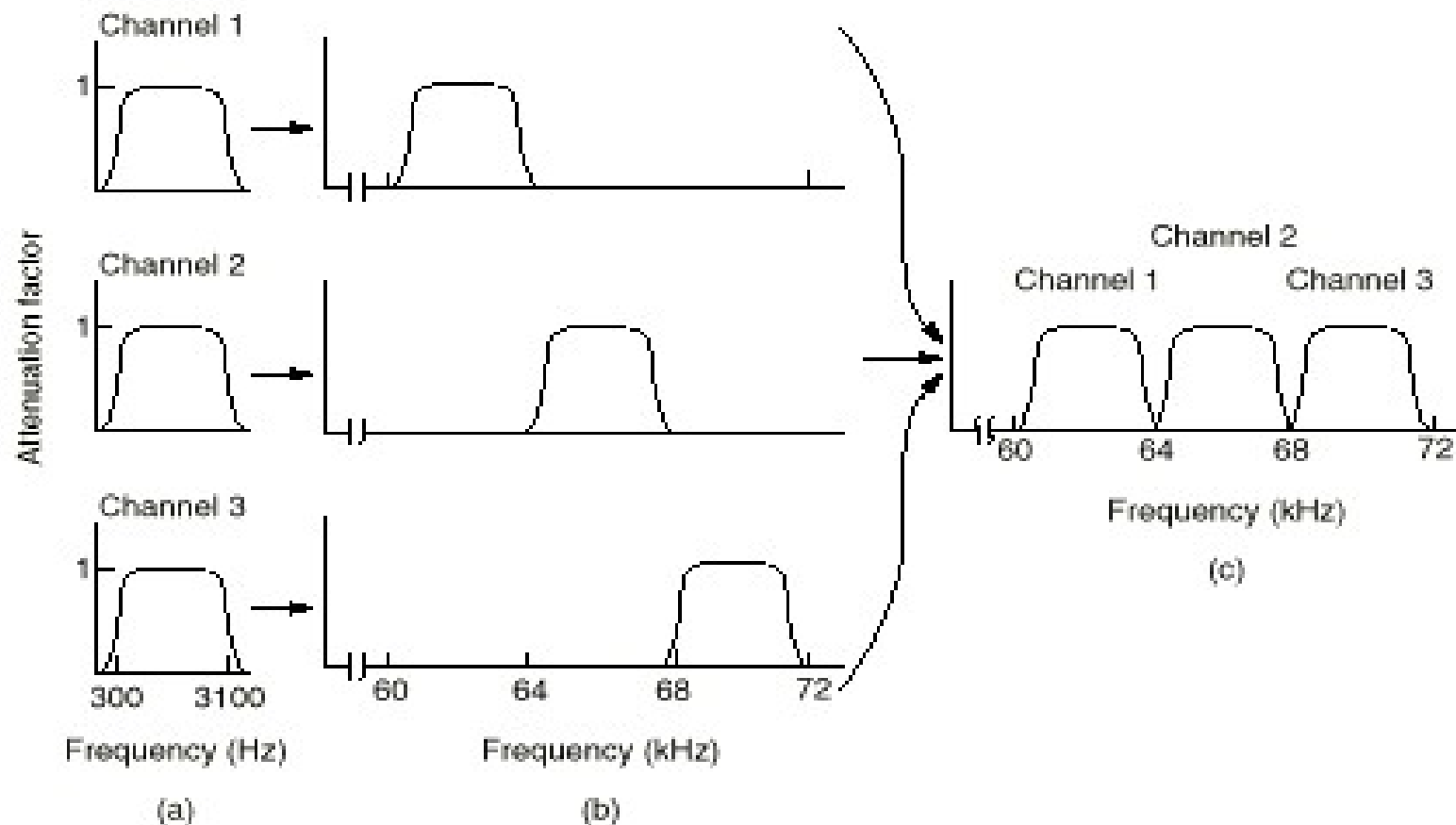


Fig. 2-26. The T1 carrier (1.544 Mbps).



# 频分复用 FDM



**Fig. 2-24.** Frequency division multiplexing. (a) The original bandwidths. (b) The bandwidths raised in frequency. (c) The multiplexed channel.



# 波分复用 WDM

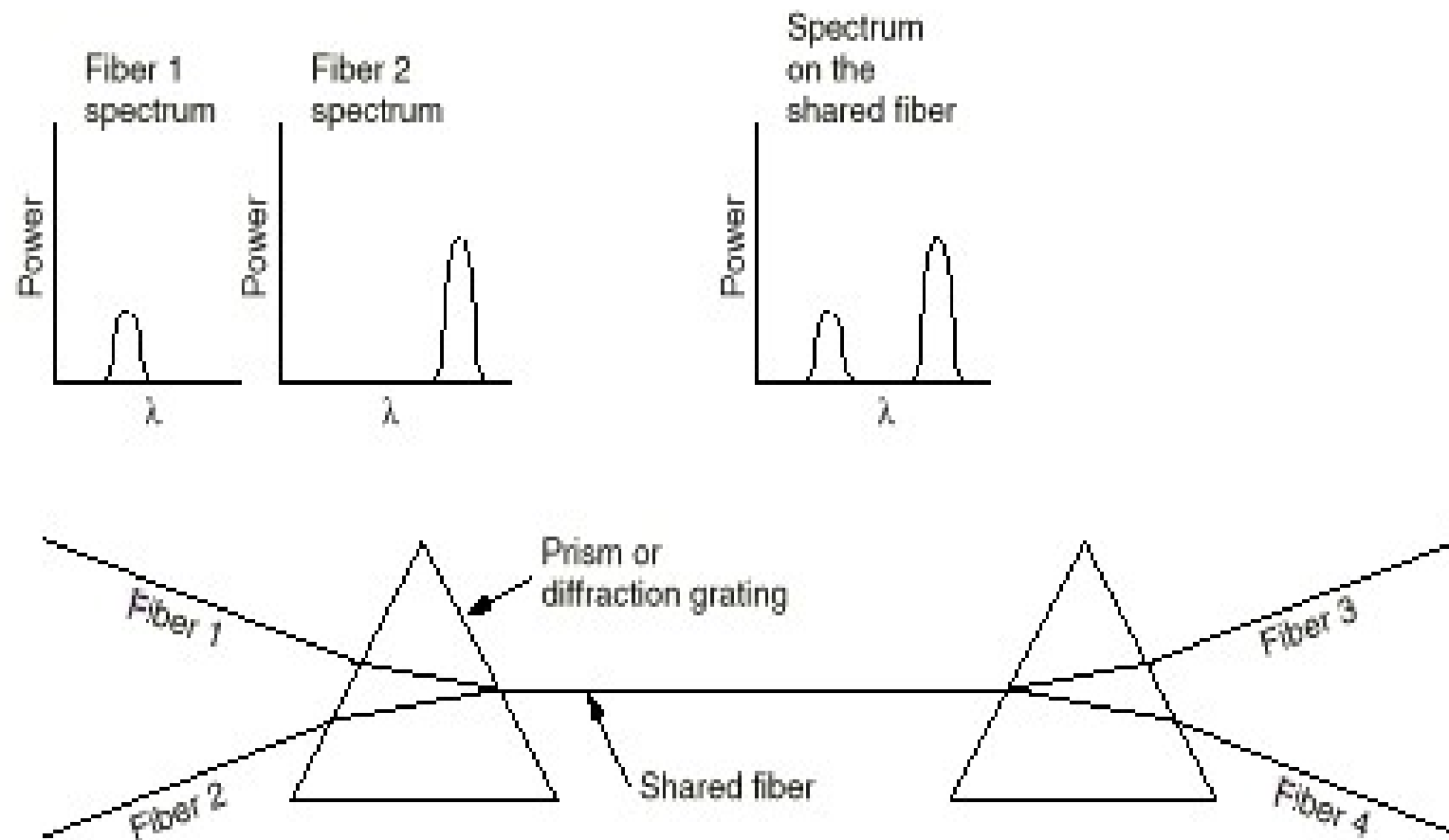
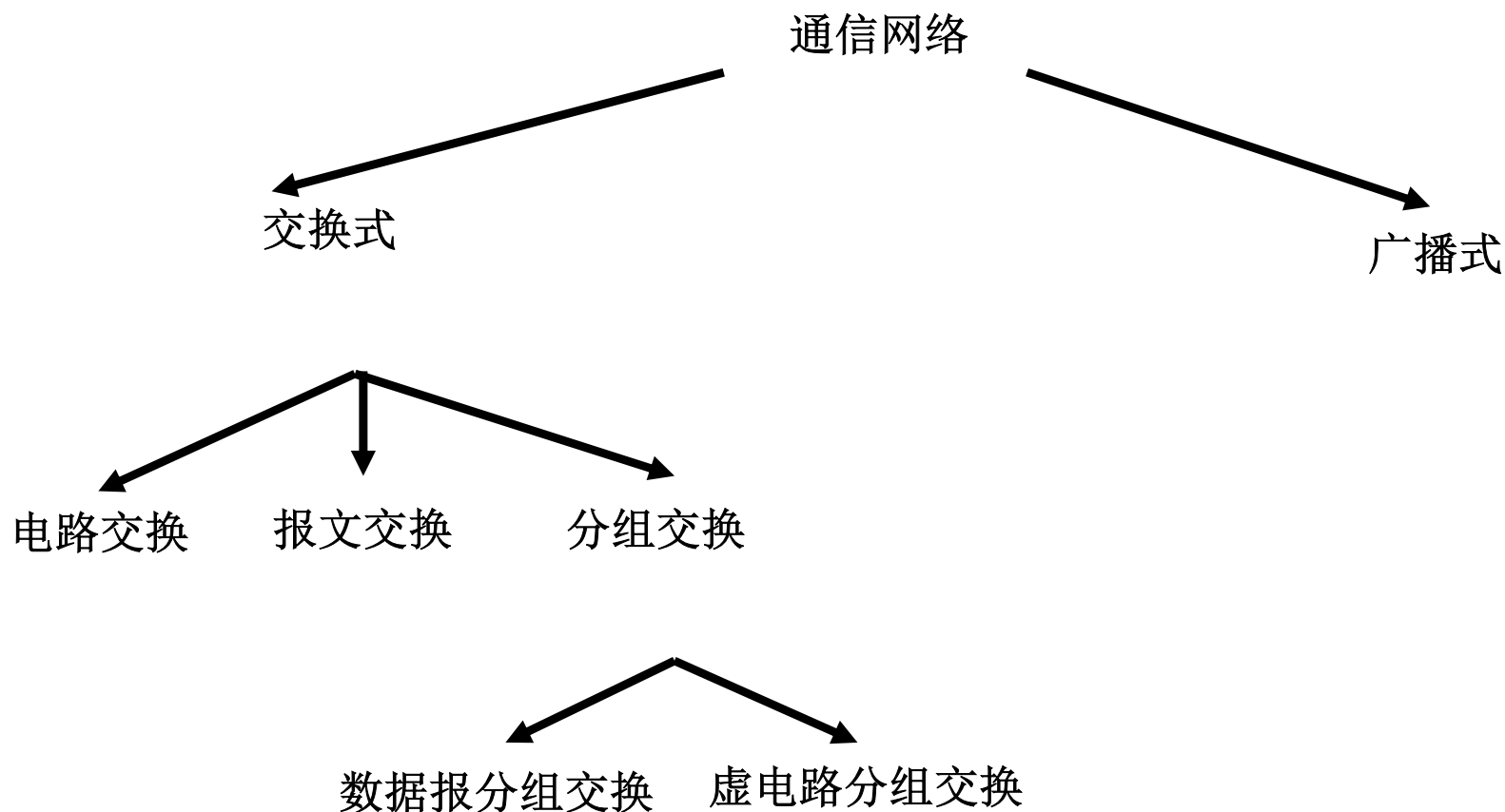


Fig. 2-25. Wavelength division multiplexing.



# 交换技术

- 通信网络可以根据其结点交换信息的方式进行分类





## 交换技术（续）

- 在多结点通信网络中，为有效利用通信设备和线路，一般希望动态地设定通信双方间的线路。
- 动态地接通或断开通信线路，称为“交换”
- 交换方式分类：
  - **电路交换**
  - **报文交换，存储转发方式**
  - **分组交换（包交换），存储转发方式**





# 电路交换 (circuit switching)

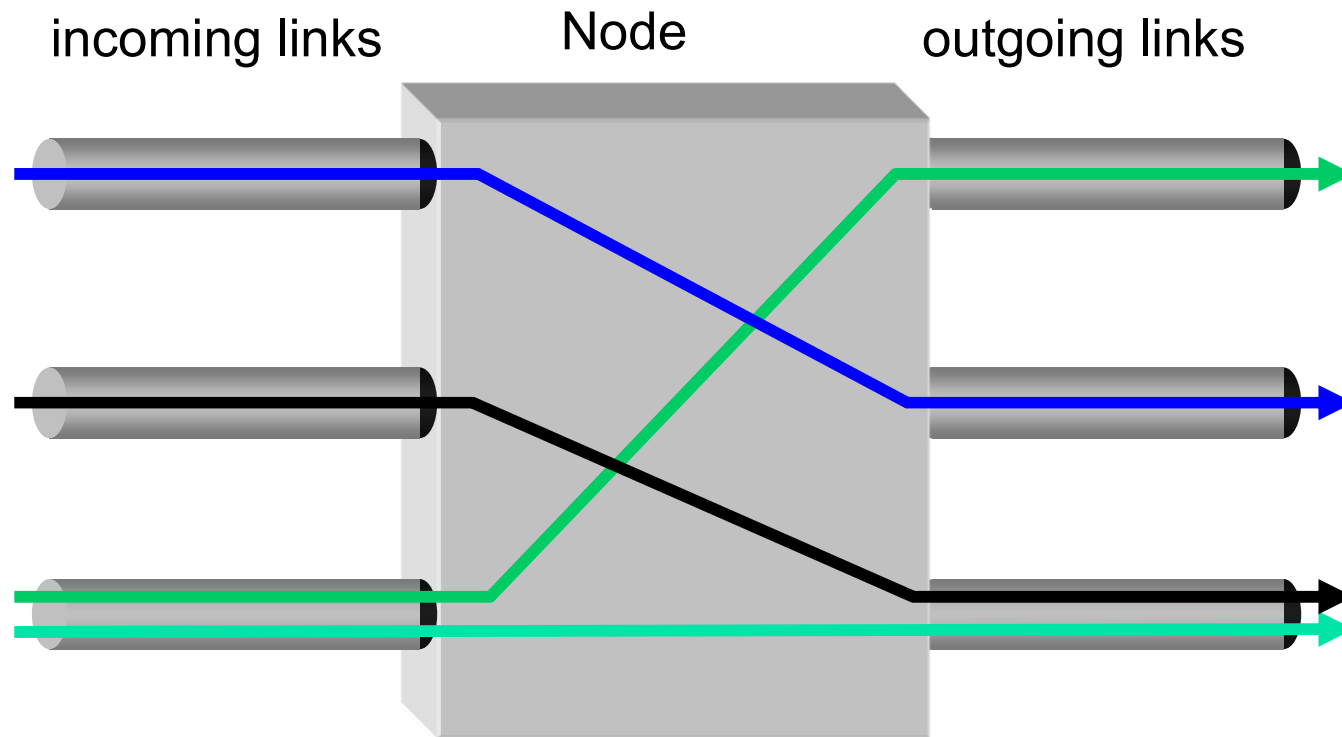
- 原理
  - 直接利用可切换的物理通信线路，连接通信双方
- 三个阶段
  - 建立电路，传输数据，拆除电路
- 特点
  - 在发送数据前，必须建立起点到点的物理通路
  - 建立物理通路时间较长，数据传送延迟较短
- 例
  - 电话网 (1875 - )
  - ISDN (Integrated Services Digital Networks)





## 电路交换 (续)

### ■ 电路交换网络中的结点（交换机）工作方式

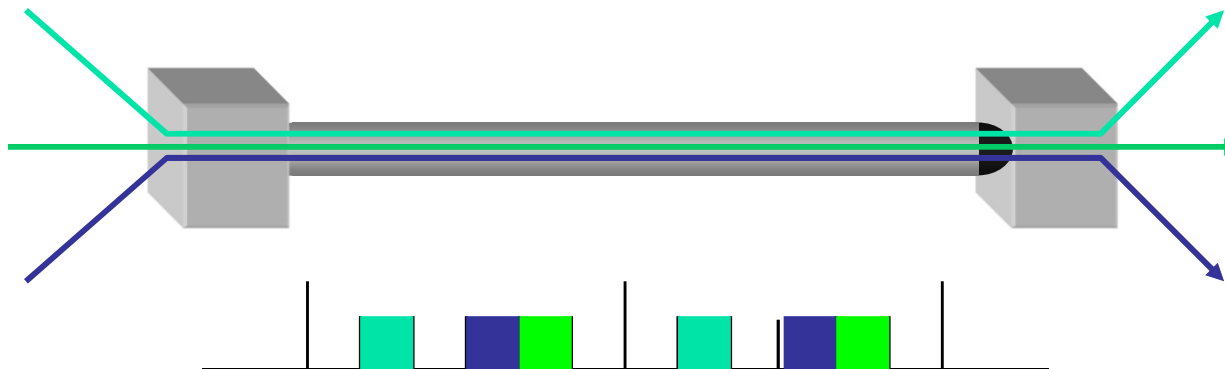






# 电路交换（续）

- 复用/解复用
  - 一般采用时分复用
  - 时间被分为帧（frame），帧被分为时槽（slot）
  - 时槽在帧内的相对位置决定这个槽所传输数据所属的会话
  - 发送方和接收方需要同步
  - 非永久会话需要动态绑定时槽到一个会话





# 报文交换 (message switching)

## ■ 原理

- 信息以报文（逻辑上完整的信息段）为单位进行存储转发

## ■ 特点

- 线路利用率高
- 要求中间结点（网络通信设备）缓冲大
- 延迟时间长



# 分组交换 (packet switching)

## ■ 原理

- 分组：比报文还小的信息段，可定长，也可变长
- 信息以分组为单位进行存储转发。源结点把报文分为分组，在中间结点存储转发，目的结点把分组合成报文

## ■ 特点

- 每个分组头包括源地址和目的地址，独立进行路由选择
- 网络结点设备中不预先分配资源
- 线路利用率高
- 易于重传，可靠性高
- 易于开始新的传输，让紧急信息优先通过
- 开销增加

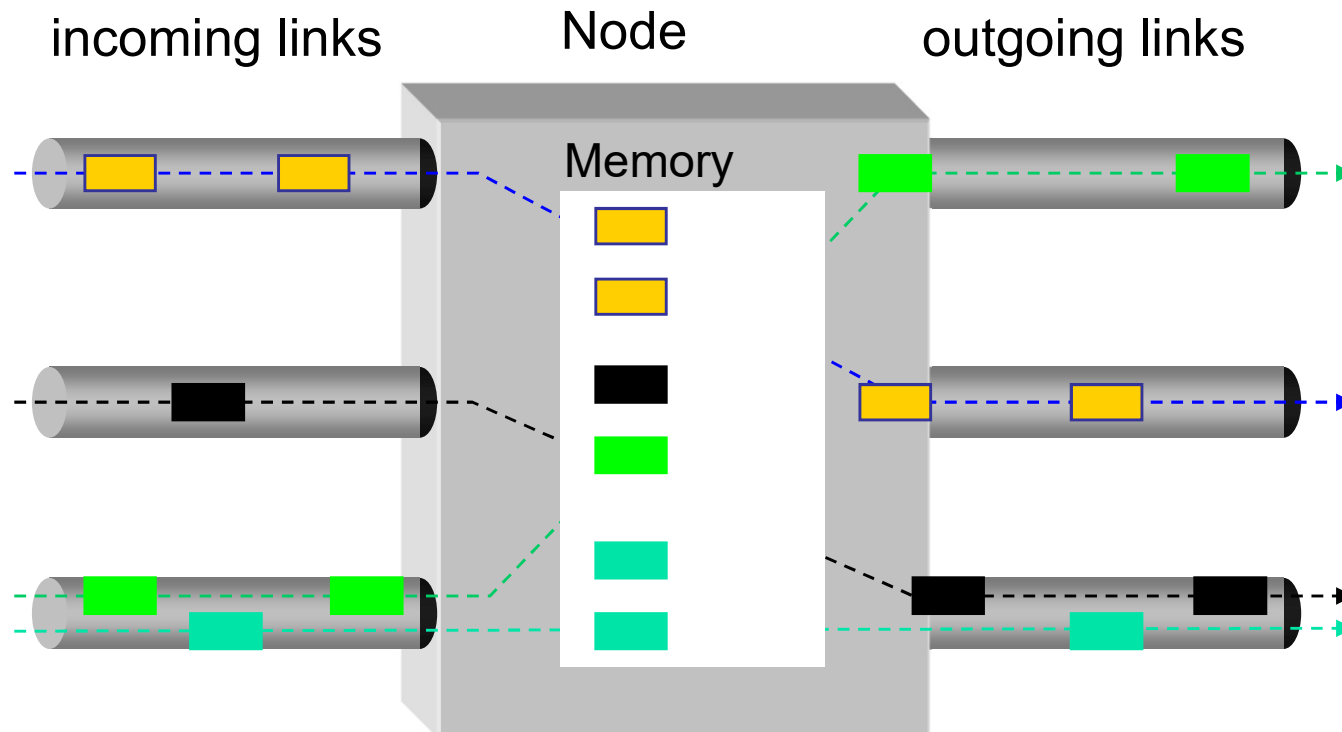
## ■ 分组交换分为

- 数据报 (datagram) 分组交换
- 虚电路 (virtual circuit) 分组交换



## 分组交换（续）

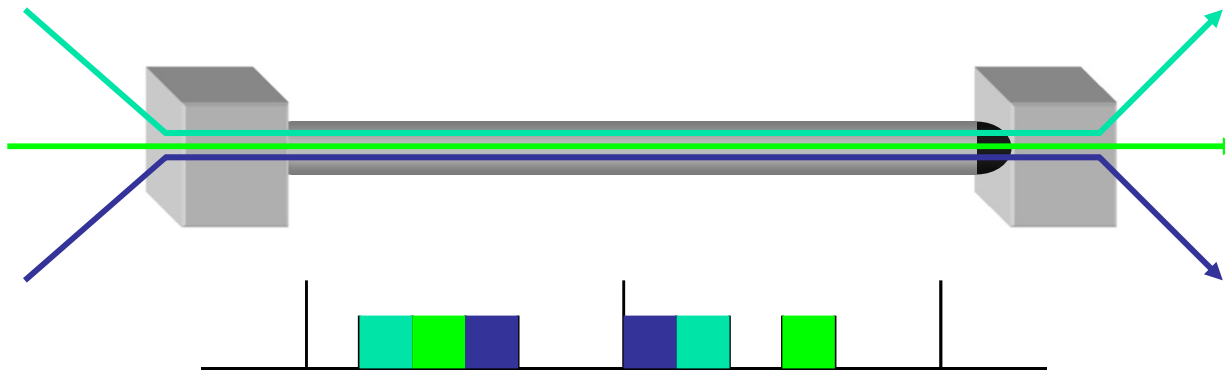
- 分组交换网中的结点（交换机/路由器）工作方式

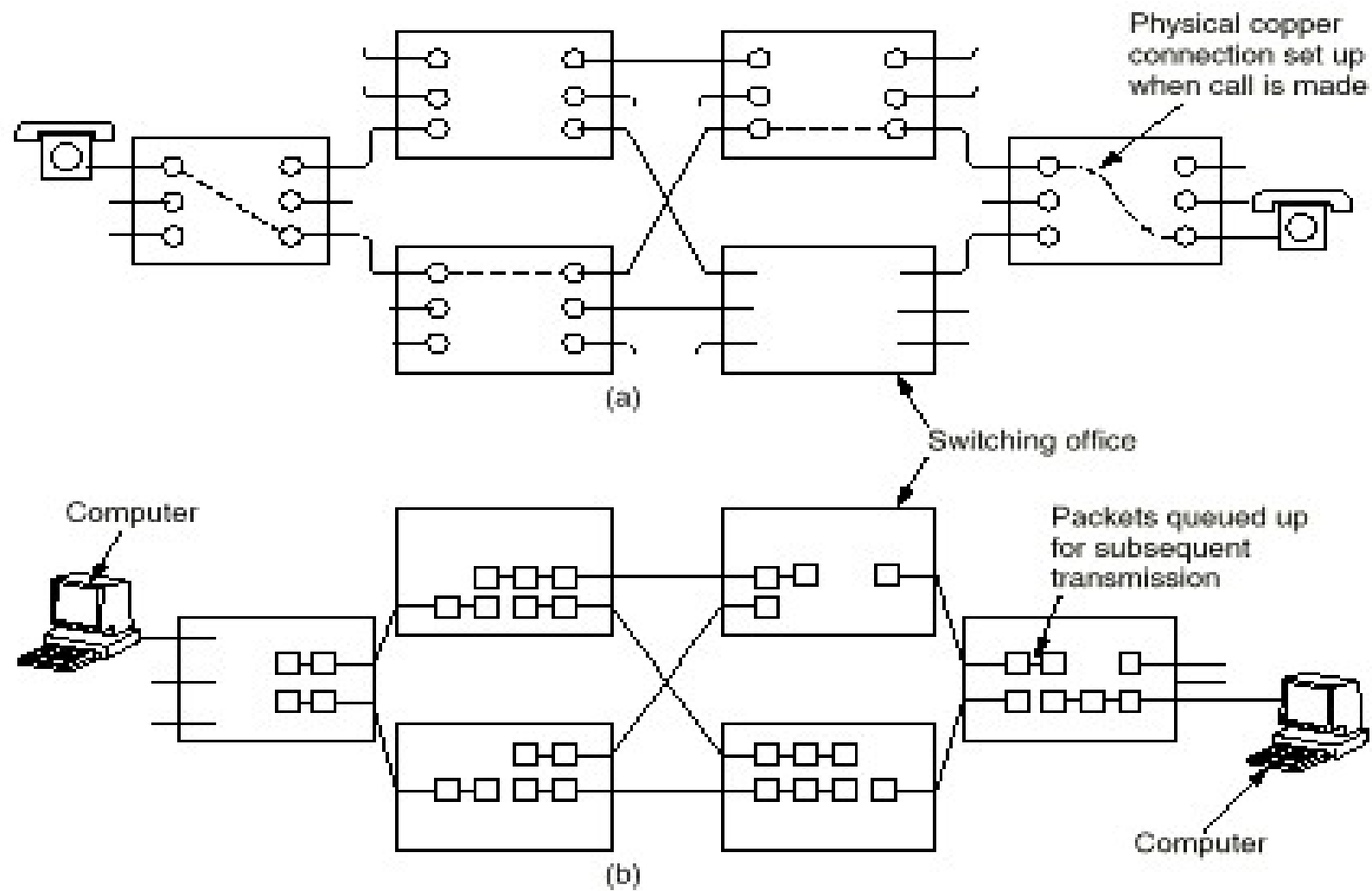




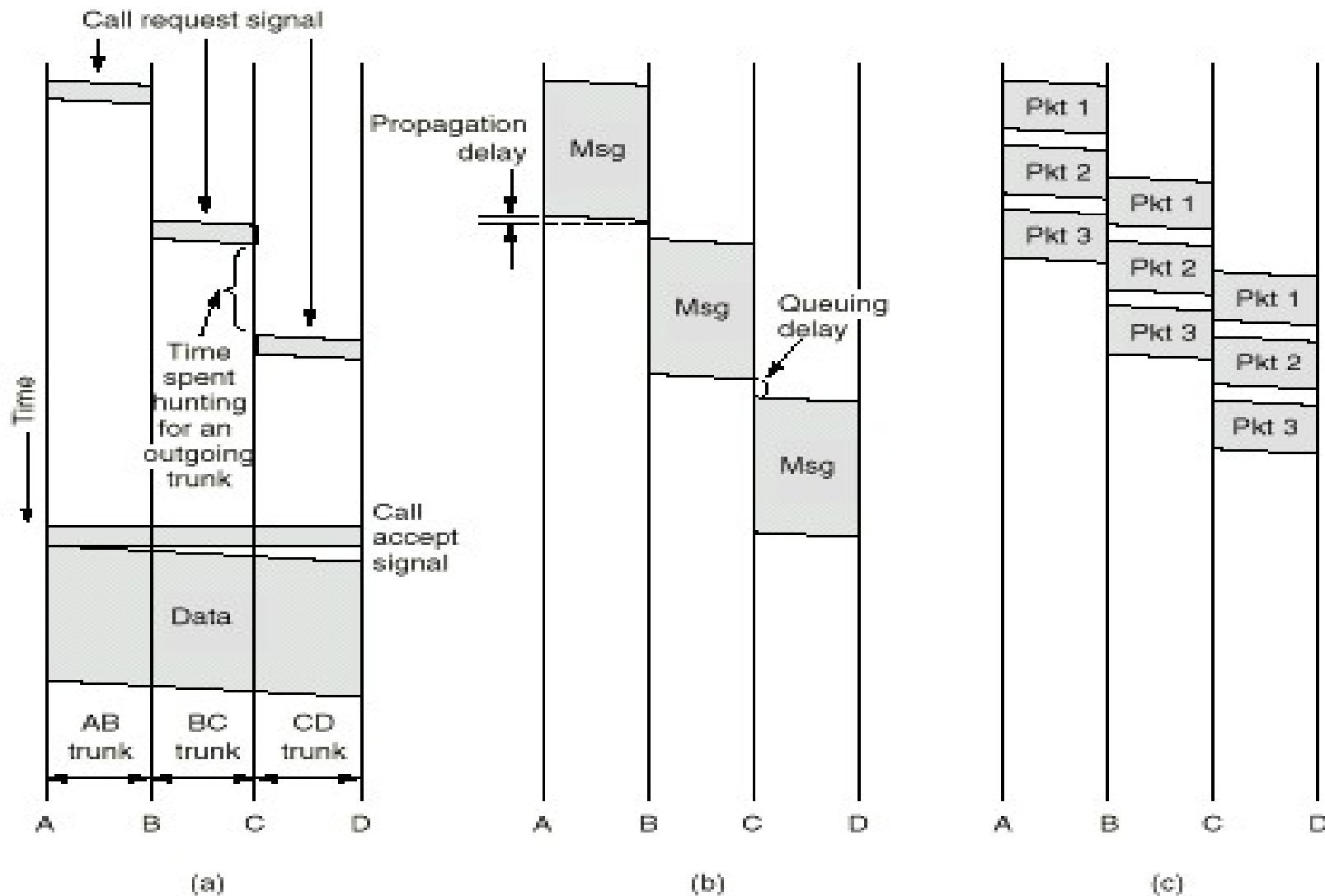
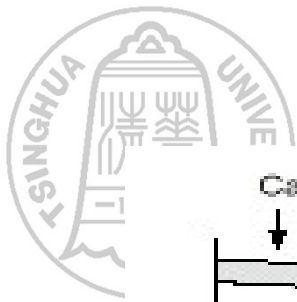
## 分组交换（续）

- 复用/解复用
  - 采用统计复用，按需分配信道资源
  - 来自任意会话的数据可以立即发送，不需要等待时槽
  - 用附加的分组头来区分数据





**Fig. 2-34.** (a) Circuit switching. (b) Packet switching.



**Fig. 2-35.** Timing of events in (a) circuit switching, (b) message switching, (c) packet switching.



## 分组交换（续）

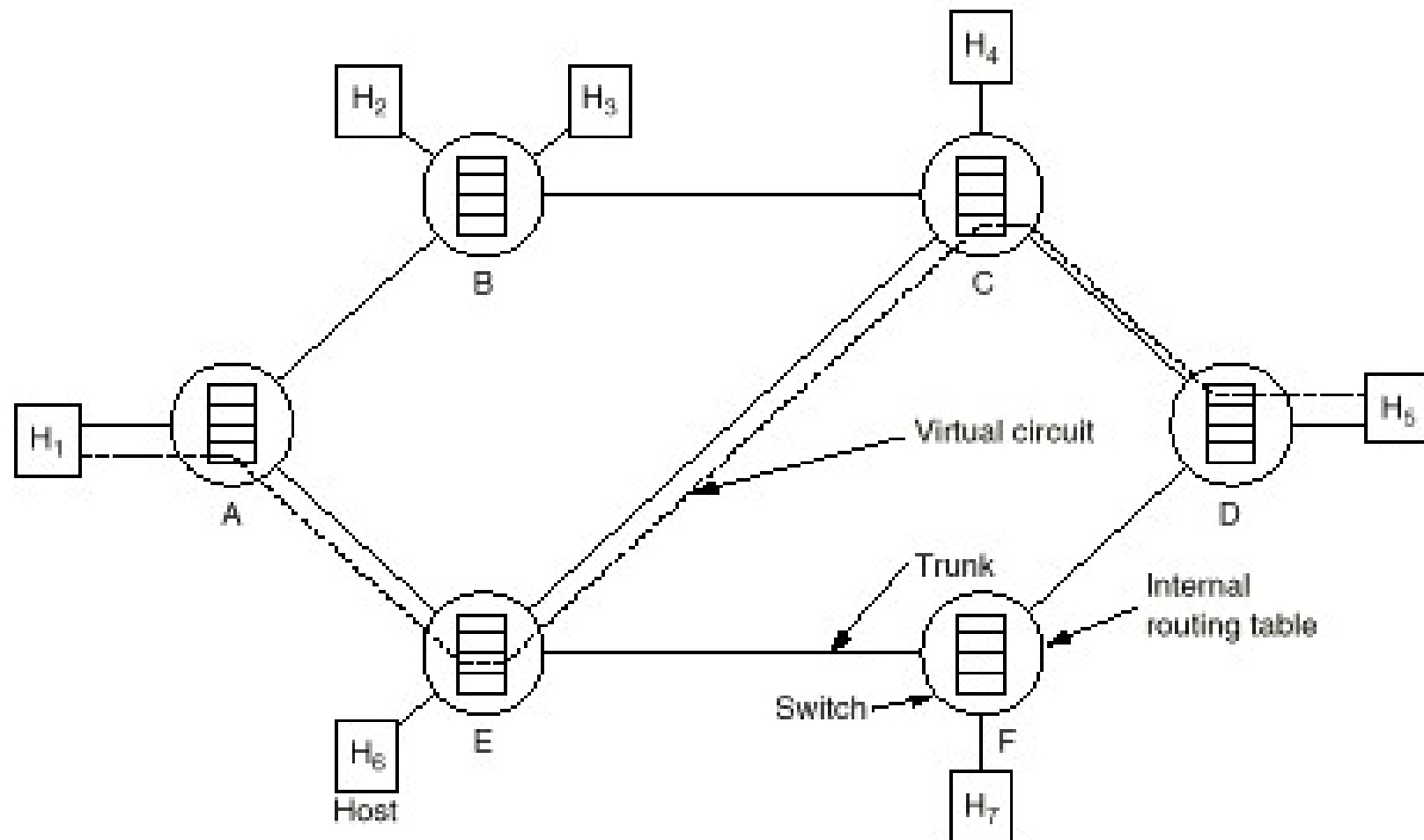
- 数据报分组交换
  - 每个分组均带有网络地址（源、目的），可走不同的路径
  - 例: IP networks





# 分组交换（续）

- 虚电路分组交换
  - 电路交换和分组交换的结合
    - 数据以分组形式传输
    - 来自同一流的分组通过一个预先建立的路径（虚电路）传输
    - 确保分组的顺序
    - 但是来自不同虚电路的分组可能会交错在一起
  - 分三个阶段
    - 建立：发带有全称网络地址的呼叫分组，建立虚电路
    - 传输：沿建立好的虚电路传输数据；
    - 拆除：拆除虚电路。
  - 注意：分组头不需要包含完整的地址信息
  - 例：ATM networks



**Fig. 2-43.** The dotted line shows a virtual circuit. It is simply defined by table entries inside the switches.



## 分组交换（续）

- 电路交换与分组交换的比较
  - 分组交换相比电路交换的最大优势是可以实现统计复用，有效的利用带宽
    - 峰值带宽和平均带宽的比例：话音3:1，数据15:1
  - 但是分组交换需要处理拥塞，因此：
    - 需要复杂的路由器
    - 难以保证端到端服务质量（延迟和带宽的保证）
  - 实际应用中，这两种方式可以结合在一起
    - IP over SONET, IP over Frame Relay



| Item                               | Circuit-switched | Packet-switched |
|------------------------------------|------------------|-----------------|
| Dedicated "copper" path            | Yes              | No              |
| Bandwidth available                | Fixed            | Dynamic         |
| Potentially wasted bandwidth       | Yes              | No              |
| Store-and-forward transmission     | No               | Yes             |
| Each packet follows the same route | Yes              | No              |
| Call setup                         | Required         | Not needed      |
| When can congestion occur          | At setup time    | On every packet |
| Charging                           | Per minute       | Per packet      |

**Fig. 2-36.** A comparison of circuit-switched and packet-switched networks.



# 不同交换技术的比较

- 电路交换适用于实时信息和模拟信号传送，在线路带宽比较低的情况下使用比较经济
- 报文交换适用于线路带宽比较高的情况，可靠灵活，但延迟大
- 分组交换缩短了延迟，也能满足一般的实时信息传送。在高带宽的通信中更为经济、合理、可靠。是目前公认较（最）好的一种交换技术

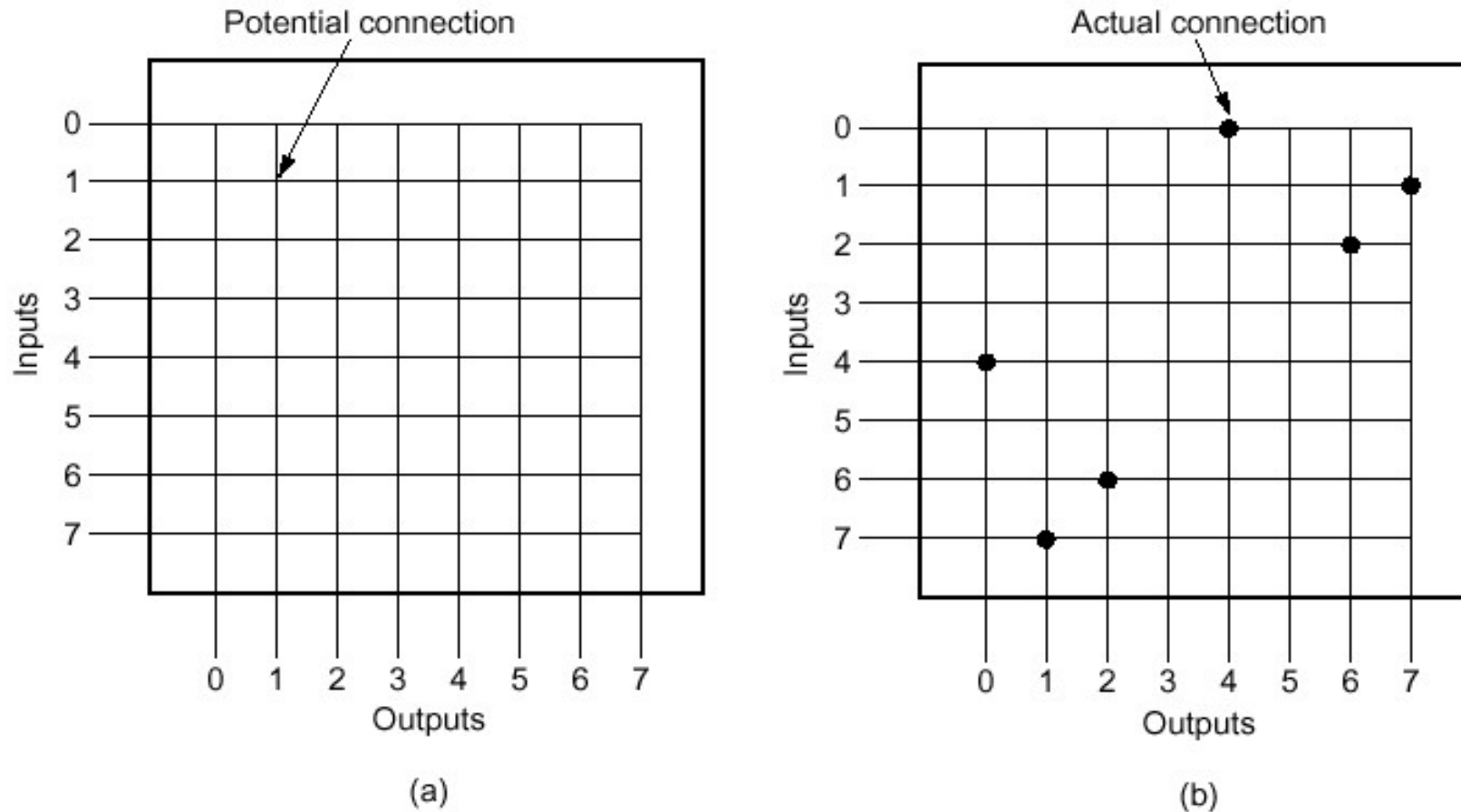


# 交换结构

- 交换结构 (**switch fabric**)
  - **crossbar** 交换
  - 空分交换
  - 时分交换



# crossbar 交换



**Fig. 2-38.** (a) A crossbar switch with no connections. (b) A crossbar switch with three connections set up: 0 with 4, 1 with 7, and 2 with 6.



# 空分交换

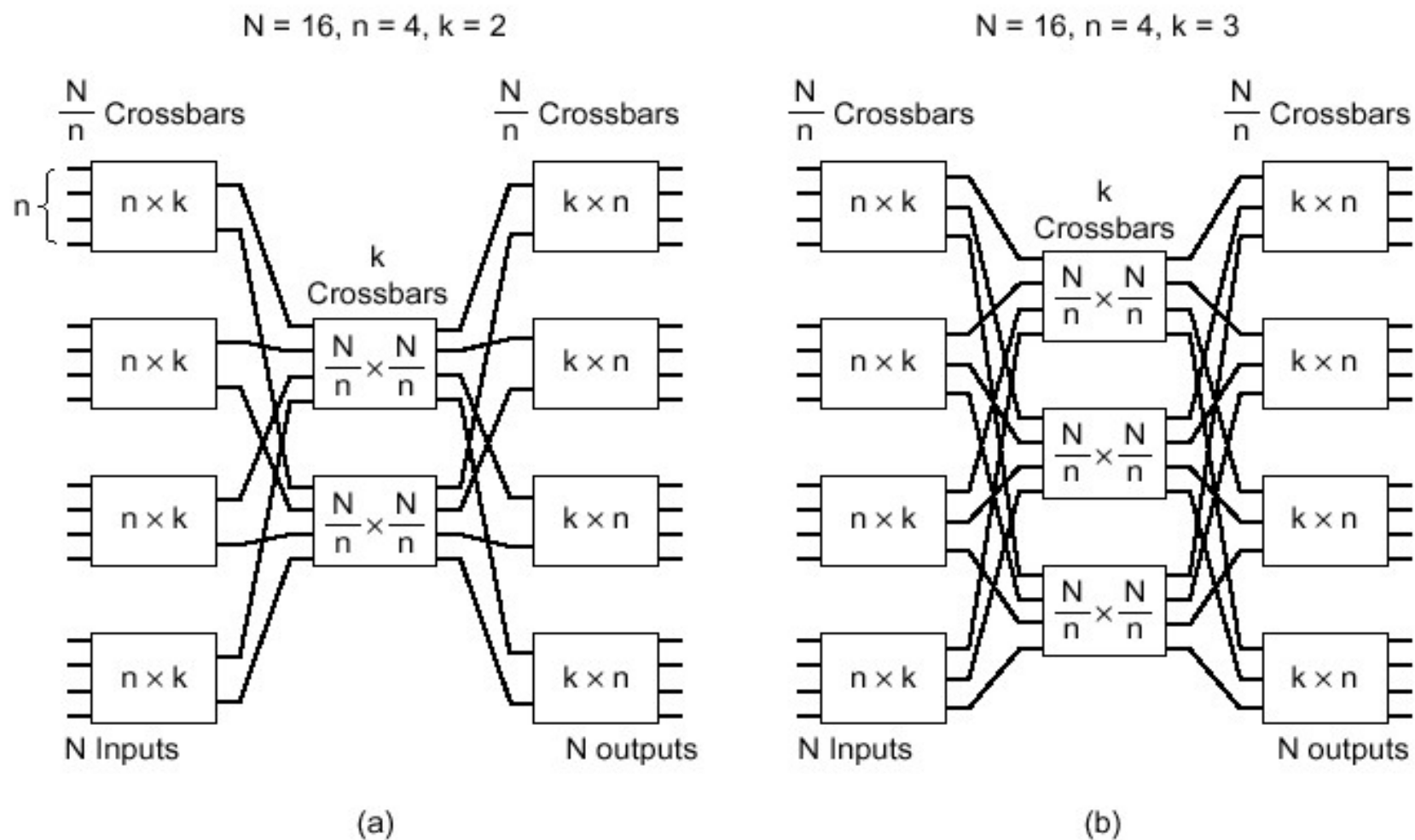
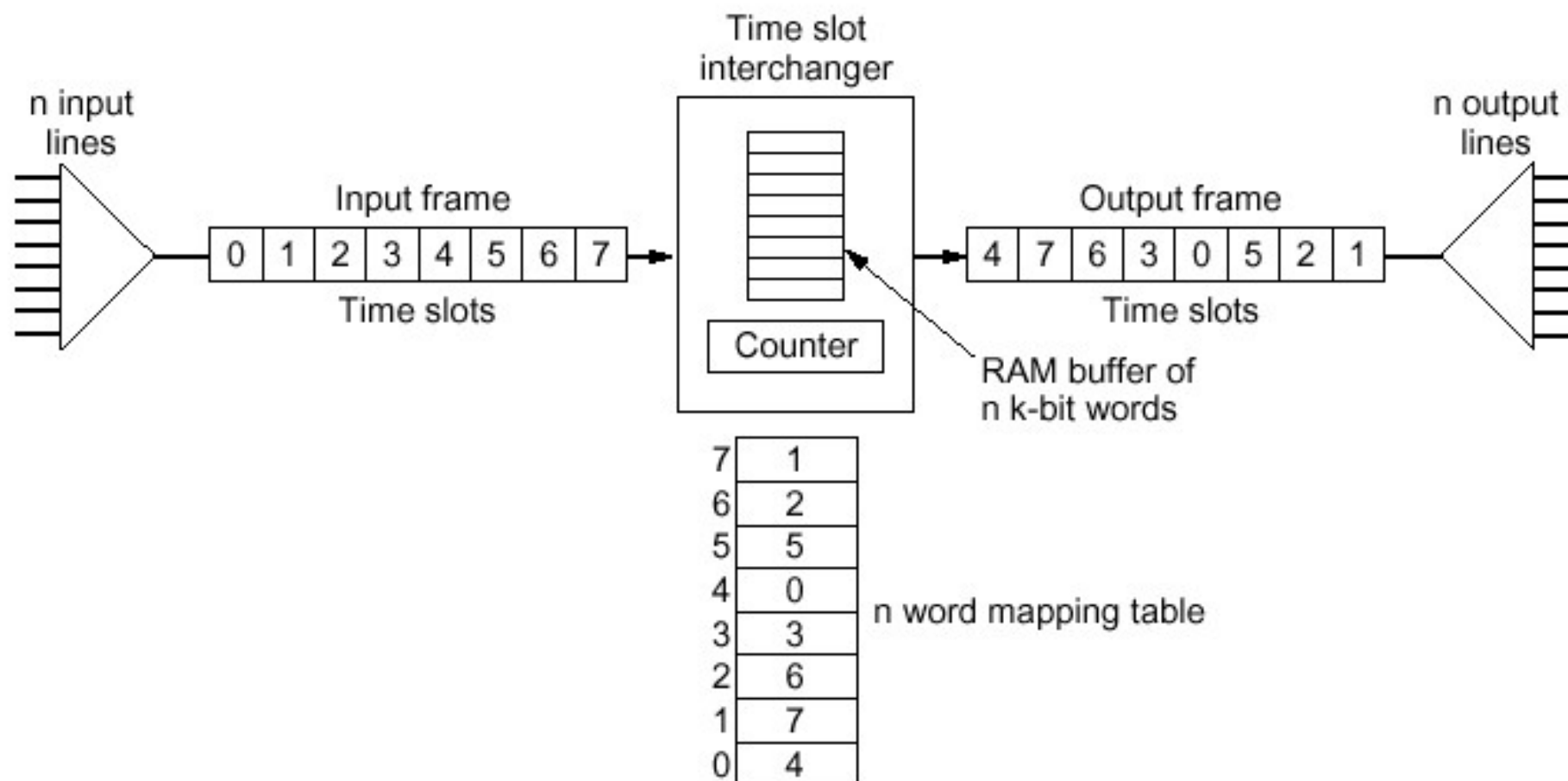


Fig. 2-39. Two space division switches with different parameters.





# 时分交换



**Fig. 2-40.** A time division switch.



# 总结

- 数据通信基础理论
  - 信号，信号的时域观和频域观，傅立叶分析
  - 有限带宽信号
  - 奈魁斯特定律、香农定律和信道的最大数据传输速率
- 数据通信技术
  - 数据通信系统的基本结构
  - 传输和传输方式
  - 数据编码技术
  - 多路复用技术



# 总结（续）

## ■ 交换技术

### ■ 电路交换

### ■ 报文交换

### ■ 分组交换

- 数据报分组交换

- 虚电路分组交换

### ■ 交换结构

■ 思考：查阅资料，总结电路交换与分组交换的区别