

# 数据通信



## 7-10章复习课

殷亚凤

[yafeng@nju.edu.cn](mailto:yafeng@nju.edu.cn)

<http://cs.nju.edu.cn/yafeng/>  
Room 901, Building of CS



# 第7-10章内容概览



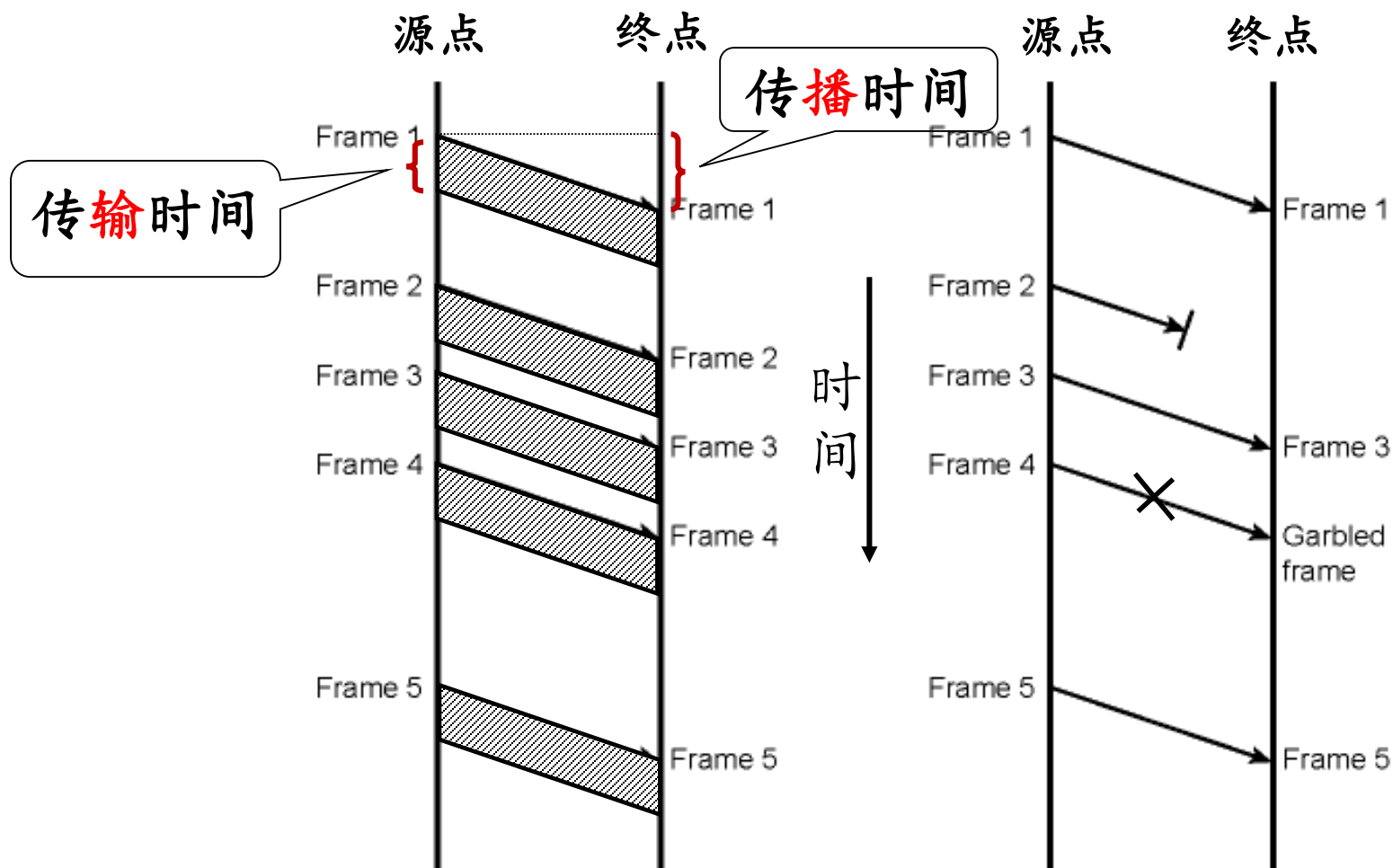
- 第7章 数据链路控制协议
- 第8章 复用
- 第9章 广域网技术和协议
- 第10章 蜂窝无线网络



# 第7章 数据链路控制协议

1. 流量控制
2. 差错控制
3. 高级数据链路控制

# 帧传输模型



(a) 无差错传输

(b) 传输中出现丢失和差错

# 停止等待流量控制



源实体传输一个帧



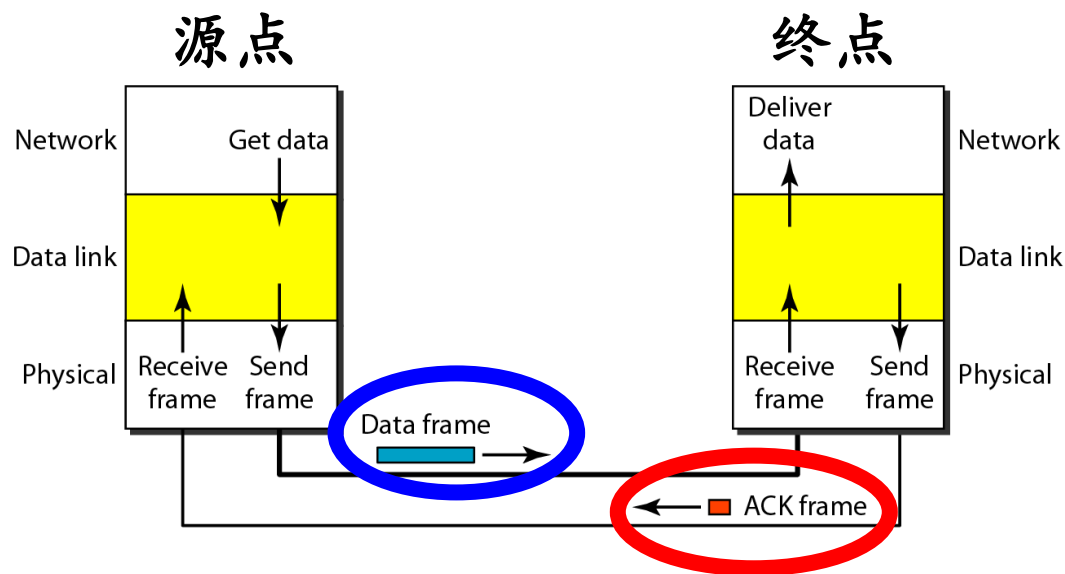
目的实体接收到帧之后，  
返回一个确认



源点在发送下一帧之前  
必须等待确认



终点可以不发送确认，  
从而终止数据流



# 停止等待流量控制



- 把大块的**数据切分成小数据块**传输：
  - 接收方**缓存空间**有限
  - 大块数据容易发生错误，出现**错误时重传**小块数据更容易
  - 避免一个站点长时间**占用传输媒体**

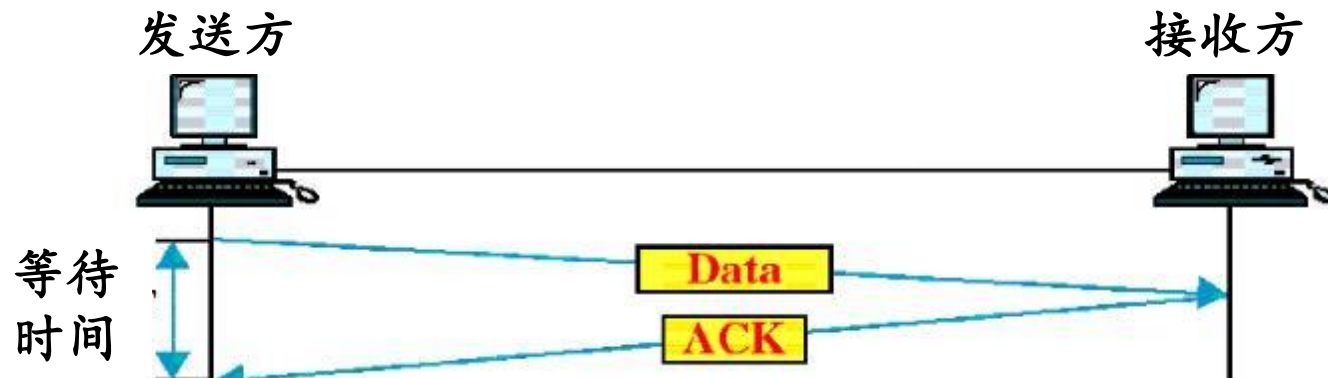
- 链路的比特长度 
$$B = R \times \frac{d}{v}$$

R是链路的数据率bps，d是链路长度m，V是传播速度m/s

- 传输时间取1时，传播时延/时间 
$$a = \frac{B}{L}$$

- L是一个帧中的比特数(以比特为单位的帧长度)
- a是传播时间与传输时间的比值

# 停止等待流量控制



$$a = \frac{t_{prop}}{t_{frame}} = \frac{\text{传播时间}}{\text{传输时间}} = \frac{d / V}{L / R} = \frac{Rd}{VL} = \frac{B}{L}$$

$R$  = 数据率 (bps)

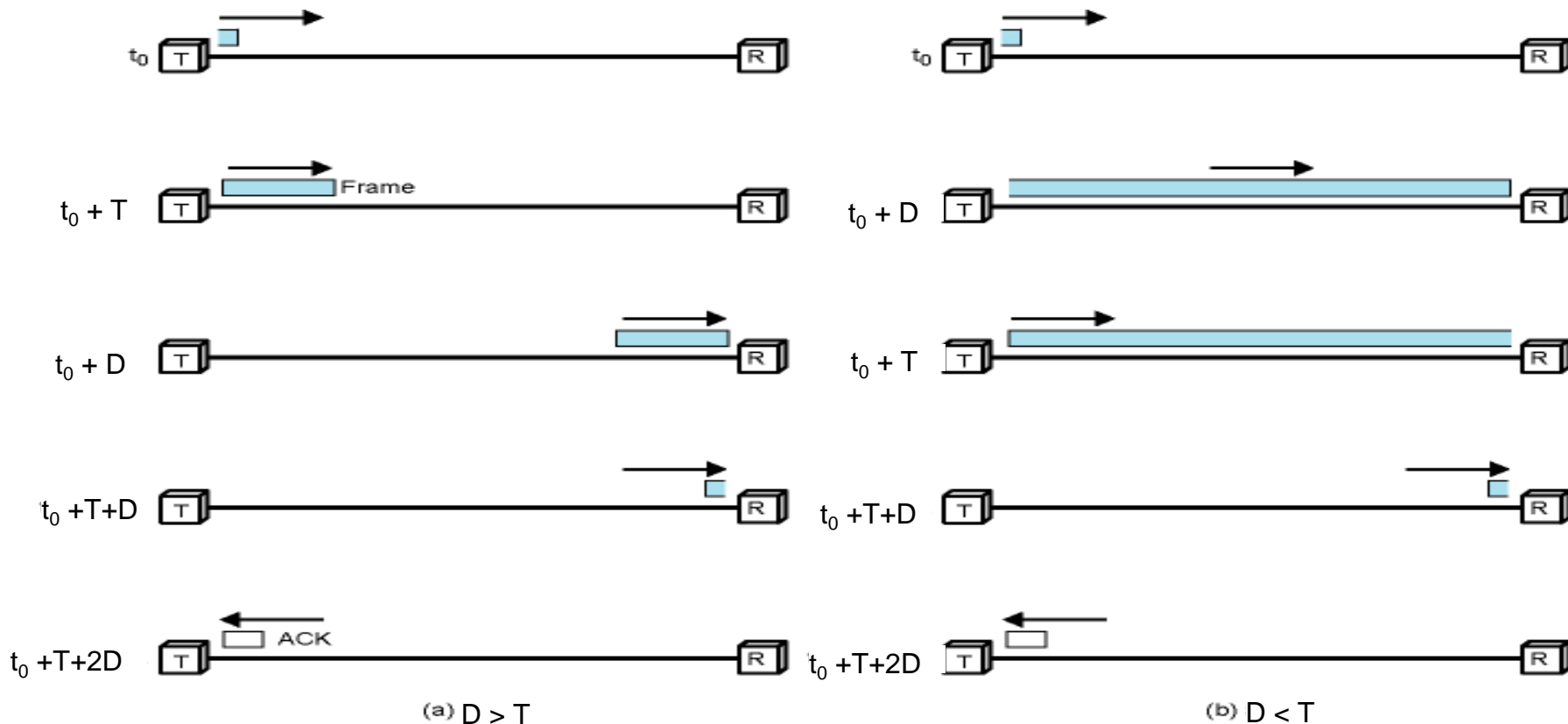
$d$  = 链路的长度/距离 (m)

$V$  = 传播速度 (m/s)

$B$  = 以比特为单位的链路长度 (bits)

$L$  = 以比特为单位的帧长度 (bits)

# 链路利用率

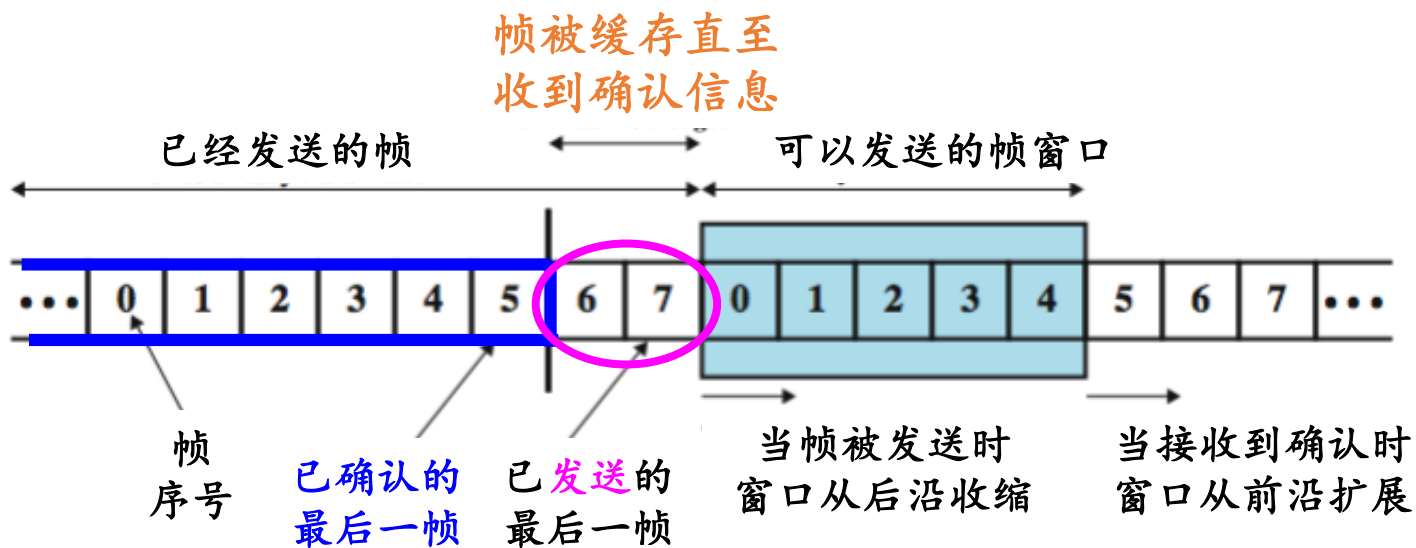


**(a>1)** 传播时间 =  $D$ , 传输时间 =  $T$       **(a<1)**

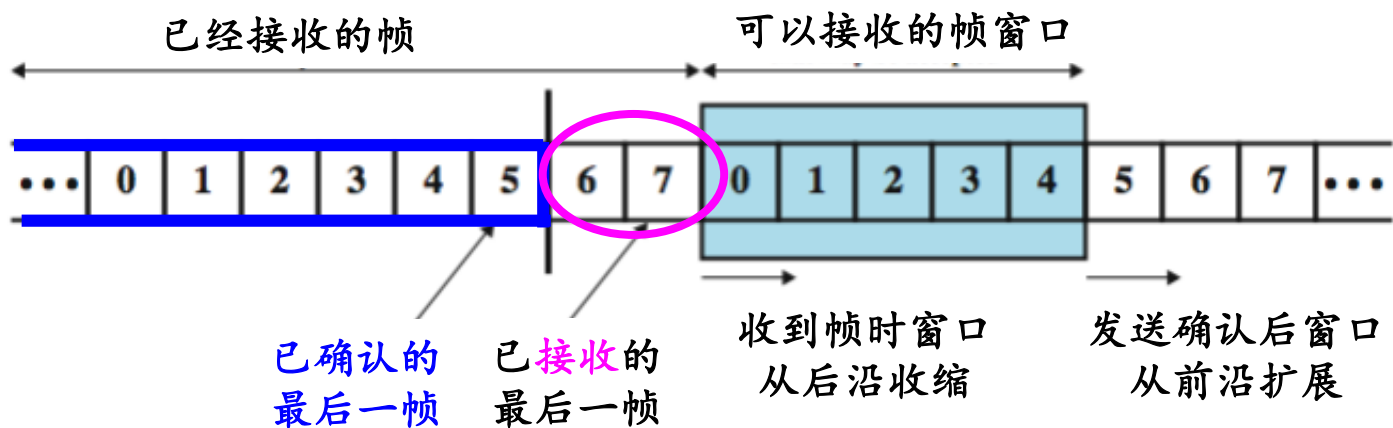
$$U = \frac{t_{frame}}{T_F} = \frac{t_{frame}}{2t_{prop} + t_{frame}} = \frac{1}{1 + 2a}$$



# 滑动窗口描述



发送方

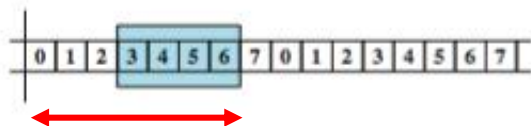
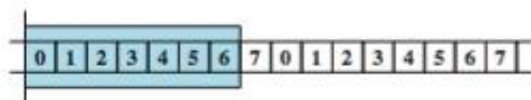


接收方

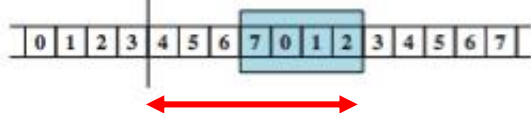
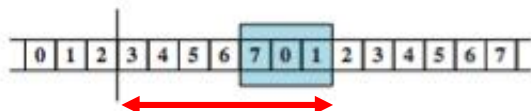
# 滑动窗口协议示例



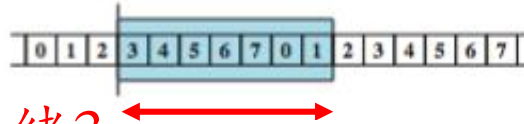
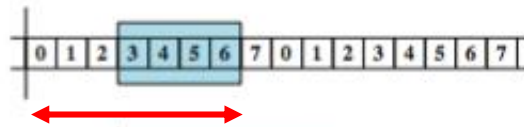
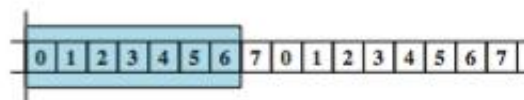
源站系统A



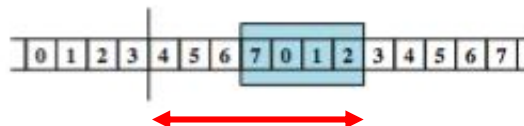
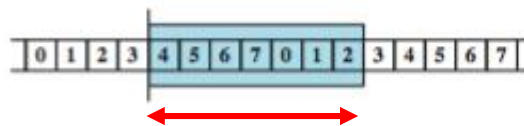
发送方只能发送紧跟在最后一次确认帧之后的7个帧



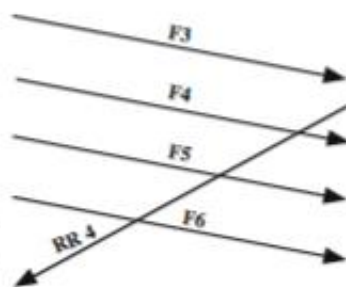
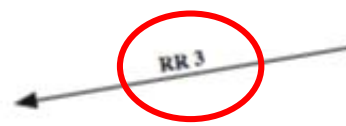
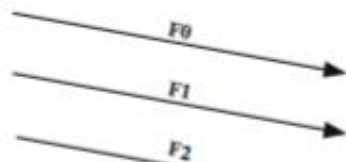
源站系统B



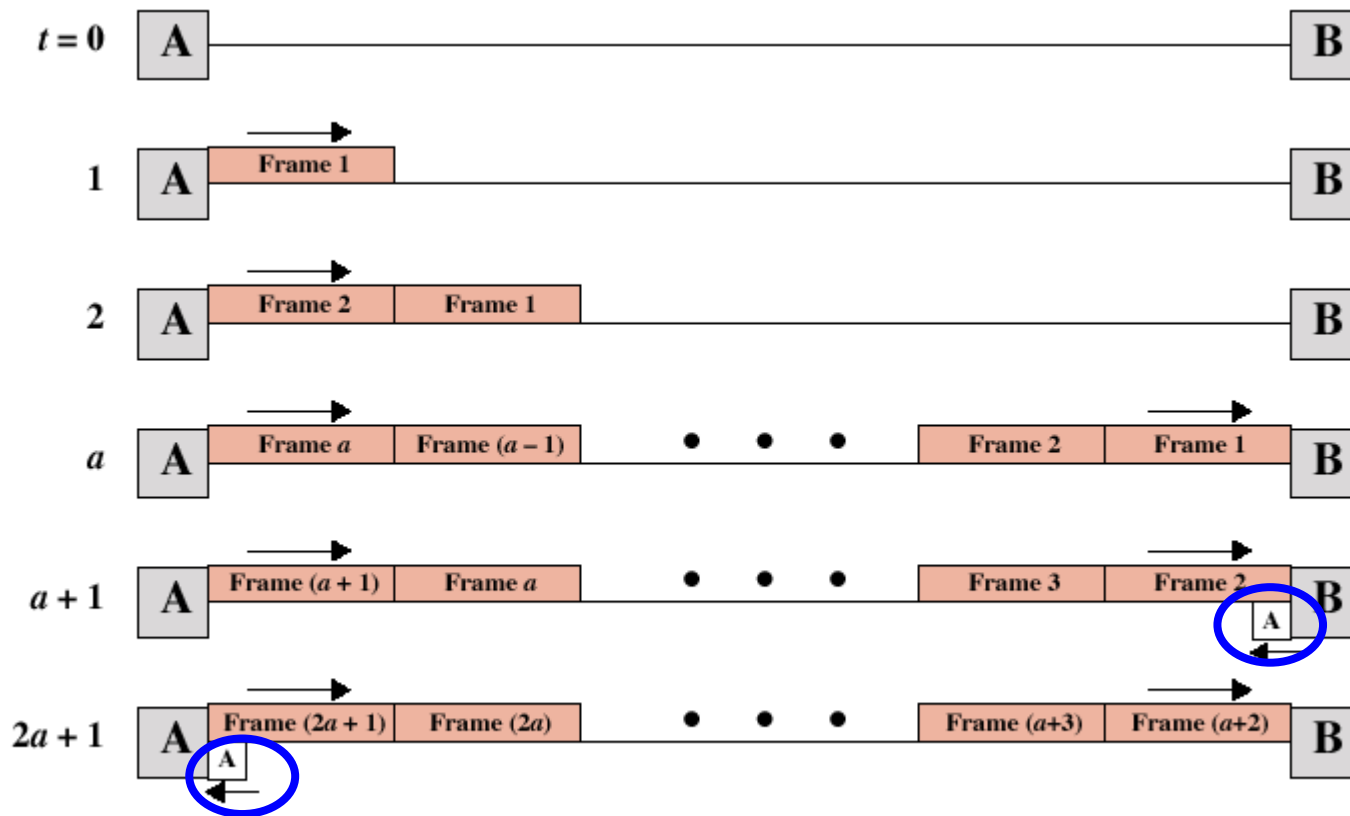
接收方只能容纳紧跟在最后一次确认帧之后的7个帧



窗口大小为  $7(2^3-1)$



# 滑动窗口的性能

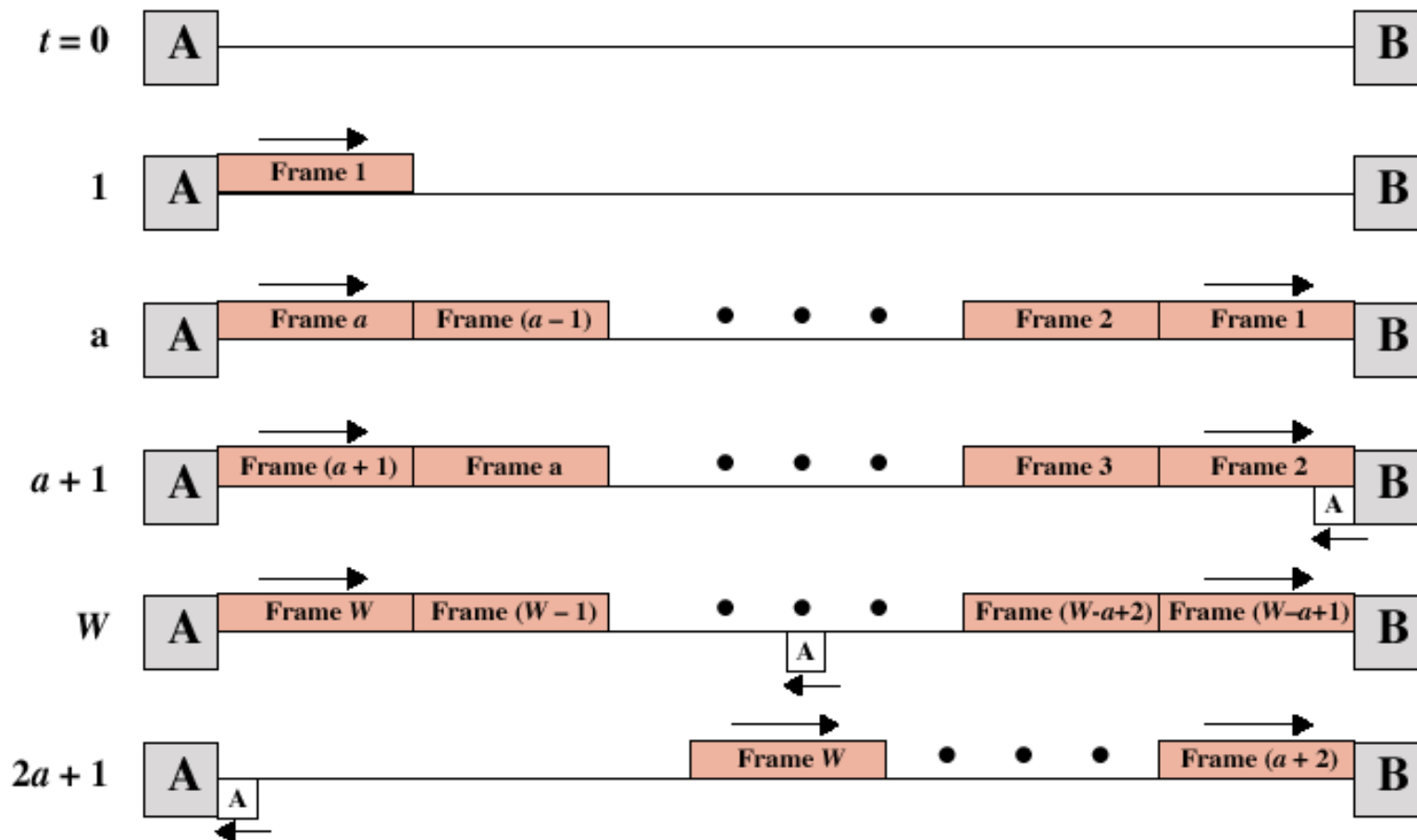


(a)  $W \geq 2a + 1$

$W$ 为发送方/接收方窗口大小,  $a$ 为链路长度

链路利用率:  $U = 1$

# 滑窗的性能



(b)  $W < 2a + 1$

$W$ 为发送方/接收方窗口大小,  $a$ 为链路长度

链路利用率:  $U = W / (2a + 1)$

# 自动重传请求



- 停止等待ARQ (stop-and-wait ARQ)
  - 基于停止等待流量控制技术
- 返回N ARQ (go-back-N ARQ)
  - 基于滑动窗口流量控制技术
- 选择拒绝 ARQ (selective-reject ARQ)

# 停止等待ARQ



- 源点发送一个数据帧，等待ACK
  - 保持一个发送帧的拷贝
  - 在终点确认返回前，源点不发送其他帧

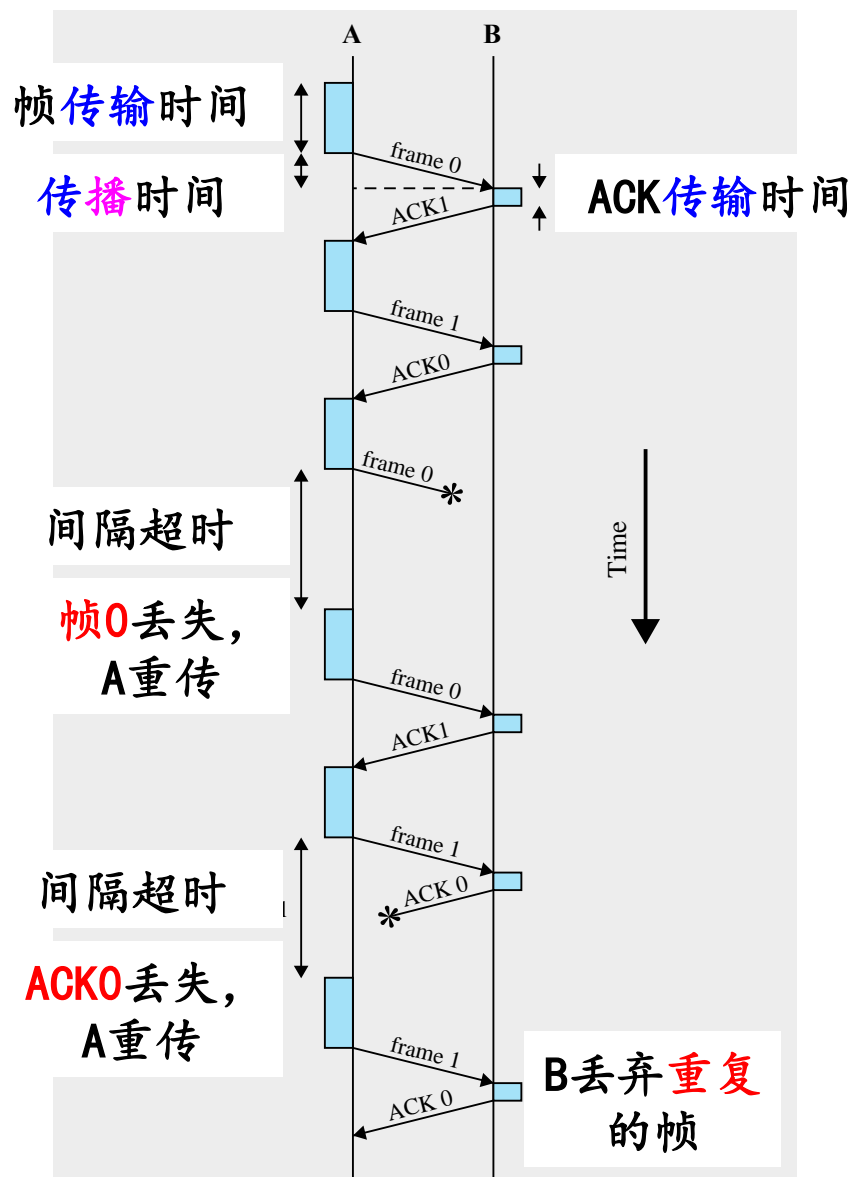
## 1) 帧损伤

- 接收端检测到差错，丢弃该帧
- 发送端超时重传

## 2) 确认 (ACK) 损伤

- 发送端超时重传
- 接收端收到用两份相同编号的帧
- 使用 ACK0 / ACK1 来确认希望接收的帧  
(ACK “i” 是指接下来希望接收帧i)

# 停止等待ARQ



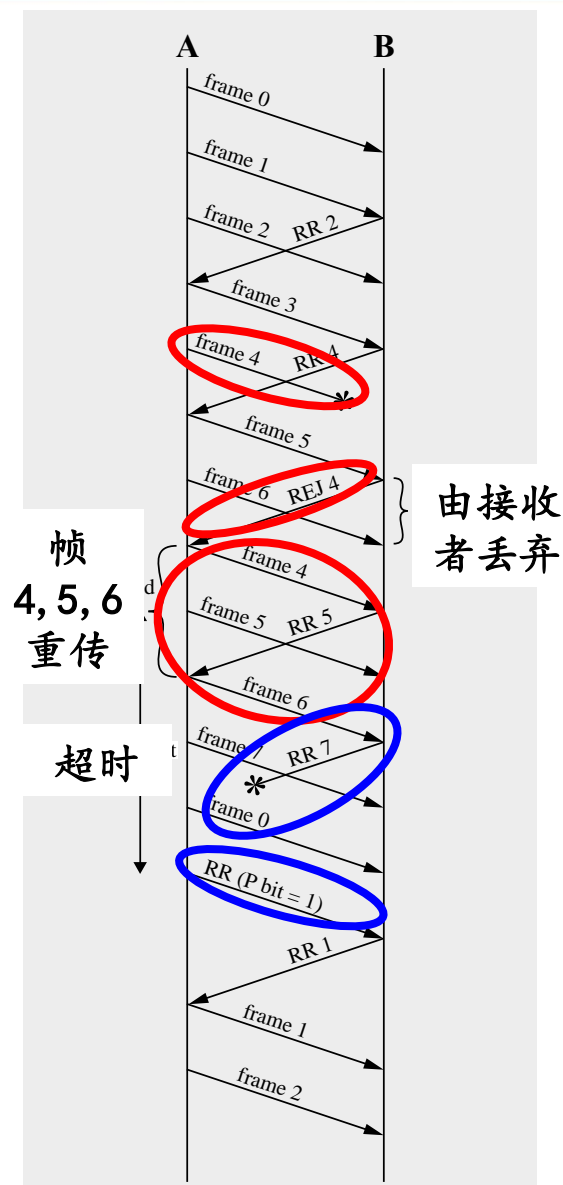
# 返回N ARQ



- 基于滑动窗口流量控制机制,没有收到确认的帧的最大数目取决于窗口大小
- 如果没有差错,使用肯定确认 (RR)
- 如果错误发生,为错误帧发送一个否认 (REJ)
  - 接收端丢弃该帧和所有后来收到的帧,直到错误帧被正确接收
  - 发送端重传有差错的帧和差错帧后所有已经传输过的帧



# 返回N ARQ示例

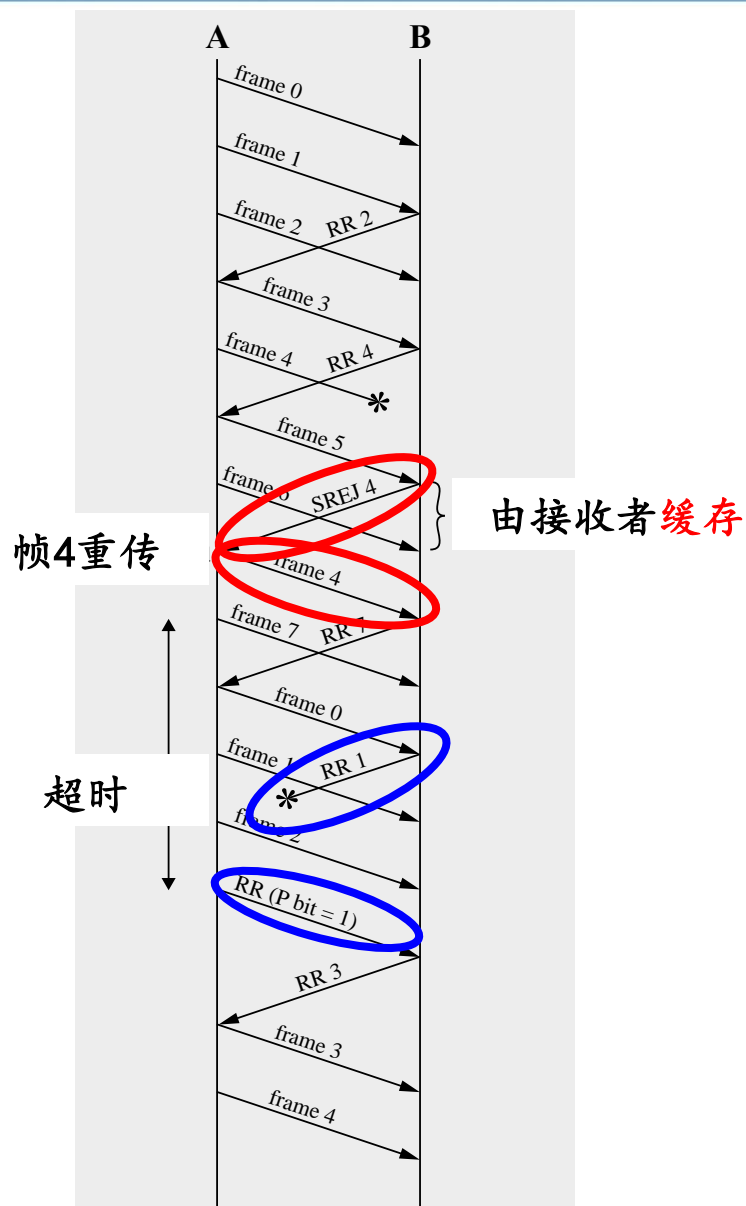


# 选择拒绝 (ARQ)



- 仅重传拒绝帧或超时帧，也叫做选择重传ARQ
  - 后续帧被接收端接收并缓存起来
  - 最小化重传帧的数量
- 接收端需要维护足够大的缓存
- 发送端和接收端逻辑更为复杂
  - 能够按照正确的顺序重组帧
  - 判断并仅发送失序帧
- 用于传播时延长的卫星链路

# 选择拒绝 (ARQ)



# 高级数据链路控制 (HDLC)



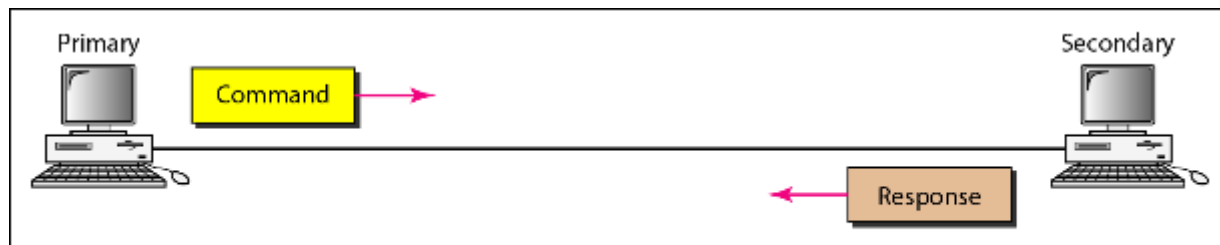
- 最重要的数据链路控制协议，是其他重要数据链路控制协议基础。
- HDLC定义了3种类型的站点、2种链路设置以及3种数据传送运行方式。
- 站点：
  - 主站：负责链路控制操作(命令)
  - 从站：在主站的控制下操作(响应)
  - 混合站：结合了主站和从站的特点（命令/响应）
- 链路设置：
  - 非平衡设置：1个主站、多个从站（全双工/半双工）
  - 平衡设置： 2个混合站组成（全双工/半双工）

# 数据传送方式



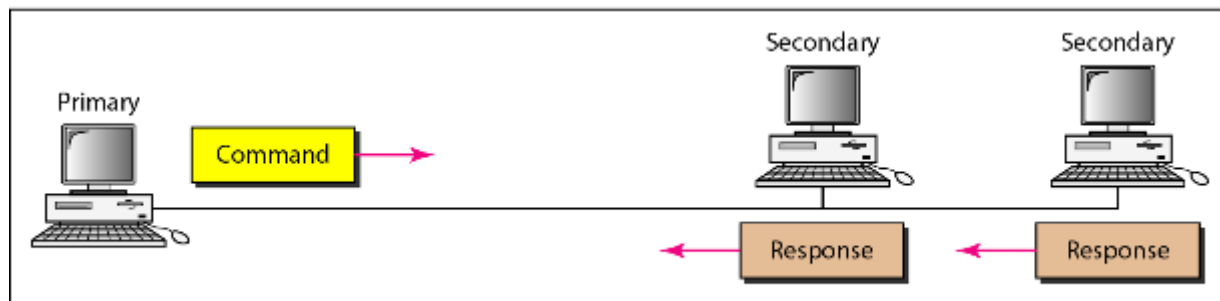
- 正常响应方式 (NRM)
  - 非平衡设置
  - 主站能够发起到从站的数据传送
  - 从站只有在接收到主站的命令式才传输数据

主站



a. Point-to-point

从站



b. Multipoint

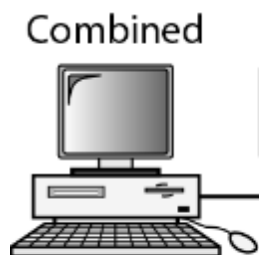
# 数据传送方式



- 异步平衡方式 (ABM)

- 平衡设置
- 两个混合站都能够发起数据传输，不需要对方混合站的许可
- 使用最广泛

混合站



Command/response

混合站



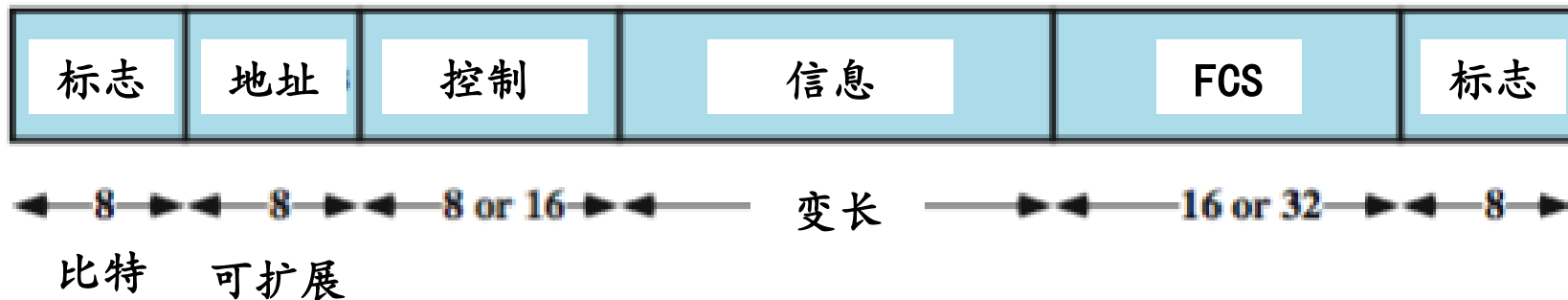
Command/response

# 数据传送方式



- 异步响应方式 (ARM)
  - 非平衡设置
  - 从站能够发起传输
  - 主站仍对链路全权负责，包括初始化、差错回复、链路逻辑断开等
  - 很少被使用

# HDLC 帧结构



## 帧格式

- 使用同步传输
- 传输以帧的形式进行
- 一个帧格式满足所有数据和控制交换

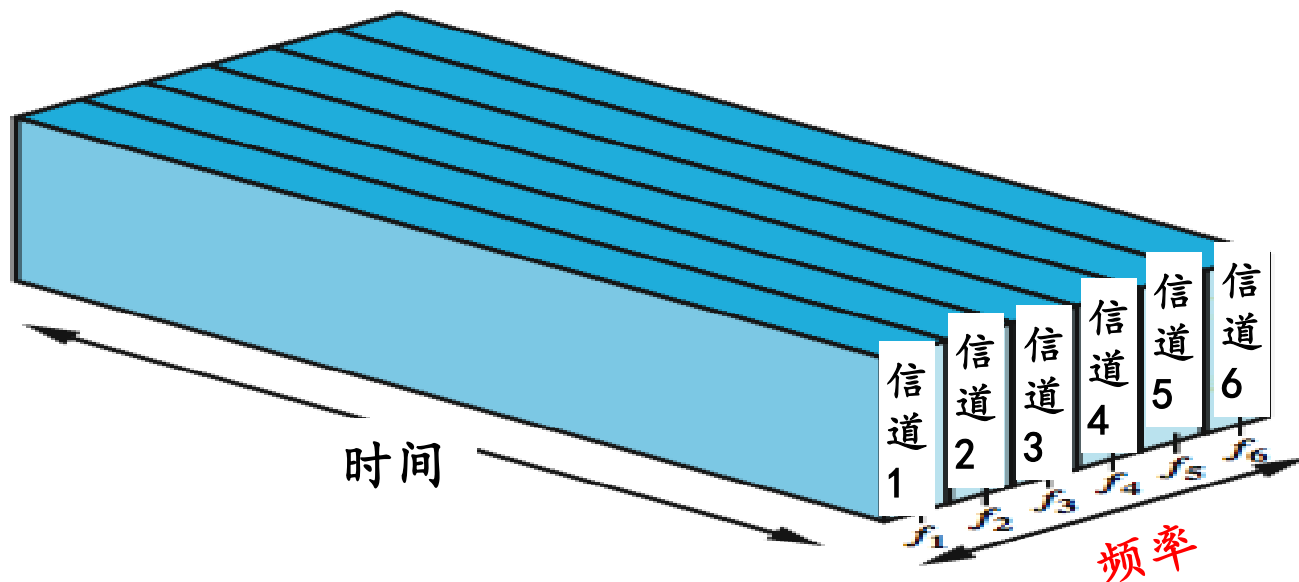




## 第8章 复用

1. 频分复用
2. 同步时分复用
3. 统计时分复用
4. 非对称数字用户线路

# 频分复用 FDM

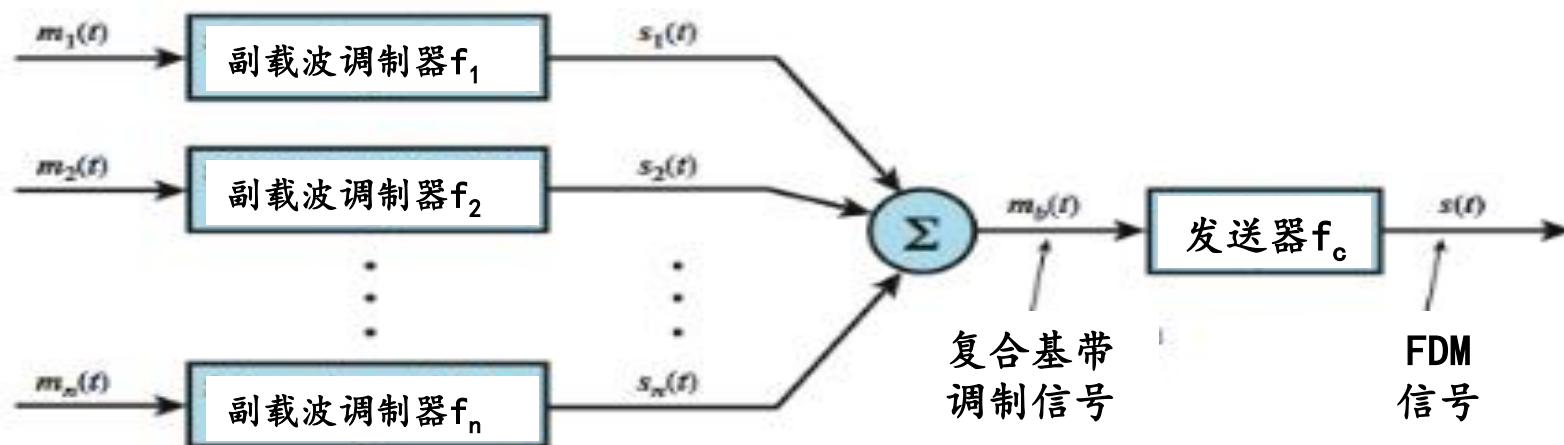


- 传输媒体的有效带宽超出被传输信号所要求的带宽，则可以使用频分复用；
- 每个信号调制到不同的载波频率上，这些载波频率间距足够大以保证这些信号带宽不会重叠，使多个信号可以同时被运载；
- 每个被调制的信号具有以各自载波频率为中心的一定带宽，称为信道；
- 信道被防护频带（频谱中未使用部分）隔开，防止干扰。

# 频分复用 FDM



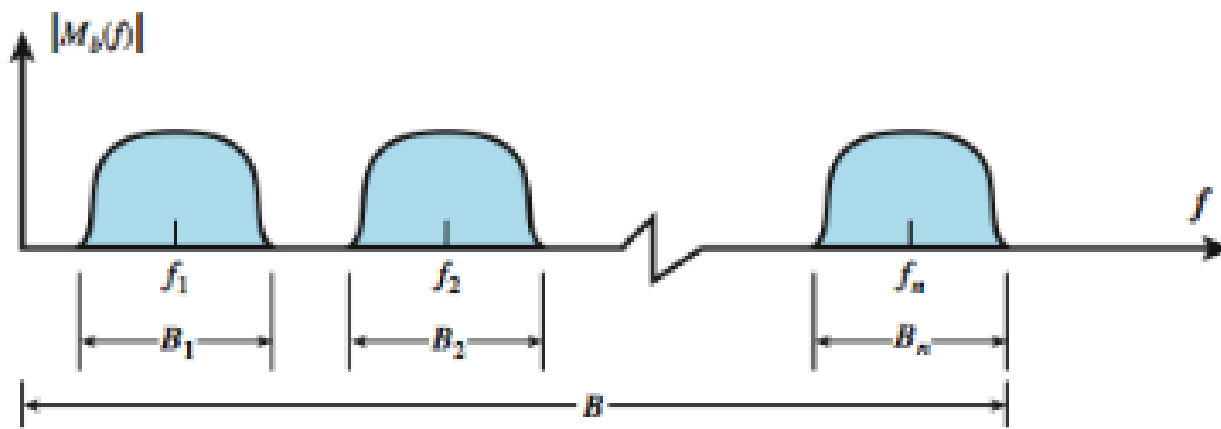
- 输入信道可以是**数字**的，也可以是**模拟**的
  - 数字输入：必须通过调制解调器转换成模拟信号
- 媒体上传输的混合信号是**模拟**的



FDM系统发送器

- FDM系统的**发送器**:
  - 各路信号先被**调制到载波 $f_i$ 上**（副载波），即频谱搬移到以 $f_i$ 为中心的位置；
  - 经调制的模拟信号叠加起来，产生**复合基带信号**；
  - **复合信号**作为整体，可再进行另外的**调制**，如搬移到载波频率 $f_c$ 上；

# 频分复用 FDM

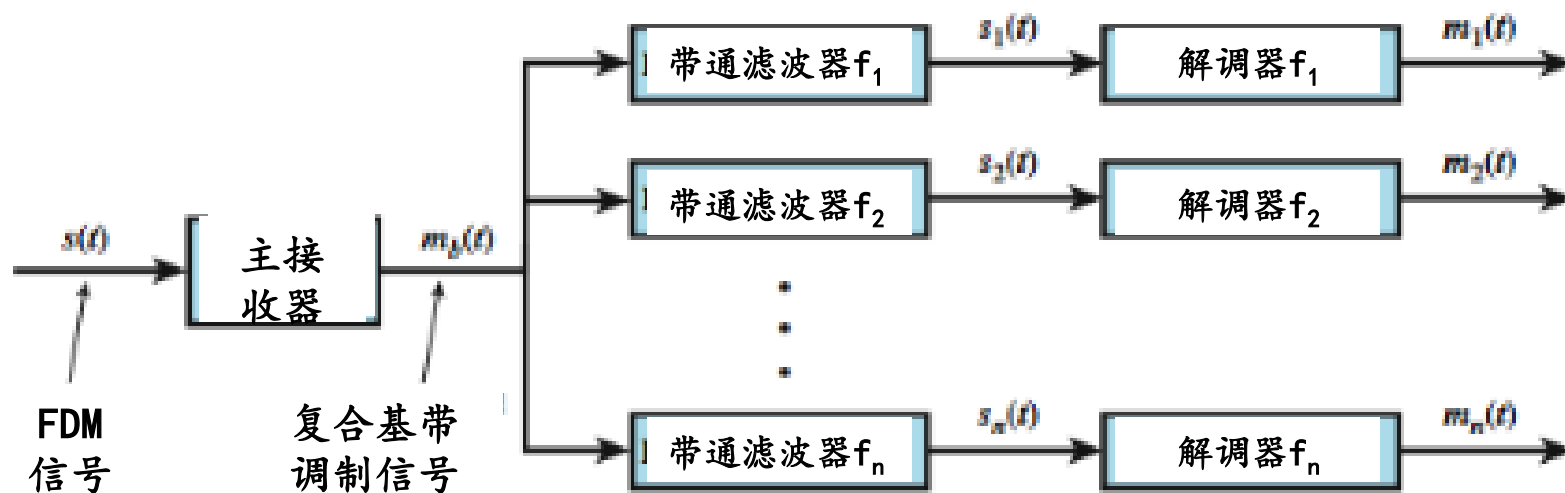


复合基带信号的频谱

- 复合基带信号：

- 总带宽为 $B$ ，其中 $B > \sum_{i=1}^n B_i$ ；
- 该模拟信号经过适当的媒体进行传输。

# 频分复用 FDM



FDM系统：接收器

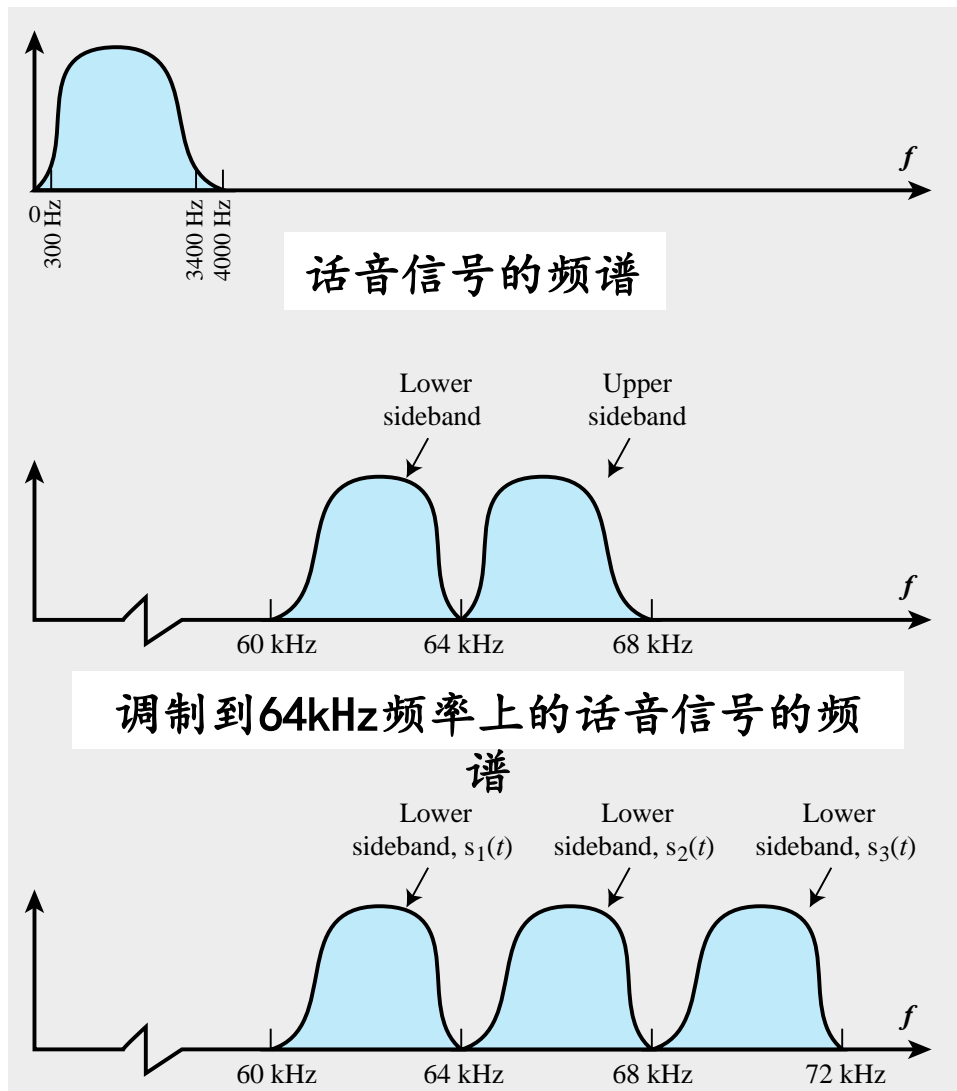
- FDM系统的**接收器**：

- FDM信道经过**解调**得到复合基带信号；
- 复合基带信号通过 $n$ 个**带通滤波器**，每个滤波器以 $f_i$ 为中心，且具有 $B_i$ 的带宽；
- 各成员部分经过**解调**后恢复为原始信号；

# 话音信号频分复用



- 传输三路话音信号：
  - 话音信号的带宽一般为4kHz，其中有效频谱为300-3400Hz；
  - 采用64kHz载波进行调制，调制到的带宽为8kHz，范围是60-68kHz；
  - 为了提高利用率，只传输下边带，最终三路话音信号对应的频谱如右图所示。

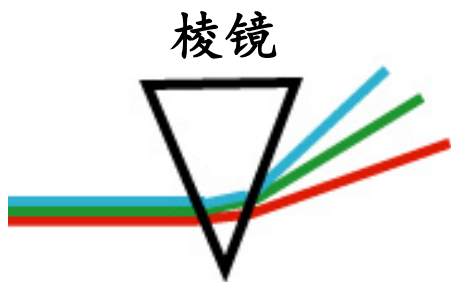


使用64kHz、68kHz、72kHz副载波的合成信号的频谱

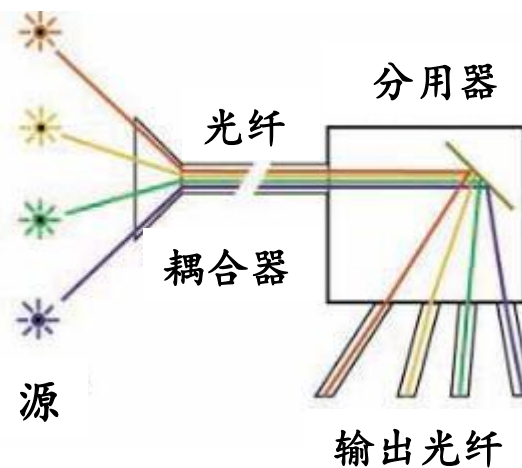
# 波分复用 WDM



- **波分复用**：频分复用的另一种形式
- **不同波长的光信号**通过同一根光纤传输
- 采用不同源的窄带光组成一个宽带光
  - 棱镜可用作波分复用及其多路分解



将一束光分为不同颜色



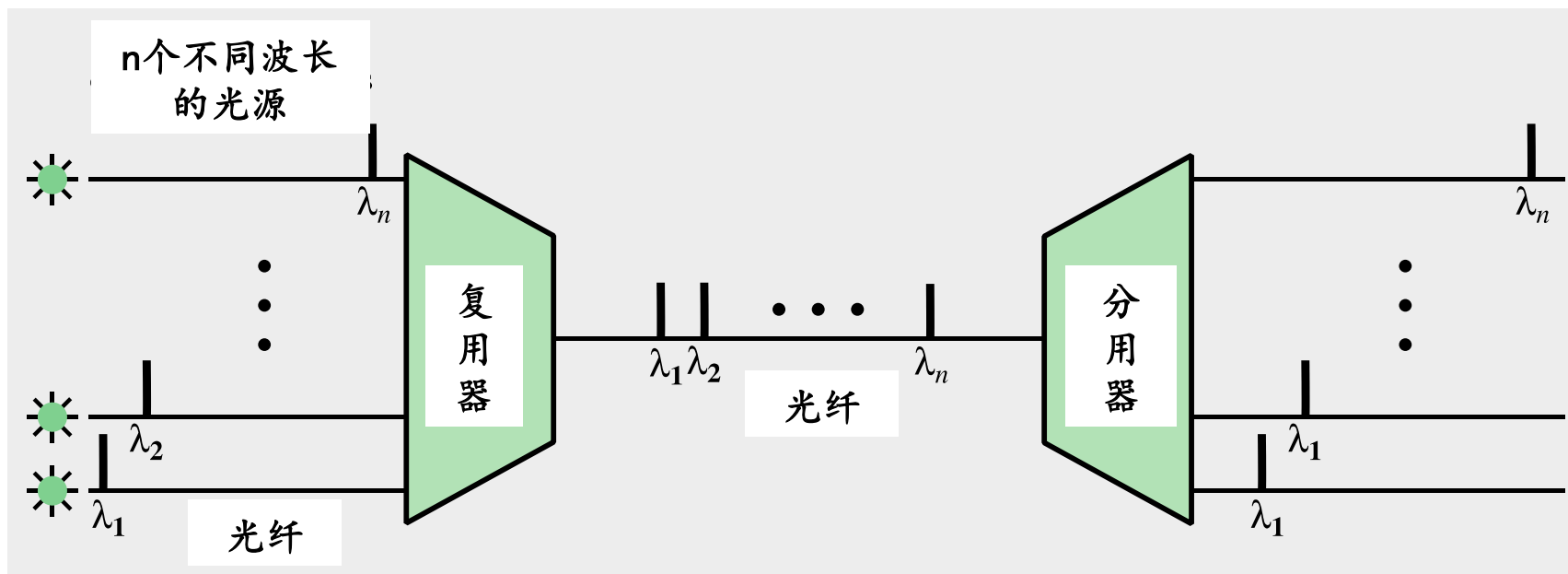
WDM 分用器

# 波分复用 WDM



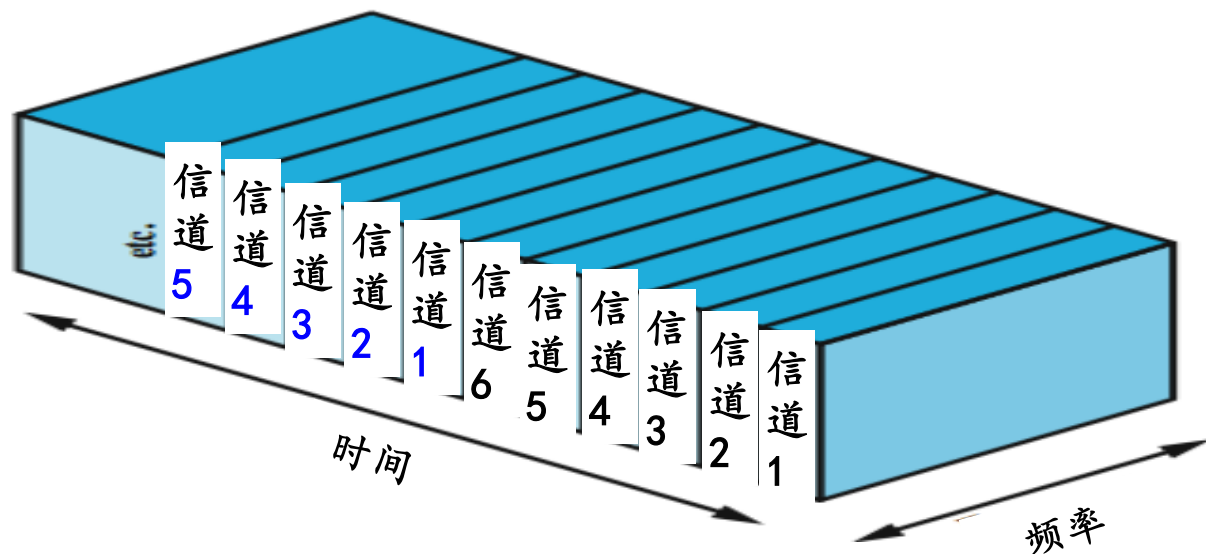
## • WDM系统:

- 数个源生成波长不同的激光线束并发送到一个复用器上;
- 复用器将这些源合并再通过一条光纤线路传输;
- 复合信号到达分用器, 各个成员信道在这里被分解并发送到目的点的各个接收器上。



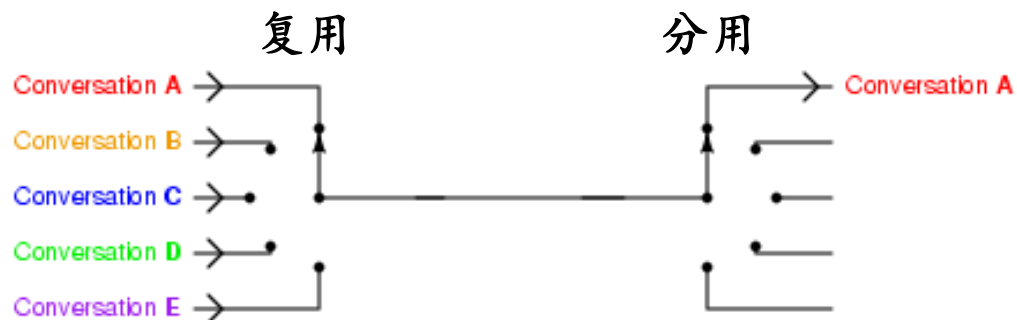
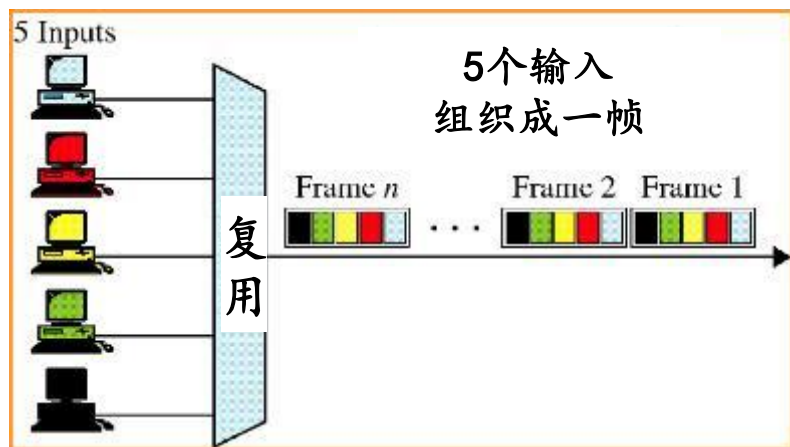


# 同步时分复用 (同步TDM)



- **同步时分复用**（要求：传输媒体能够达到的数据率超出被传输的数字信号的数据率）
  - 采用在**不同时间交错传输**每个信号中的一部分；
  - 多路**数字信号**（或携带**数字数据的模拟信号**）可用一条传输通路运载；
  - **交错**可以是比特级，也可以是字符级或更大的粒度
  - **同步**是指时隙被提前分配给数据源且是固定的

# 同步时分复用

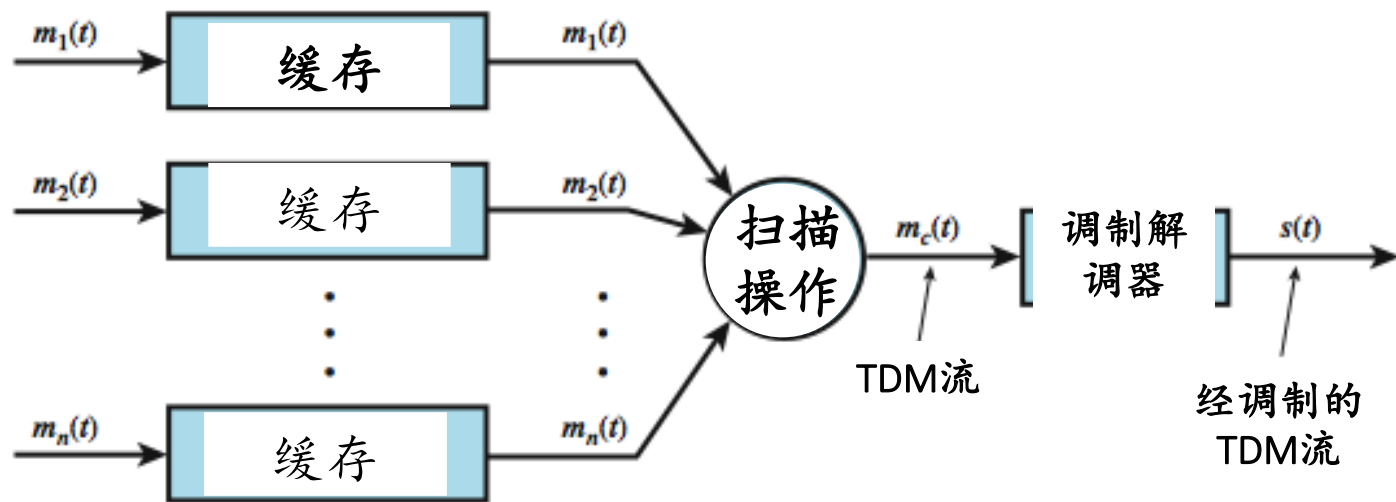


## • 同步时分复用

➤ 数据被组织成“帧”：

- 每帧包含一组**循环**使用的时隙；
- 每个数据源可以被分配一个或多个时隙

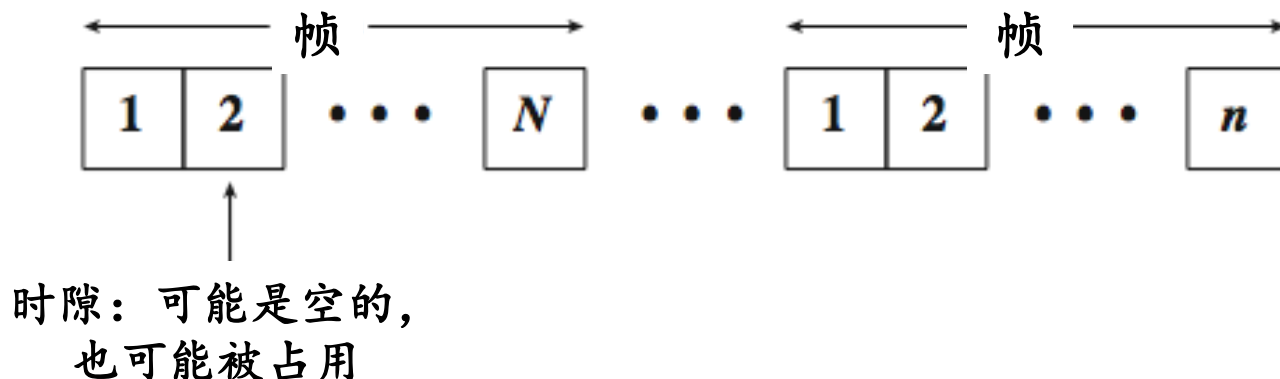
# TDM系统发送器



## • TDM系统发送器：

- 所有来自数据源的输入数据都被暂时缓存起来；
- 缓存经顺序扫描后，形成复合数字数据流；  
(复合数据流的传输率至少是多路数据流的数据率之和)
- 复合数字信号可直接传输，也可经过调制解调器（变成模拟信号）。

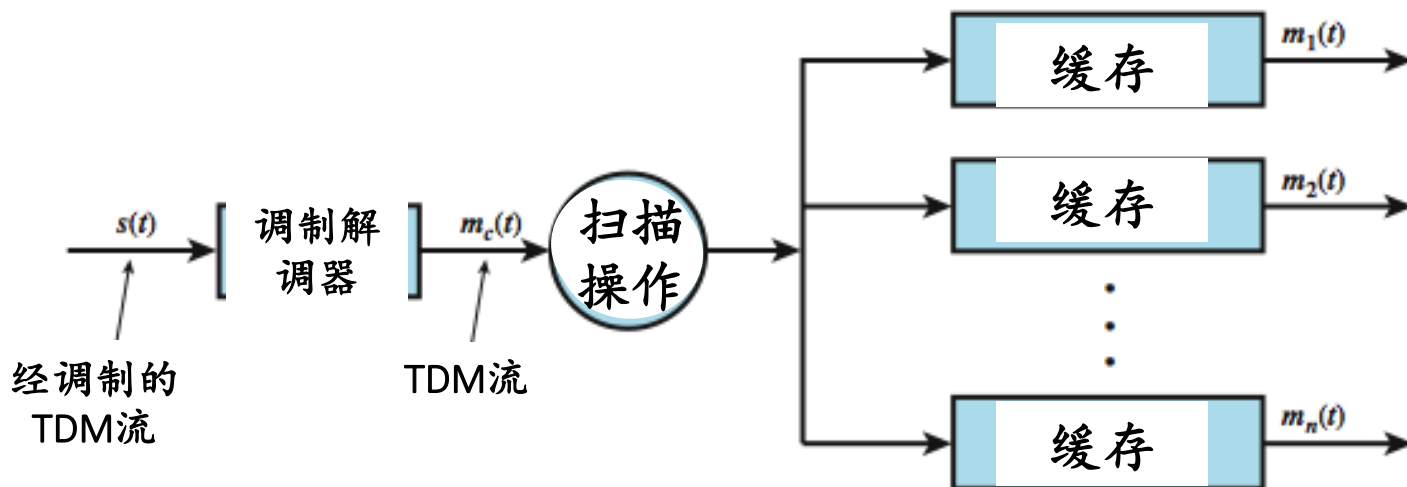
# TDM帧



- TDM帧：

- 数组被组织成**帧**的形式；
- 每个帧含有一组**循环使用**的时隙；
- 每个帧中，各**数据源**都有其**对应**的一个或多个时隙；
- 从一帧到另一帧，所有为某个数据源指定的**时隙序列**形成一个**信道**；
- **时隙**的长度等于发送器**缓存的长度**，通常为1比特或1字节。

# TDM系统接收器



- TDM系统接收器：

- 交错的数据解除复用，并传递到不同的目的缓存中；
- 每个输入数据源，都有一个对应的输出目的点；
- 每个输出点接收到数据率与数据生成时的数据率相同。

# TDM链路控制



输入1 ..... **F<sub>1</sub>** f<sub>1</sub> f<sub>1</sub> d<sub>1</sub> d<sub>1</sub> d<sub>1</sub> C<sub>1</sub> A<sub>1</sub> F<sub>1</sub> f<sub>1</sub> f<sub>1</sub> d<sub>1</sub> d<sub>1</sub> d<sub>1</sub> C<sub>1</sub> A<sub>1</sub> F<sub>1</sub>  
输入2 ... F<sub>2</sub> f<sub>2</sub> **f<sub>2</sub>** d<sub>2</sub> d<sub>2</sub> d<sub>2</sub> d<sub>2</sub> C<sub>2</sub> A<sub>2</sub> F<sub>2</sub> f<sub>2</sub> f<sub>2</sub> d<sub>2</sub> d<sub>2</sub> d<sub>2</sub> d<sub>2</sub> C<sub>2</sub> A<sub>2</sub> F<sub>2</sub>

输入数据流

... f<sub>2</sub> F<sub>1</sub> d<sub>2</sub> f<sub>1</sub> d<sub>2</sub> f<sub>1</sub> d<sub>2</sub> d<sub>1</sub> d<sub>2</sub> d<sub>1</sub> C<sub>2</sub> d<sub>1</sub> A<sub>2</sub> C<sub>1</sub> F<sub>2</sub> A<sub>1</sub> f<sub>2</sub> F<sub>1</sub> f<sub>2</sub> f<sub>1</sub> d<sub>2</sub> f<sub>1</sub> d<sub>2</sub> d<sub>1</sub> d<sub>2</sub> d<sub>1</sub> d<sub>2</sub> d<sub>1</sub> C<sub>2</sub> C<sub>1</sub> A<sub>2</sub> A<sub>1</sub> F<sub>2</sub> F<sub>1</sub>

复用数据流

F=标志字段；A=地址字段；C=控制字段  
d=数据字段的一个八位组；f=FCS字段的一个八位组

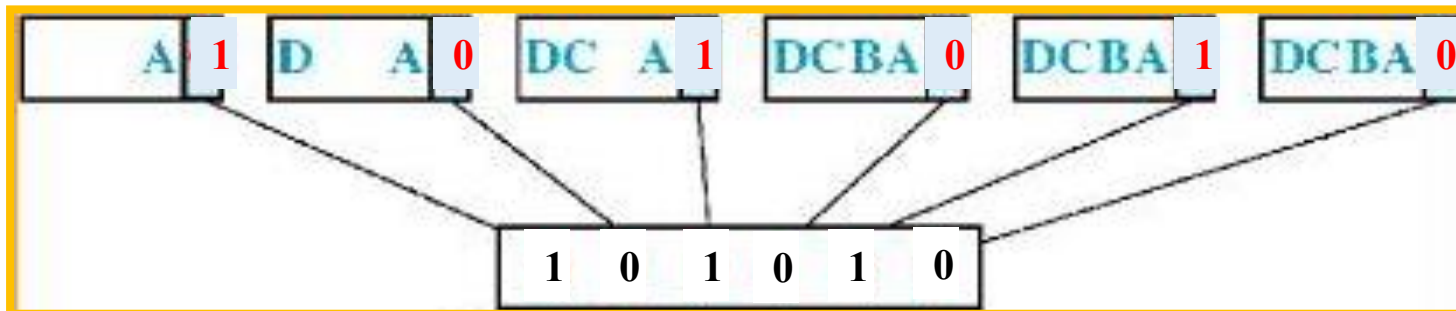
在TDM信道上使用数据链路控制：

- 两个数据源，都使用HDLC；
- 采用字符交错复用技术，混合后单个HDLC失去了自身的完整性；
- 但在接收方，HDLC又被组装起来。

# 组帧



- 无需链路控制协议管理整个TDM链路，但需要确保帧同步
- 组帧技术：增加数字组帧技术
  - 每个TDM帧附加一个控制比特；
  - 一帧到另一帧，形成可识别的比特模式；
  - 一个典型的交替比特模式 101010.....；
  - 同步搜索模式：接收器将接收到的帧中的比特位与预期的模式相比较，直到这个模式在多个帧里持续传输，建立帧同步



# 脉冲填充



TDM最困难的问题是**同步不同的数据源**：

- 每个数据源具有**独立的时钟**，时钟偏差会引起同步丢失；
- 输入数据率之间也可能**不存在简单的比例**关系。

## 脉冲填充：

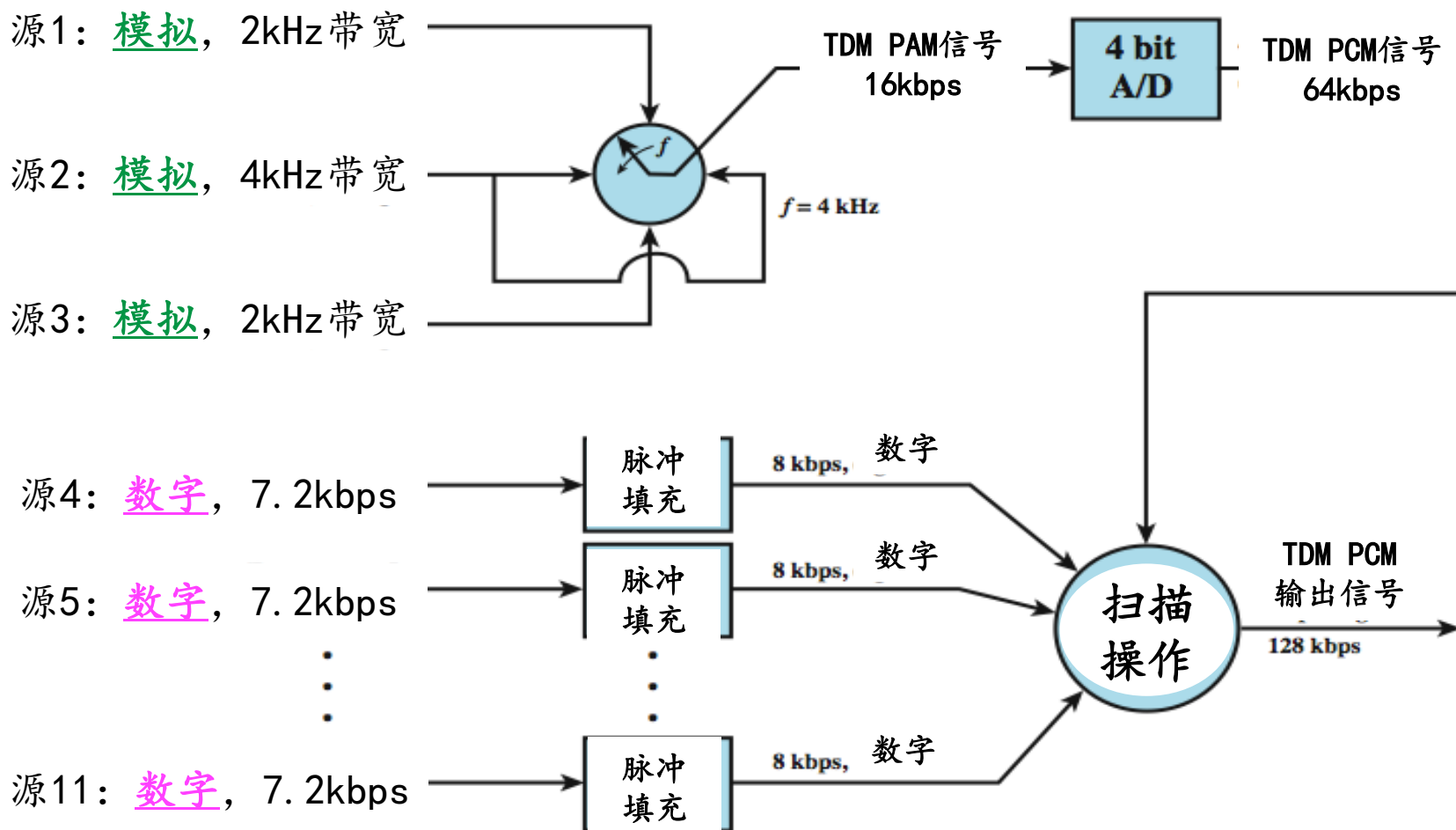
- 复用器**输出的数据率**（不包括组帧比特）**高于进入的数据率**之和；
- 在每个**输入信号**中**填充额外的比特或脉冲**，直到输入速度被提高到本地时钟信号速率；
- **填充脉冲**被插入到复用器帧格式的**固定位置**，在分用器删除。



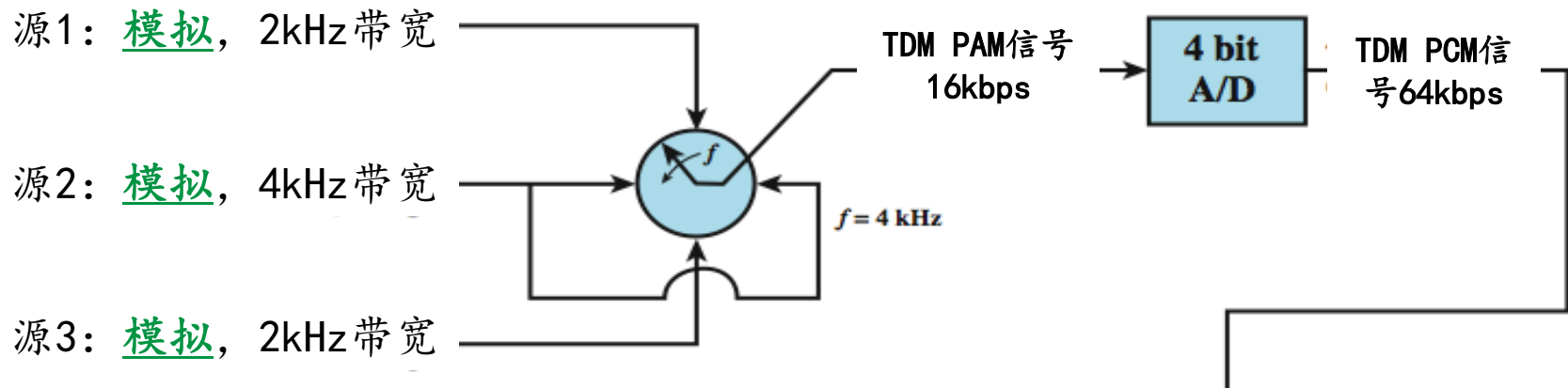
# TDM 综合示例



- 使用同步TDM技术复用数字和模拟的11路数据源



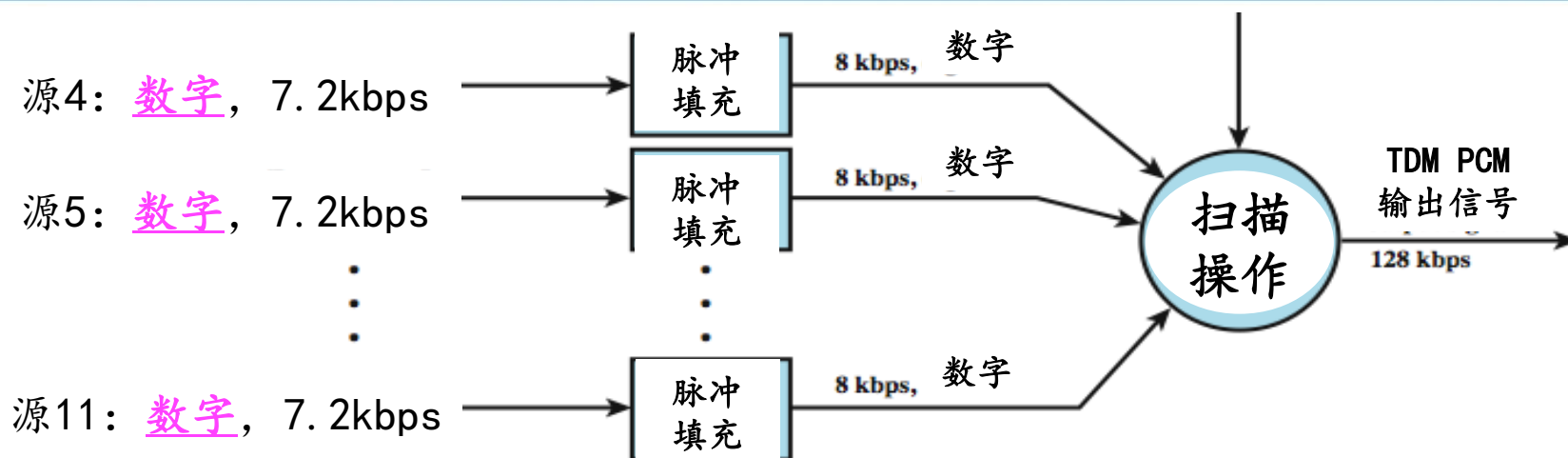
# TDM 综合示例



## 模拟数据源→数字信号:

- 采样速率是带宽的2倍: 源1和源3为每秒4000个样本, 源2为每秒8000个样本;
- 模拟样本PAM需要量化/数字化, 假设每个样本需要4比特表示;
- 扫描速率为4kHz, 每次从源1和源3中各取一个样本, 从源2中取两个样本;
- 4个样本经过交错形成16比特PCM样本;
- 每秒4000次扫描, 合成比特率为64kbps。

# TDM 综合示例



## 数字源→脉冲填充:

- 每个源采用脉冲填充, 将数据率提高到8kbps;
- 总数据率达到64kbps。

## 模拟源、数字源最终汇合:

- 64bps+64kbps→128kbps;
- 每秒扫描4000次, 每次32比特 (包括模拟源最终产生的16比特PCM和数字源最终形成16比特数据)

# 统计时分复用



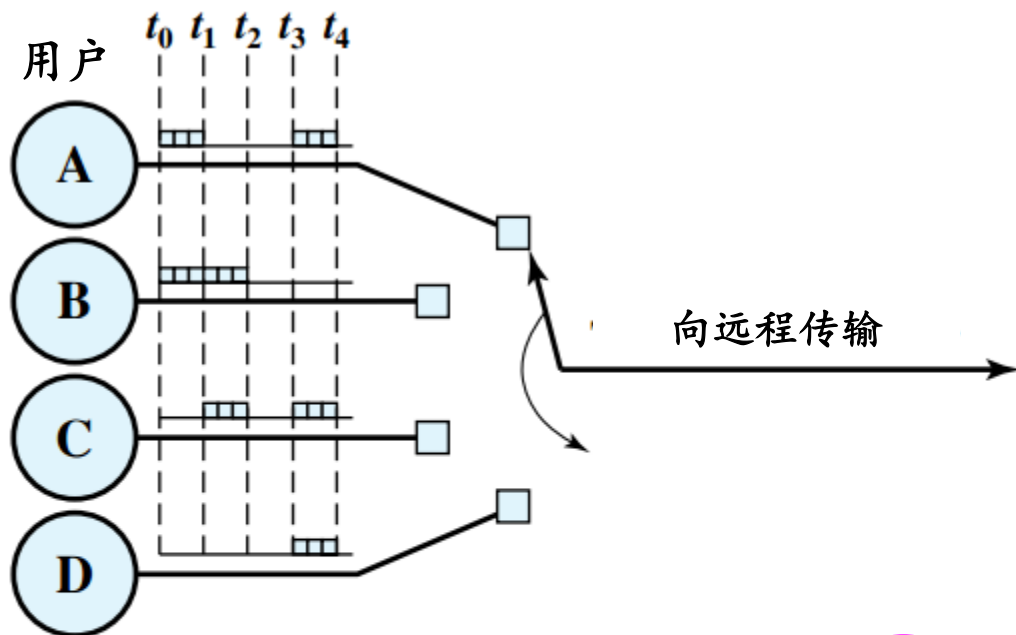
## 同步时分复用：

- 会发生多个时隙被浪费的情况

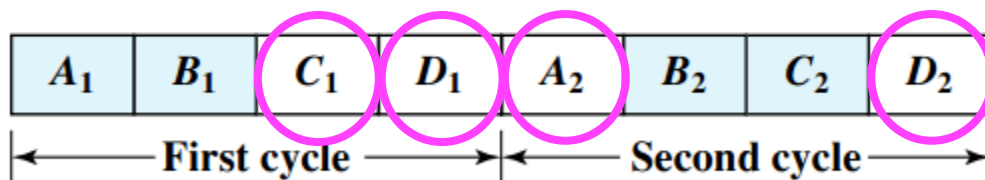
## 统计时分复用：

- 按需动态分配时隙；
- 复用器扫描输入缓存，搜集数据直到帧被填满，发送该帧；
- 分用器接收到一帧，并将时隙数据分发给合适的输出缓存。

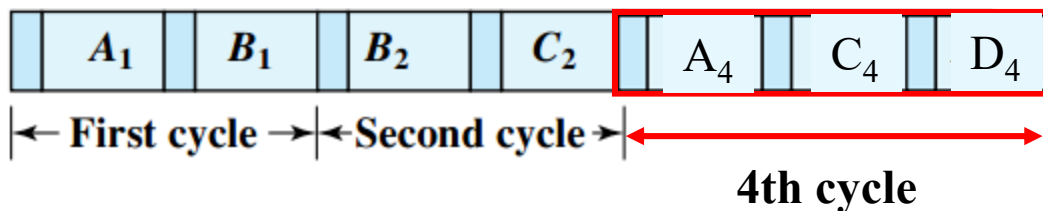
# 统计时分复用



同步时分复用



统计时分复用



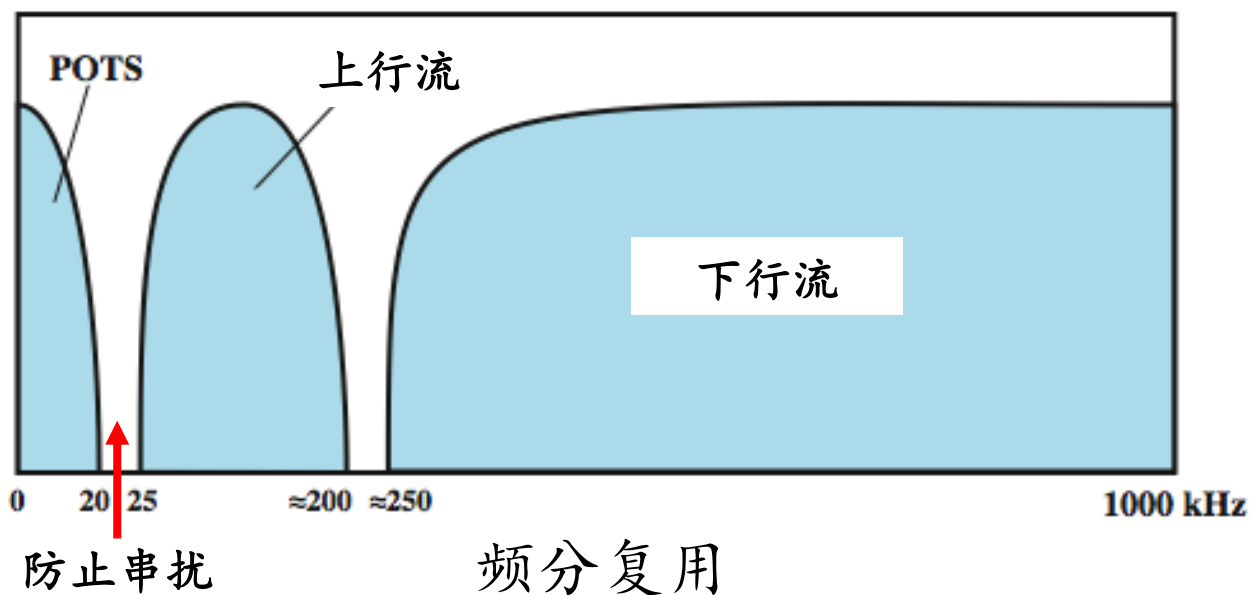
数据  
地址  
空  
时隙

# 非对称用户数字线路 ASDL



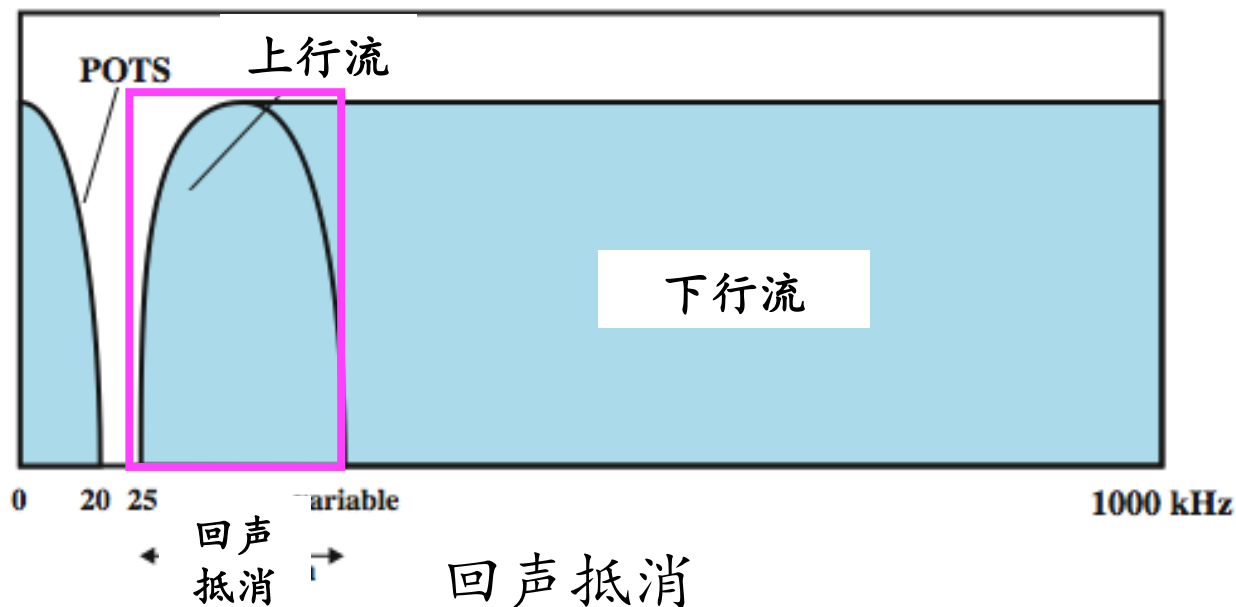
- **高速广域网面临的最大挑战**：用户和网络之间的链路（数字用户线路）
  - 无法为每个客户安置一条电缆；
  - 已有**双绞线**将住宅用户和商业用户与电话网络连接起来；
  - 通过普通电话线提供高速数字数据→ **非对称数字用户线路**。
- **非对称数字用户线路（ASDL）**
  - **非对称**：ASDL提供的下行流（电信公司到用户）容量高于上行流（用户到电信公司）容量；
  - ASDL采用**频分复用技术**充分利用了双绞线的1MHz容量。

# 非对称用户数字线路 ASDL



- 最低的25kHz为语音保留，称为POTS（传统电话业务）；
- 分配上行流和下行流时，采用频分复用或者回声抵消。
- 上行流/下行流内部使用频分复用。

# 非对称用户数字线路 ASDL



- 使用回声抵消：

- 频率越高，衰减越大。使用回声抵消，更多的下行流可以位于较好的频谱区；
  - 在改变上行流容量时具有更大的灵活性（重叠区扩展）。
- 
- 回声抵消：允许同一条传输线路上同时传输两个方向的信号，发送器必须从接收到的信号中减去自己的传输回声，已回复对方的信号。





# 第9章 广域网技术和协议

1. 电路交换
2. 分组交换
3. 异步传递方式

# 电路交换网络



- **电路交换**：两个站点之间有一条专用的通信通路。
  - 这条通路由网络结点之间的链路首位相接形成的链路序列；
  - 每条物理链路上都有该连接专用的逻辑信道。
- 电路交换的通信包括三个步骤：
  - **电路建立**：在能够发送信号之前，首先必须建立一条端到端（站点到站点）的电路。
  - **数据传送**：从源站点发出的信息经过网络传输到目的站点。
  - **电路断连**：经过一段时间的数据传输之后，连接被终止，通常是由这两个站点中的某个站点发起的动作。

# 电路交换的概念

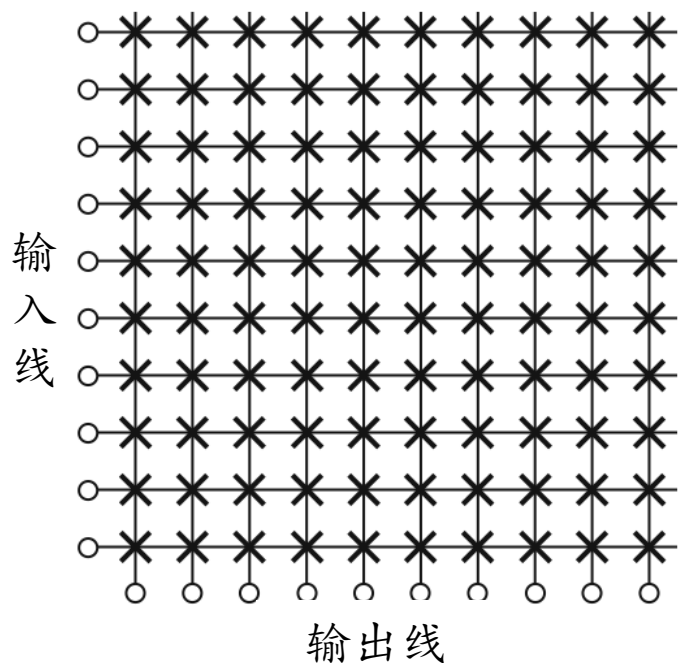


- 当网络的两个站点之间因所有通路都正在使用而无法建立连接时就发生了阻塞。
- **阻塞网络**：有可能出现阻塞情况的网络
- **无阻塞网络**：允许所有站点同时建立连接，所有可能的连接请求都能够被接受，只要对方空闲
- **应用需求**
  - **话音通信**：大多数电话通话持续时间并不长，将网络配置成阻塞网络是可接受的
  - **数据处理设备**：终端可能会持续连接数小时，要求使用无阻塞或接近无阻塞的设置。

# 空分交换



- **空分交换机**：信道通路和信号通路之间从**物理上被分隔开**（空间分隔）的交换机；
- **每次连接**：都需要建立一条经过该交换机的**物理通路**，该通路完全用于这两个断点之间的信号传送；
- **基本模块**：**金属交叉点**，或可以由控制单元闭合或断开的半导体门电路。

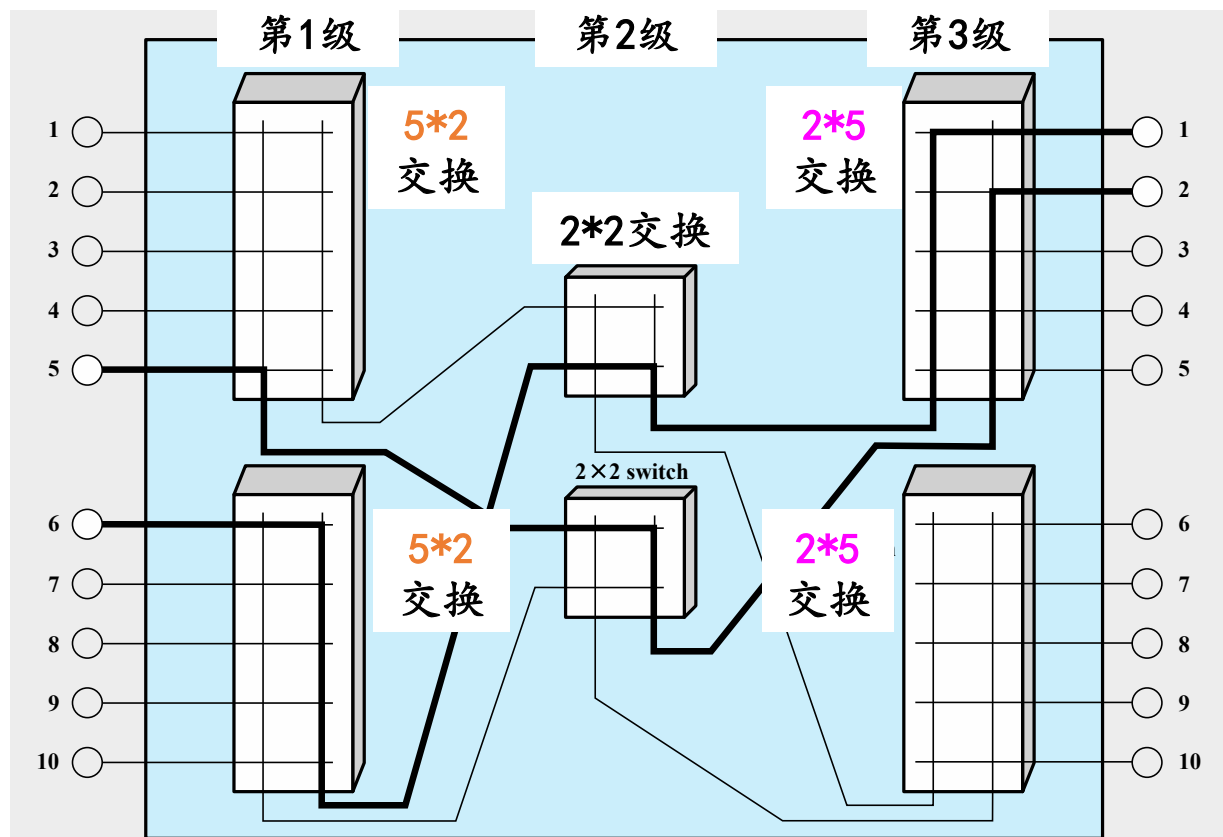


- 交叉点的数量以相连点数量的平方数上升；
- 一个交叉点的损坏使其对应线路所属的设备无法连接；
- 交叉点利用率很低。

# 空分交换

## • 多级交换

- 交叉点数量减少；
- 多条通路可通过该网络连接两个端点，从而提供可靠性。



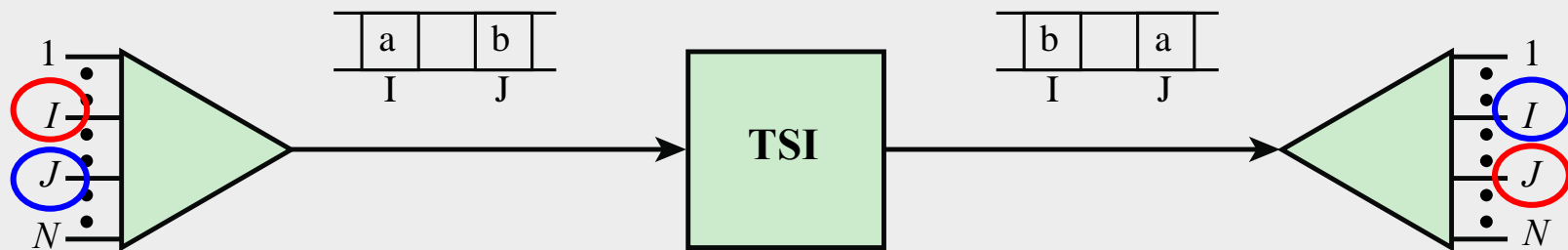
□ 更复杂的控制机制

□ 可能被阻塞

# 时分交换



- **时分交换**：将低速率的比特流分割成许多小块，然后与其他比特流一起共享速率较高的容量。
- **时隙交换 (TSI)**：是很多时分交换机的基础构建，通过对同步TDM时隙流进行操作，通过时隙对互换实现全双工。

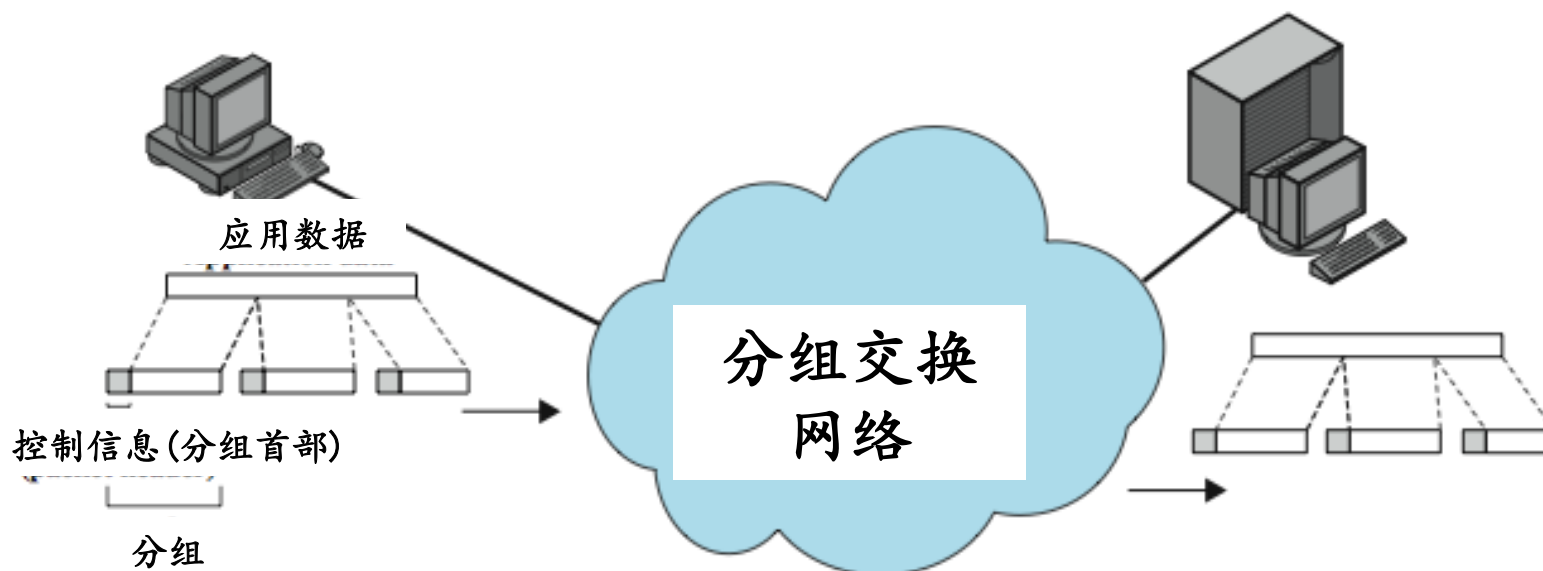


TSI 操作

# 分组交换



- 数据以**短分组**的形式传输；
- 分组长度上限值一般为**1000个八位组**（字节）；
- 更长的报文被分割成一个**分组序列**；
- 每个分组包含部分**用户数据**和**控制信息**；
- 在经过的每个结点上，分组被**接收**、**暂存**、**传递**。



# 分组交换



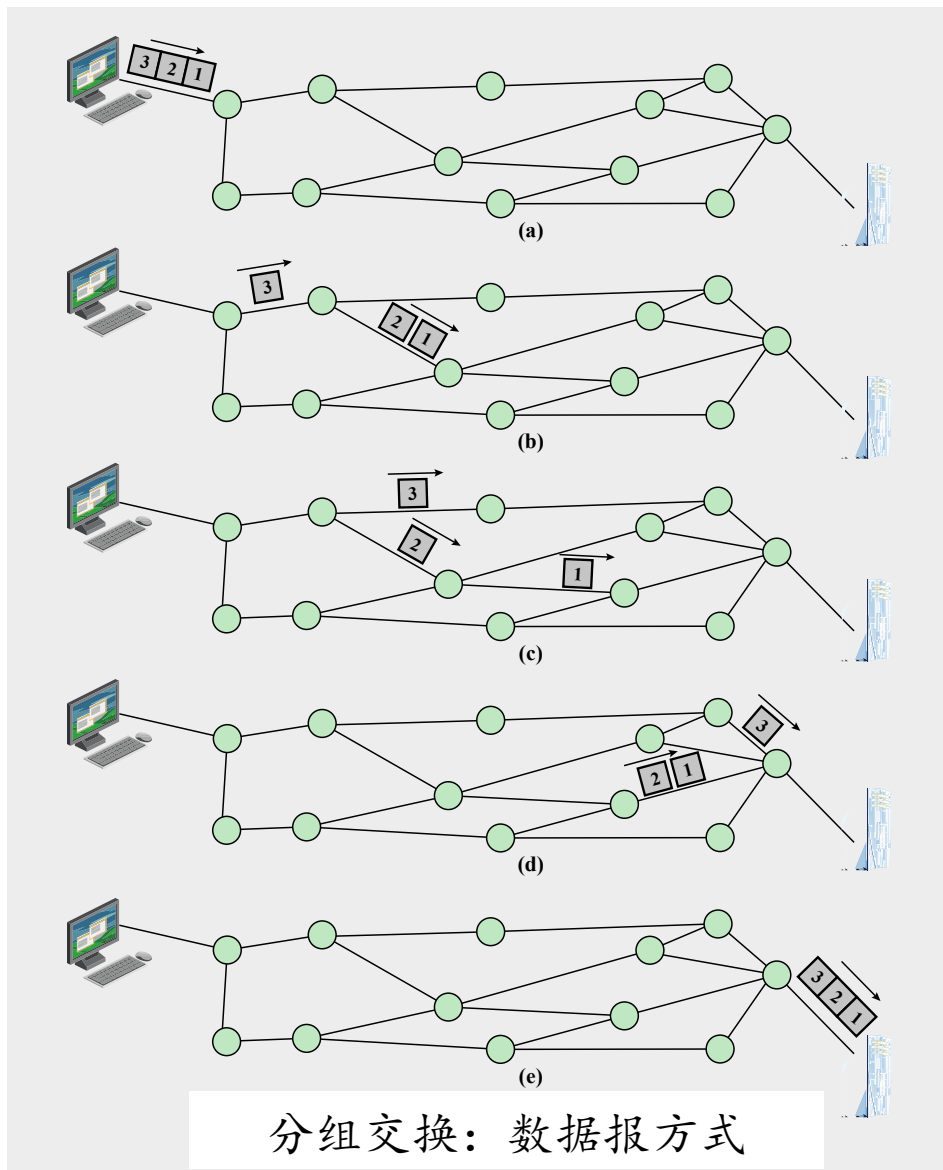
- 分组交换与电路交换相比，存在以下优点：
  - 线路的效率较高，单条结点到结点的链路在一段时间内可以被许多分组动态地共享；
  - 分组交换网络能够完成数据率之间的转换，不同数据率的站点可以互相交换分组；
  - 通信量拥挤时，电路交换中的某些呼叫会被阻塞，而分组交换仍能够被接受，只是传递的时延增长；
  - 能够使用优先级别，在一个结点有多个分组等候时，优先级较高的分组可以先被传输。



# 分组交换：数据报方式

## • 数据报方式

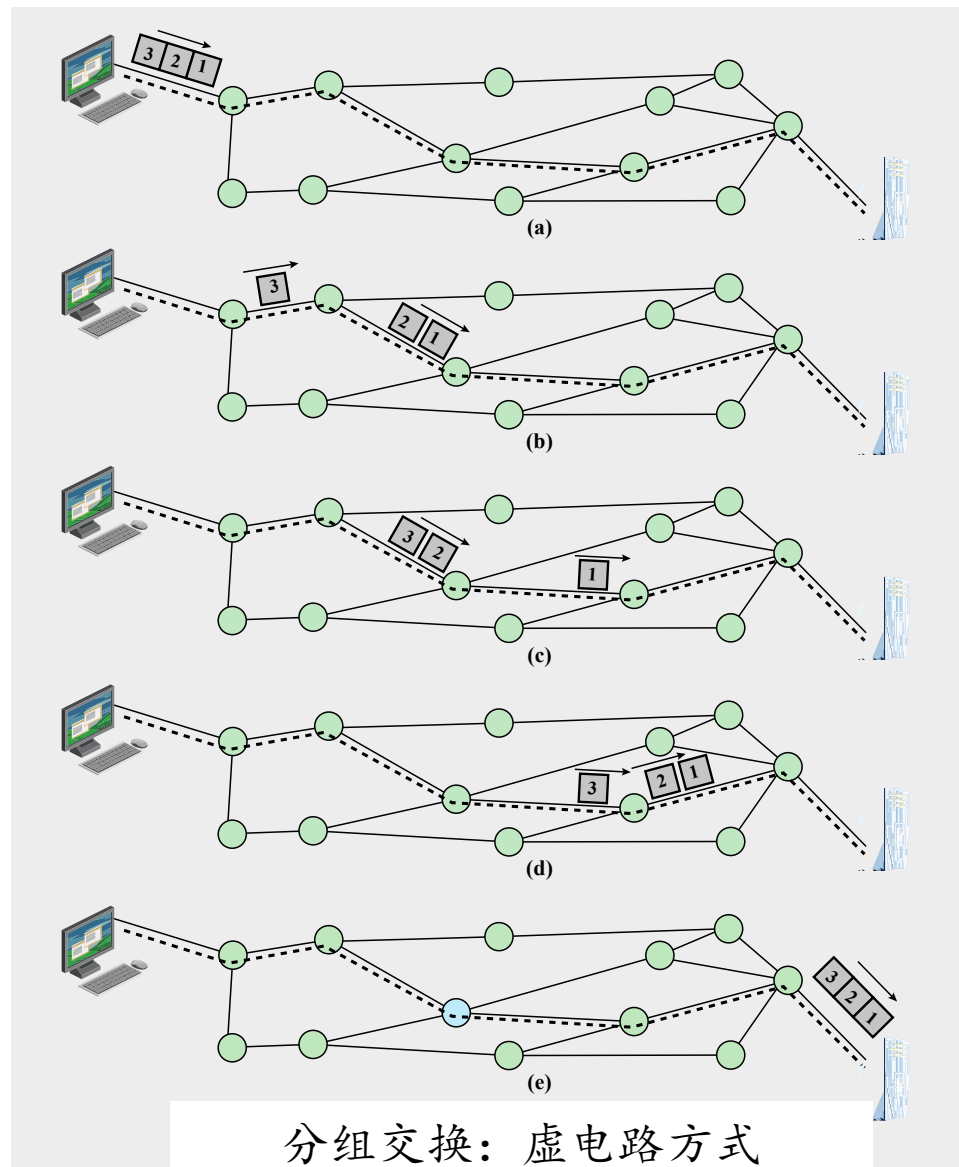
- 被独立对待的一个分组称为一个**数据报**。
- 每个分组视为独立的，和其他分组没有关系；
- 每个结点为分组选择下一个结点（考虑相邻结点的通信量信息、线路故障等）；
- 相同地址的分组可能沿着不同的路由、失序地到达出口结点；
- 出口结点恢复这些分组的顺序，再交付给终点。



# 分组交换：虚电路方式

## • 虚电路方式

- 在发送任何一个分组之前，**建立一条预定的路由**。
- 通信双方之间所有的分组都沿相同的路由穿过网络；
- 每个分组含有一个虚电路标识；
- 结点知道如何引导分组，不需要路由选择判断；
- 任何站点都具有到达其他任何一个站点的多条虚电路，也可以拥有到达多个站点的多条虚电路。
- 不是专用信道，线路可以共享。



# 分组交换

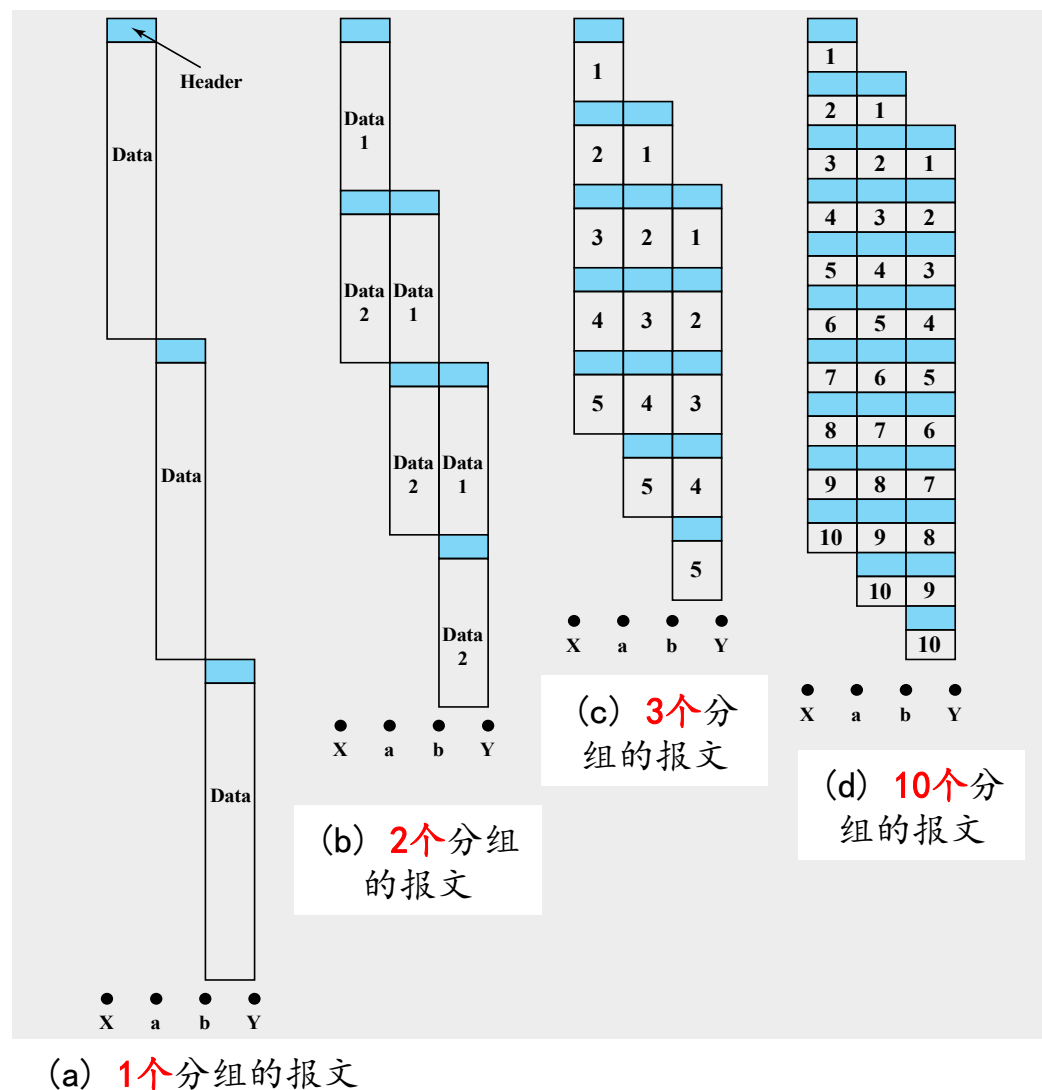


- **数据报方式**：传送一个或几个分组
  - 对于小分组更加便捷；
  - 更加灵活，结点可以绕过拥塞区域的路由；
  - 结点出现故障时，可以绕过该故障节点。
- **虚电路方式**：适合长时间交换数据
  - 可以使用按序传输；
  - 可以使用差错控制；
  - 传送速度更快。

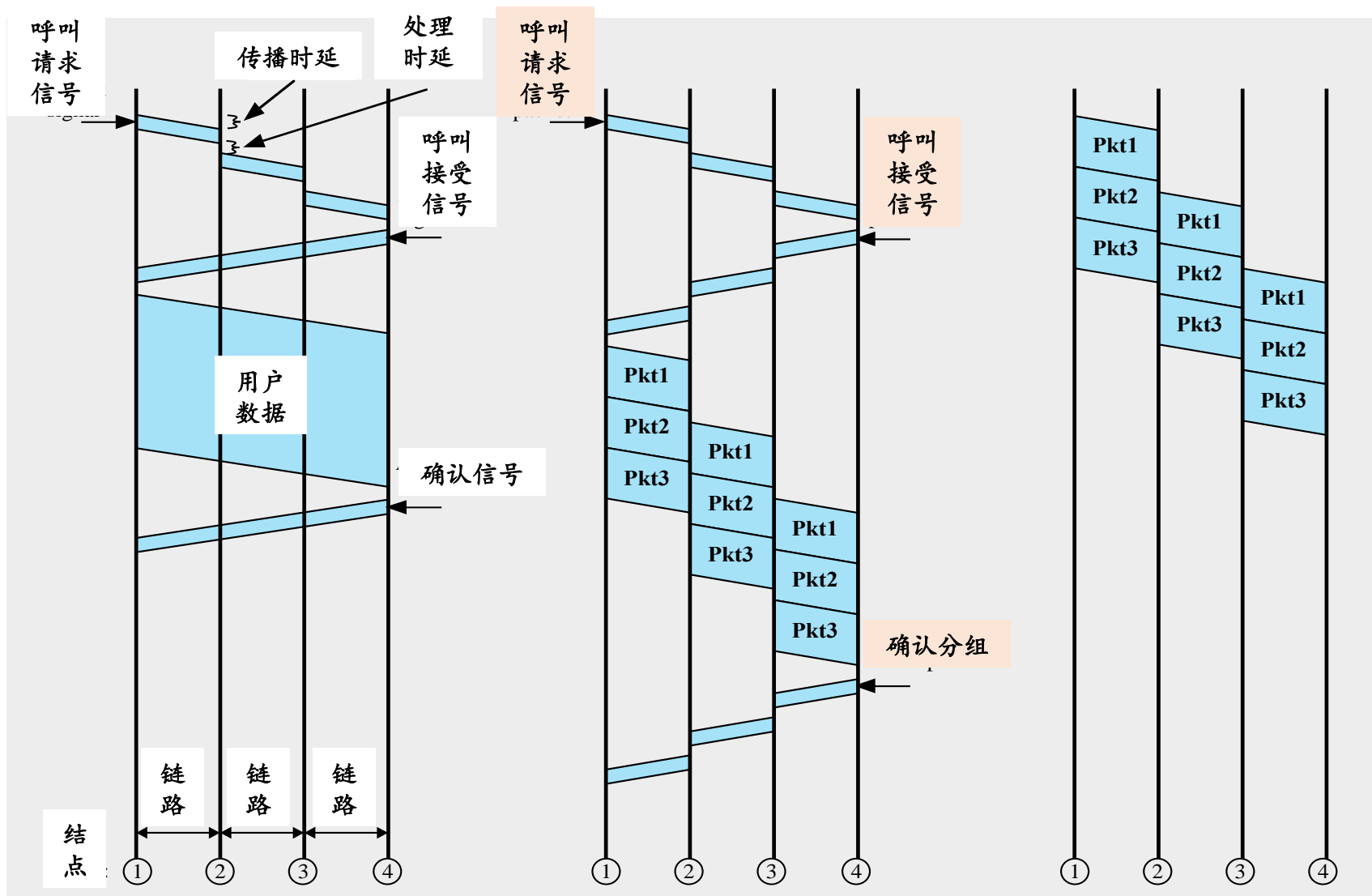
# 分组大小



- 假设数据以虚电路方式传输， $X \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow Y$ ：
- (a) 每个分组含40个八位组报文和3个八位组控制信息，即43个八位组；需要**129个八位组**的传输时间；
- (b) **减小分组**（20个八位组报文和3个八位组控制信息）；通过**并行**，总传输为**92个八位组**时间；
- (c) **减小分组**（8个八位组报文和3个八位组控制信息）；通过**并行**，总传输为**77个八位组**时间
- (d) **更小化分组可能导致时延增加**，由于存在固定首部。



# 电路交换与分组交换的对比



电路交换

虚电路分组交换

数据报分组交换

# 异步传递方式 ATM

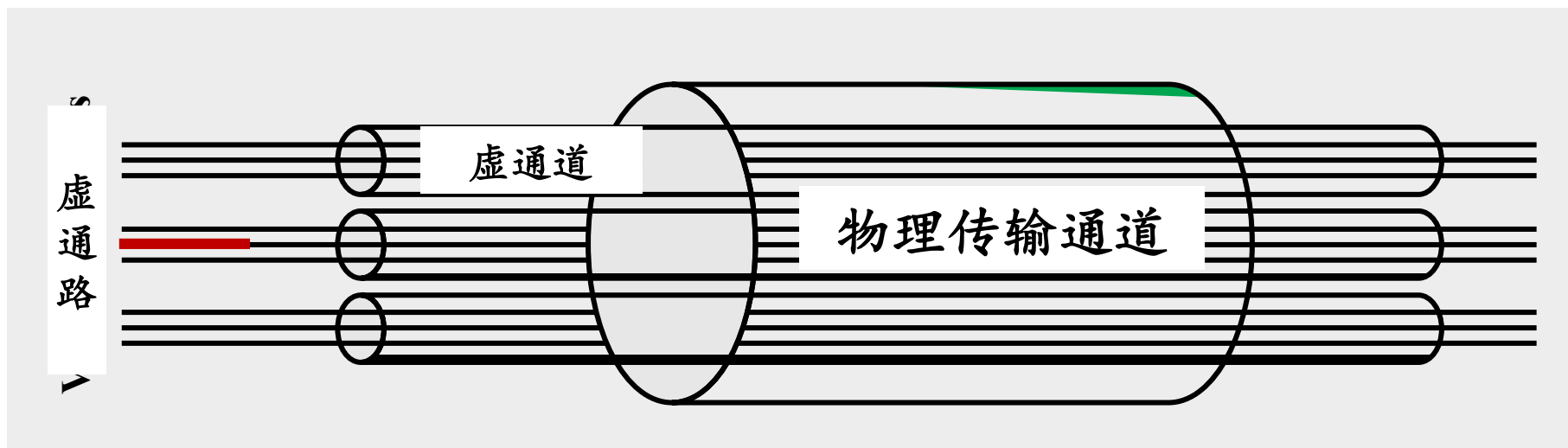


- **异步传递方式**是一种交换和复用技术，它采用小的，固定长度的分组，称为**信元**。
- **固定长度分组**：时延变化小，保证交换和复用功能的高效实现。
- **信元长度小**：打包时延小，支持对时延无法容忍的交互化音服务。
- **面向连接的分组交换技术**：提供类似电路交换网络的性能，有提供分组交换网络的灵活性和效率。

# ATM 逻辑连接



- ATM的逻辑连接称为**虚通路连接（VCC）**，类似于虚电路，是ATM网络中最基本的交换单元。
- **VCC**经由网络在两个端用户之间建立，这条连接传输速率可变、全双工、长度固定的信元流。
- 一个**虚通道连接（VPC）**是一群具有相同断点的VCC。



# ATM 逻辑连接

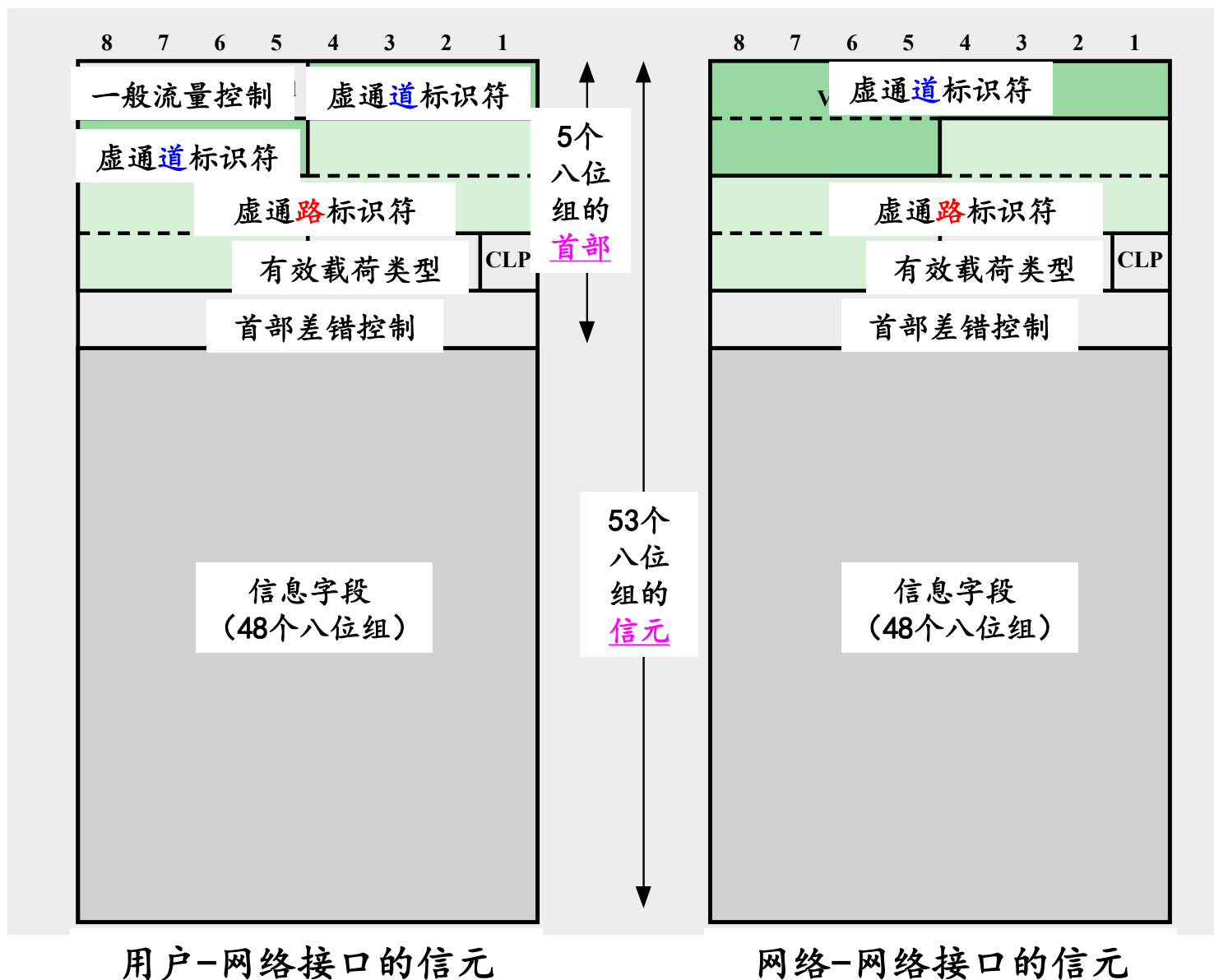


- 虚通道的好处

- 简化了网络体系结构：网络运输功能被划分为与单逻辑连接相关的功能部分，以及与逻辑连接组相关的功能部分。
- 提高网络的性能与可靠性：网络与更少且集中的实体打交道。
- 减少处理过程并缩短连接建立时间：在现有的虚通道上增加一条新的虚通路只需要很少的处理时间。
- 增强的网络服务：虚通道对端用户可见，用户可以定义闭合的用户群。



# ATM 信元





# 第10章 蜂窝无线网络

1. 蜂窝网络的概念
2. 四代蜂窝网络
3. LTE-Advanced

# 蜂窝网络的概念



- 蜂窝网络构成：

- 使用多个低功率发送器，数量级在100W以下；
- 发送器所能达到的覆盖范围很小；
- 将一个区域划分为很多蜂窝，各个蜂窝由自己的天线提供服务。

- 蜂窝：

- 每个蜂窝分配一个频带；
- 有一个基站提供服务，基站由发送器、接收器和控制单元组成；
- 相邻的蜂窝指派的频率各不相同，避免干扰或串音；
- 两个蜂窝之间距离足够远，可以使用相同频带。

# 蜂窝的形状

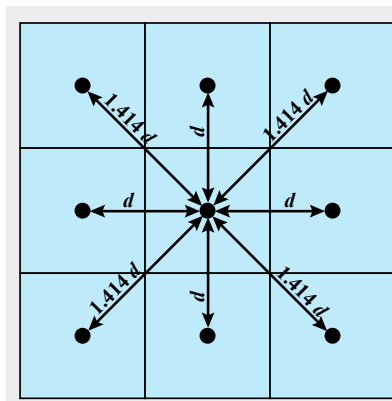


- 为了方便在不同蜂窝中切换，希望所有相邻蜂窝之间是等距

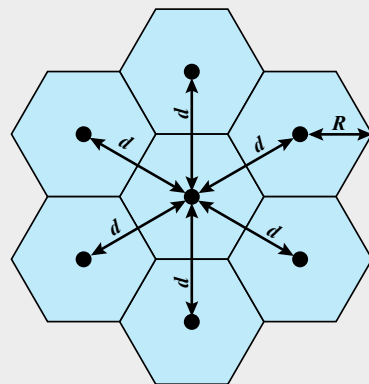
➤ **正方形**：边长为 $d$ 时，与4个相邻蜂窝的距离为 $d$ ，另外4个为 $\sqrt{2}d$



➤ **六边形**：边长为 $R$ 时，到相邻蜂窝的距离均为 $d = \sqrt{3}R$



正方形模式



六边形模式

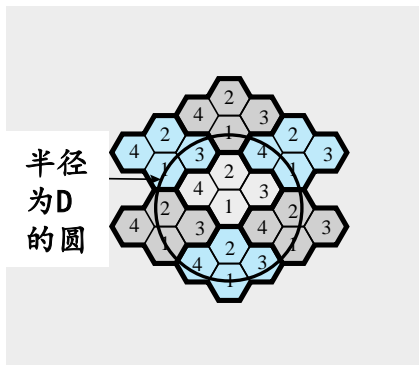
- 在**实际使用**中，并不是精确的六边形模式：

➤ **地形**的限制；

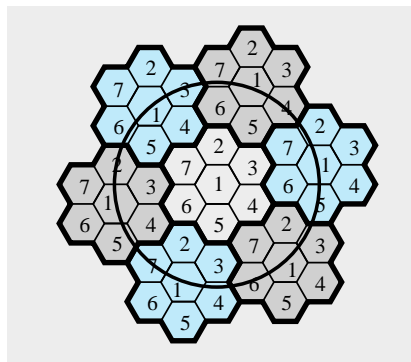
➤ 本地信号**传播条件**限制；

➤ 实际**天线位置**选择的限制。

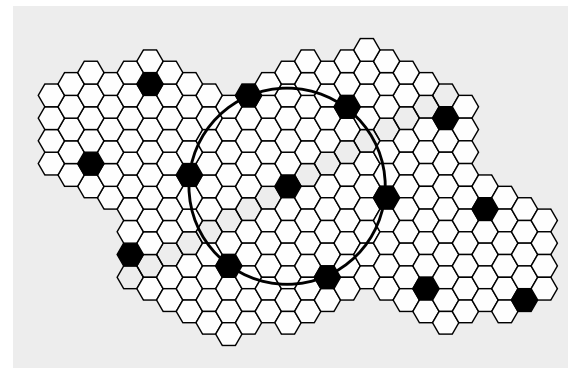
# 频率重用



(a) **N=4**的频率重用模式



(b) **N=7**的频率重用模式



(c) **N=19**的频率重用模式

- 该模式由**N**个蜂窝组成，每个蜂窝指派的频率数量相同，则每个蜂窝可以有 **$K/N$** 个频率，其中**K**是分配给系统的频率的总数。

- **D**=使用相同频率的蜂窝(称为同波道)中心之间的最小距离;
- **R**=蜂窝半径;
- **d**=相邻蜂窝的中心之间的距离 ( $d = \sqrt{3}R$ )
- **N**=重复模式(在该模式中每个蜂窝使用的频带都是唯一的)中的蜂窝数，称为**重用系数**。

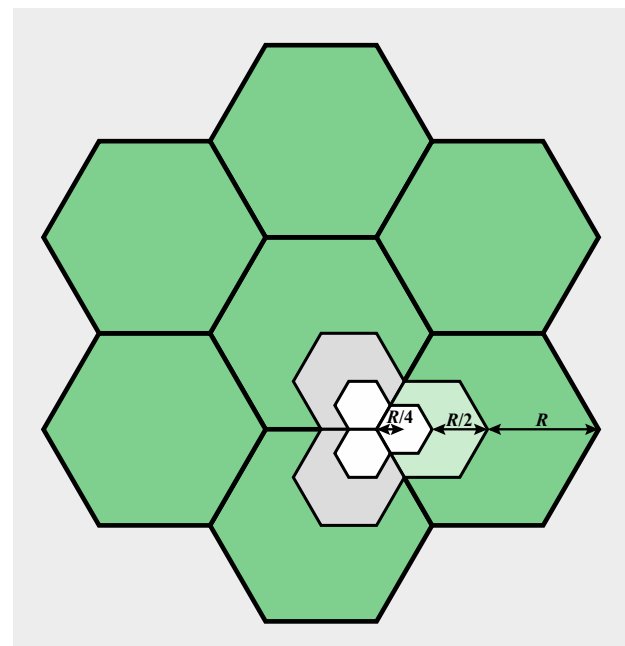
- 在**六边形的蜂窝模式**中:

- $N = I^2 + J^2 + (I \times J), I, J = 0, 1, 2, 3, \dots \rightarrow N=1, 3, 4, 7, 9, 12, \dots$
- $\frac{D}{R} = \sqrt{3N}$ , 也可表示为  $\frac{D}{d} = \sqrt{N}$

# 增大容量



- 用户和通信量的增长，导致没有足够的频率分配给蜂窝：
- 添加新信道：通过添加新的信道来发展和扩张系统
- 频率借用：拥塞的蜂窝从相邻蜂窝获取一些频率，也可以动态地指派频率给各个蜂窝。
- 蜂窝分裂：在使用率的地区把一个蜂窝分类成几个小蜂窝，以提供更大的容量。
- 蜂窝扇区化：蜂窝被划分成若干个楔形扇区，每个扇区有自己的一组新到，通常每个蜂窝分成3~6个扇区。
- 微蜂窝：蜂窝尺寸减少，伴随着基站或移动单元的辐射功率水平降低。在城市街道、高速公路旁、公共建筑物物理，微蜂窝作用不可低估。



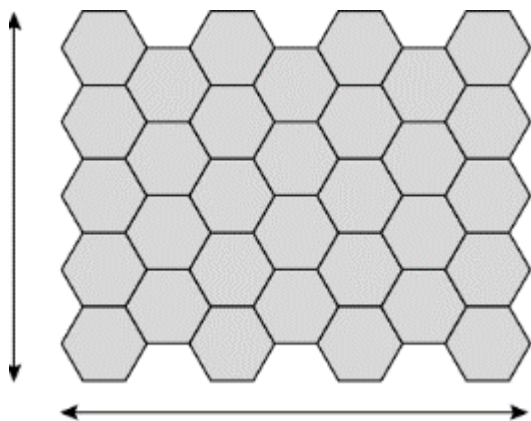
折减系数 $F=2$ 的蜂窝分裂

# 频率重用举例

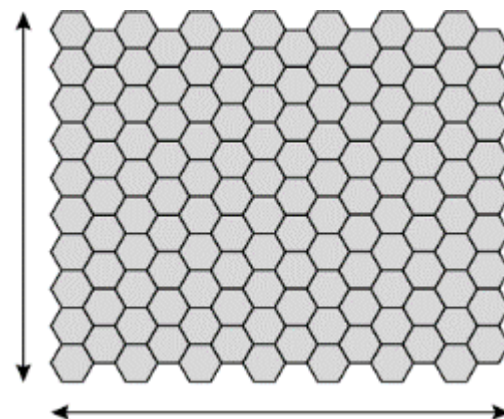


**例子10.1**：假设有一个32蜂窝的系统。每个蜂窝的半径为1.6km，32个蜂窝的频带总量可支持336个业务频道，频率重用系数N=7。

- 它们覆盖的地理面积是多少？每个蜂窝有多少信道？同时能够处理的呼叫总量是多少？
- 如果蜂窝半径为0.8km，共有128个蜂窝，重复上述计算。



- 每个蜂窝：半径1.6m，面积 $1.5R^2\sqrt{3} = 6.65km^2$
- 覆盖面积： $6.65 \times 32 = 213 km^2$
- 每个蜂窝信道数： $336/7 = 48$
- 总信道容量： $48 \times 32 = 1536$

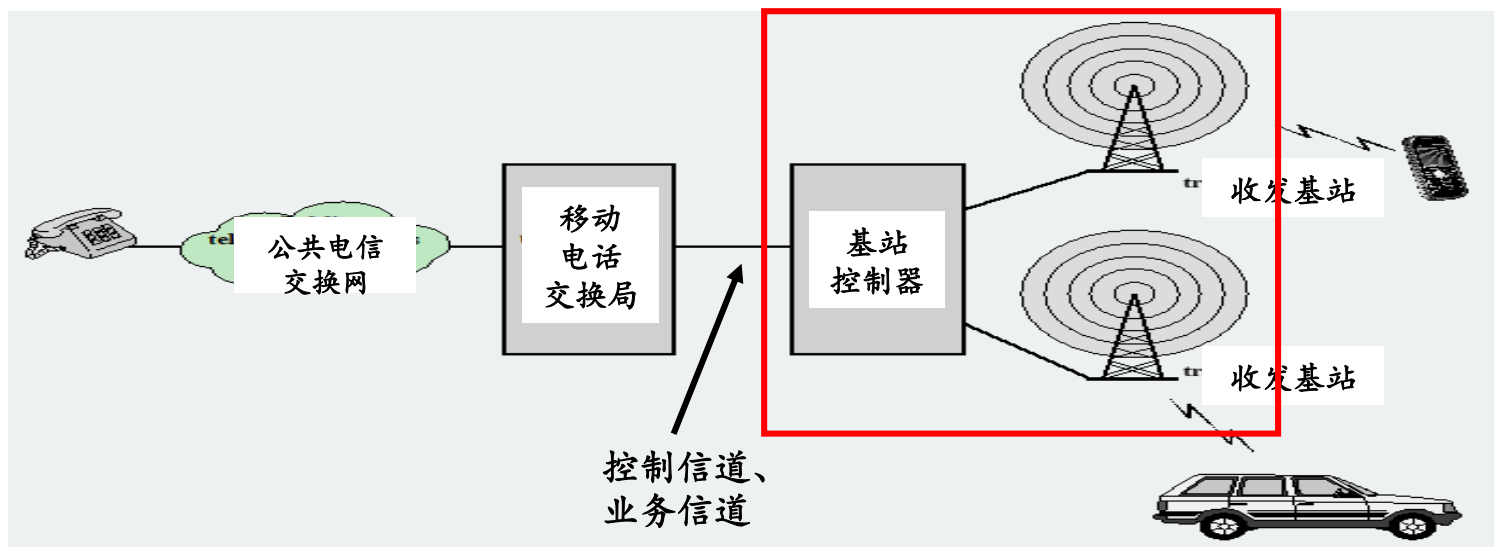


- 每个蜂窝：半径0.8m，面积 $1.5R^2\sqrt{3} = 1.16km^2$
- 覆盖面积： $1.16 \times 128 = 213 km^2$
- 每个蜂窝信道数： $336/7 = 48$
- 总信道容量： $48 \times 128 = 6144$

# 蜂窝系统的操作

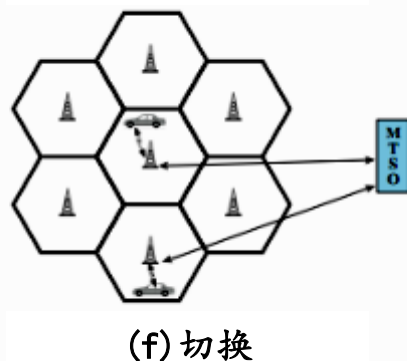
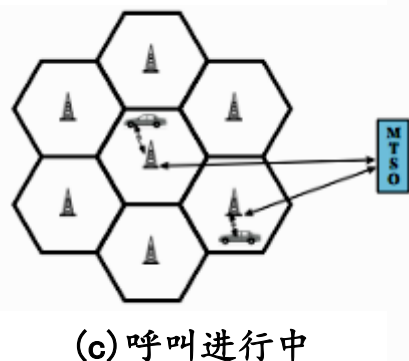
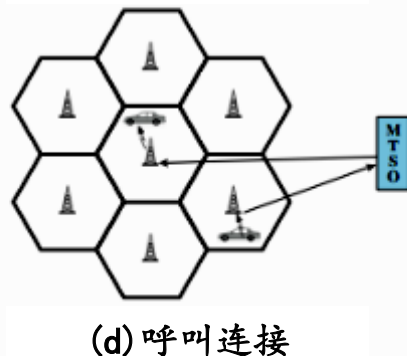
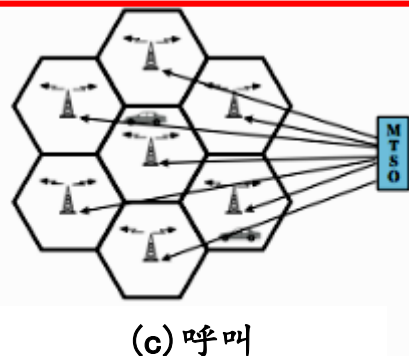
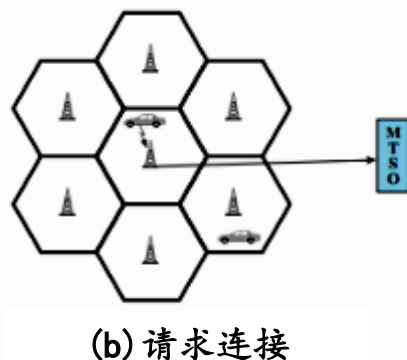
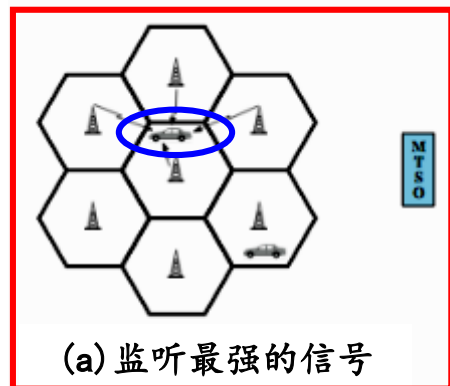
- 蜂窝系统的主要构成元素：

- **基站**：位于每个蜂窝的中心位置，包括一根天线、一个控制器和数个用来在指派给该蜂窝的信道上进行通信的收发器。
  - **控制器**用于处理移动单元和网络其他部分之间的呼叫过程。
- **移动电话交换局 (MTSO)**：可服务于多个基站，其与基站的链路可以是有线的也可以是无线的。
  - **MTSO连接移动单元**之间的呼叫，同时还连接到公用电话或电信网络上。
  - **MTSO为每个蜂窝指派话音信号**，执行切换处理。



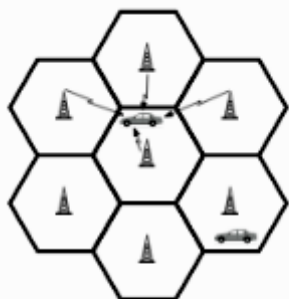


# 移动蜂窝呼叫过程



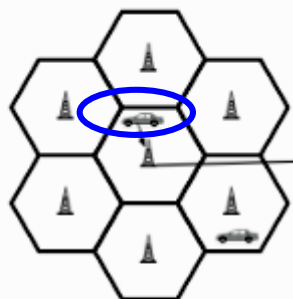
- 移动单元初始化：
  - 不同频率的蜂窝分别在不同的信道上进行广播；
  - 移动单元选择最强的建立信道并监听该信道；
  - 移动单元和控制该蜂窝的MTSO之间执行握手动作；
  - 如果移动设备进入新蜂窝，就会选择新的基站。

# 移动蜂窝呼叫过程



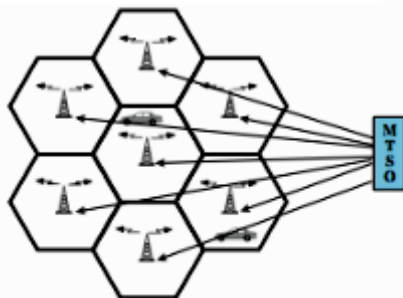
(a) 监听最强的信号

MTSO



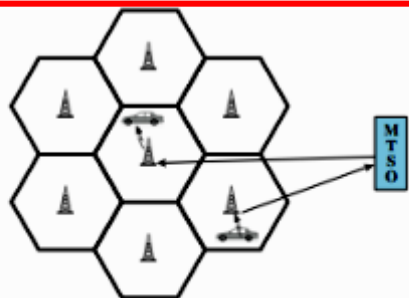
(b) 请求连接

MTSO



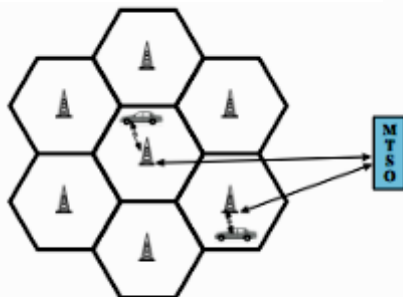
(c) 呼叫

MTSO



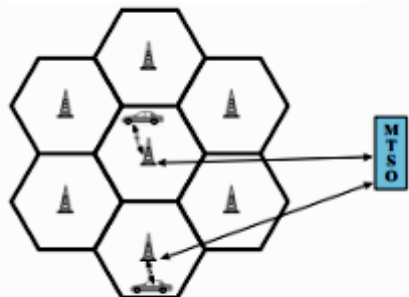
(d) 呼叫连接

MTSO



(e) 呼叫进行中

MTSO



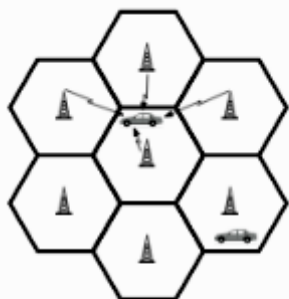
(f) 切换

MTSO

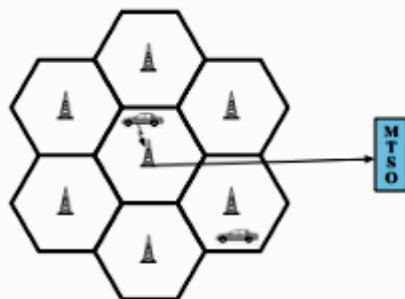
- 移动台发起的呼叫：

- 移动单元在已选的建立信道上发送被叫单元号码来发起呼叫；

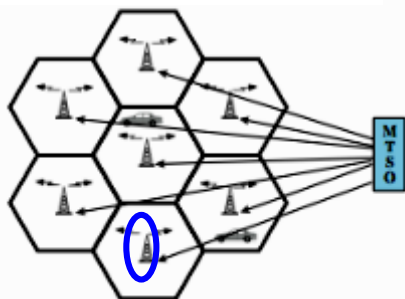
# 移动蜂窝呼叫过程



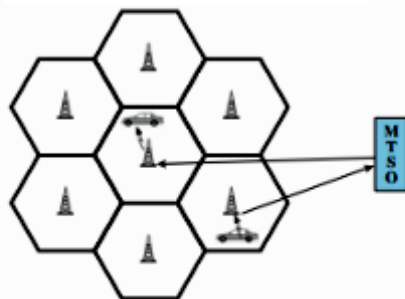
(a) 监听最强的信号



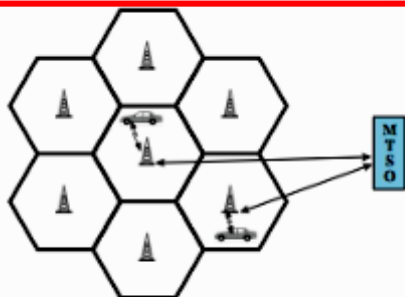
(b) 请求连接



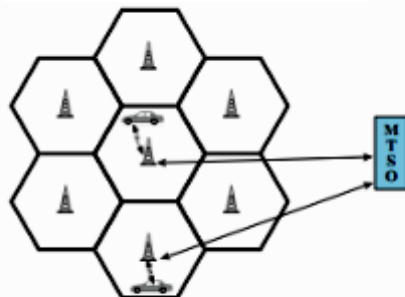
(c) 呼叫



(d) 呼叫连接



(e) 呼叫进行中

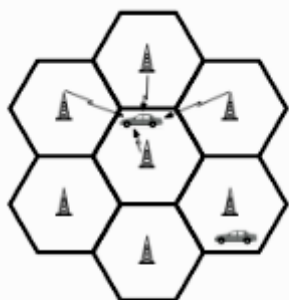


(f) 切换

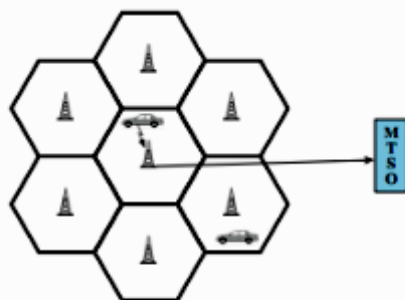
- 寻呼:

- **MTSO**根据被叫的移动号码向某些基站**发送寻呼消息**;
- 每个**基站**在指派给自己的建立信道上**发送寻呼信号**。

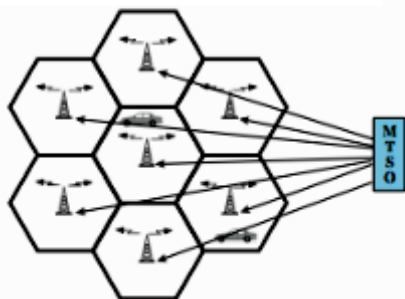
# 移动蜂窝呼叫过程



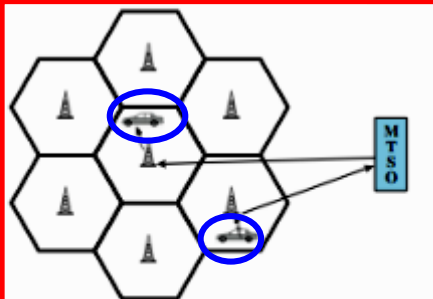
(a) 监听最强的信号



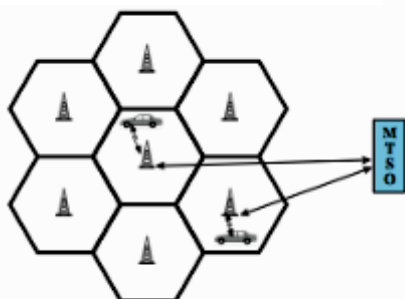
(b) 请求连接



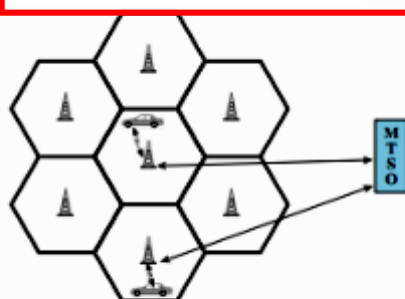
(c) 呼叫



(d) 呼叫连接



(e) 呼叫进行中

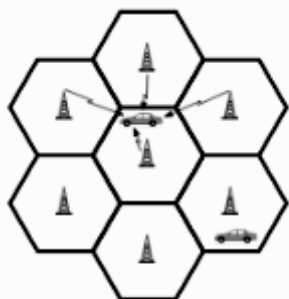


(f) 切换

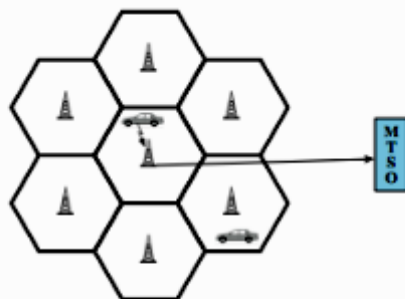
## • 呼叫接收:

- 被叫移动单元在监听着的建立信道中识别出自己的号码，并向该基站发出响应；
- 基站向MTSO发出响应；
- MTSO在呼叫基站和被叫基站之间建立一条电路；
- MTSO在这两个基站蜂窝内选择一条可用的业务信道，并向各基站发送出通知；
- 各基站向自己的移动单元发出通知；
- 两个移动单元分别到指派给自己的信道上接收信号。

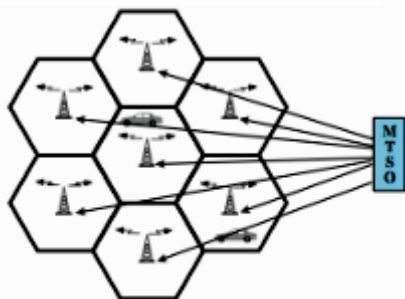
# 移动蜂窝呼叫过程



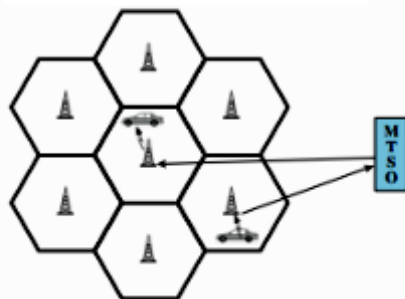
(a) 监听最强的信号



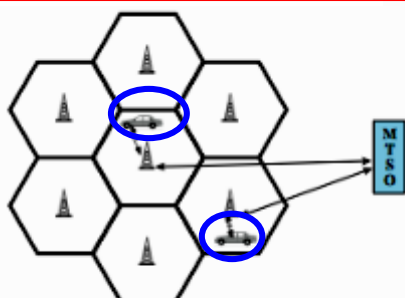
(b) 请求连接



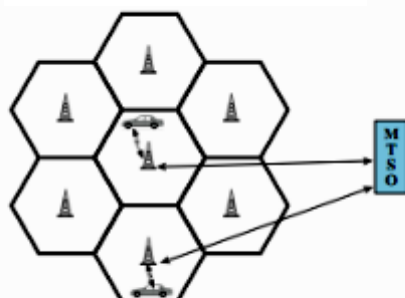
(c) 呼叫



(d) 呼叫连接



(e) 呼叫进行中

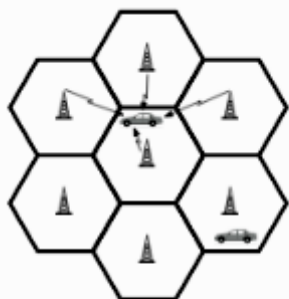


(f) 切换

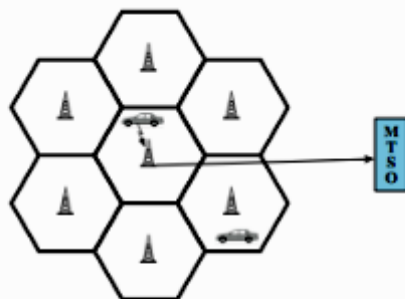
- 呼叫进行中:

- 在连接期间，两个移动单元通过它们各自的基站和该MTSO相互交换语音或数据信号。

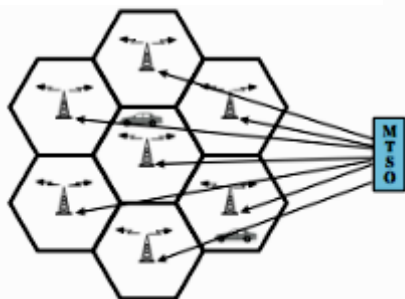
# 移动蜂窝呼叫过程



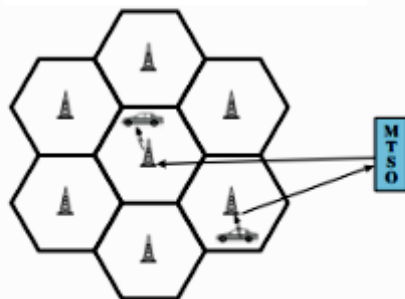
(a) 监听最强的信号



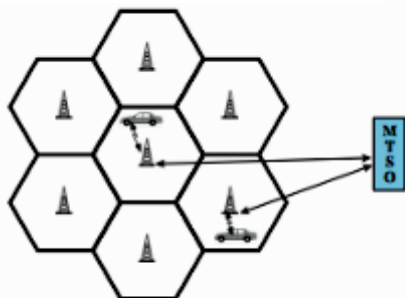
(b) 请求连接



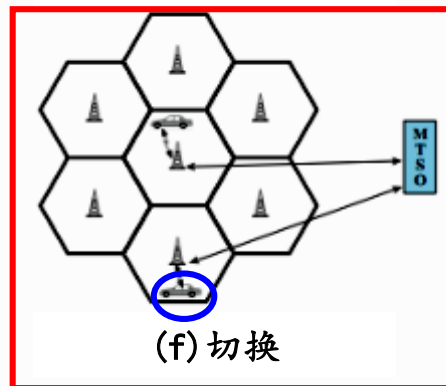
(c) 呼叫



(d) 呼叫连接



(e) 呼叫进行中



(f) 切换

- 切换:

- 在连接期间，移动单元从某个蜂窝的范围而**进入另一个蜂窝**的范围；
- **业务信道切换**到指派给新蜂窝的基站的业务信道上；
- 系统在进行切换时既**不会中断**呼叫，也**不会警告**用户。

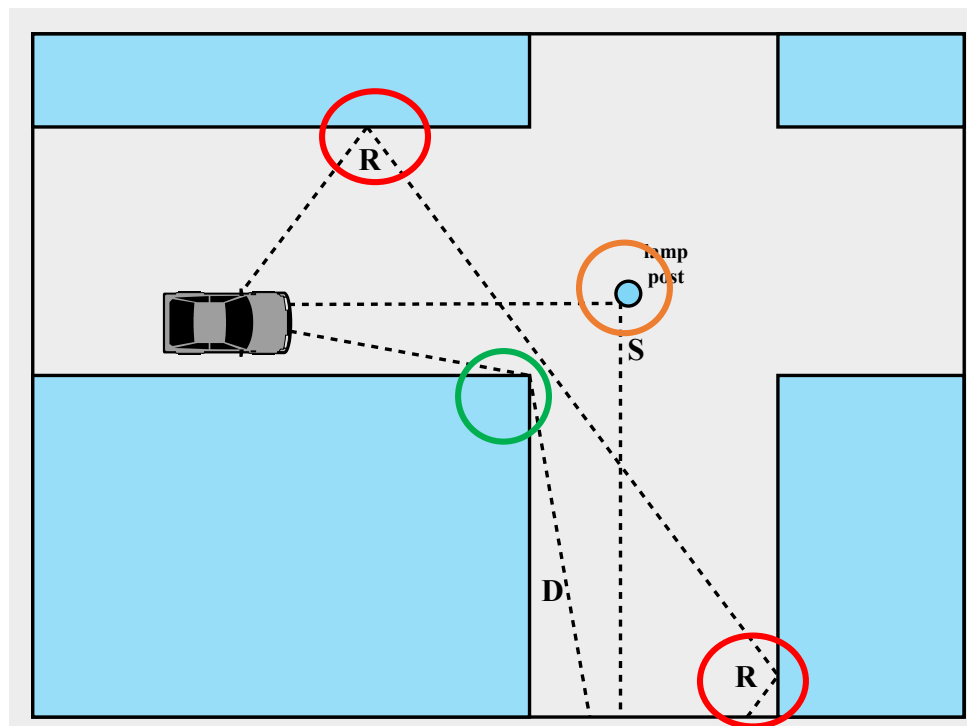
# 移动环境中的衰落



- **衰落**指的是由于传输媒体或路径中存在变化而是接收到的信号功率可能随时间而变化。

## ➤ 多径传播

- **反射**：发生在电磁信号遇到比信号波长更大的物体表面时。
- **衍射**：出现在比无线电波波长更大的无法穿透的物体边缘处。
- **散射**：障碍物的大小与信号波长接近或小于该信号波长。

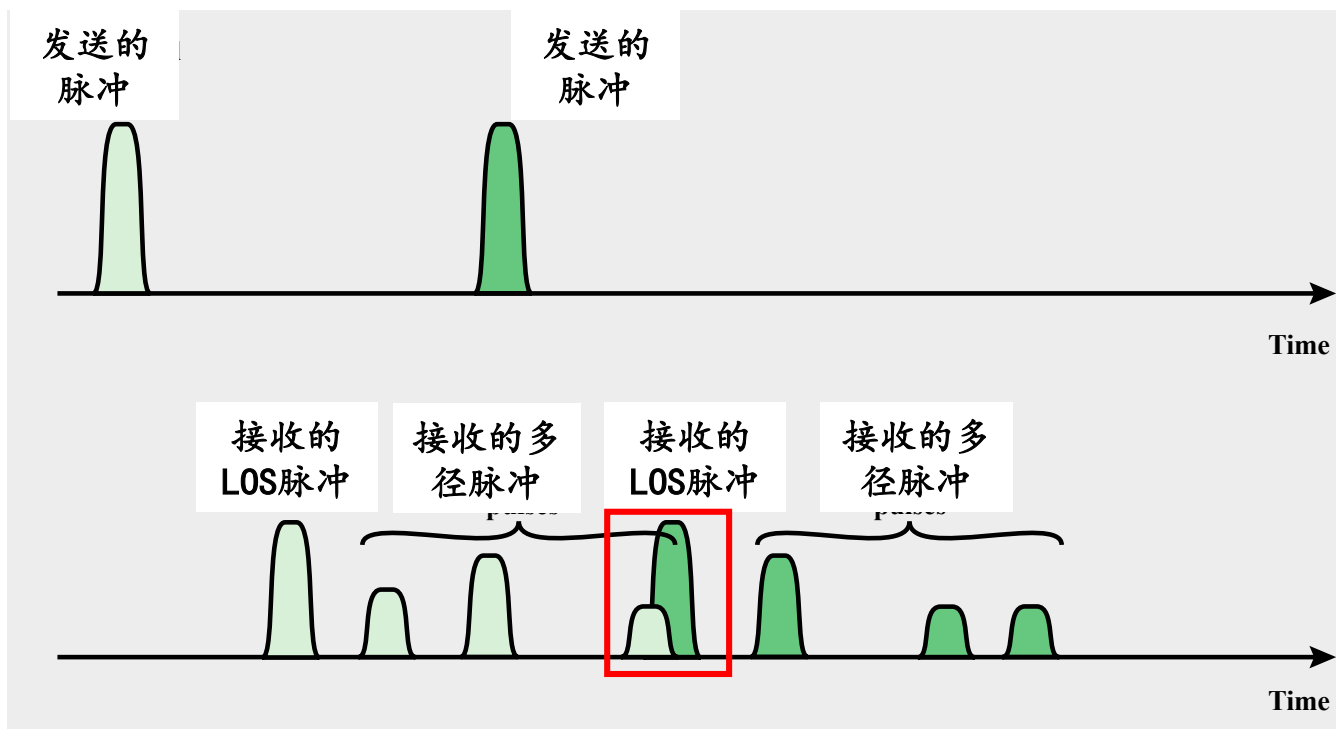


R: 反射, S: 散射, D: 衍射

# 多径传播效应



- 多径传播效应：
  - 产生多个相位不同的**信号副本**：如果这些相位叠加后相互抵消，信噪比就会下降，是接收器端在检测信号时更加困难。
  - **码间干扰**：脉冲的一个或多个延迟副本可能会与下一个比特的主脉冲同时到达，从而加大提取数据比特的困难。





# 衰落类型

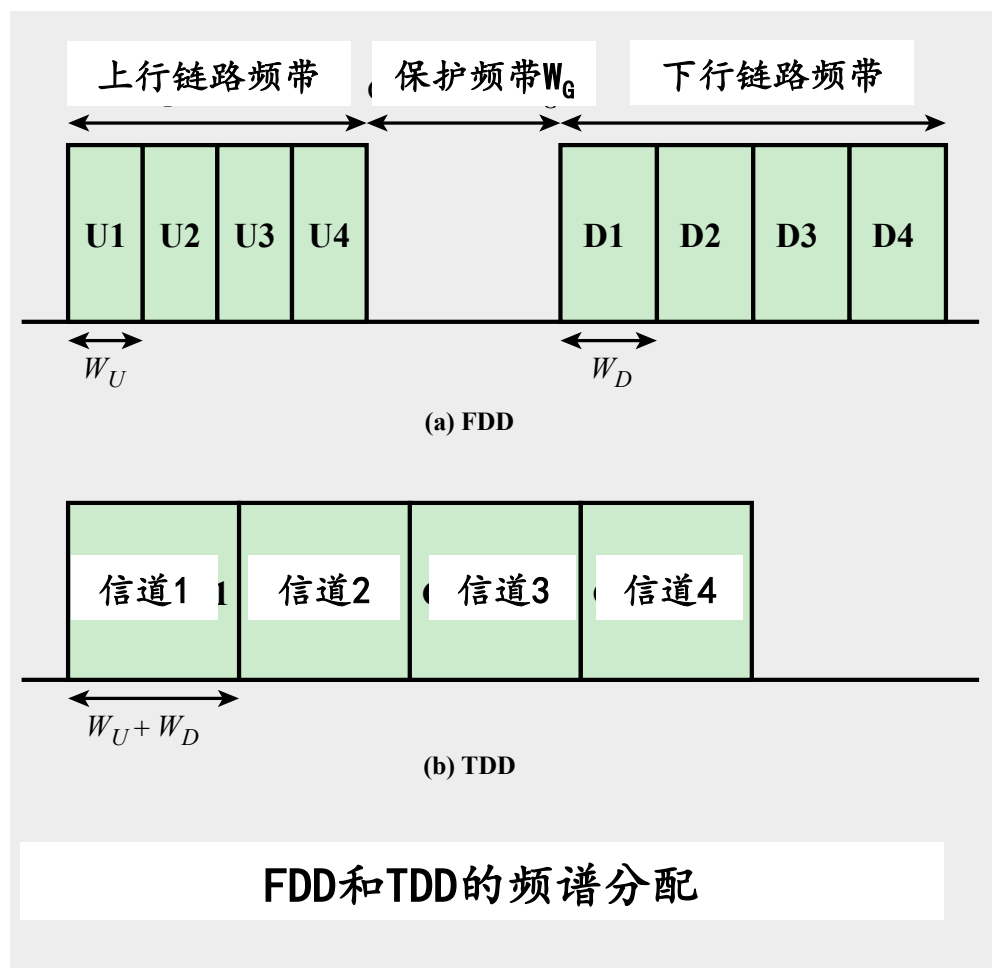


- **快衰落**：在超过半个波长的距离上，信号的强度会迅速发生变化。即使经过短距离，振幅的变化可能高达20-30dB。这种类型的迅速衰落变化现象称为快衰落。
- **慢衰落**：经过较长一段距离后，接收功率除了出现快速波动之外，接收到的平均功率水平也会变化，称为慢衰落。
- **平坦衰落**：或称非选择性衰落，接收信号的所有频率成分的波动是同时的且成相同比例的。
- **选择性衰落**：对一个无线电信号的不同频谱成分的影响是不同的。

# LTE-Advanced传输特性



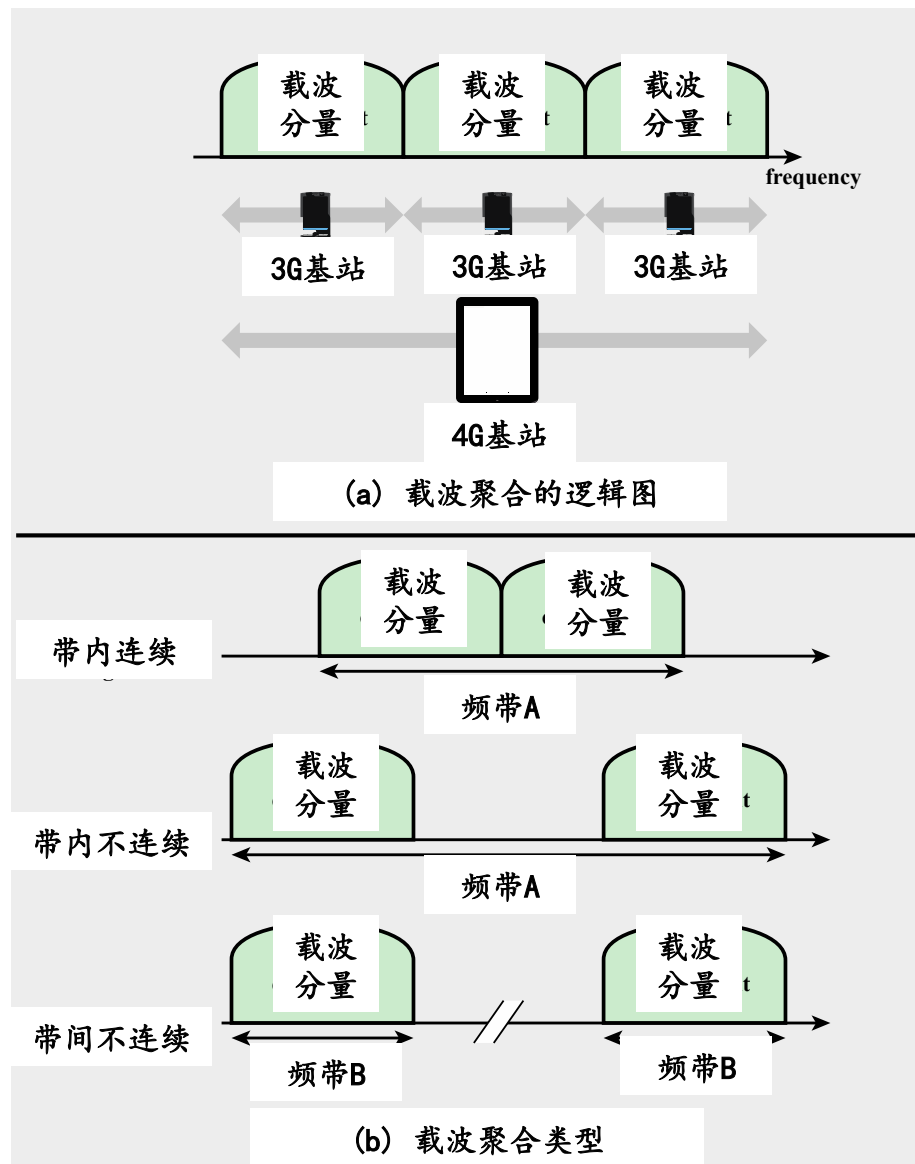
- LTE-Advanced即可适用于**频分双工FDD**的成对频谱，也可适用于**时分双工TDD**的非成对频谱
- FDD:
  - 分配给用户 $i$ 的是一对信道 $U_i$ 和 $D_i$ ，他们的带块分别是 $W_U$ 和 $W_D$
- TDD:
  - UL和DL的传输操作在同一频带上进行，但在**时域上交替**，TDD在容量分类上比FDD更灵活



# LTE-Advanced传输特性：载波聚合



- LTE-Advanced使用**载波聚合**来增加带宽，提高比特率。每一个被聚合的载波称为一个分量载波。
  - **带内连续的**：载波彼此之间是相邻的，可视为一个被放大的信道，用户基站只需要一个收发器，但需要连续的频带可用于分配。
  - **带内不连续的**：多个分量载波属于同一频带，但不能视为一个信号，需要多个收发器。用于一个频带内频谱分配不连续的国家。
  - **带间不连续的**：使用不同的频带，可利用频带碎片，需要多个收发器。



# 总结



## 问题？

殷亚凤

[yafeng@nju.edu.cn](mailto:yafeng@nju.edu.cn)

<http://cs.nju.edu.cn/yafeng/>

Room 901, Building of CS

