



《通信与网络》

⊕ 钟晓峰

- 清华大学 电子工程系 副研究员
- 通信研究所 副所长

⊕ 研究领域

- 无线通信网络的协议、安全
- 用户行为与业务模型

⊕ 联系方式

- 电子工程系罗姆楼9-201
- 010-62781389, 13911117785
- zhongxf@tsinghua.edu.cn
- <http://oa.ee.tsinghua.edu.cn/~zhongxiaofeng/index.htm>



1



《通信与网络》
Communications & Networks

通信与网络

钟晓峰

电子工程系



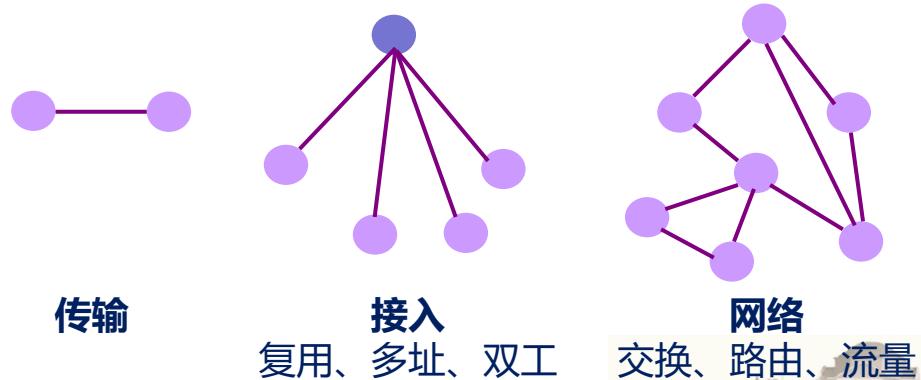
2



从“通信”到“网络”

■ 知识结构的变化

- 参与节点：点到点→点到多点→多点到多点



3



从“通信”到“网络”

■ 知识结构的变化

- 参与节点：点到点→点到多点→多点到多点
- 协议层次：物理层、链路层、网络层、传输层、应用层

应用层	网络应用：每天都在用！
传输层 (Transport)	流量控制：拥塞控制、TCP
网络层	网络技术：网络拓扑、交换、路由
数据链路层	接入技术：资源划分、复用、多址、双工
物理层 (Transmission)	传输技术：信源编码、信道编码、调制解调等

4



从“通信”到“网络”

■ 知识结构的变化

- 参与节点：点到点→点到多点→多点到多点
- 协议层次：物理层、链路层、网络层、传输层、应用层
- 通信媒介：从无线到有线

■ 学科风格的变化

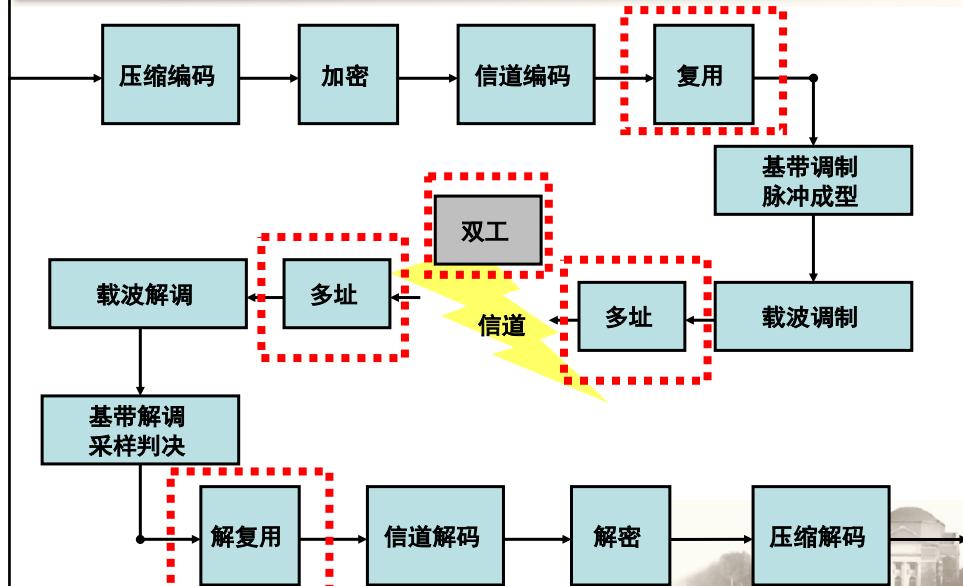
- 通信：理论体系（算），EE，物理
- 网络：算法/协议（码），CS，MS



5



本讲的目的



6



本讲提纲

- ⊕ 基本概念：复用、多址、双工
- ⊕ 基础理论：通信资源的划分方式
- ⊕ 接入技术：多址固定接入、随机接入
- ⊕ 复用技术：时分复用、复接技术
- ⊕ 双工技术：全双工、半双工



7



本讲提纲

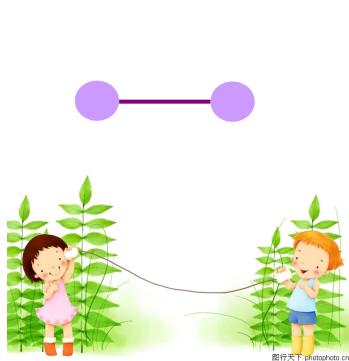
- ⊕ 基本概念：复用、多址、双工
- ⊕ 基础理论：通信资源的划分方式
- ⊕ 接入技术：多址固定接入、随机接入
- ⊕ 复用技术：时分复用、复接技术
- ⊕ 双工技术：全双工、半双工



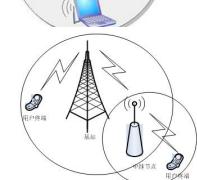
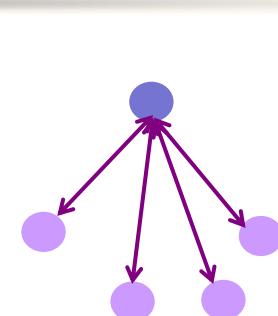
8



从“点到点”到“点到多点”



高效传输、可靠传输



1、双向通信



2、多节点同时通信



9

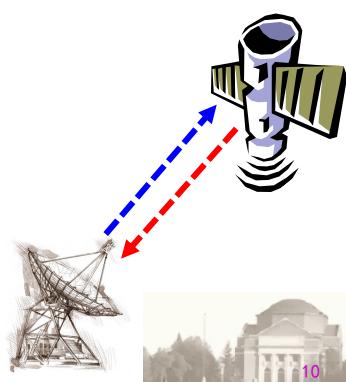
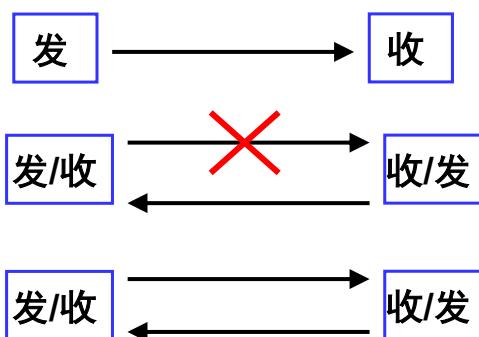


双工、多址、复用

⊕ 双工：通信双方进行双向传送消息

□ Duplex: 双向通信时双发对于通信资源的共享

□ 单工、半双工、全双工

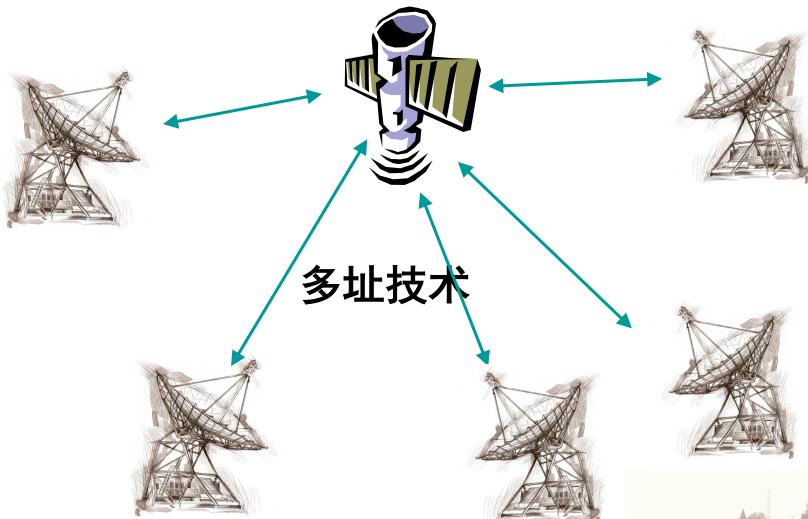


10

5



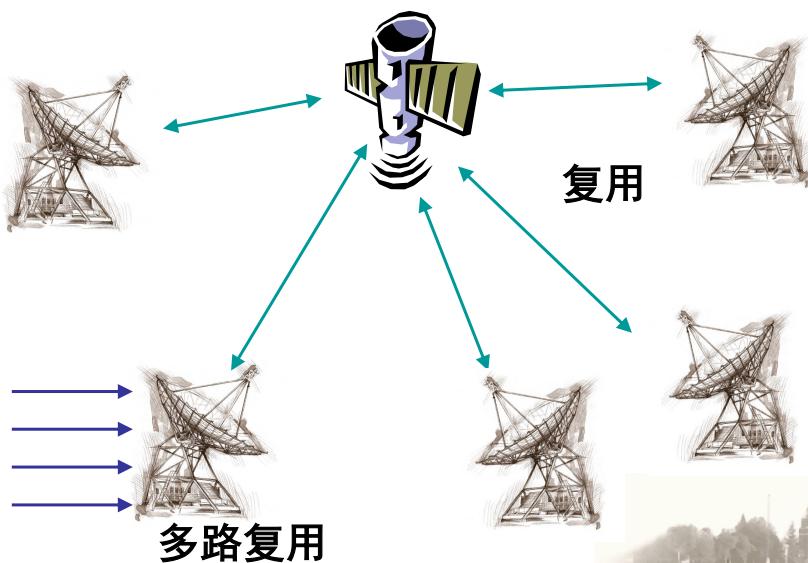
双工、多址、复用



11



双工、多址、复用



12



复用和多址的概念和目的

⊕ 复用 (Multiplexing)

- 提高通信资源的利用率
- 适用于单路传输需求未占满物理介质传输能力的情况
- 在传送带上传送多种零件，充分利用传送带

⊕ 多址(Multi-Access)

复用和多址在概念上有很多相似之处，需要细心区分！

- 满足多用户信息传输的需求
- 适用于多路信息在同一系统中同时传输的情况
- 多辆汽车行驶在一条马路上



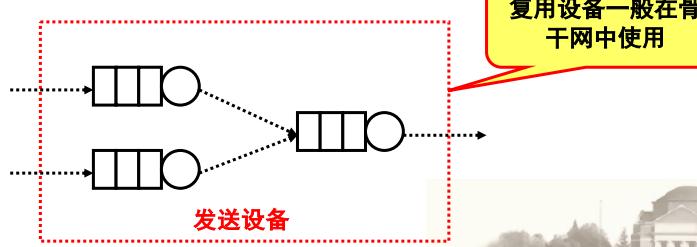
13



复用和多址的概念辨析

- ⊕ 由于复用和多址的概念非常容易混淆，我们特意需要仔细辨别之
- ⊕ 复用具有如下特征

- 在发送设备内部完成多路信息的混合
- 通信资源（带宽，时隙）预先分配完毕



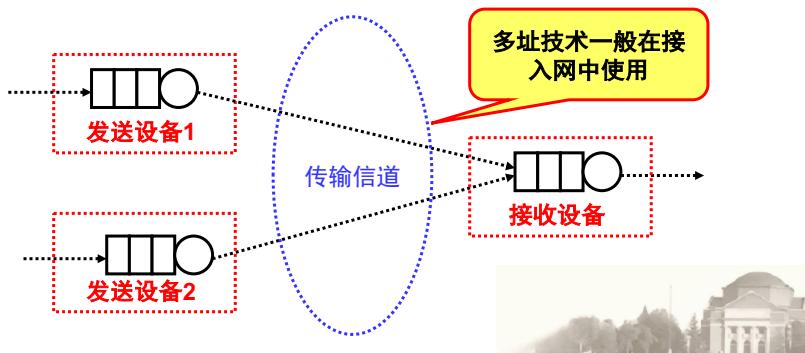
14



复用和多址的概念辨析

多址具有如下特征

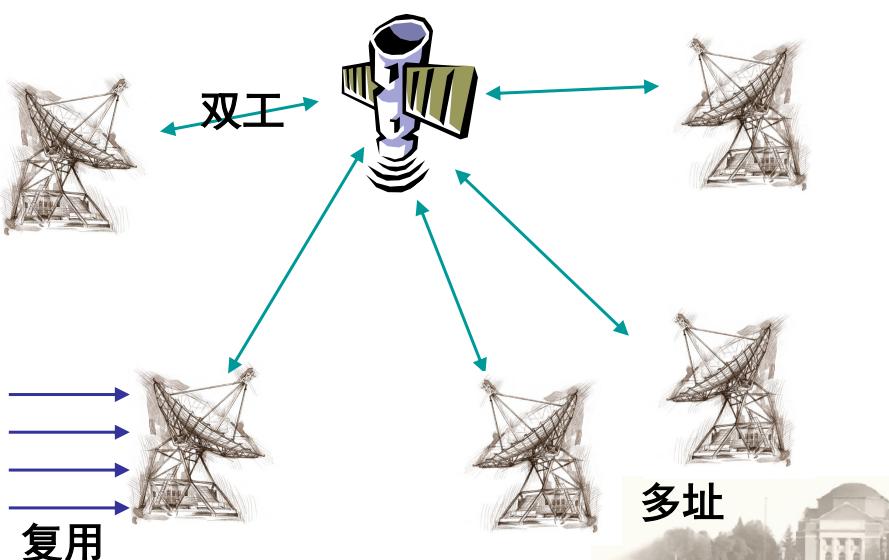
- 在传输媒质或信道中完成多路信息的混合
- 通信资源（带宽，时隙）根据用户的需求可以动态分配



15



双工、多址、复用：概念总结



16



本讲提纲

- ◆ 基本概念：复用、多址、双工
- ◆ 基础理论：通信资源的划分方式
- ◆ 接入技术：多址接入、随机接入
- ◆ 复用技术：时分复用、复接技术
- ◆ 双工技术：全双工、半双工



17



双工、复用和多址的基本方式

- ◆ 双工、复用和多址的相似性，决定了它们都依赖于一个共同概念，那就是通信资源的划分
- ◆ 常见的分割方法如下
 - 频分（FD）：将整个可用频带分割为不同的子频带
 - 时分（TD）：将整个可用传输时间分割为不同的时隙
 - 码分（CD）：将整个信号空间分割为不同正交

凡事无绝对，信息论意义上可以通过Superposition Coding、NOMA实现多址，无须通信资源分割！



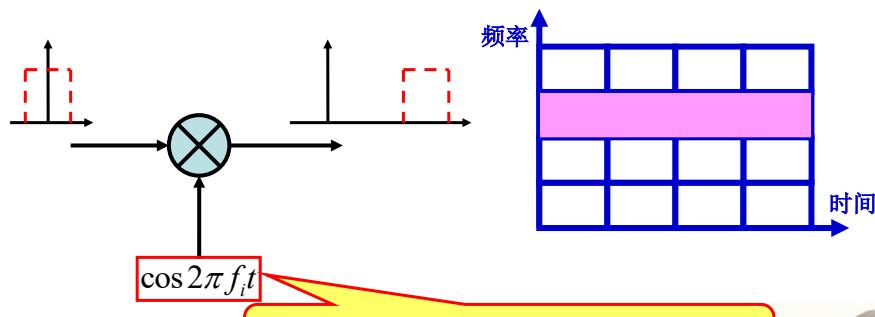
18



通信资源的常见分割方式

频分 (FD)

利用不同本振频率的混频器，将具有一定带宽限制的信号调制到指定频带



19

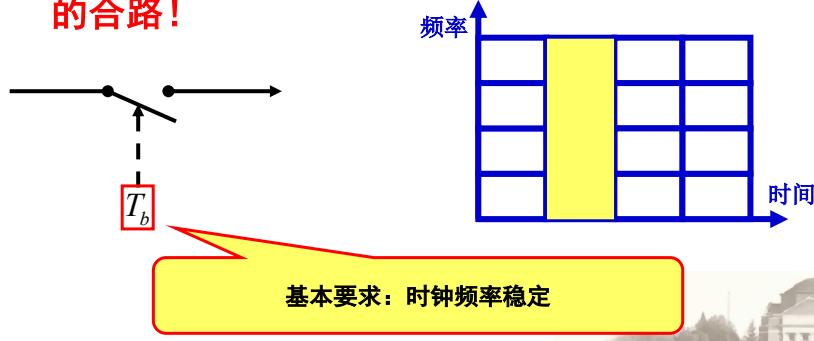


通信资源的常见分割方式

时分 (TD)

利用不同相位时钟信号，将信息bit放置到指定时隙

注意：只有TD能够实现调制前对于原始信息bit的合路！



20

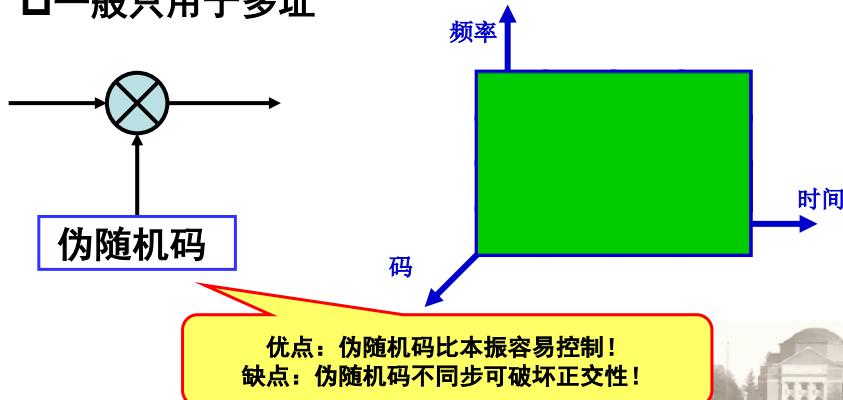


通信资源的常见分割方式

⊕ 码分 (CD)

□ 利用不同的正交码对一路信号进行扩频，使其属于本码空间

□ 一般只用于多址



21



常见分割方式的统一表示

⊕ 理想情况下，不同资源分割方式可以统一描述如下

□ 第*i*路符号为 a_i ，则复用或多址后的信号为

$$\mathbf{x} = a_1 \mathbf{x}_1 + a_2 \mathbf{x}_2 + \cdots + a_N \mathbf{x}_N$$

使用正交分割，获得的资源只与总路数有关，而与正交基选择无关！

□ 其中， \mathbf{x}_i 是*i*路对应的正交基，满足

$$\langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j \rangle = 0, \forall i \neq j \quad \langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_i \rangle = 1$$

这是信号空间方法，不要求掌握，但是你要知道TD/FD/CD在本质上是一致的！

□ 接收端通过内积分离出各路信号

$$\begin{aligned}\hat{a}_i &= \langle \mathbf{x}, \mathbf{x}_i \rangle \\ &= a_1 \langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_1 \rangle + a_2 \langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_2 \rangle + \cdots + a_i \langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_i \rangle + \cdots + a_N \langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_N \rangle \\ &= a_i\end{aligned}$$

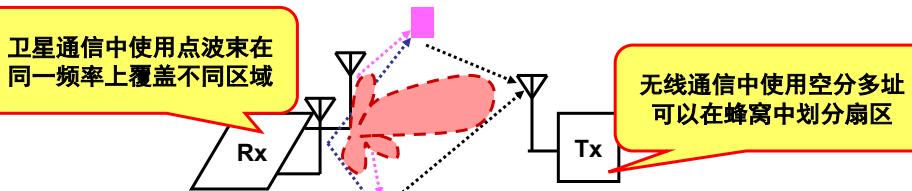
22



其它资源分割方法

⊕ 空分 (SD)

- 利用定向波束，实现对空间频谱资源的分割
- 一般只用于多址
- 对天线有特殊需求，需要定向天线或天线阵列



⊕ 极分 (Polarization Division, PD)

- 利用正交极化重复利用频谱资源
- 只用于对频谱利用率要求及其苛刻的场合

23

本讲提纲

- ⊕ 基本概念：复用、多址、双工
- ⊕ 基础理论：通信资源的划分方式
- ⊕ 接入技术：多址接入、随机接入
- ⊕ 复用技术：时分复用、复接技术
- ⊕ 双工技术：全双工、半双工

24



多址技术

常用多址方式有

TDMA：时分多址

FDMA：频分多址

在实际协议中，有时也采用几种多址技术混合的方式，如GSM采用FD/TD混合多址

OFDMA，正交频分多址，是FDMA的新发展，应用于IEEE 802.16等新标准中

CDMA：码分多址

CDMA 2000, WCDMA, TD-SCDMA

SDMA：空分多址

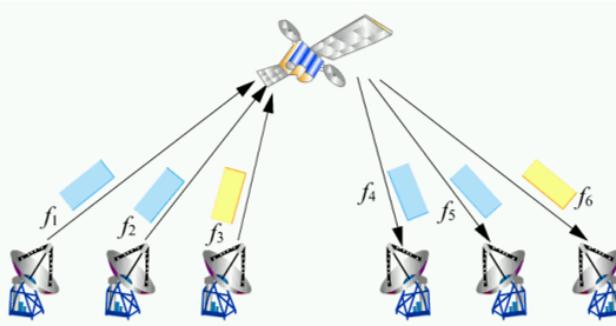
大量应用于卫星通信

SDMA既可以成形实际电磁波束，也可以在信号空间进行波束成形，后者硬件要求更低！

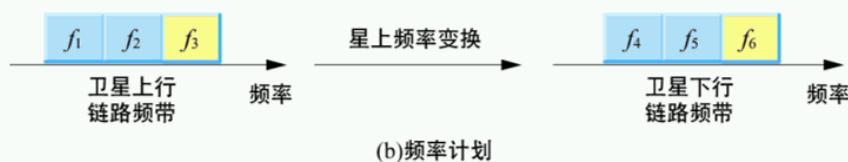
25



频分多址：FDMA



(a) 方框图

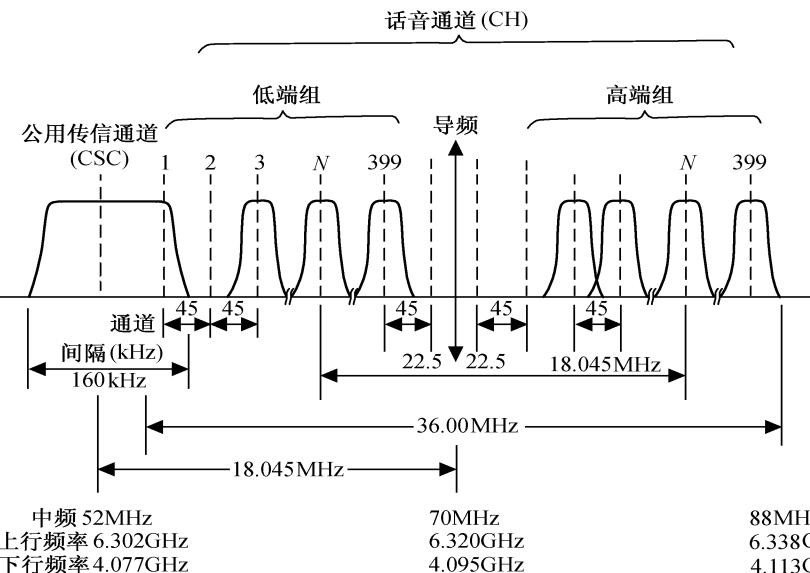


(b) 频率计划

26



频分多址：FDMA



27



频分多址：FDMA

典型应用系统：

- 卫星通信系统：SPADE体制卫星通信系统

- 蜂窝移动通信系统：第一代系统

设计FDMA系统时，应具备的特点

- 频道宽度：信号带宽、调制方式

- 保护带、收发频率间隔

- 一般采用FDD方式，采用双工器使用同一套天线

FDMA的优缺点

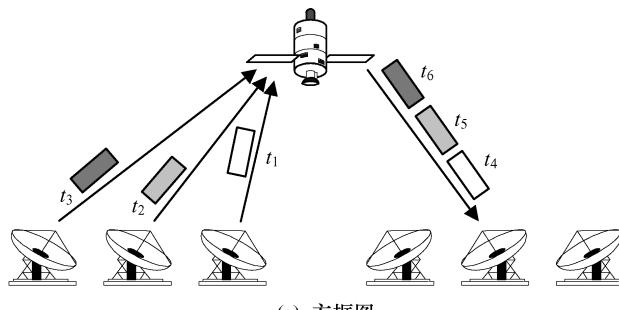
- 设备简单、技术成熟、不需复杂同步

- 频带利用率低、功放非线性影响、干扰问题

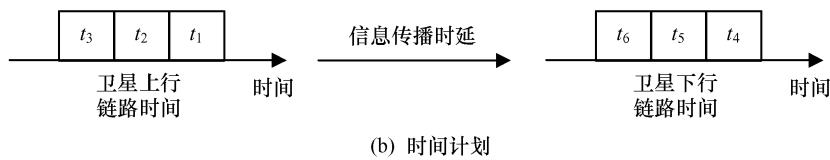
28



时分多址: TDMA



(a) 方框图

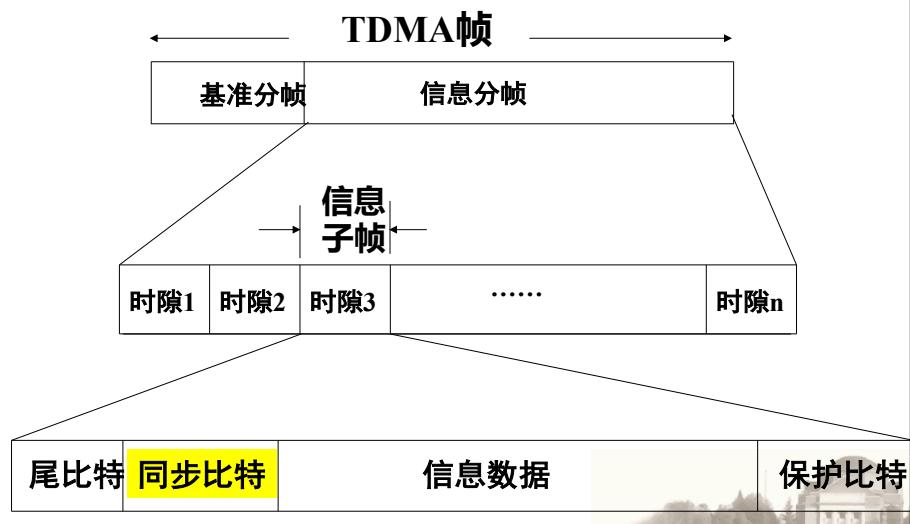


(b) 时间计划

29



时分多址: TDMA帧结构



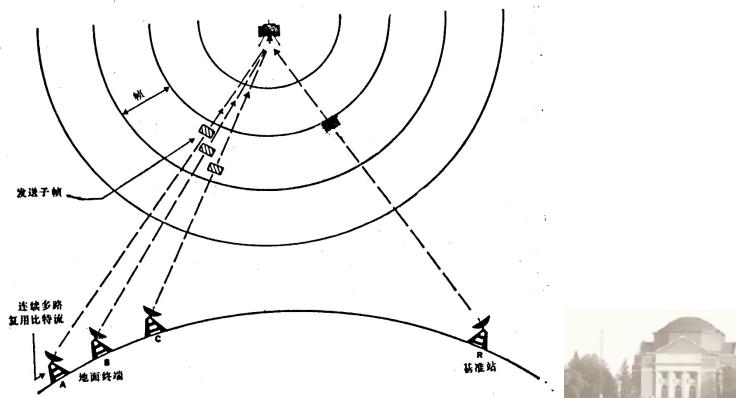
30



时分多址：TDMA系统关键



10ns
10MHz (1E-10@1ms)



31



时分多址：TDMA

⊕ 典型应用系统：

- 卫星通信系统：广泛使用TDMA
- 蜂窝移动通信系统：第二代系统GSM

⊕ 设计TDMA系统时，应具备的特点

- 帧结构
- 严格的系统定时同步

⊕ TDMA的优缺点

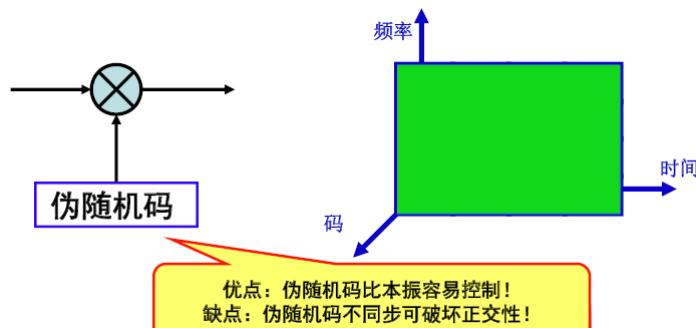
- 传输速率大幅提升（较FDMA）
- 码间串扰问题严重，需自适应均衡器

32



码分多址：CDMA

- 利用不同的正交码对一路信号进行扩频，使其属于本码空间
- 一般只用于多址

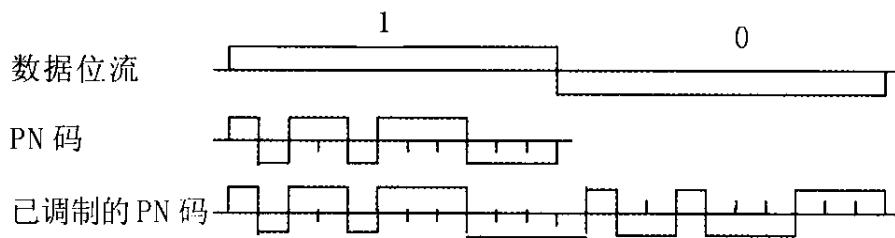


33



码分多址：扩频通信技术

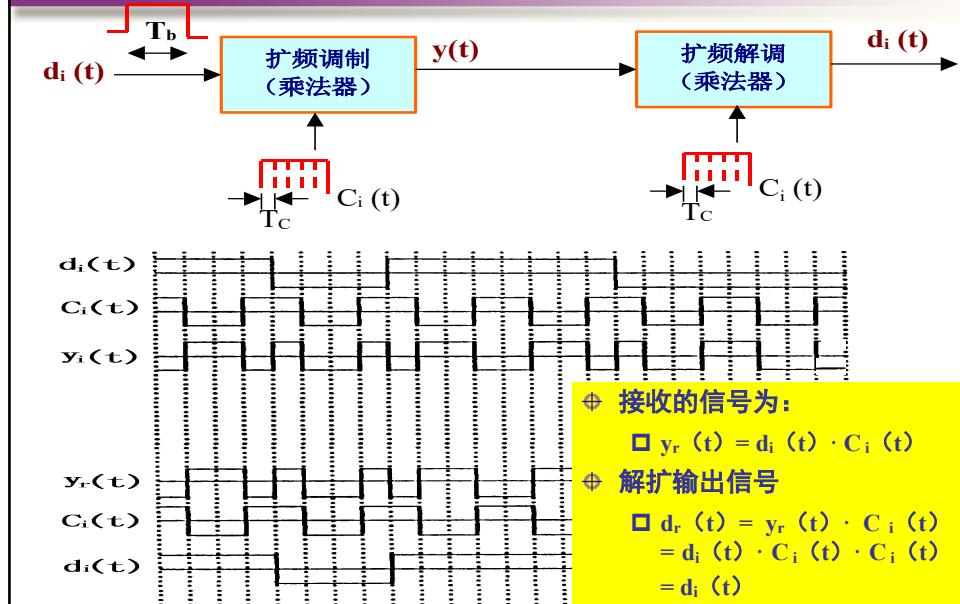
- 扩频：直接用具有高码率的扩频码序列(伪随机序列)在发端去扩展信号的频谱。
- 解扩：在收端用相同的扩频码序列去解扩，把展宽的扩频信号还原成原始的信息。



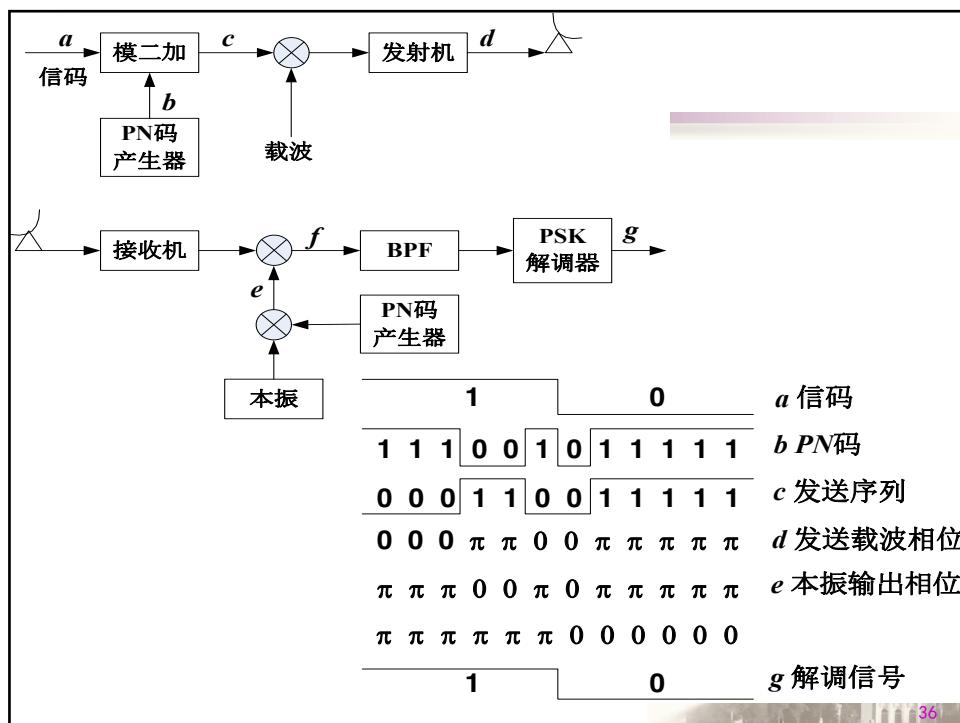
34



扩频通信系统 (CDMA系统)



35

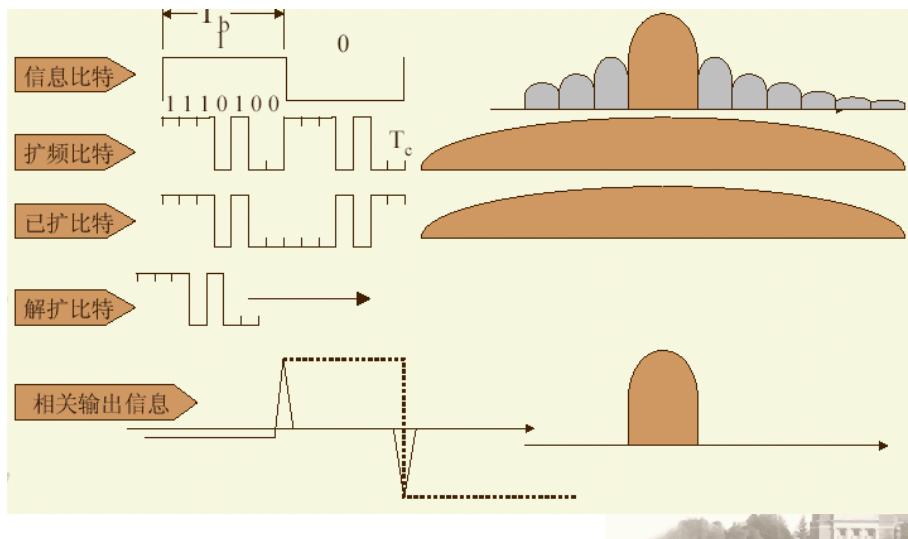


36

36



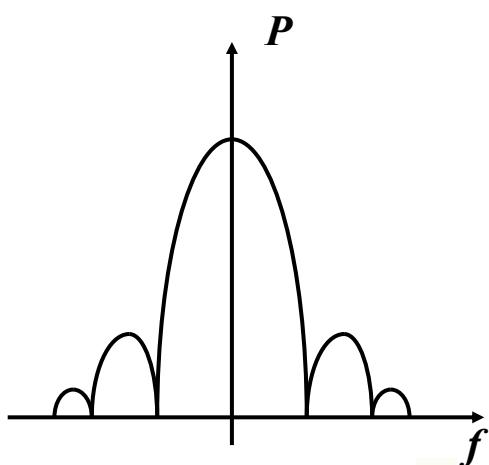
分析角度1：从频域进行分析



37



直接序列扩频通信的频谱变换



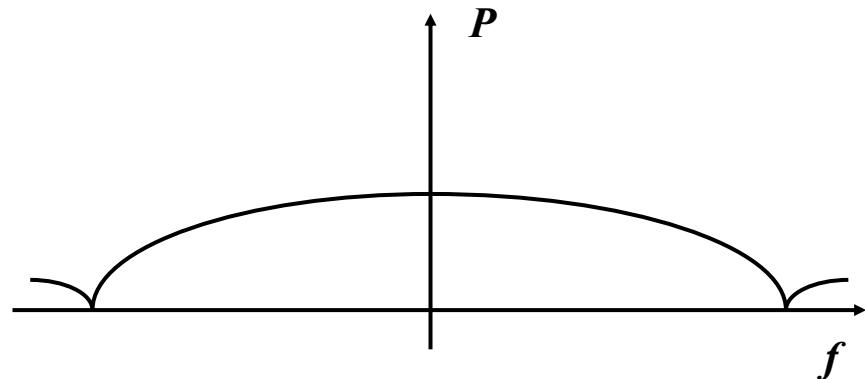
(a) 用户信号的功率谱曲线

38

38



分析角度1：从频域进行分析



(b)扩频

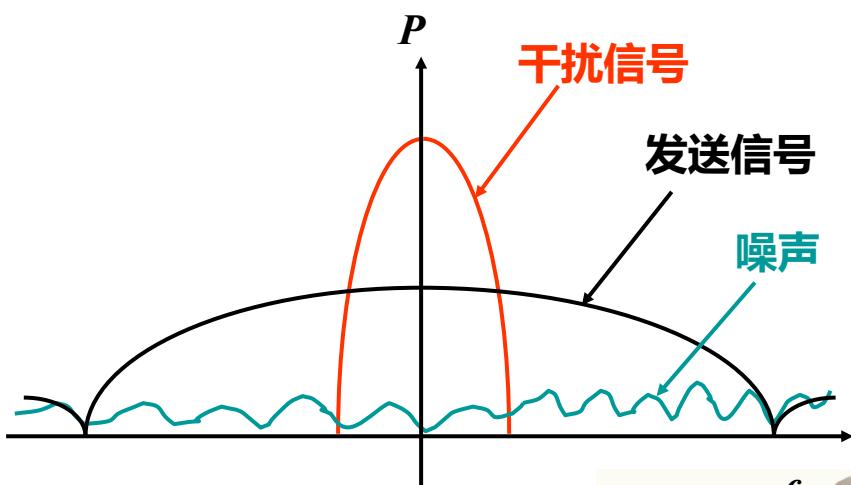


39

39



分析角度1：从频域进行分析



(c)经信道传输，接收到的信号

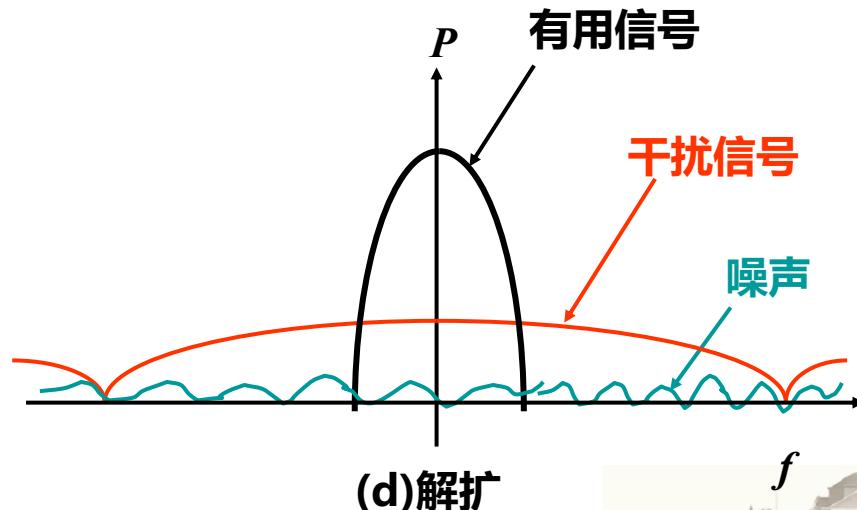


40

40



分析角度1：从频域进行分析



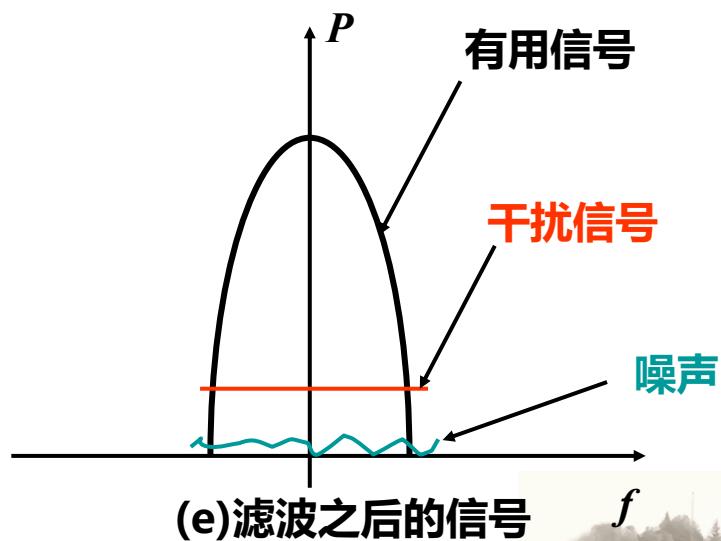
41



41



分析角度1：从频域进行分析



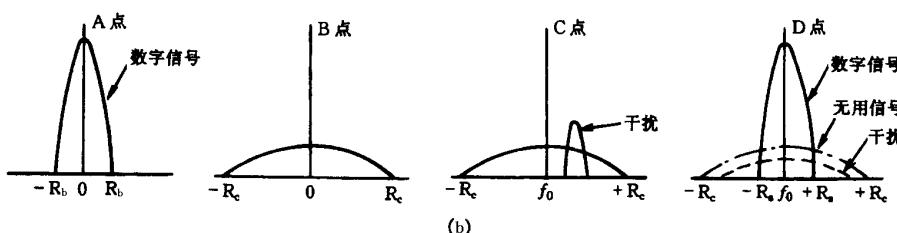
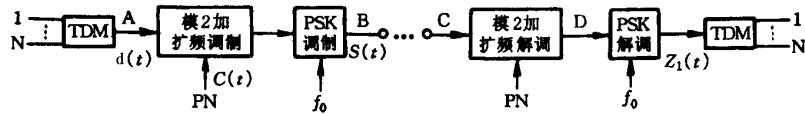
42



42



分析角度1：从频域进行分析



43



分析角度2：扩频通信理论基础

⊕ 扩频通信是以信息论的Shanon公式理论为基础发展而来

□ Shanon公式： $C = B \log_2 (1 + S/N)$

C为信道容量，单位为b/s；B为传输的信号频带宽度，单位为Hz；S为信号平均功率，N为噪声平均功率；

□ Shanon公式反映的重要结论：

频带B和信噪比可以互换；

增加信号的频带宽度，可在较低的信噪比的条件下以任意小的差错概率来传输信息；

采用扩频信号进行通信的优越性在于用扩展频谱的方法可以换取信噪比上的好处。

44



分析角度3：序列的相关性

⊕ **自相关：**长度(周期)为 P 的码序列 x 的自相关系数

$$\rho_x(x) = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P x_i \cdot x_{i+\tau}$$

⊕ **互相关：**周期均为 P 的两个码序列 x 和 y 的互相关系数

$$\rho(x, y) = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P x_i y_i$$

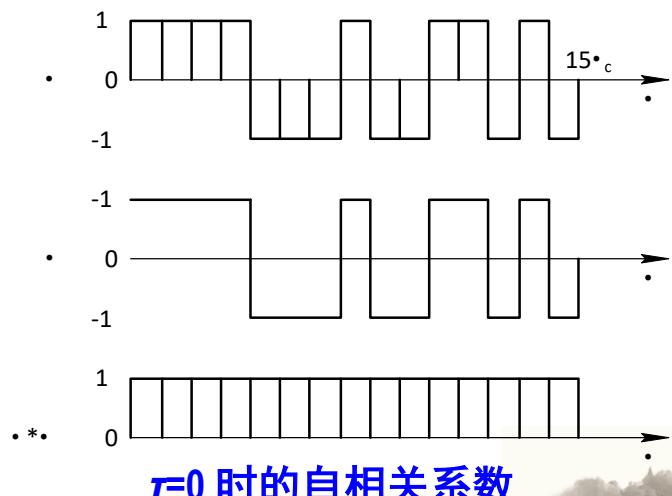
45

45



分析角度3：序列的相关性

例：码序列111100010011010的自相关系数

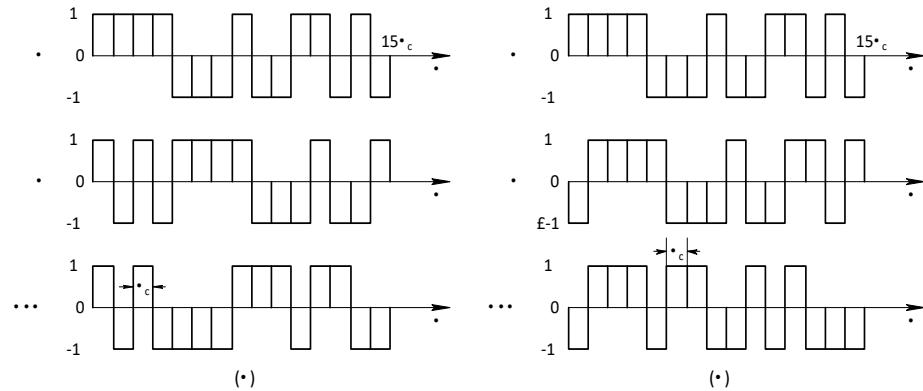


46

46



分析角度3：序列的相关性



15位码序列 $\tau \neq 0$ 时的自相关系数

(a) $\tau=4T_c$ (b) $\tau=T_c$

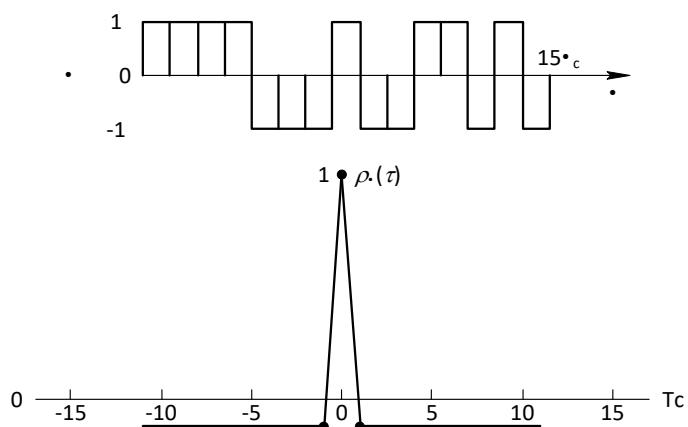


47

47



分析角度3：序列的相关性



$n=4, P=15$ 码序列的自相关系数曲线



48

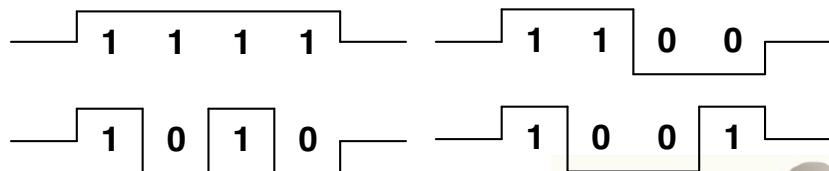
48



分析角度3：序列的相关性（理想正交码）

互相关小的码序列： $\rho_{x,y}(\tau)=0$

码长为4的正交码的波形，其任两个码都是正交的，因为在一个周期中，两个码之间相同位的与不同位的数目均相等，故 $\rho=0$ 。



码长为4的4组正交码的波形

49



分析角度3：序列的相关性

用户1扩频码为：-1 1 -1 1

用户1的话音信号数据为1-1 -1 1 -1 -1，速率为13kbps
则在发射机端，扩频信号速率为 $13 \times 4 = 52$ kchips/s。

-1-1-1 1-1-1-1 1-1-1-1 -1-1-1-1 1-1-1-1 1-1-1-1

在接收机端，用同样的扩频码-1 1 -1 1进行解扩(对扩频信号做逐码片相乘，然后每四个码片求和)

4 -4 -4 4 4 -4 -4

如果用户2的扩频码-1 -1 1 1，对用户1的接收信号进行解扩处理，得到的是

0 0 0 0 0

50

50



扩频的实现方法

⊕ DS-SS：直接序列扩频

□ 发端直接用高速码序列去扩展输入信息的带宽

⊕ FH：跳频

□ 用扩频码序列去进行频移键控调制，使载波频率不断地跳变

□ 发端信息码序列与扩频码序列组合构造的不同码字控制频率合成器，使其输出频率根据码字的改变而改变，形成了频率的跳变。

⊕ TH：跳时

□ 用一定码序列进行选择的多时片时移键控；

□ 时间轴分为多个时片，哪个时片发射信号由扩频码序列进行控制。由于发送信号采用的时片很窄，也就展宽了信号的频谱。

51



码分多址：CDMA 总结

⊕ 典型应用系统：

□ 蜂窝移动通信系统：第二/三代移动通信系统

CDMA、W-CDMA、TD-SCDMA

⊕ CDMA的优缺点

□ 扩频技术：抗干扰、抗多径、保密性

□ 系统容量大，不需要复杂的频率分配和管理

□ 软容量特性、软切换特性

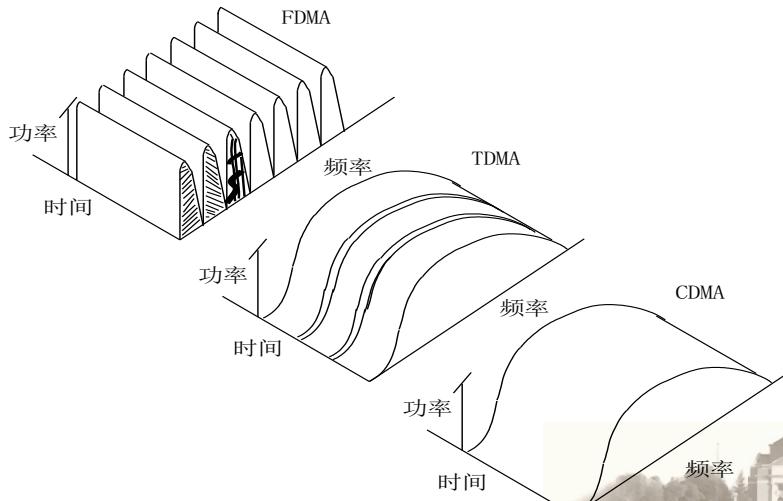
□ 存在多址干扰和远近效应



52



总结：多址技术的比较



53



从多址到接入

- ⊕ 多址的本质：固定化的资源共享实现多用户同时接入
- ⊕ 存在问题：固定（分配）接入
 - 业务不繁忙时，利用效率低下
 - 用户数量多时，系统难以设计
- ⊕ 解决思路：随机（分配）接入
 - ALOHA协议
 - CSMA/CD-CA协议
- ⊕ 性能指标：评价接入方式的效率
 - 网络负载、平均通过量、平均分组延时、稳定性

54



ALOHA接入

⊕ ALOHA: Additive Link on-line Hawaii System

□ 70年代，夏威夷大学，卫星通信

⊕ 核心思想： 随机接入

□ 随时有数据要发送，立刻接入信道发送

□ 如果遇到碰撞/冲突，则随机延时后重发

⊕ ALOHA系统的主要工作模式

□ 传输模式：使用纠错码进行数据传输

□ 监听模式：发送方监听确认信息

□ 重发模式：收到否认信息后随即等待后重发

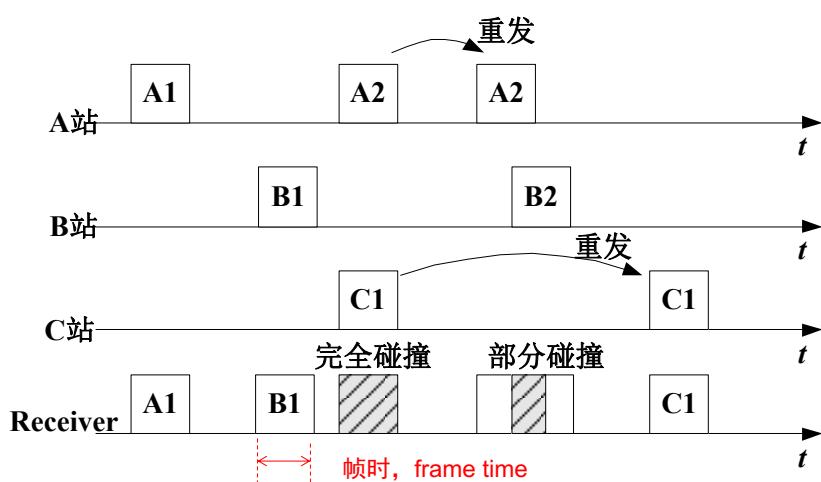
□ 超时模式：超时重发



55



纯ALOHA (P-ALOHA) 方式



56



ALOHA的性能(效率)分析

- ⊕ 所有的帧长度固定，速率固定，传输一帧时间固定为“帧时（Frame time）”；
- ⊕ 假设：
 - 无限多用户产生的新帧服从泊松分布， t 时刻内产生 n 个分组的概率为 $P(n) = (\lambda t)^n e^{-\lambda t} / n!$
 - 平均每秒钟响应的分组个数，网络负载 $G = \lambda t$
- ⊕ 两个重要指标
 - 通过量S：发送时间T内平均成功发送的分组
 - 网络负载G：T时刻内平均发送的分组数（不管是否成功）



57

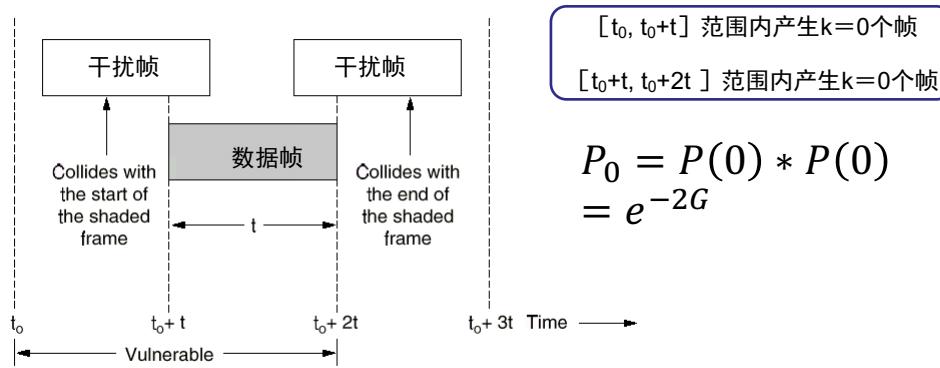
57



ALOHA的性能(效率)分析

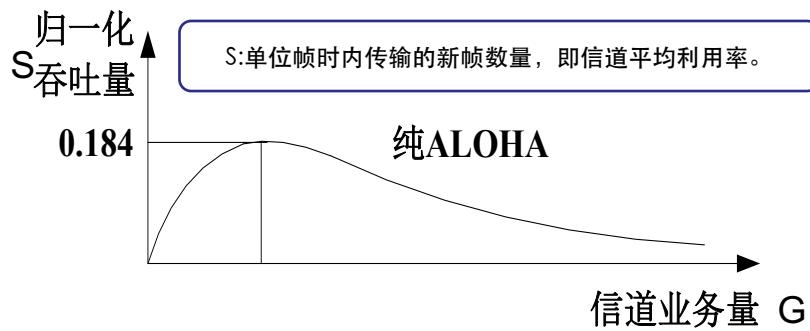
⊕ 冲突危险区

数据帧发送成功的概率 P_0 等价于：



58

29



例：ALOHA网络采用9600kbit/s的数据率，则总的最大的吞吐量为

$$0.184 \times 9600 \text{kbit/s} = 1766 \text{kbit/s}$$

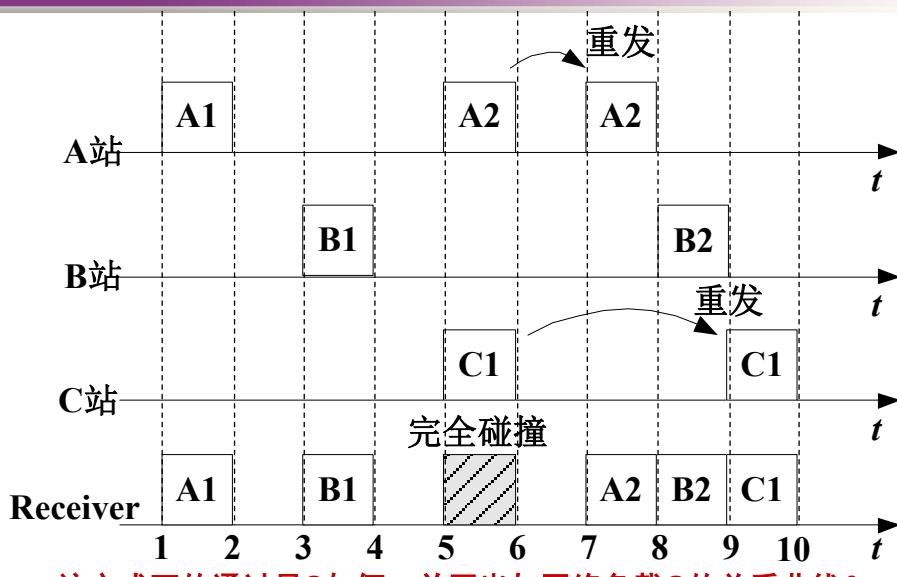
且这1766kbit/s的容量必须由所有用户共享

59

59



时隙ALOHA (S-ALOHA) 方式

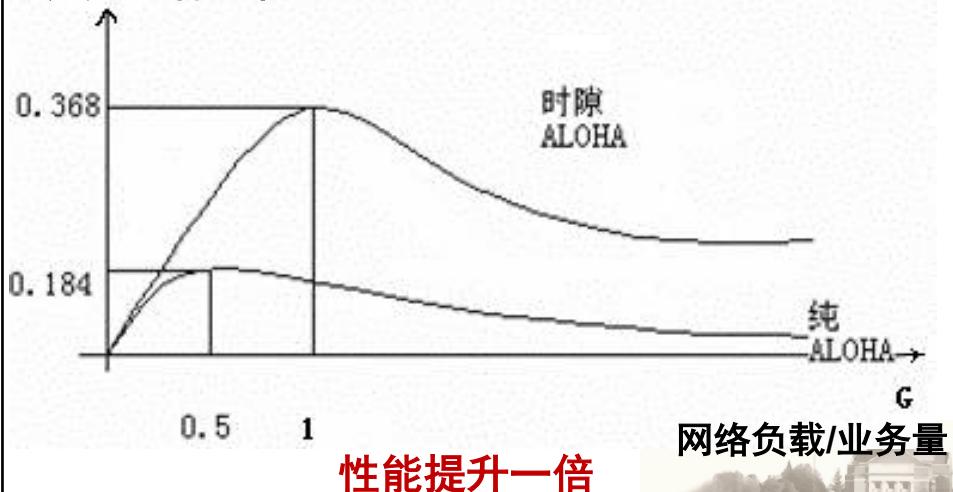


60



时隙ALOHA (S-ALOHA) 方式

S通过量/吞吐率



61



捕获效应ALOHA (C-ALOHA) 方式

- ⊕ ALOHA：所有分组的发功率相同，因而发生碰撞情况下，接收端无法正常接收分组。
- ⊕ C-ALOHA：方每个用户以略微不同的功率电平发射，当两个分组发生碰撞时，其中较强的信号可能会被接收机正确接收(强信号捕获接收机)。
- ⊕ 系统吞吐量可提高3倍，但输入电平的幅度起伏会导致比特差错率增大。



62

62



从ALOHA到CSMA

⊕ ALOHA协议的不足

□发送分组时不考虑信道是否空闲，略显盲目

⊕ 载波监听多路访问协议

□Carrier Sense Multiple Access Protocols, CSMA

□载波监听（Carrier Sense）

站点在为发送帧而访问传输信道之前，首先监听信道有无载波，若有载波，说明已有用户在使用信道，则不发送帧以避免冲突。

□多路访问（Multiple Access）

多个用户共用一条线路



63

CSMA协议

⊕ 1-坚持型CSMA (1-persistent CSMA)

□ 原理

若站点有数据发送，先监听信道；

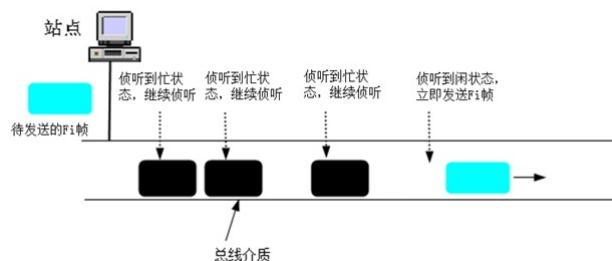
若站点发现信道空闲，则发送；

若信道忙，则继续监听直至信道空闲，然后发送；

若产生冲突，等待一随机时间后重新开始发送。

□ 优点：减少了信道空闲时间；

□ 缺点：增加了发生冲突的概率；



64



CSMA协议

⊕ 非坚持型CSMA (non-persistent CSMA)

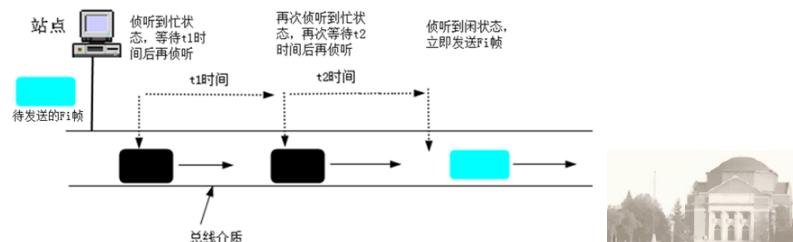
□ 原理

若站点有数据发送，先监听信道；
若站点发现信道空闲，则发送；
若信道忙，等待一随机时间后重新开始发送过程；
若产生冲突，等待一随机时间后重新开始发送过程。

□ 优点：减少了冲突的概率；

□ 缺点：增加了信道空闲时间，发送延迟增大

□ 信道效率比1-坚持CSMA高，传输延迟比1-坚持CSMA大。



65

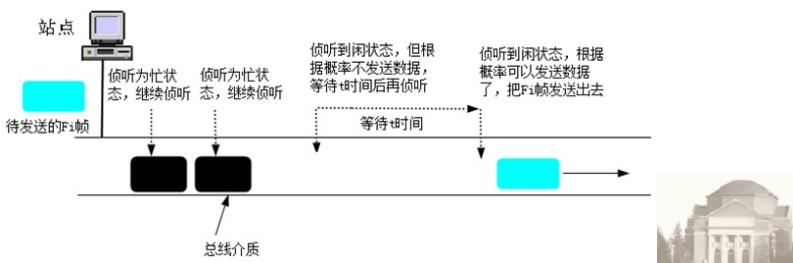


CSMA协议

⊕ p-坚持型CSMA (p-persistent CSMA)

□ 原理

若站点有数据发送，先监听信道；
若站点发现信道空闲，则以概率p发送数据，以概率q=1-p延迟至下一个时槽发送。若下一个时槽仍空闲，重复此过程，直至数据发出或时槽被其他站点所占用；
若信道忙，则等待下一个时槽，重新开始发送
若产生冲突，等待一随机时间，然后重新开始发送



66



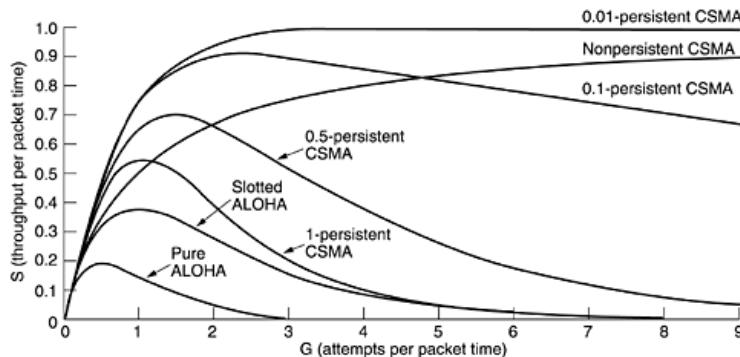
CSMA

⊕ p-持续CSMA

□ 监听，发现空闲，以p概率发送

⊕ 非持续CSMA

□ 监听，发现忙，随机等待后再监听



67



从CSMA到CSMA/CD

⊕ CSMA：决定发送后则发送完

□ 缺点：如果发生冲突，其实可以不发了！

⊕ 带冲突检测的CSMA协议

□ Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD)

□ 当两个帧发生冲突时，两个被损坏帧继续传送毫无意义，而且信道无法被其他站点使用，对于有限的信道来讲，这是很大的浪费。

□ 如果站点边发送边监听，并在监听到冲突之后立即停止发送，可以提高信道的利用率



68



CSMA/CD协议

⊕ 原理

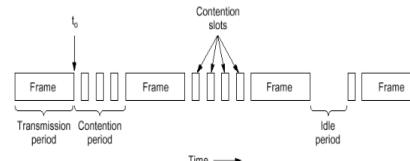
- 站点使用CSMA协议进行数据发送；
- 在发送期间如果检测到冲突，立即终止发送，并发出一个瞬间干扰信号，使所有的站点都知道发生了冲突；
- 在发出干扰信号后，等待一段随机时间，再重复上述过程

⊕ 工作状态

- 传输周期；竞争周期；空闲周期

⊕ 一个站点确定发生冲突要花多少时间？

最坏情况下，2倍电缆传输时间



69



CSMA/CA协议

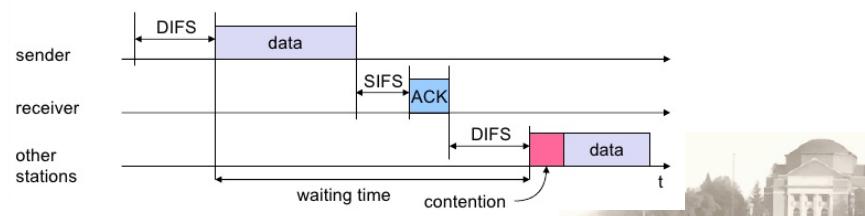
⊕ 带冲突避免的CSMA协议

- Carrier sense multiple access with collision avoidance (CSMA/CA)

□ 适用于无法检测载波冲突的网络

□ 使用ACK信号来避免冲突

典型系统 Wireless LAN



70



CSMA/CA协议

⊕ 工作原理

□发送前检测网络中是否有数据正在传输

如果没有传输，则等待一段固定时间，再随机选择一个
时间片继续探测；如果网络中仍无传输，就将数据发
送出去

□接收端收到数据后发送ACK

如果发送端接收到ACK，传输完成

如果没有收到ACK，发送端在等待一段时间之后重传



71



CSMA/CD与CSMA/CA的区别

⊕ CSMA/CD

□发送的同时能检测冲突，但无法避免

□适用于总线式的以太网

□检测电缆中的电压，冲突时电压会发送变化

⊕ CSMA/CA

□发送的同时无法检测冲突，只能尽量避免

□适用于无线局域网，802.11a/b/g/n

□检测能量和载波来判断信道是否空闲



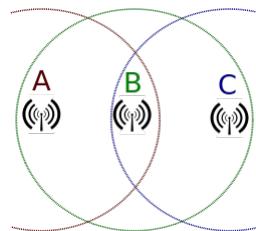
72



隐藏终端

⊕ 隐藏终端问题, Hidden node problem

- A检测到信道A→B空闲，发送数据
- C检测到信道C→B空闲，发送数据
- 两路信号在B处叠加，无法分辨

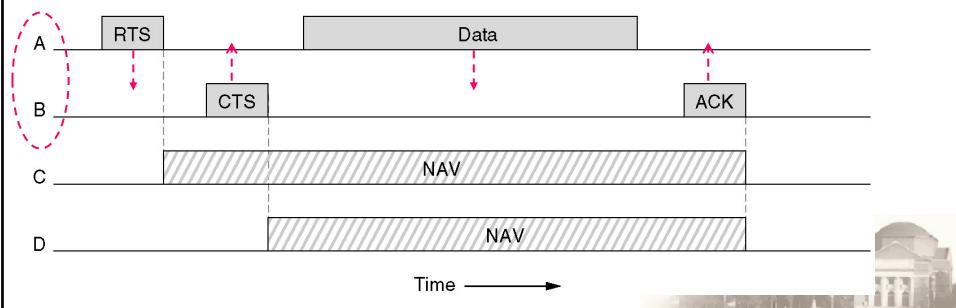


73



RTS/CTS

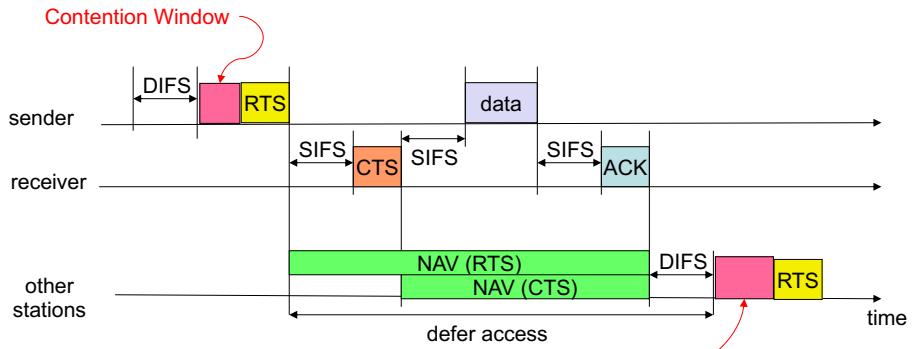
- ⊕ Request to Send / Clear to Send
- ⊕ 通过RTS/CTS接入信道，邻居节点获知本次传输所需时间NAV，在NAV时间内保持静默，直到传输完毕；
- ⊕ ACK对数据传输进行确认，以确保传输有效性；
- ⊕ RTS/CTS包长较短，碰撞开销较Data小



74



IEEE802.11-DCF



- ◆ 当节点监听到信道处于空闲状态时，首先保持静默DIFS时间（系统设定的固定值），同时生成一个随机竞争窗时间（Contention Window-CW），在这个竞争窗时间内继续监听信道；
- ◆ 只有当在DIFS+CW时间内信道持续保持空闲状态，节点才发出RTS要求接入信道；
- ◆ 每次竞争中某个节点的CW值是根据一定的规则在一定的范围内随机生成的，以降低信道竞争冲突概率；
- ◆ 同时，CW的生成算法还在网络拥塞控制、接入公平性等方面进行了优化；

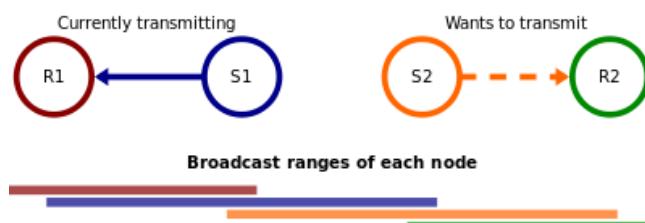
75



暴露终端

⊕ 暴露终端问题，Exposed node problem

- S1→R1与S2→R2互不影响
- 当S1→R1时，S2无法发送数据给R2
- 在同步网络中可以解决
S2只收到RTS，没有收到CTS，可以正常发送



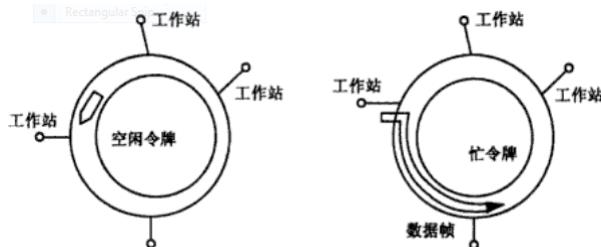
76



令牌管理协议

⊕ Token Ring 令牌环

- 依赖介质连接若干工作站的环状局域网络
- 发送权限由旋转运行的令牌 (Token) 提供
- 数据循环传送于环路，最终被目的工作站接收



77



令牌管理协议

⊕ 操作流程

- 不携带数据的令牌成为空令牌
- 空令牌到达某站，如该站无数据要发送，则快速通过；如有信息要发送，则将空令牌改为忙令牌，并且加载数据
- 各工作站检查忙令牌的地址信息，如果与自己的地址符合，复制数据后在忙令牌上加载被复制的标记
- 忙令牌环绕一周返回源站时，检查是否被接收，清除数据后发送一个空令牌



78

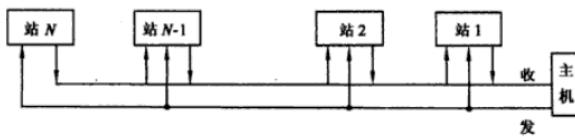


轮询

⊕ 轮询

□ 网上主机按照一定顺序逐个询问各用户有无信息发送，如有信息发送则立即发给主机，否则询问下一用户

□ 分为轮叫轮询和传递轮询



79



轮询

⊕ 轮叫轮询（轮流呼叫查询）

□ 主机按顺序从站1开始逐个轮询

□ 站1如有数据，立即发给主机；如无数据，则向主机发送控制帧，表示无数据发送

□ 随后，主机询问站2，以此类推

□ 从站1到站N循环询问，循环发送数据



80



轮询

⊕ 传递轮询（集中轮询）

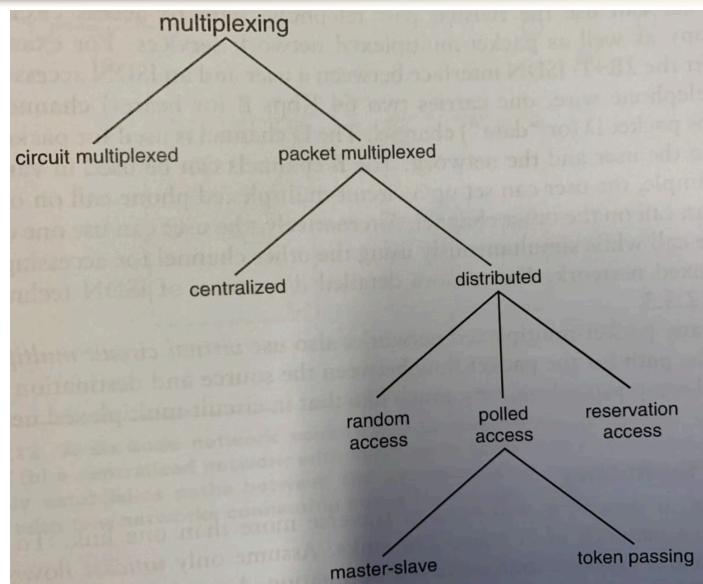
- 主机先向站N轮询，站N在发送数据（如有数据要发送）或者控制帧（无数据要发送）之后，将其相邻站N-1的地址附上
- 当站N-1检测到自己的地址后，由站N-1掌握发送权继续向主机发送数据，以此类推
- 当站1发完数据时，将主机地址附于其后，发送权重新回到主机，完成一个循环
- 传递轮询与令牌环的原理非常相似



81



接入技术总结



82



本讲提纲

- ⊕ 基本概念：复用、多址、双工
- ⊕ 基础理论：通信资源的划分方式
- ⊕ 接入技术：多址接入、随机接入
- ⊕ 复用技术：时分复用、复接技术
- ⊕ 双工技术：全双工、半双工



83



频分复用

- ⊕ FDM——Frequency Division Multiplexing
 - 先将各路信号调制到不同频段，然后复用整个通信带宽
 - 优点：不要求多路的时钟同步，不需要进行时钟抖动调整
 - 缺点：信道的非线性会在FDM系统中产生交调失真与高次谐波，引起路际串话，因此，对信道的非线性失真要求很高。此外，FDM用到的模拟滤波器设计较为复杂。

FDM必须使用模拟滤波器吗？

OFDM

如何提高FDM的效率？



84



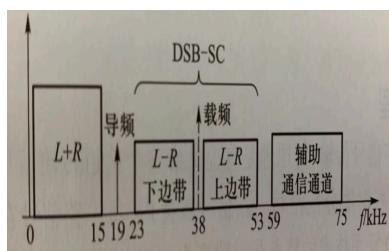
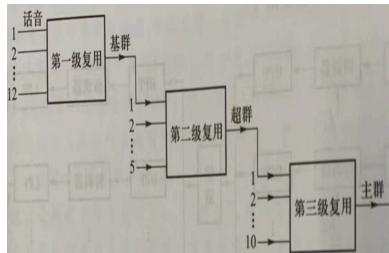
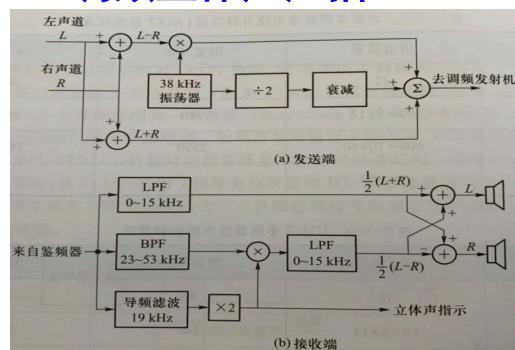
典型频分复用系统

模拟电话多路复用系统

□ 单边带调制频分复用

□ 12电话→5基群→10超群

调频立体声广播



85



时分复用

TDM——Time Division Multiplexing

□ 先将各路bit对齐安置到不同时隙，然后复用整个通信时间

□ 优点1：复接和分接均可采用数字处理，较为灵活可靠。

□ 优点2：可以直接对bit流进行处理，更贴近信源端。

□ 缺点：复接和分接需要时钟对齐，因此对信道中时钟相位抖动及接收端与发送端的时钟同步问题则提出了较高要求。

交换机，路由器等都应用了TDM原理

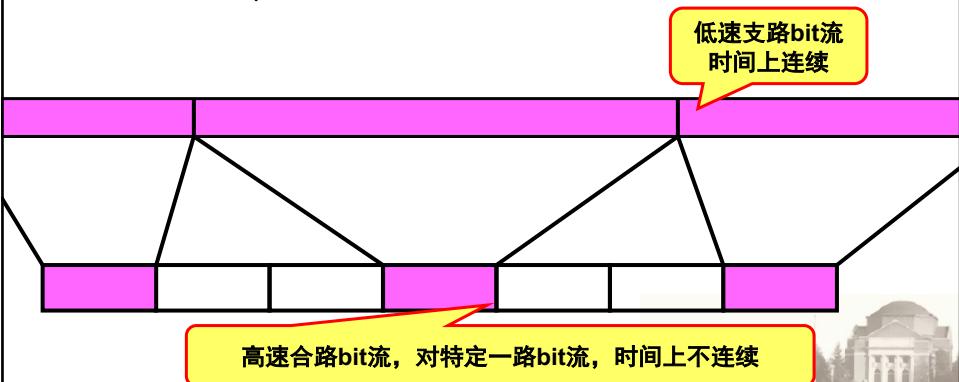
86



帧

⊕ 帧 (Frame)

- TDM中整个时间被划分成时隙分给不同支路
- 从支路的角度来看，其bit流被截断后放置在不同时隙，每个时隙内对应的一组bit构成一帧



87



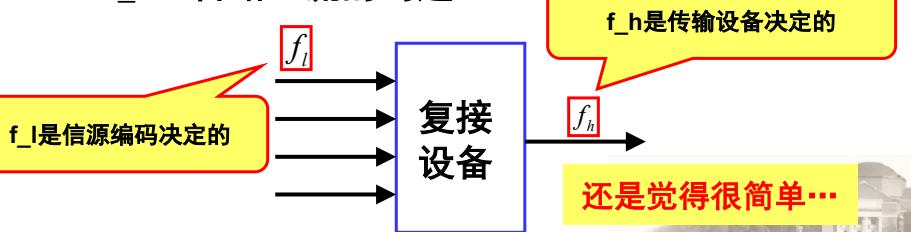
复接

⊕ 复接是TDM最重要的环节

- 该环节将多个支路的bit流合成高速bit流
- 这是一个知易行难的过程！

⊕ 一些符号

- f_l : 支路bit流的码速
- f_h : 合路bit流的码速



88



复接的困难之处

⊕ 假设输入m个支路

- 对于一个复接设备，m是固定的
- 能够实现复接的必要条件是 $mf_l < f_h$ 不能取等号，因为复接还额外有开销
- 否则传输链路不足以支持m个支路
- 但这还远远不够... 貌似还不是很难...
- 为了能在接收端将m路bit流分离出来，必须保证支路bit流出现在恰当的位置，并具有统一的帧格式



89



帧与超帧

⊕ 帧结构

- Q个信息bit——来自于信源编码
- K个非信息bit——复接开销 } $K + Q$
- 用于同步，塞入标识等等
- 相当于传送带上的卡具
- 具体功能后面还要讲到

通信理论只关心这些数字，通信工程则关心各个bit的具体位置

⊕ 超帧

- m个不同支路的帧合路形成一个超帧（Super Frame），长度为 $L_s = m(Q + K)$

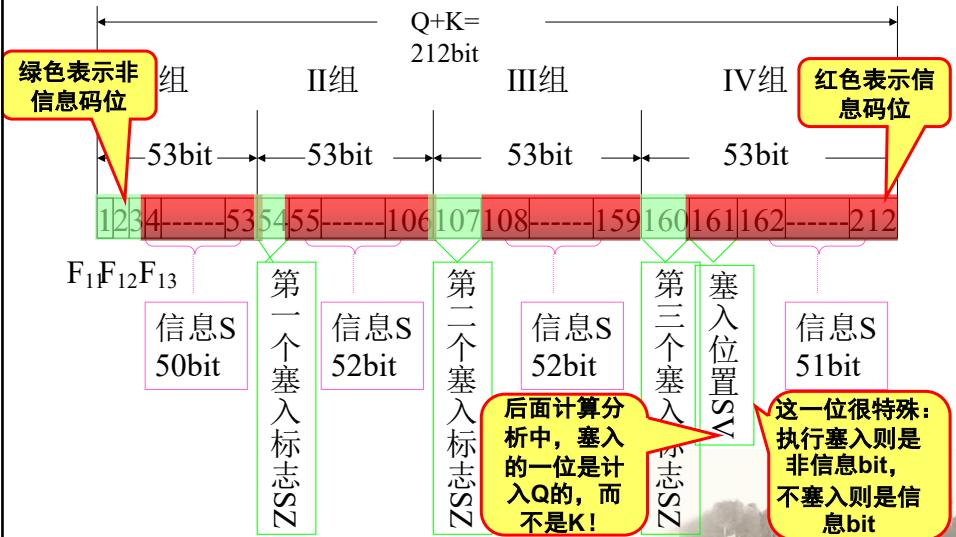


90



实际的帧格式

SDH基群到二次群正码速调整结构



91



复接的困难之处

注意到合路bit流包含了m个帧流

于是分配给每个支路的帧的传输速率为

$$f_m = \frac{f_h}{m}$$

这是由传输设备决定的！

除去复接开销，分配给支路信息bit流的码速为

$$f_i = \frac{Q}{K+Q} \frac{f_h}{m} = \frac{Q}{L_s} f_h$$

同时还决定于帧结构！

注意：由于f_i是传输和复接设备决定的，而f_h是信源编码决定的，因此f_i不一定等于f_h

92



复接的困难之处

⊕ 举个例子来说明这个困难

□ 乘坐摩天轮时，可能出现三种情况

- 1, 摩天轮快，坐不满
- 2, 摆天轮慢，不够坐
- 3, 摆天路速度刚好，但是人流到达不平稳



93



码速调整

⊕ 考虑如下三种情况

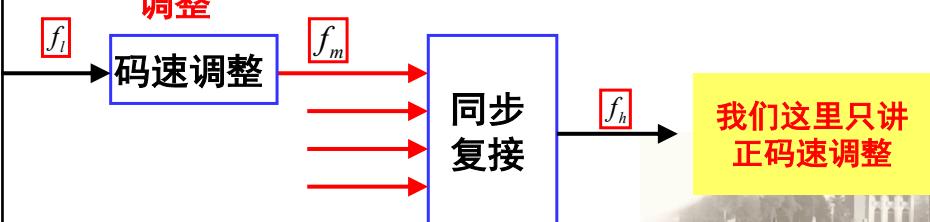
□ 情况1：分配给支路的信息bit传输速率大于支路码速

$$f_l < \frac{Q}{L_s} f_h$$

塞入位相当于摩天轮每个车厢内空着的座位，但在通信中它必须是一个bit，同时需要能区分是信息bit还是塞入bit

□ 此时，支路码流无法把每一帧都填满，需要塞入一些bit

□ 这一过程等效于提高了支路码速，故称正码速调整



94



码速调整

- 情况2：分配给支路的信息bit传输速率等于支路码速

$$f_l = \frac{Q}{L_s} f_h$$

支路码流可以把每一帧都填满，但是由于支路码速的抖动，需要进行bit移位

这一过程没有改变支路码速，故称零码速调整

- 情况3：分配给支路的信息bit传输速率小于支路码速

$$f_l < \frac{Q}{L_s} f_h$$

每帧都填满后，还有未传输的支路bit，需要额外补充bit位置进行传输

从成帧角度来看，这一过程降低了支路码速，故称负码速调整

注意：情况3要求增加摩天轮车厢数

95

调整速率

- 调整速率用来刻画进行塞入的频繁程度

口 f_s ：单位时间内塞入的bit数（塞入码速）

- 注意塞入位是为了弥补支路信息bit流无法填满分配给支路的信息bit传输位而采用的

口 所以

$$f_s + f_l = \frac{Q}{L_s} f_h$$

口 也就是说

$$f_s = \frac{Q}{L_s} f_h - f_l$$

口 此外，工程中定义标称调整速率

$$f_{s0} = \frac{Q}{L_s} f_{h0} - f_{l0}$$

96



最大调整速率与塞入比

由于每帧只有一个塞入位，所以复接设备对于码速调整的能力是有限的

最大调整速率刻画了这一能力

当每帧塞入位都进行塞入时，塞入的码速为

$$f_{s\max} = \frac{f_m}{Q+K} = \frac{mf_m}{m(Q+K)} = \frac{f_h}{L_s}$$

最大调整码速！

为了刻画复接设备使用了多大的调整能力

定义塞入比——实际调整码速与最大调整码速之比

$$S = \frac{f_s}{f_{s\max}}$$



97



塞入比公式

如下公式可以用来计算塞入比

$$\left(\frac{1}{m} - \frac{f_l}{f_h} \right) L_s = K + S$$

证明：

$$S = \frac{f_s}{f_{s\max}} = \frac{\frac{Qf_h}{L_s} - f_l}{\frac{f_h}{L_s}} = \frac{Qf_h - L_s f_l}{f_h} = Q - \frac{f_l}{f_h} L_s$$

再根据

$$L_s = m(Q+K) \rightarrow Q = \frac{1}{m} L_s - K$$

塞入比决定于复接设备，支路码速和帧结构

$$\left(\frac{1}{m} - \frac{f_l}{f_h} \right) L_s = K + S$$



98



误码对于复接的影响

⊕ 如果误码出现在信息码位

□ 没关系，就错一个信息bit而已

⊕ 如果误码出现在塞入指示位（注意不是塞入位）

□ 则信息bit流整体滑动错位，带来严重的误码

□ 所以一般采用多个bit来同时指示是否塞入

□ 塞入指示位差错产生的后果如下

N-1次群码流产生比特滑动

N-1次群分接器出现失帧

N-2次群产生附加误码

没办法细讲，
知道就可以了



99

解复用

⊕ 刚才我们讲了复用，其主要困难是

□ 支路码速与合路码速的不匹配

⊕ 下面我们讲解复用，其主要困难是

□ 从杂乱无章的“0”，“1”bit流中识别出超帧/帧的位置，从而实现正确的分接

□ 识别帧位置的过程称为**帧同步**，在通信/网络中应用的及其广泛

□ 我们这里只讲**帧同步**的基本原理及其分析



100



帧同步方法

⊕ 帧同步的前提：发送端需要标识帧的开头

□ 采用**同步头**，提供帧同步定时信息（Timing Information），标示一帧的开始

□ 同步头是一组确定的“0”，“1”bit，例如 0101011。它由协议规定，收发双方都知道

⊕ 帧同步的问题

□ 由于信息bit是随机的，可能出现任何组合，而当信息bit的01组合与同步头完全一致时，则会出现伪同步头

□ 同步头越长，则出现伪同步头的可能性越小

增长同步头会付出哪些代价？



101

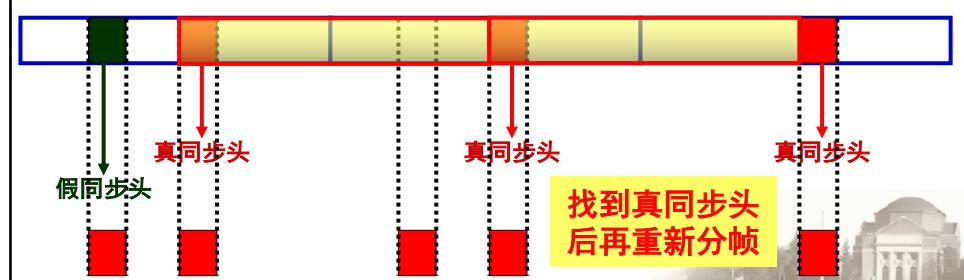
同步头捕捉

高速传输中需要用
在线捕捉算法

⊕ 我们先看一种理想主义的离线方法

□ 把接收到的bit流存下来，先随便切分出n个帧周期（注意接收机知道一帧多长）

□ 然后开始搜索其中的同步头，找到后跳过1个帧周期，再看是否还出现同步头。若连续n次都成功了，则认为找到了正确的同步头



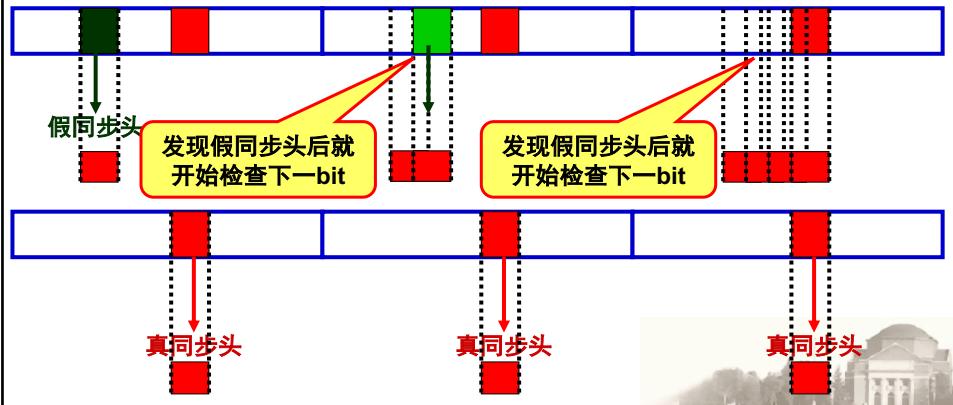
102



同步头捕捉

⊕ 实用的在线算法

□不存储接收到的bit流，如果发现错了就从下一个位置开始继续搜索



103



同步头捕捉的性能分析

⊕ 出现伪同步头的概率

□假设同步头长度为n，则信息bit恰好排成“李鬼”同步头的概率是

$$P = 2^{-n}$$

⊕ 在线算法中，若发现了一个同步头（无论真伪），则系统会等到下一帧验证其真伪

□被一个码位的伪同步头欺骗而耽误的时间是

欺骗时间呈几何分布

$$\begin{aligned}\Delta T &= \sum_{i=1}^{\infty} P^i (1-P) i T \\ &= (1-P) T \sum_{i=1}^{\infty} i P^i \\ &= P(1-P)^{-1} T\end{aligned}$$

这里T表示一帧的周期

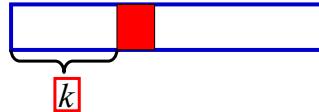
104



同步头捕捉的性能分析

⊕ 假设帧长是L，则切分块长也是L

□ 若真实的帧同步头出现在第k个码位



□ 则找到这个真同步头需耗费的平均时间是

$$T_k = (k-1)\Delta T + (k-1)T_h$$

被前k-1个码位耽误的时间

T_h 是一个bit的时间，这里是移位到第k个码位的时间

105

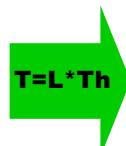


同步头捕捉的性能分析

⊕ 因为预先的切分是随机的（切分位置等概），所以真实同步头出现在哪个码位也是均匀分布的。

□ 所以，找到（不是确认）真实同步头的平均时间就是

$$\begin{aligned}\bar{T} &= E[T_k] \\ &= \sum_{k=1}^L \frac{(k-1)\Delta T + (k-1)T_h}{L} \\ &= \frac{L-1}{2}(\Delta T + T_h) \\ &= \frac{L-1}{2} \left(\frac{P}{1-P} T + T_h \right)\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\bar{T} &= \frac{L-1}{2} \left(\frac{P}{1-P} T + T_h \right) \\ &= \frac{L-1}{2} \left(1 + \frac{LP}{1-P} \right) T_h\end{aligned}$$

106



信道误码对同步头捕捉的影响

⊕ 当信道存在误码时，则情况更糟糕

□ 即使遇到了真的帧同步头，也可能其自身的误码而失之交臂

□ 信道误码为 P_e 时漏检真的帧同步头的概率是

$$P_m = 1 - (1 - P_e)^n \approx nP_e$$

□ 漏检真的帧同步头的后果：

1. 接收机从下一个码位开始继续搜索

错过了！



注意：误码不影响0, 1等概率分布，所以出现伪同步头的可能性没有改变。

2. 距离下次找到真的帧同步头的平均时间是

$$T_L + T_h$$

别忘了错过后移位的时间

107



信道误码对同步头捕捉的影响

⊕ 抓到真的帧同步头的平均时间是

为什么还长得几何分布样？

$$\begin{aligned} \bar{T}_e &= \sum_{i=0}^{\infty} P_m^i (1 - P_m) [\bar{T} + i(T_L + T_h)] \\ &= \bar{T} + (1 - P_m)(T_L + T_h) \sum_{i=1}^{\infty} iP_m^i \\ &= \bar{T} + \frac{P_m}{1 - P_m} (T_L + T_h) \end{aligned}$$

⊕ 注意到

$$2\bar{T} = (L-1)(\Delta T + T_h) \approx T_L + T_h$$

后两个近似利用了 P 和 P_m 很小的性质

$$\bar{T}_e \approx \frac{1 + P_m}{1 - P_m} \bar{T} \approx (1 + 2P_m)(1 + LP) \frac{L-1}{2} T_h \approx (1 + 2P_m + LP) \frac{L-1}{2} T_h$$

108



最优同步头长度

⊕ 同步头长度的影响

$$\bar{T}_e \approx (1 + 2P_m + LP) \frac{L-1}{2} T_h$$

$$P_m = nP_e$$

可通过减小同步头长度而减小

$$P = 2^{-n}$$

可通过增加同步头长度而减小

⊕ 于是，最优化同步头的问题建模为

$$\min : t(n) = 2nP_e + L2^{-n}$$

⊕ 求导后得

$$\frac{d}{dn} t(n) = 2P_e - L2^{-n} \ln 2 = 0$$

⊕ 最优同步头长为

$$n = \log_2 \left(\frac{L \ln 2}{2P_e} \right)$$

109



改善差错信道下的帧同步性能

⊕ 差错信道下帧同步面临的问题

□ 当信道存在差错时，任意一位误码都会可以导致失步虚警

□ 接收机频繁的失步和再同步搜索会产生巨大的开销，浪费通信资源，从而导致效率低下

⊕ 解决的方法

□ 对同步结果进行校验，若连续几次发现同步头，则进入同步状态

□ 进入同步状态后，不轻易进入失步状态。仅当连续多次同步头校验差错时，转入失步状态

引入帧同步状态机！



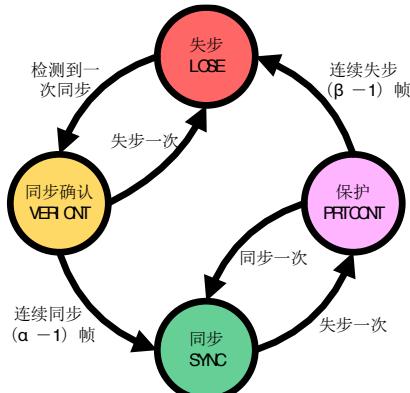
110



帧同步状态机

综合使用帧同步保护和搜捕校核

**若连续三次
找到同步头，
则锁定到同
步状态**



歌剧《图兰朵》：三
个问题，一次死亡！

捉三放四！

111



失步时间的分析

问题的描述

这是课本p190习题8.6的解法！

口处于同步状态时，以概率

$$p = P_m = 1 - (1 - P_e)^n \approx nP_e$$

口发生同步头错误，若连续发生k次错误，则进入失步状态，则进入失步的平均时间是多少？

问题的求解：先进行数学建模

口有放回的抽球，抽到蓝色球的概率为 $(1-p)$ ，抽到红色球概率为 p

口当连续抽到i次红球时试验停止，此时总抽球次数记为K

口讨论K的分布及数字特征

112





抽球模型的计算

⊕ 定义概率累积函数

$$q_k = \Pr\{K \leq k\}$$

⊕ 则概率分布函数为

$$p_k = q_k - q_{k-1} = \Pr\{K = k\}$$

⊕ 求解的关键：

□ {抽球恰在第k次结束} = {前k-i-1次中未出现连续i个红球} and {第k-i次是蓝球} and {最后i次全是红球}



113



概率迭代方程

⊕ 上式中各概率的计算

□ {前K-i-1次中未出现连续i个红球}

$$1 - q_{k-i-1}$$

□ {第K-i次是蓝球} $p_b = 1 - p$

□ {最后i次全是红球} $p_r = p^i$

□ {抽球恰在第k次结束} $p_k = q_k - q_{k-1}$

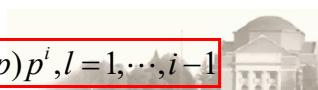
⊕ 根据上式列出概率迭代方程为

$$q_k - q_{k-1} = (1 - q_{k-i-1})(1 - p)p^i$$

□ 初始边界条件

$$q_i = p^i$$

$$q_{i+l} = p^i + l(1 - p)p^i, l = 1, \dots, i-1$$



114



概率迭代方程的求解

⊕ 利用特征函数在变换域求解

□ 注意到边界条件，先进行下标平移

注意边界条件
 $q_{-i} = p^i$

$$q_{k+i+1} - q_{k+i} = (1-q_k)(1-p)p^i$$



$$z^{i+1}Q(z) - p^i z - z^{-1}Q(z) = \left(\frac{1}{1-z^{-1}} - Q(z) \right) (1-p)p^i$$

一般来说，我们更关心平均失步时间，而这个容易得到简单的解析结果

$$Q(z) = \frac{p^i(z-p)}{(1-z^{-1})[z^{i+1} - z^i + (1-p)p^i]}$$

由部分分式展开法进行Z反变换即可得概率累积函数！

115



平均失步时间计算



⊕ 注意到失步帧数的概率分布为

$$p_k = q_k - q_{k-1}$$

$$P(z) = Q(z) - z^{-1}Q(z) = \frac{p^i(z-p)}{z^{i+1} - z^i + (1-p)p^i}$$

⊕ 回忆由生成函数求均值的方法

$$P'(z) = \frac{d}{dz} P(z) = \frac{p^i [z^{i+1} - z^i + (1-p)p^i] - p^i(z-p)[(i+1)z^i - iz^{i-1}]}{[z^{i+1} - z^i + (1-p)p^i]^2}$$

⊕ 平均失步帧数为

$$\tau = -P'(1)T = \frac{1-p^i}{(1-p)p^i} T$$

有兴趣的同学可以看一下：S.-Y. R. Li, A Martingale Approach to the Study of Occurrence of Sequence Patterns in Repeated Experiments, Annals of Probability, Vol.8, No.6, pp.1171-1176, 1980.

116



平均失步时间的讨论

⊕ 进一步讨论

□ 低误码率或大*i*情况下

$$\tau \approx \frac{T}{(1-p)p^i}$$

⊕ 考虑一个实际系统

□ 若同步头长度为3bit，传输误码率约 $pe=0.033$ （这对实际系统要求很低），则对应的 $p=0.1$

□ 若采用4级保护，此时平均失步时间为

$$\tau \approx \frac{T}{(1-p)p^i} = \frac{T}{0.9 \times 0.1^4} = 11000T$$

如此高的误码率下能够保证平均同步时间超过10000帧，性能已经很好了！

117



时分复用系统与标准

⊕ 准同步数字复接

注意这里的同步概念和刚才略有区别，是指支路码速方面的

□ PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy)

□ 复接方法采用上面讲过的码速调整

⊕ 同步数字复接

□ SDH (Synchronous Digital Hierarchy)

□ 复接方法采用固定位置映射法

此时支路码速必须严格等于传输设备分配给其的码速，若有偏差，则通过缓冲器延时处理。

这一页及随后3页供填空、简答时参考，知道就可以了

118





PDH的缺点

⊕ 地区性的标准

- 北美: 1.5M, 6.3M, 45M, Nx45M
- 欧洲: 2M, 8M, 34M, 140M
- 日本: 1.5M, 6.3M, 32M, 100M, 400M

⊕ 没有世界性的标准光接口

⊕ 异步复用方式: 码速调整

⊕ OAM (运行、管理和维护; Operation, Administration and Maintenance) 通道缺乏

⊕ 基于点对点传输

⊕ 没有业务的兼容性



119



SDH的优点和缺点

⊕ 优点:

- 通用和兼容的电、光接口
- 字节间插复用方式
- 丰富的OAM功能
- 对PDH的向下兼容性

⊕ 缺点:

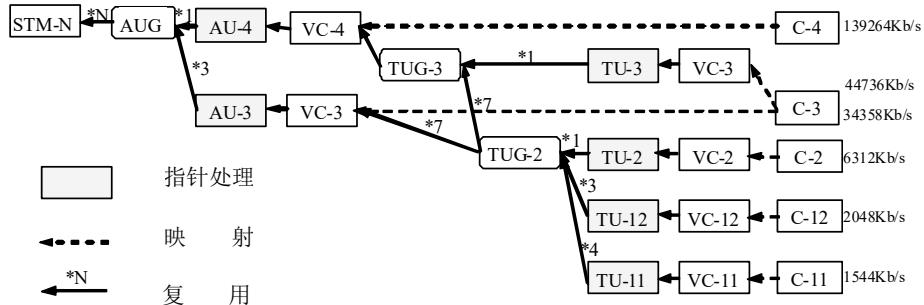
- 效率低
- 指针调整机制复杂
- 软件的大量使用影响系统安全性



120



时分复接的标准现状



PDH按传输速率不同，分别称为基群、二次群、三次群、四次群，四次群以下存在两套准同步数字复接系列，一套用于北美和日本，另一套用于欧洲和中国

SDH是全球统一的同步数字复接系列，当四次群速率已不能满足大容量高速传输需求时，美国首先提出同步光纤网（SONET）的建议，开始推行SDH复接标准

121

本讲提纲

- ⊕ 基本概念：复用、多址、双工
- ⊕ 基础理论：通信资源的划分方式
- ⊕ 接入技术：多址接入、随机接入
- ⊕ 复用技术：时分复用、复接技术
- ⊕ 双工技术：全双工、半双工

122



关于双工

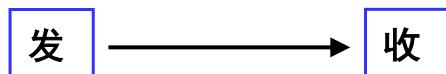
在通信协议和标准中，大家常常也会看到 TDD, FDD等词汇

□ 这里：第二个D是Duplex——双工，表示双向通信时双发对于通信资源的共享

□ FDD时分双工，TDD频分双工

为了避免混淆，这里也做一点解释

□ 单工（Simplex），顾名思义只能单向传输



□ 如广播系统就是单工的。但是多数通信系统需要双工

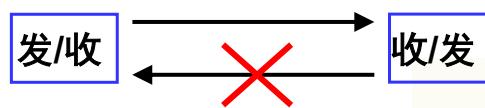
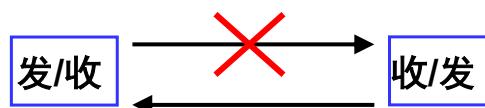
123

半双工

半双工（Half Duplex）

□ 可以实现双向通信，但是发的时候不能收，收的时候不能发，需要手动切换

□ 对讲机：walkie-talkie, push-to-talk



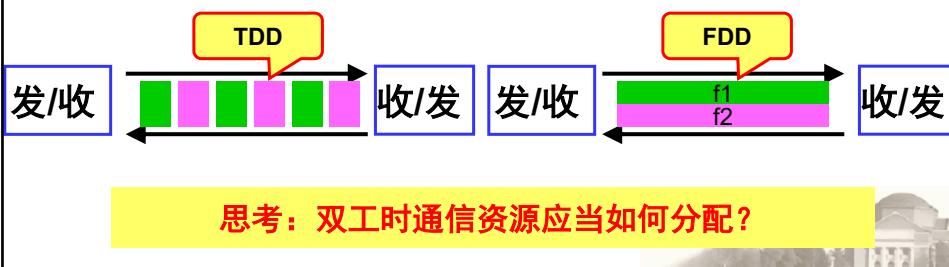
124



全双工

⊕ 全双工 (Full Duplex)

- 可以实现双向通信，系统自动将信道划分为两个单向的信道
- TDD：按时隙划分两个单向的信道
- FDD：按频带划分两个单向的信道



125

致谢

- ⊕ 本课程讲义是在清华大学《现代通信原理》、《通信原理概论》、《通信与网络》长年教学积累基础上制作而成，向参与本课程建设多位教师致敬。
- ⊕ 本教学素材同时参考了国外开放课程资料：

- MIT Open Course Ware: Digital Communication Systems
(<http://ocw.mit.edu>, EECS 6.02)
- edX: A System View of Communications: From Signals to Packets (<https://www.edx.org>)

126



《通信与网络》
Communications & Networks

谢谢！

Thanks !

