

The background of the slide features a stylized world map in a light blue color, centered in the upper half. Below the map is a depiction of a vast ocean with gentle ripples, extending to the bottom of the frame. The sky above the ocean is a gradient of blue, with soft, white clouds on the right side, suggesting a bright, clear day. The overall aesthetic is clean and professional, typical of a technical presentation.

第8章 多路复用和多址接入

本章内容

8.1 引言

8.2 FDMA

8.3 TDMA

8.4 CDMA

8.5 CSMA

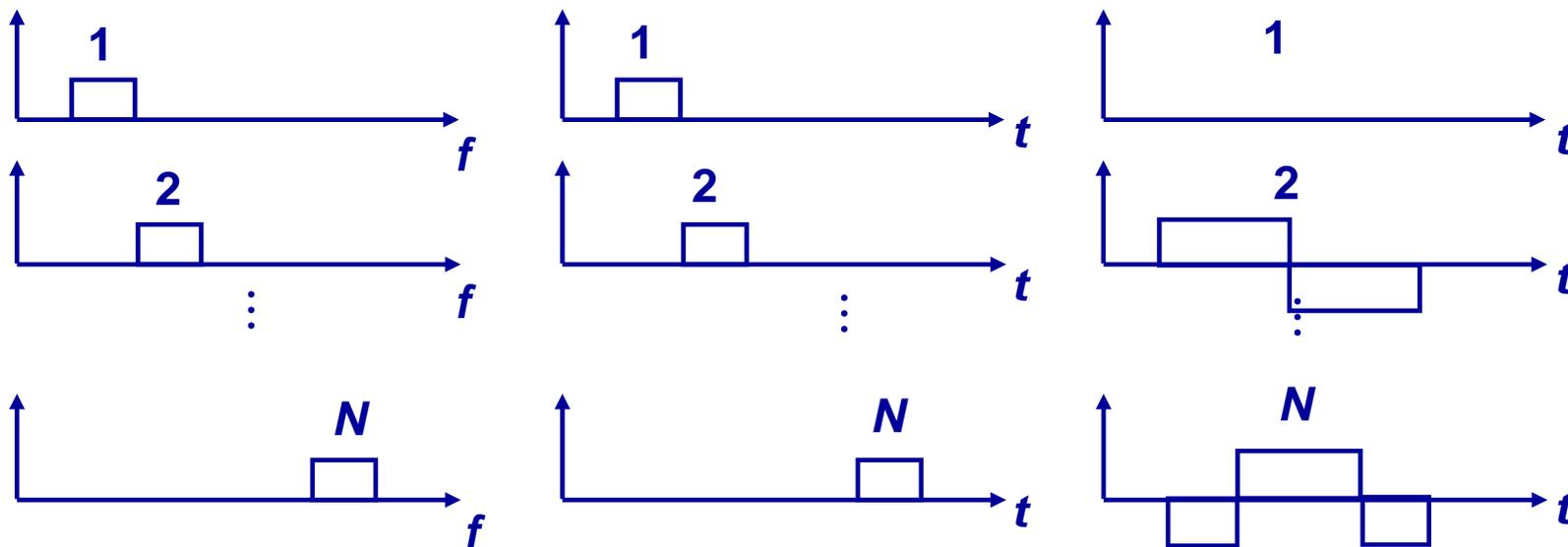
8.6 polling

8.7 trend

8.1 引言

❖ 多路复用

- 目的：在一条链路上传输多路独立信号而互不干扰
- 基本原理：正交划分方法
- 3种多路复用基本方法：频分复用（**FDM**）、时分复用（**TDM**）、码分复用（**CDM**）
- 其它方法：波分复用（**WDM**）、空分复用（**SDM**）



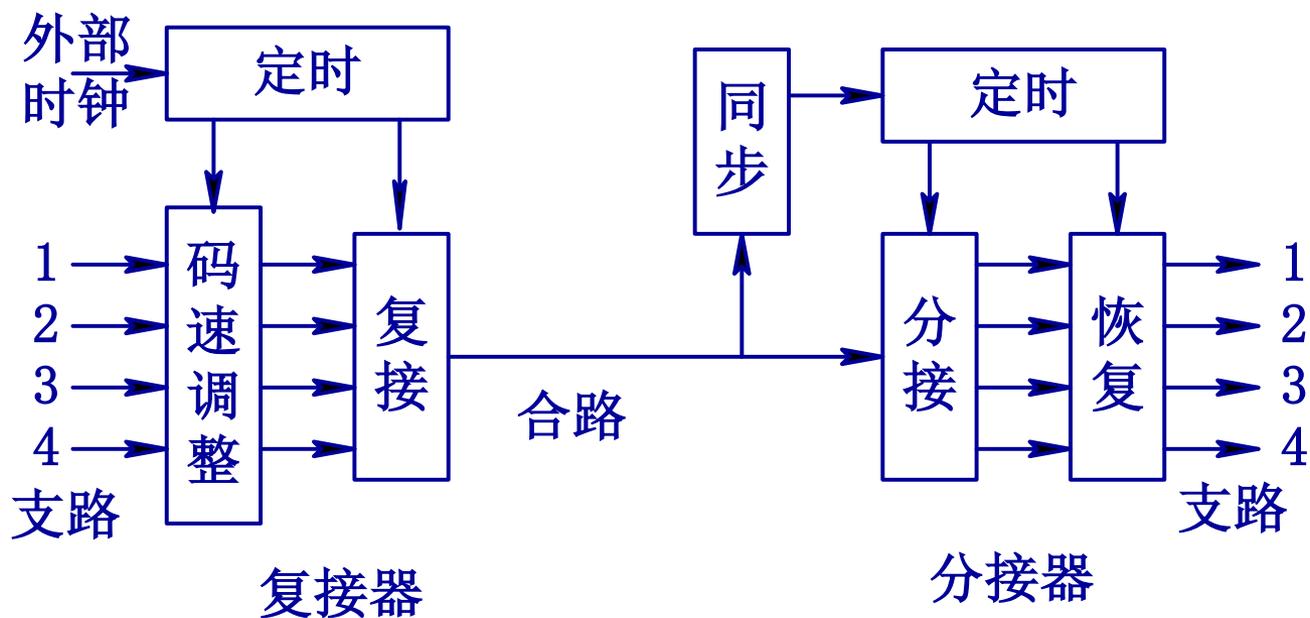
(a) 频分

(b) 时分

(c) 码分

❖ 复接

- 目的：解决来自若干条链路的多路信号的合并和区分。
- 关键技术问题：目前大容量链路的复接几乎都是**TDM**信号的复接，此时，多路**TDM**信号时钟的统一和定时就成为关键问题。



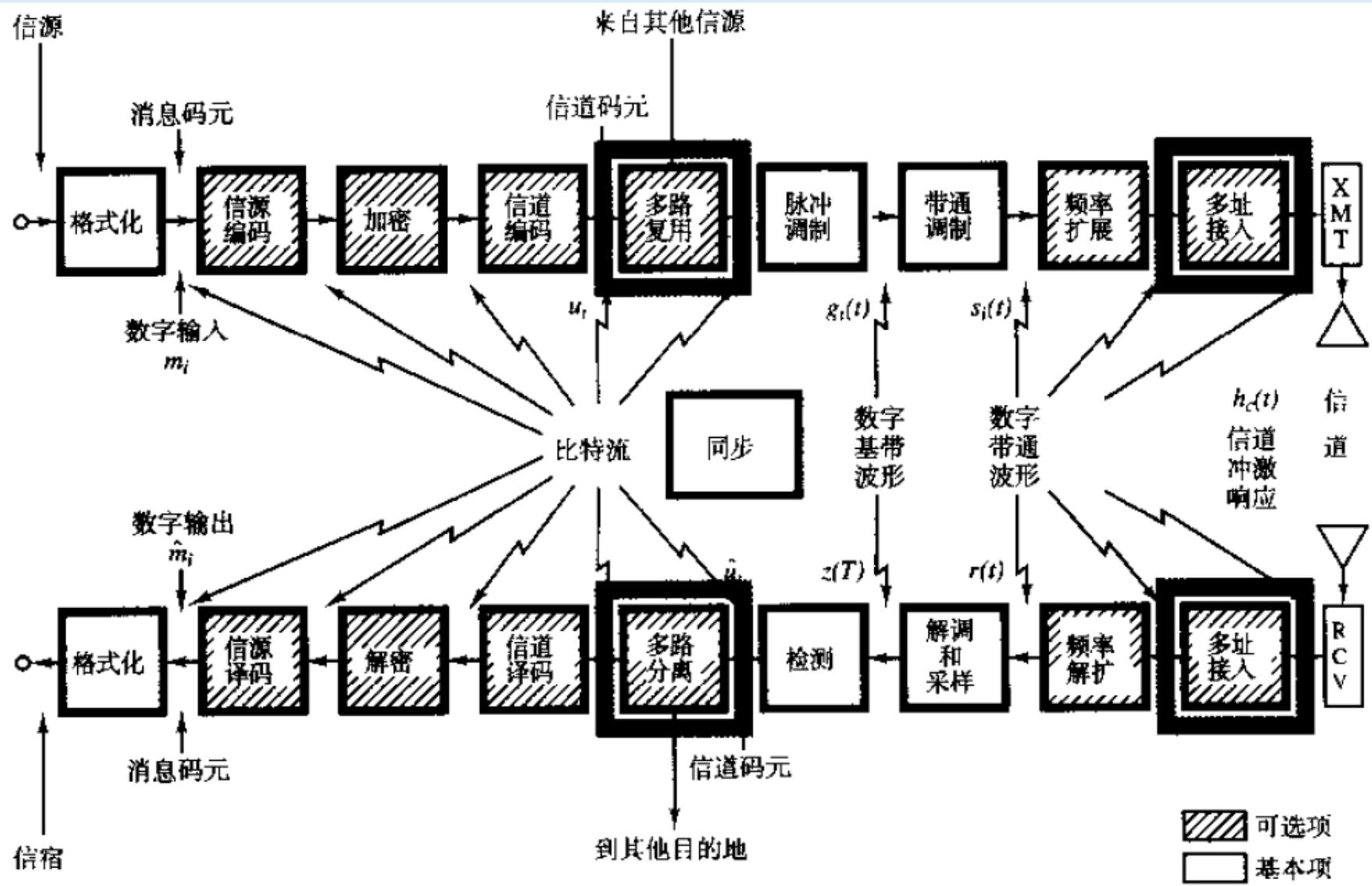
数字复接系统组成原理

❖ 多址接入

- 目的：多个用户共享信道、动态分配网络资源。
- 方法：频分多址、时分多址、码分多址、空分多址、极化多址以及其他利用信号统计特性复用的多址技术等。

❖ 多路复用和多址接入的区别与联系

- 相同：二者都是为了**通信资源共享**
- 区别：
 - 多路复用中，用户对资源共享的需求是固定的，或者至多是缓慢变化的，资源是预先分配给各用户。
 - 多址接入中，网络资源通常是动态分配的，并且可以由用户在远端提出共享要求。因此必须按照用户对网络资源的需求，随时动态地改变网络资源的分配。



- ❖ 在通信系统尤其是无线系统中，通信资源是非常宝贵的，如何让用户在信号传输时共享这些资源就是我们本章的研究内容。
- ❖ 无线网络中的多址接入协议大致分为三类：**固定分配** (e.g. TDMA, FDMA, CDMA, SDMA, PDMA), **随机接入** (e.g. ALOHA, CSMA/CA) and **按需分配** (e.g. polling).
- ❖ 多址接入设计的关键问题：**各种信号在共享通信资源时，不会在检测过程中产生难以处理的相互干扰。**

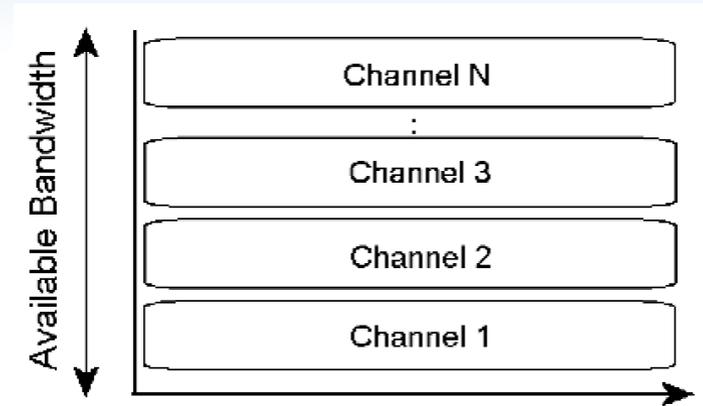
❖ 如：TDMA
$$\int_{-\infty}^{+\infty} x_i(t)x_j(t)dt = \begin{cases} K, & i = j \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

$$K \neq 0$$

❖ FDMA
$$\int_{-\infty}^{+\infty} X_i(f)X_j(f)df = \begin{cases} K, & i = j \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

8.2 FDMA

- 频分多址 (FDMA, Frequency Division Multiple Access)将可用频谱分成多个子带, 供一个或多个用户使用。



- ❖ Using FDMA, each user is allocated a dedicated channel (subband), different in frequency from the subbands allocated to other users. Over the dedicated subband the user exchanges information. When the number of users is small relative to the number of channels, this allocation can be static, however, for many users dynamic channel allocation schemes are necessary.

- ❖ 在蜂窝系统中，信道分配通常都是成对进行的，因此对每个正在通信的移动用户，都有两个信道：一个是从用户端到基站端传输数据，称为上行链路（Uplink），或反向链路(reverse link)；一个是从基站端到用户端传输数据，称为下行链路（Downlink），或称为前向链路(forward link)。
- ❖ For an uplink/downlink pair, uplink channels typically operate on a lower frequency than the downlink channel in an effort to preserve energy at the mobile nodes. This is because higher frequencies suffer greater attenuation than lower frequencies and consequently demand increased transmission power to compensate for the loss. By using low frequency channels for the uplink, mobile nodes can operate at lower power levels and thus preserve energy.

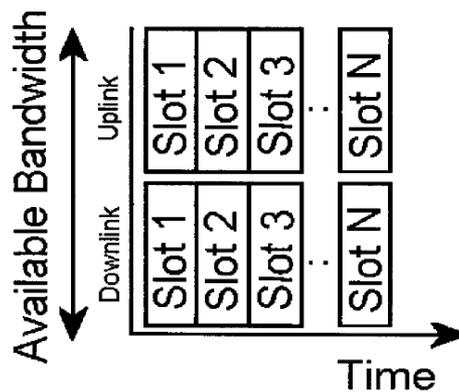
- ❖ **FDMA**最大的问题是信道彼此之间不能靠的太近，因为发射机在某个信道的主瓣（**main band**）上发射信号时，会在该信道的旁瓣(**sideband**)上产生能量泄漏，因此频率信道之间一定要有频带保护，以消除信道间的干扰。当然，这些保护频带的使用，降低了可用频谱的利用率。

系统	上行链路 工作频段	下行链路 工作频段	信道带宽	可用信 道带宽
AMPS	824~849MHz	869~894MHz	30KHz	24KHz
NMT	453~457.5MHz 890~915MHz	463~467.7MHz 935~960MHz	25KHz	9.4KHz

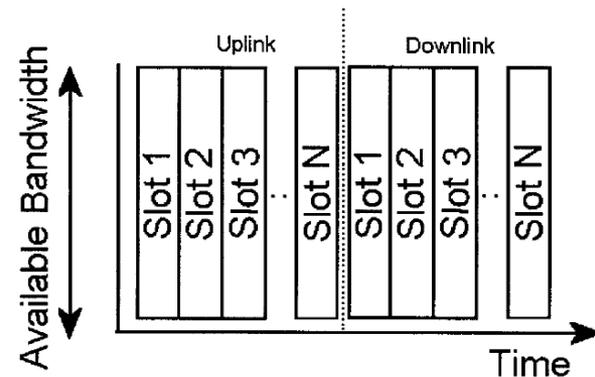
8.3 时分多址 (TDMA)

- ❖ 在TDMA(Time Division Multiple Access)中, 相同通信资源的共享是通过分配给用户不同的时隙(Timeslot)实现的。
- ❖ Each active node is assigned one (or more) slots for transmission of its traffic. Nodes are notified of the slot number that has been assigned to them, so they know how much to wait within the TDMA frame before transmission.

Uplink and downlink channels in TDMA can either occur in different frequency bands (FDD-TDMA) or time-multiplexed in the same band (TDD-TDMA).

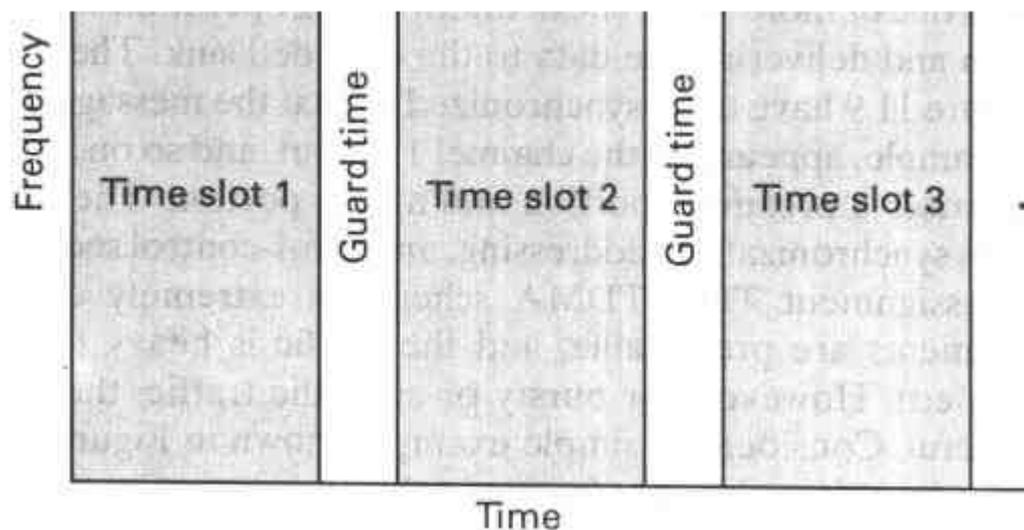


FDD-TDMA

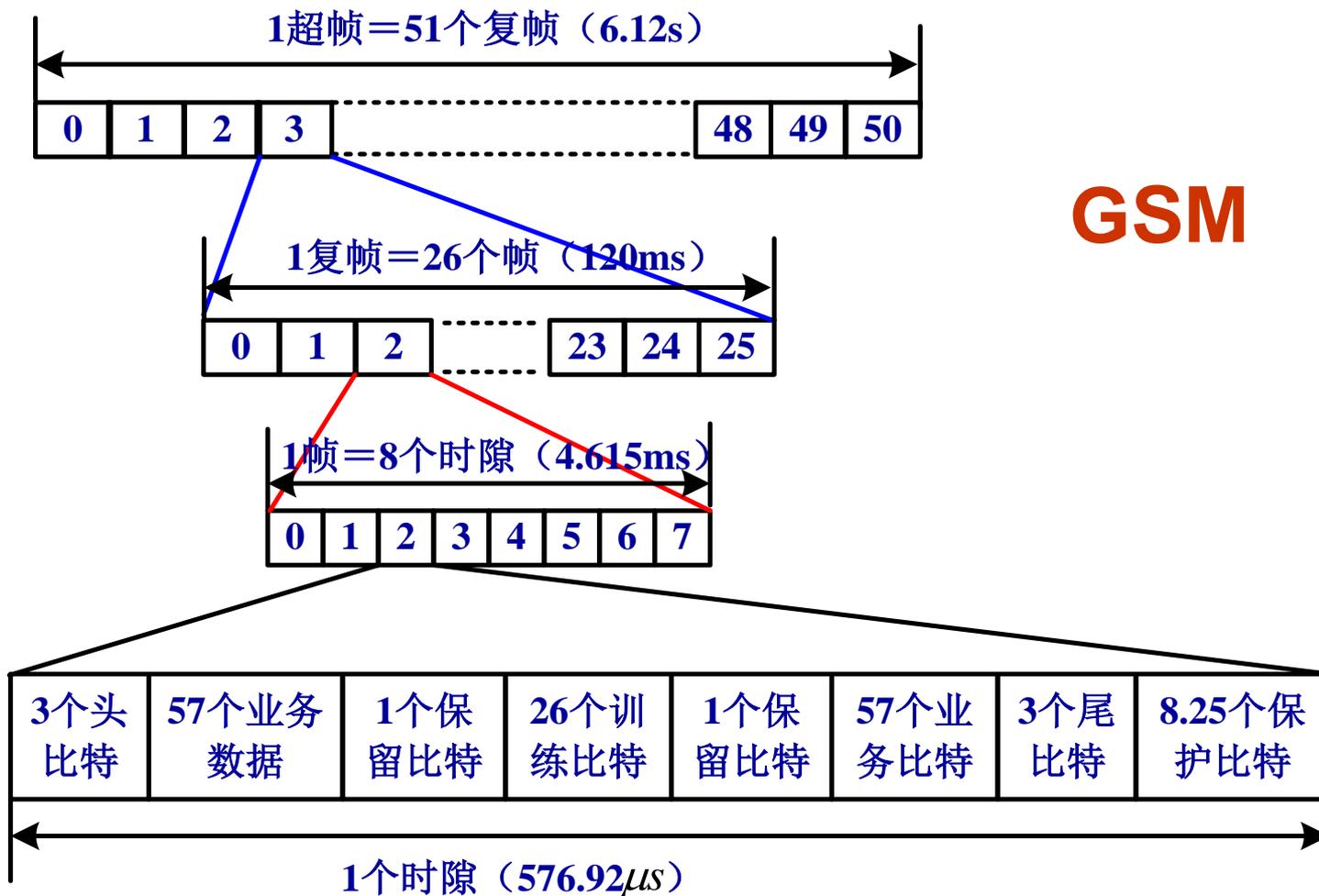


TDD-TDMA

- ❖ TDMA本质上是一种半复用技术，因为对于通信双方来说，在某个特定时刻，只能有一方进行发送。如果时隙很短，在TDMA系统对同步的要求就比较高，如果多个用户距离较远，传输时延就可能会使某些用户错过其发送的顺序。因此相邻时隙之间也要留出保护时间（Guard Time）。



固定分配的TDMA



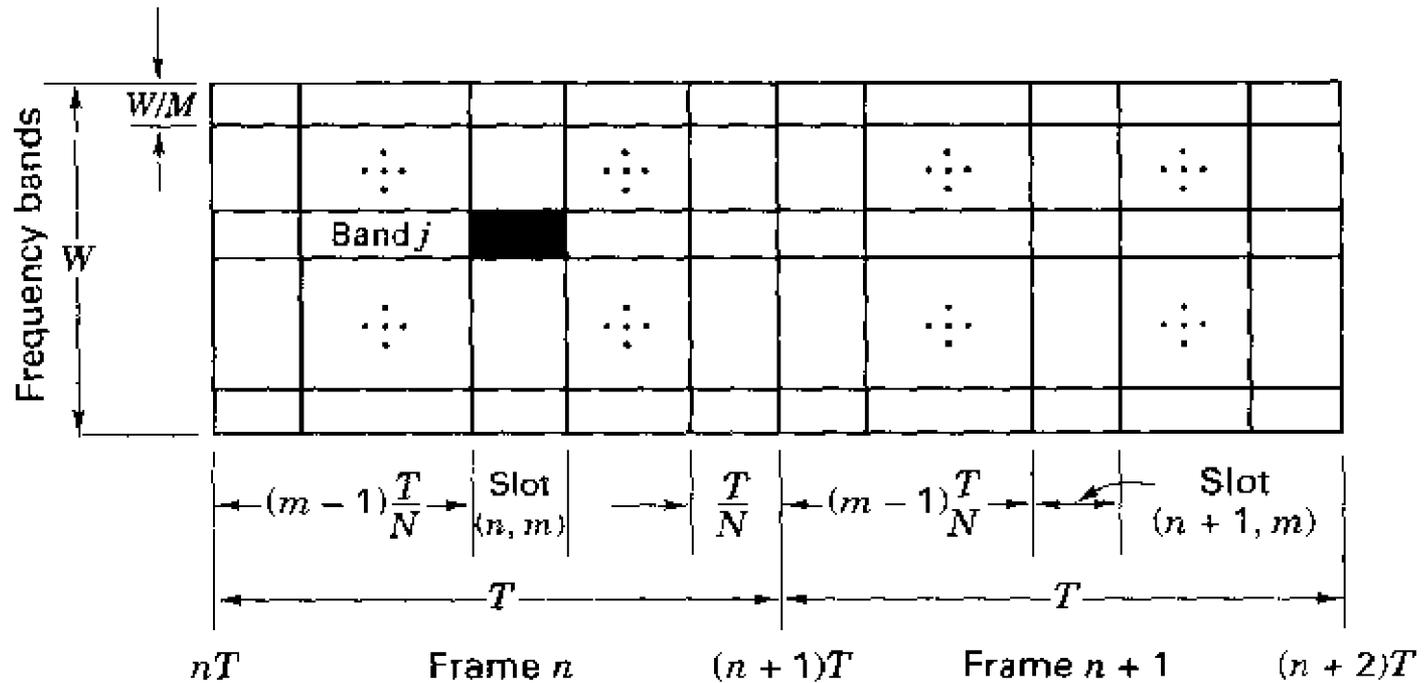
GSM

动态分配TDMA

- ❖ 动态TDMA策略是按照业务需求分配时隙，最大的好处是能够自适应于不断变换的业务方式。它主要包括以下三类：
- ❖ **第一种方案**是Binder提出的：假设用户数少于时隙数，这样每个用户都可以分配到一个特定的时隙，剩余的时隙不分配给任何人。按照用户的业务需求，它可以用slotted ALOHA的方式对剩余时隙进行竞争。
- ❖ 如果一个用户想在一个剩余slot里发送信息，它就在该slot的开始进行操作；如果一个用户 $USER_A$ 监测到用户 $USER_B$ 在前一个TDMA帧的HOME SLOT_B是空闲状态， $USER_A$ 也可以使用 $USER_B$ 的HOME SLOT_B进行数据发送；当 $USER_B$ 想发送数据时，它就在HOME SLOT_B进行发送，当然碰撞就产生了，这就告诉其他用户在下一个TDMA帧里，HOME SLOT_B是属于 $USER_B$ 的，其他用户就不要在该时隙发送数据。

- ❖ **第二种方案**是Crowther提出的：假设用户数是未知的，且不断变化的，则时隙不分配给任何一个用户，所有用户都是通过ALOHA方式竞争使用。当一个用户 $USER_A$ 获取一个 $SLOT_A$ ，它就发送一个帧。其他用户就知道了这种情况，在下一个TDMA帧中就不使用 $SLOT_A$ 。
- ❖ **第三种方案**是Roberts提出的，目的是最小化由于碰撞造成的带宽损失。在一个TDMA帧中有一个特定的时隙（预留时隙 reservation slot），该时隙又被分成很多子时隙（subslots），用于解决时隙的竞争问题。每个想使用时隙进行数据发送的用户都会在预约时隙的一个subslot（随机方式）里发送注册请求。时隙的分配是按照升序进行的。即第一个成功预约分配TDMA帧的第一个数据slot，第二个成功预约分配TDMA帧的第二个数据slot，依次类推。

联合FDMA/TDMA



❖ 相对于时间零点，某个时隙可描述为：

$$\text{时隙}(n,m) \quad nT + \frac{(m-1)T}{N} \leq t \leq nT + \frac{mT}{N}$$

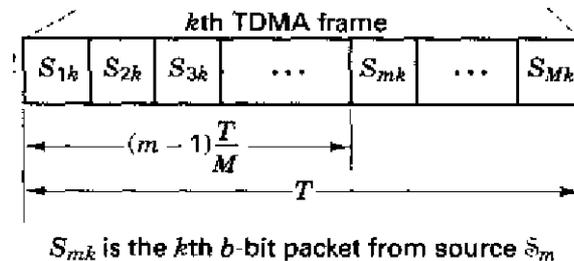
FDMA和TDMA的性能比较

- ❖ **比特率等效性**: 假设通信资源能够支持R bps的数据速率;
- ❖ **FDMA**: 系统带宽被分成M个正交频带 (M个用户), 每个用户都能够以R/M bps的速率传输, 即 $R_{FD}=R/M$ 。
- ❖ **TDMA**: 每个帧被分为M个正交时隙 (M个用户), 每个用户都以R bps的数据速率传输, 但需要的传输时间拉长了M倍, 即 $R_{TD}=R/M$ 。
- ❖ **消息延迟特性D**: 由数据分组的平均等待时间 T_{wait} 和传输时间 $T_{transmit}$ 组成。
- ❖ **FDMA**: 每个数据分组在T秒间隔上发送, 且数据分组一旦生成就马上被传输, so $T_{transmit-FD}=T$, $T_{wait-FD}=0$
- ❖ **TDMA**: 每个数据分组在T/M秒间隔上发送, so $T_{transmit-TD}=T/M$

$$T_{wait-TD} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (m-1) \frac{T}{M} = \frac{T}{2} \left(1 - \frac{1}{M}\right)$$

$$D_{FD} = T$$

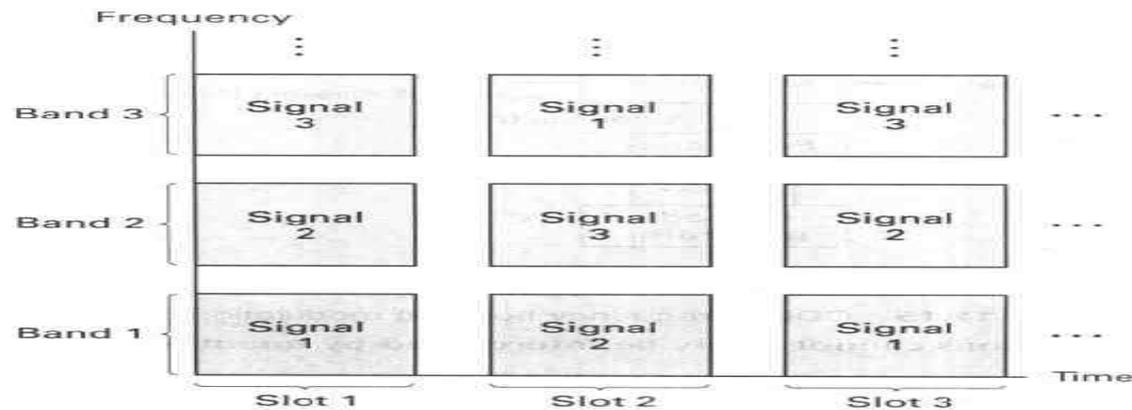
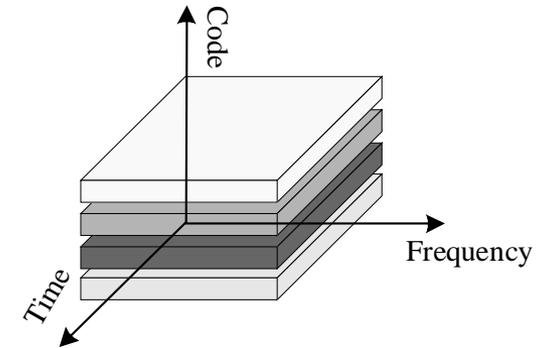
$$D_{TD} = \frac{T}{2} \left(1 - \frac{1}{M}\right) + \frac{T}{M}$$



从消息延迟的角度看, TDMA 优于FDMA。

8.4 CDMA

- ❖ **FDMA**是在不同的频率子带容纳多用户，**TDMA**是在不同的时隙容纳多用户，而**CDMA**系统中，多个用户可以共享所有的频带和时隙，不同用户是用不同的码字唯一识别。
- ❖ **CDMA**源于扩频，在World War II期间开发出来的。扩频的目的是避免人为干扰或被敌人截获信息，它在特定的时间间隔内使用了很多窄带信道，这样敌人只能监听到某一个窄带信道，而不能接收到整个信息。这种形式的扩频称为**Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)**，不是用作为接入技术。



- ❖ 目前CDMA常指**Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)**, 用于所有的基于CDMA的蜂窝电话系统中。所有用户都分配一个特定的码(code), 不同用户的code是相互正交或准正交的, 即任何一对码字向量的内积为0。
- ❖ 如: **Hadamard**矩阵满足以上特性

$$H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

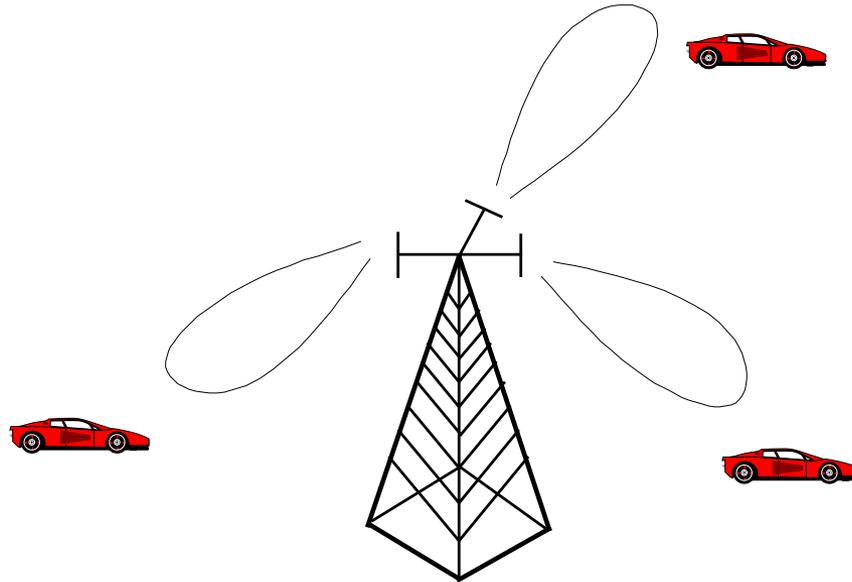
$$H_n = \begin{bmatrix} H_{n-1} & H_{n-1} \\ H_{n-1} & -H_{n-1} \end{bmatrix}$$

Station codes	Transmissions	Decoding traffic of station:
$C_A: 1010$	A: Bit 1 $\Rightarrow 1 -1 1 -1$	A: $S * C_A = (-1 -1 3 -1) * (1 -1 1 -1) / 4 = 1 \Rightarrow$ binary 1.
$C_B: 1001$	B: Bit 0 $\Rightarrow -1 1 1 -1$	B: $S * C_B = (-1 -1 3 -1) * (1 -1 -1 1) / 4 = -1 \Rightarrow$ binary 0.
$C_C: 0011$	C: Bit 1 $\Rightarrow -1 -1 1 1$	C: $S * C_C = (-1 -1 3 -1) * (-1 -1 1 1) / 4 = 1 \Rightarrow$ binary 1.
	----- $S = -1 -1 3 -1$	

- ❖ **CDMA**假设不同用户的信号到达接收机时具有相同的功率，但实际情况并非如此。由于不同用户到达**BS**的路径不同，信道衰落也就不同，因此信号功率也就不同。这就是远近效应，可通过功率控制技术，使得不同用户到达**BS**时的功率大致相同。
- ❖ 再者，同**FDMA**和**TDMA**一样，**CDMA**也要求发射机和接收机之间保持同步,这可通过由发射机发送一个特定的**code**来实现，这个信号称为导引（**pilot**）信号，接收机接收到该信号可保持与发射机的同步。

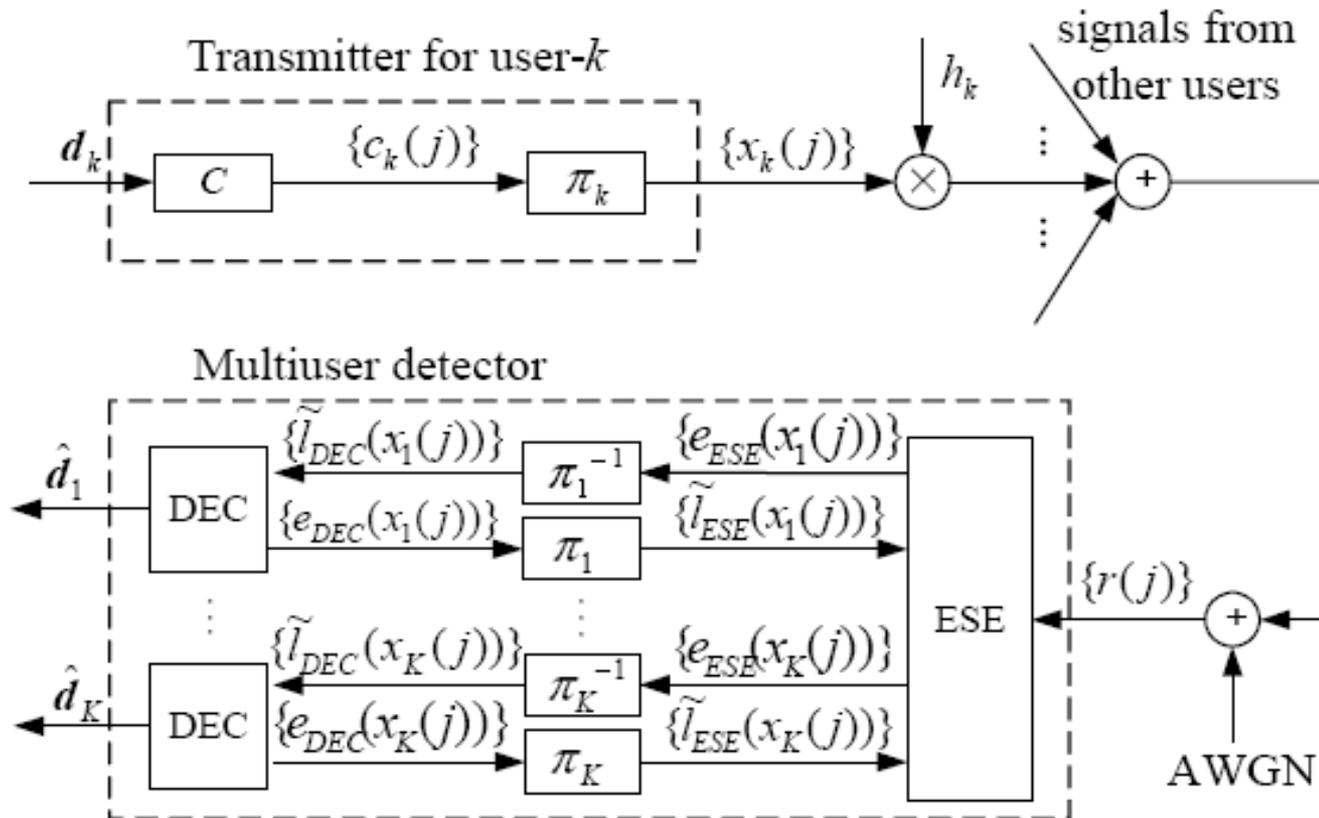
空分多址 (SDMA)

- ❖ 空分多址 (Space Division Multiple Access), 也称为多波束频率复用。



交织多址 (IDMA)

❖ Interleave-Division Multiple-Access



8.5 ALOHA-CSMA

- ❖ **The principle of ALOHA is fairly simple: Whenever a station has a packet to transmit, it does so instantaneously. If the station is among a few active stations within the network, the chances are that its transmission will be successful. If, however, the number of stations is relatively large, it is probable that the transmission of the station will coincide with that of (possibly more than one) other stations, resulting in a collision and the stations' frames being destroyed.**
- ❖ **A critical point is the performance of ALOHA. One can see that in order for a packet to reach the destination successfully, it is necessary that:**
 - **no other transmissions begin within one frame time of its start;**
 - **no other transmissions are in progress when the station starts its own transmission; this is because stations in ALOHA are 'deaf', meaning that they do not check for other transmissions before they start their own.**

- ❖ Thus, one can see that the period during which a packet is vulnerable to collisions equals twice the packet transmission size. It can be proven that the throughput $T(G)$ for an offered load of G frames per frame time in an **ALOHA** system that uses frames of fixed size is given by $T(G)=Ge^{-2G}$. A refinement of ALOHA, slotted ALOHA, achieves twice the above performance, by dividing the channel into equal time slots (with duration equaling the packet transmission time) and forcing transmissions to occur only at the beginning of a slot. The vulnerable period for a frame is now lowered to half (the frame's transmission time) which explains the fact that performance is doubled. The throughput $T_s(S)$ for an offered load of G frames per frame time in a **slotted ALOHA** system that uses frames of fixed size is given by $T_s(G)=Ge^{-G}$.

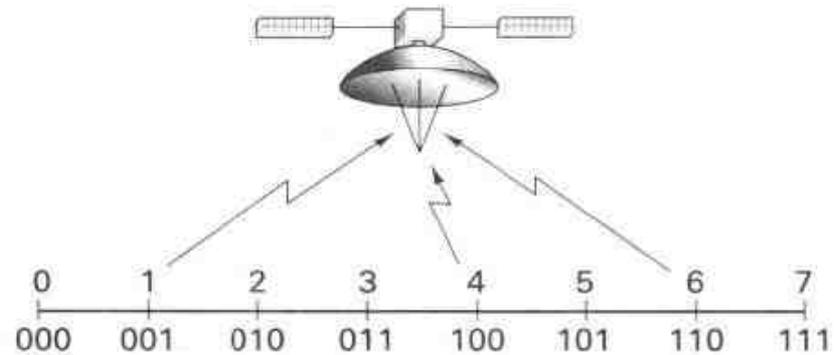
❖ The obvious advantage of ALOHA is its simplicity. However, this simplicity causes low performance of the system. **Carrier Sense Multiple Access (CSMA)** is more efficient than ALOHA. A CSMA station that has a packet to transmit listens to see if another transmission is in progress. If this is true, the station defers. The behavior at this point defines a number of CSMA variants:

- **P-persistent CSMA.** A CSMA station that has a packet to transmit listens to see if another transmission is in progress. If this is true, the station waits for the current transmission to complete and then starts transmitting with probability p . For $p=1$ this variant is known as 1-persistent CSMA.
- **Nonpersistent CSMA.** In an effort to be less greedy, stations can defer from monitoring the medium when this is found busy and retry after a random period of time.

8.6 polling

- ❖ 二叉树搜索 (binary tree search)
- ❖ 例如有8个用户，分别表示为000, 001, ...,111，搜索时是连续地划分用户组直到剩下最后一个分支，则该分支对应的用户允许接入信道。具体步骤为：
 - 卫星请求传送竞争用户标识号的第一个（最左边）比特；
 - 用户001传送一个0，用户100和110各传送一个1，卫星根据接收信号强度来选择1或0；（假设本例中选择1，so用户001退出）
 - 卫星请求传送剩余用户标识号的第二个比特；
 - 用户100传送一个0，用户110传送一个1（假设卫星选择了0，so用户110退出）；用户100访问卫星。
 - 当信道又可用时，重复上述步骤。

Terminals 1, 4 and 6
are contending

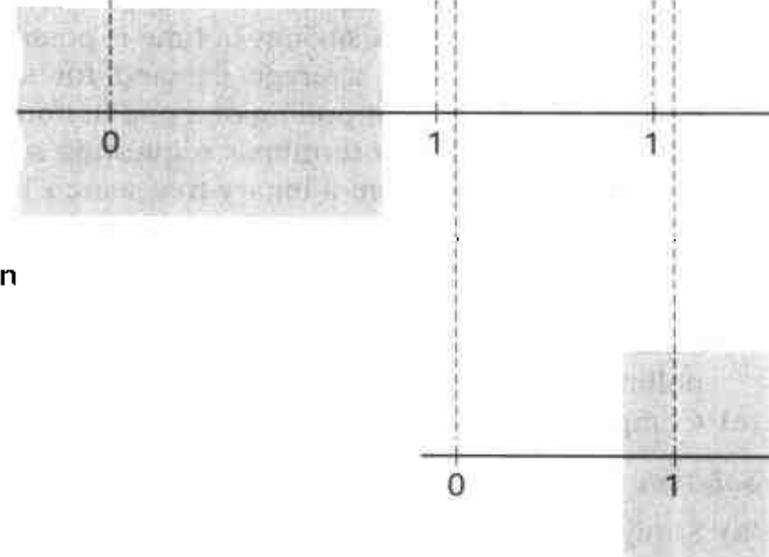


Satellite requests transmission
of first bit of ID

Satellite on the basis of
maximum SNR selects "1"
and notifies contenders

Satellite requests transmission
of second bit of ID

Satellite selects "0" and
notifies contenders



8.7 多址接入协议设计的发展趋势

- ❖ 前面的协议讨论中忽略了功耗（主要源于接入协议方面，包括无线收发信机和CPU）。发射模式、接收模式、待机模式下的功耗如何是至关重要的。对于一个节能的MAC设计，一要减小发送数量，而且由于数据传输时较高的功耗，还要尽量减少由于碰撞和错误引起的重传。从这个角度看，采取预约和轮询的MAC协议更具吸引力（但会使得接收机等待较多的时间）。另一方面，如果信道条件确实很差，不发送数据更具实际意义（节能）。
- ❖ 因此，合理的MAC协议应充分考虑物理层，甚至高层的信息，进行联合处理，如cross-layer技术。