



无线通信原理与应用

第9章 无线通信多址接入技术



主要内容

- 多址是一个什么样的问题？
- 允许冲突的多址方式简介
- 双工方式的回顾
- 无冲突的多址方式简介
- 系统容量



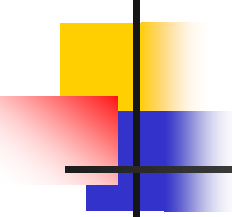
多址是一个什么样的问题？ 1

- 一个无线通信系统使用分配给其特定业务的指定频段。
 - 例如：美国当初为AMPS系统分配的频段是：
824~849MHz（共25MHz） 用于反向通信，
869~896MHz（共25MHz） 用于前向通信。
 - 又如：900MHz GSM系统的工作频段是：
890~915MHz（共25MHz） 用于反向通信，
935~960MHz（共25MHz） 用于前向通信。
- 频谱是一种稀缺资源，并且已分配的频段不易被拓展。鉴于此，无线系统必须为在指定频段内允许尽可能多的用户同时通信做出一些规定。



多址是一个什么样的问题？ 2

- 使多个用户同时进行通信的问题可以被划分为两个部分：
 - 对某个特定基站而言，怎样与多个移动台同时通信？ → 多址问题
 - 多个基站情况下，如何将频谱资源分配给它们以使得可能用户的总数最大化？ 以及这些基站在给定地理区域上如何布置？ → 蜂窝网络规划问题（第3章已介绍过）



多址是一个什么样的问题？ 3

- 公用通信网络使用通信资源（如频谱）的特点：
为了提高资源的使用效率，通信资源为用户所共享。
- 多址（Multiple Access）技术的本质是在共享通信资源的基础上，使系统中各个用户能够实现有效的互通互联的技术。互通互联的有效性指的是在保证用户通信的前提下尽可能地提高信道的使用效率。
- 所谓通信资源，也可以称作信道（Channel），依照信道使用中是否允许冲突（即同时使用同一信道）出现，将多址技术分为：
无冲突的MA 和 允许冲突的MA。



MA的适用性

- 话音业务特点：实时、速率恒定，且具有一定的端到端时延要求。
- 数据业务特点：突发（峰值速率远大于平均速率）、而对传输的实时性却要求不高。

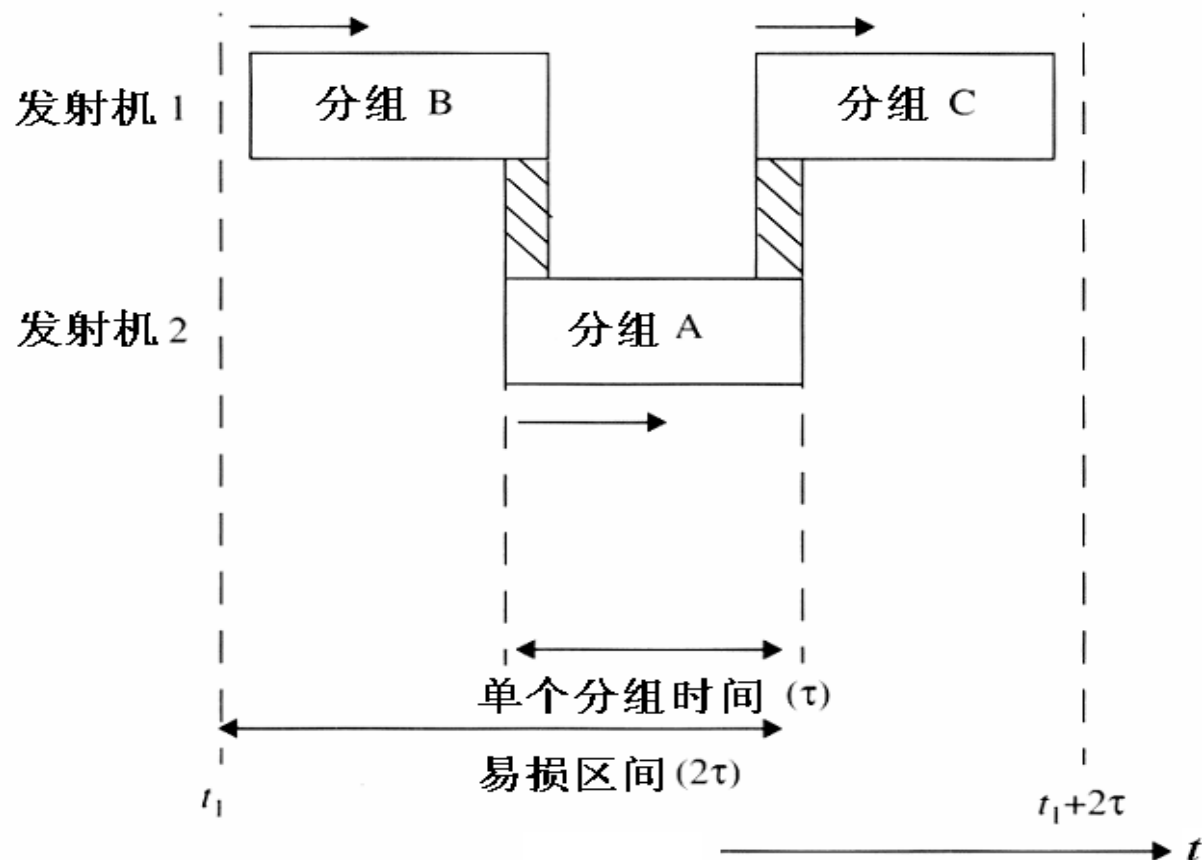
业务类型	多址技术
突发的、信息长度较短	竞争协议，如ALOHA
突发的、信息长度较长、大量用户	预留协议
突发的、信息长度较长、少量用户	有固定的TDMA预留信道的预留协议
持续性的或确定性的信息流（如话音）	FDMA, TDMA, CDMA



允许冲突的MA

- 允许冲突的MA是指用户对信道的使用具有系统无法控制（或不必要控制）的突发性和随机性，从而在共用信道时会发生冲突的多址方式。
- 常用的允许冲突的MA方式包括：
 - 纯ALOHA（Pure ALOHA）
 - 时隙ALOHA（Slotted ALOHA）
 - 载波侦听多址（CSMA）

ALOHA的易损（冲突）区间



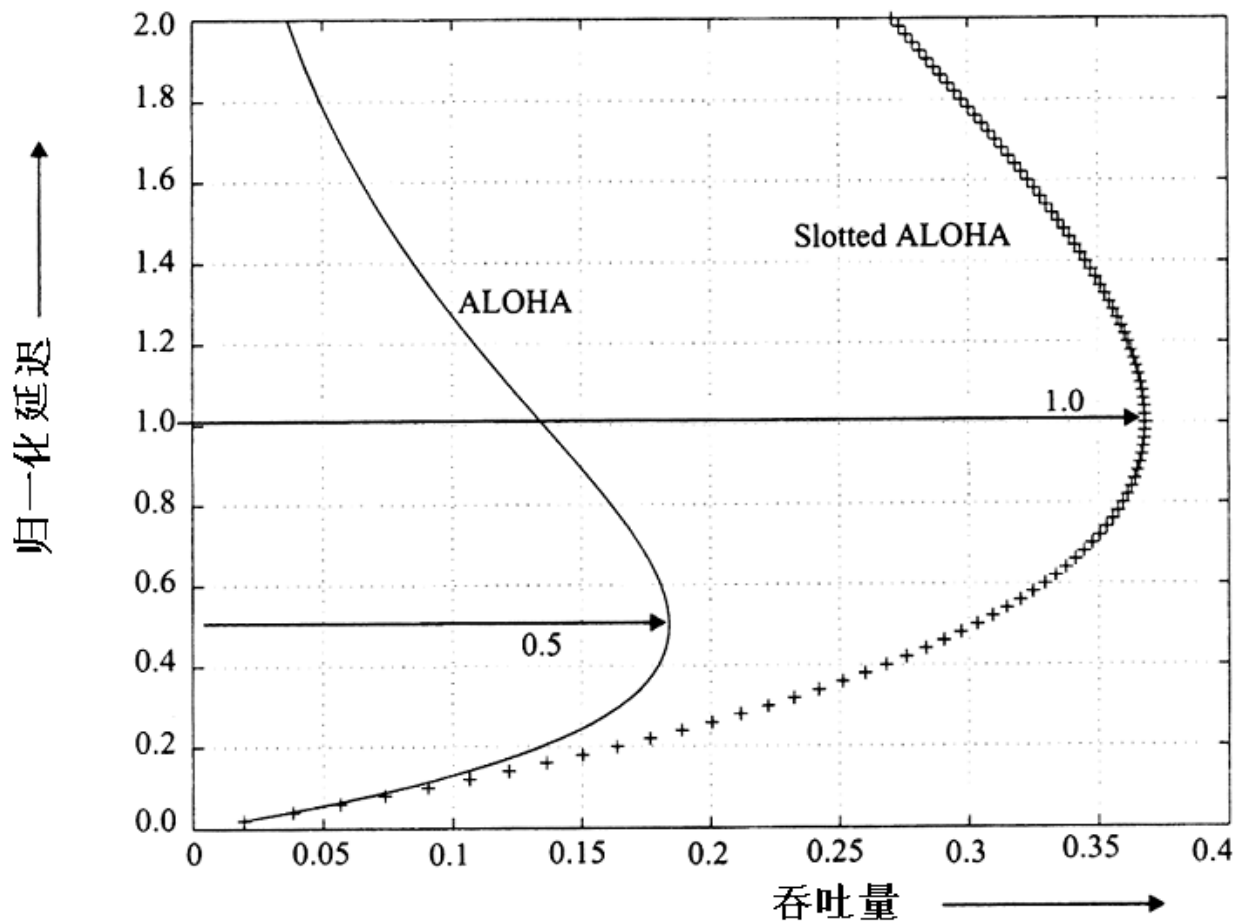
由于和分组B及分组C时间上有所重叠，分组A将与它们发生冲突



ALOHA与时隙ALOHA

- **ALOHA**协议中分组发送的起始时刻不受限制，完全是随机的，这就增加了不同用户分组发生冲突的概率，造成系统的吞吐率（成功发送分组的概率）受到较大的限制。
- **时隙ALOHA**将发送时间划分成一个个的时隙，时隙长度一般略大于用户分组长度。每个用户分组的发送起始时刻只能是时隙的起始时刻，这样就减小了发生碰撞的易损区间，从而减小了冲突概率，可以达到提高吞吐率的目的。

吞吐量与传输延迟





CSMA

- 载波侦听多址(CSMA): 减小冲突, 提高系统吞吐率的另一种办法就是**减小分组发送的盲目性**。CSMA是在发送之前进行“侦听”来确定信道的忙闲状态, 然后再决定是否发送分组。即“**先听后讲**”。可分为以下两种类型:
 - CSMA/**CD** 用于IEEE802.3 以太网(有线网), CD: 冲突检测
 - CSMA/**CA** 用于IEEE802.11 无线局域网, CA: 冲突避免

FDD与TDD1

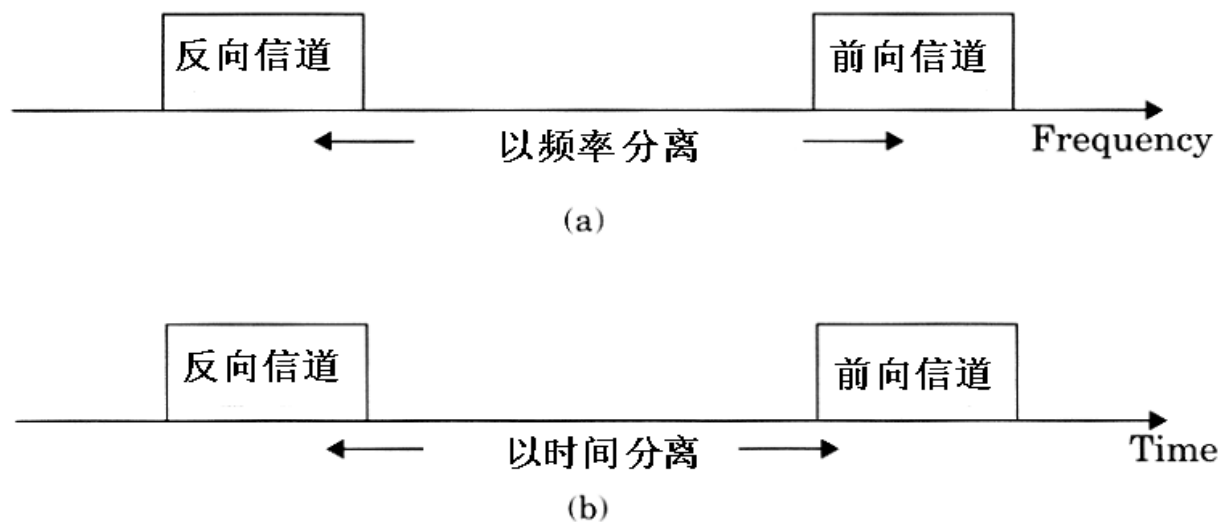
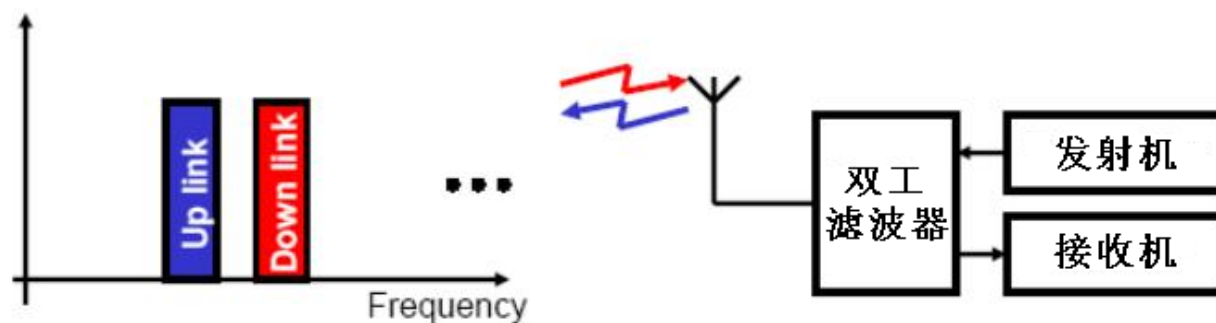


图 9.1 (a) FDD 同时提供两个单工信道；(b) TDD 在同一频率上提供两个单工时隙。

FDD与TDD2

Frequency-division Duplex (FDD)



FDD提供了更为复杂的全双工实现方案（要使用双工滤波器）。

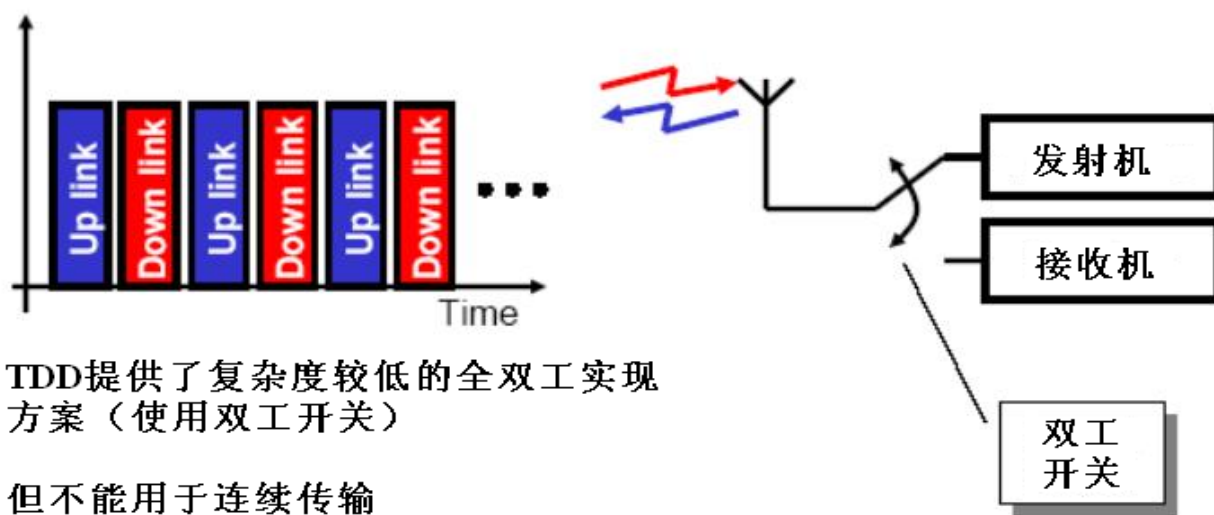
它可以用于连续传输。

系统例: Nodic Mobile Telephony (NMT), Global System for Mobile communications (GSM), Wideband CDMA (WCDMA)

FDD与TDD3

Time-division duplex (TDD)

注意：双工开关在一次通话期间快速交替接通发射机和接收机，而用户并不会发觉到这一点，用户体验到的是“全双工”通信。



TDD提供了复杂度较低的全双工实现方案（使用双工开关）

但不能用于连续传输

系统例：Wideband CDMA (WCDMA), TD-SCDMA



多址和双工方式的系统例

蜂窝系统名称	多址方式/双工方式
Advanced Mobile Phone System (AMPS)	FDMA/FDD
Global System for Mobile (GSM)	TDMA/FDD
US Digital Cellular (USDC)	TDMA/FDD
Pacific Digital Cellular (PDC)	TDMA/FDD
CT2 (Cordless Telephone)	FDMA/TDD
Digital European Cordless Telephone (DECT)	FDMA/TDD
US Narrowband Spread Spectrum (IS-95)	CDMA/FDD
W-CDMA (3GPP)	CDMA/FDD CDMA/TDD
cdma2000 (3GPP2)	CDMA/FDD CDMA/TDD



无冲突的MA

- 所谓无冲突的MA是指由系统以特定的方式来划分信道，然后将不同的信道分配给不同的用户使用，以保证信道使用过程中不发生冲突。
- 如：蜂窝网中，若采用FDMA方式，一般不会在同一小区中同时使用同一频道。



常用的无冲突的MA

- 频分多址 (**FDMA**) 不同信道即不同**频道**

Frequency

- 时分多址 (**TDMA**) 不同信道即不同**时隙**

Time

- 码分多址 (**CDMA**) 不同信道即不同**扩频序列**

Code

- 空分多址 (**SDMA**) 不同信道即**天线的不同点状定向辐射区域**

Space

频分多址 FDMA

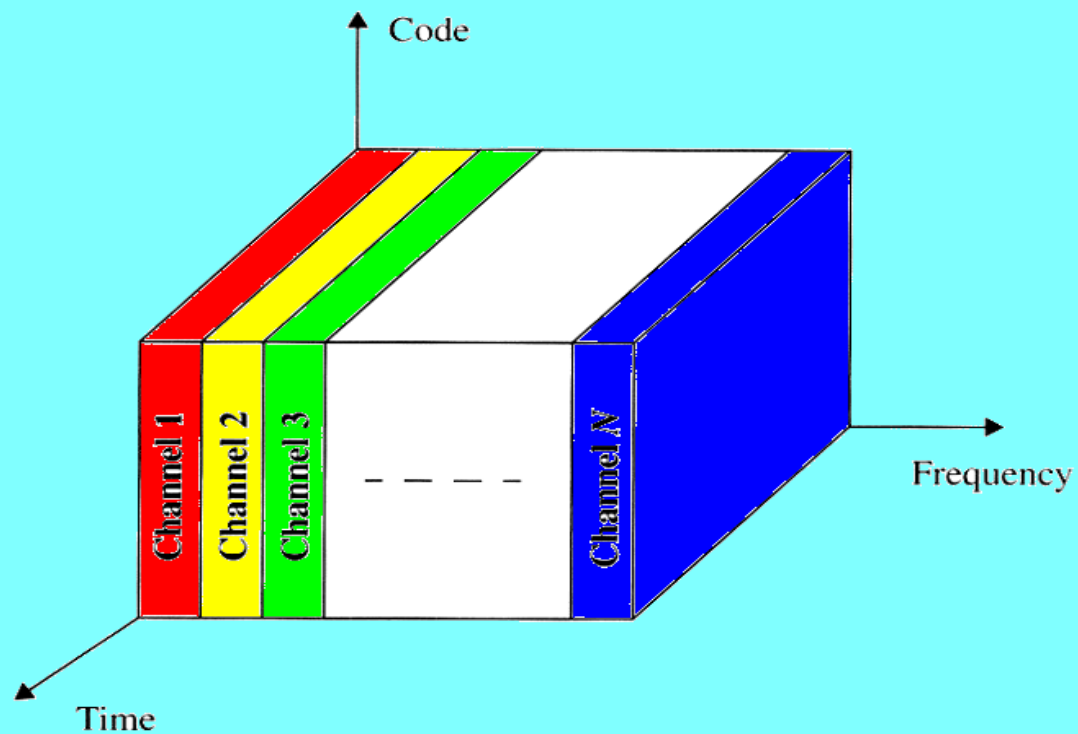


图 9.2 FDMA 中，不同的信道就是不同的频道



FDMA是TDMA和CDMA的基础

- 由于信号调制的结果是已调信号占用一定的带宽，所以信号的无线传输最终表现为对频谱的占用。因此FDMA是TDMA和CDMA的基础。
- 确切地说，

TDMA即 TDMA/FDMA

CDMA即 CDMA/FDMA

时分多址 TDMA

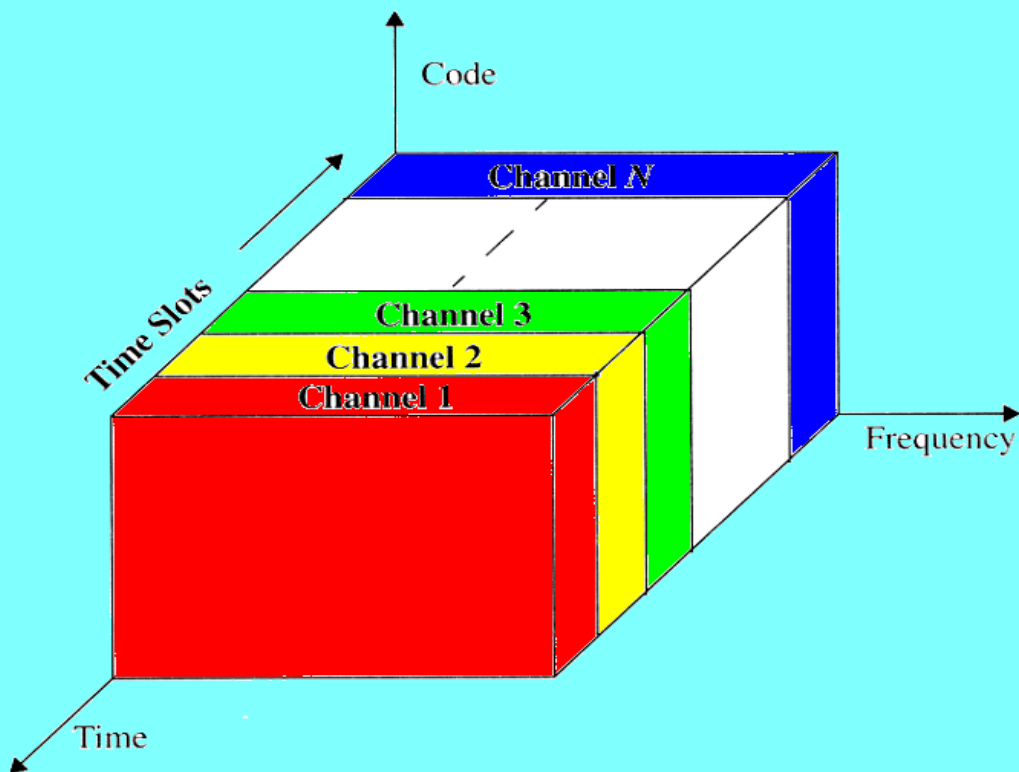


图 9.3 TDMA 中，一个信道就是一个周期性重复的时隙（Time Slot）

TDMA的帧和时隙

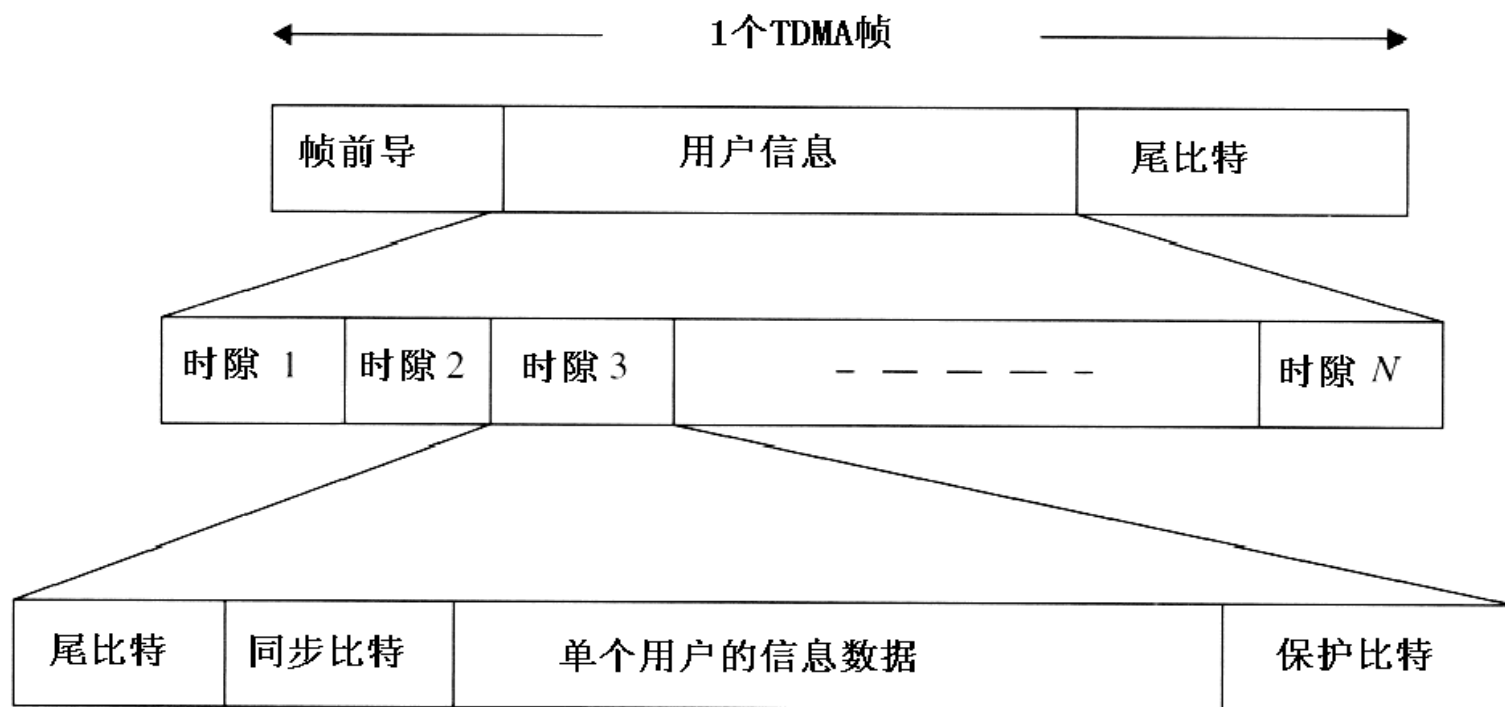


图 9.4 TDMA 帧结构。帧在时间上循环重复出现。

GSM帧结构

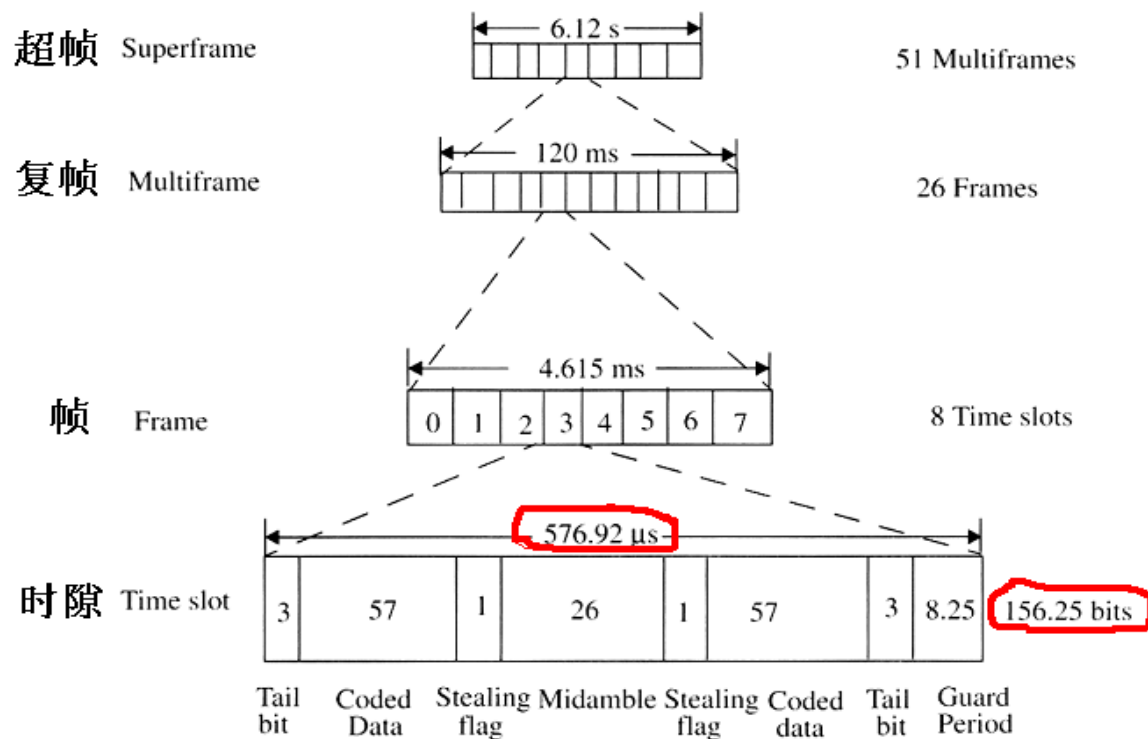


图 11.10 GSM 帧结构



GSM时隙的类型

- 在GSM术语中，**时隙**又被称为**突发**（**burst**），根据功用不同，GSM共有5种突发类型：
 - 常规突发，也就是业务突发；
 - 频率校正突发；
 - 同步突发；
 - 随机接入突发；
 - 空闲突发

GSM的不同突发及其结构 (pp391)

常规	起始 比特	加密数据	训练序列	加密数据	终止 比特	保护间隔
Normal	3 start bits	58 bits of encrypted data	26 training bits	58 bits of encrypted data	3 stop bits	8.25 bits guard period

频率校正

FCCH burst	3 start bits	142 fixed bits of all zeroes			3 stop bits	8.25 bits guard period
------------	-----------------	------------------------------	--	--	----------------	---------------------------

同步

SCH burst	3 start bits	39 bits of encrypted data	64 bits of training	39 bits of encrypted data	3 stop bits	8.25 bits guard period
-----------	-----------------	------------------------------	------------------------	------------------------------	----------------	---------------------------

随机接入

RACH burst	8 start bits	41 bits of synchronization	36 bits of encrypted data	3 stop bits	68.25 bit extended guard period	
------------	-----------------	-------------------------------	------------------------------	----------------	------------------------------------	--

空闲

Dummy burst	3 start bits	58 mixed bits	26 training bits	58 mixed bits	3 stop bits	8.25 bits guard period
-------------	-----------------	---------------	---------------------	---------------	----------------	---------------------------



业务突发的组成

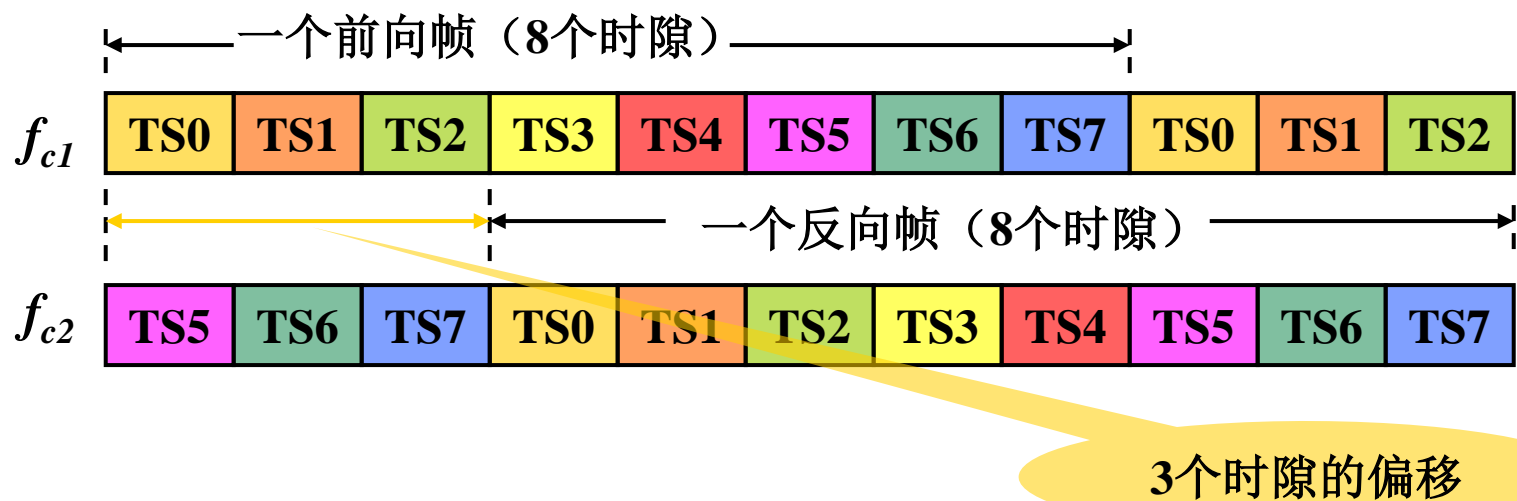
- 用来传送业务数据（如用户语音）的突发称为业务突发，也称为常规突发。业务突发一般由4部分组成：
 - 尾比特：用于为功率上升、下降留出时间；
 - 业务数据：实际的有效载荷，比如：经过编码、交织和加密处理的数字语音；
 - 训练序列：是已知序列，用于均衡。
 - 保护间隔：实际上是一段空白时间，用于防止在接收端（BS处）不同用户时隙出现时间重叠。



保护间隔

- 像GSM这样的TDMA / FDD系统，系统都是成对地向用户提供业务时隙的，即前向和反向链路使用相同编号的时隙（但前向链路时隙和反向链路时隙使用的发送载频不同）。由于**移动台处**一般采用同一频率合成器生成本地载频，所以它不可能同时形成不相同的前向链路接收载频和反向链路发射载频，因此，GSM系统规定，前向和反向相同编号时隙之间错开3个时隙的时间宽度。如下页图所示。

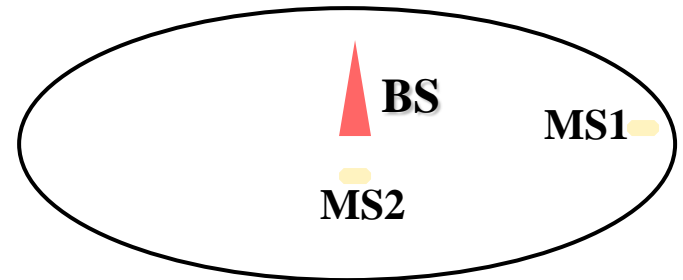
保护间隔的图示



注意：这里 f_{c1} 和 f_{c2} 分别表示前向和反向链路载频，系统会同时提供一对时隙给用户使用，如一对TS0，但它们之间有固定的3个时隙的偏移。

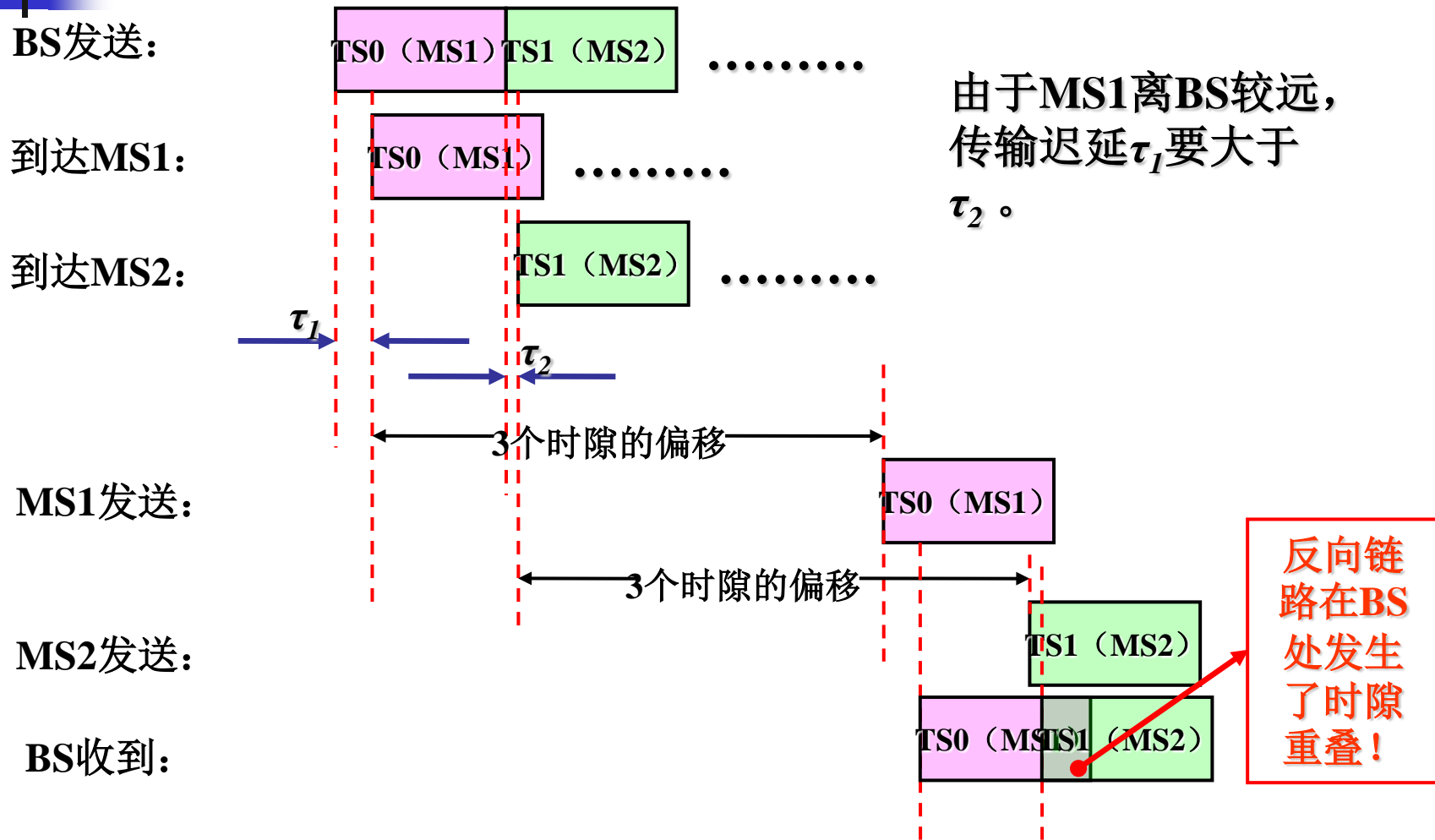
为什么要留保护间隔？ 1

- 3个时隙的偏移对于GSM系统是常数，这就是说，基站会希望在针对某个用户发出0号时隙以后，就能够在2个时隙之后的时刻接收到该用户发出的反向链路的0号时隙（与前者成对）。但是在支持多用户在同一对载频上使用相邻时隙时就可能出现这个问题。



- 考虑如图所示情形，MS1和MS2距离基站的远近不同。假定它们使用同一对载频上的相邻时隙，如：MS1使用TS0、MS2使用TS1。

为什么要留保护间隔？ 2





为什么要留保护间隔？ 3

- 如上图所示，为了保证上行链路各时隙在基站处即使发生相互重叠也不致于影响彼此的数据内容，在作突发结构设计时就在一个突发的末尾安排了一段留空时间——实际上在其间不发送任何比特，这就是保护间隔。
- 最稳妥的办法是将保护间隔留得最大——对应于MS位于小区边界处的情形。但这是非常不经济的，因为我们希望一个突发期间应该有尽可能多的时间用于传送有效数据，而不是简单一律地设定保护间隔为最大值。
- 于是，GSM系统中BS会根据小区中各MS距离BS的不同距离来要求它们提前发送，距离远的MS提前量要大一些，即离得近的MS少提前，离得远的MS多提前一些。这样一来，这样到达基站时就可以做到基本无重叠了。



(最大) 保护间隔的计算

- 由于用户的移动性，系统支持的各个用户与基站间的距离可能是不同的，甚至是差异很大的。尤其是工作于同一对双工载频上的8个用户，如果系统不加以控制，他们的时隙到达基站时就会发生重叠，从而导致双方的数据均受到破坏。
- 保护间隔(Guard Period)是以bit为单位的，GSM中每bit持续时间为 $576.92/156.25=3.692\mu s$ ，电波每秒钟传输300,000,000米；考虑双向传输的开销，如果基站距移动台距离为d(米)，则

$$GP=(2d/300)/3.692=d/553.8 \text{ bits}$$

若距离d以km计，则 $GP=d/0.5538 \text{ bits}$

所以最小可分辨的距离为553.8米(0.5538公里)。



保护间隔的计算例

例：TDMA/FDD系统，假设信道速率为1Mbps，小区半径为500m，计算此时需要设置的保护段的大小（用比特表示）。

[解]：每bit持续时间 $1\mu\text{s}$ ，双向往返最大距离为1000m。

相当于 $1000/300/1=3.3\text{bit}$ 。

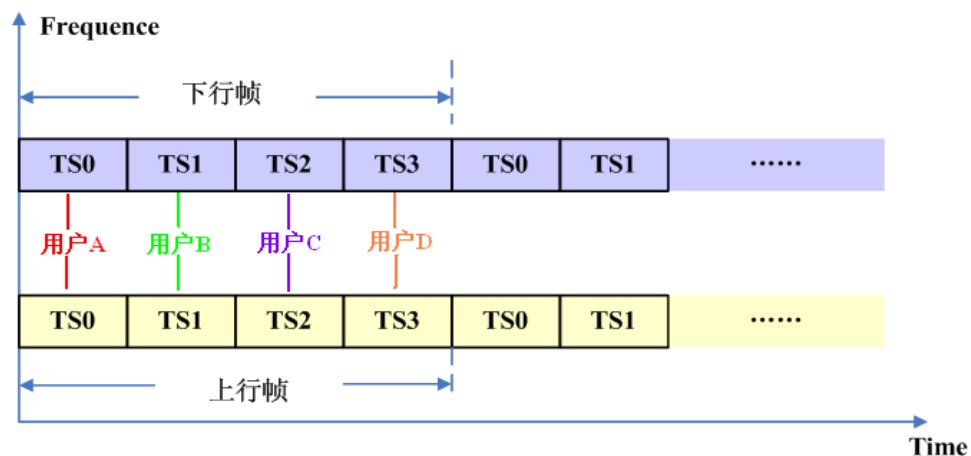
又例：GSM系统中，可使用的最大小区半径为35公里，则最大保护间隔约为：63bit。



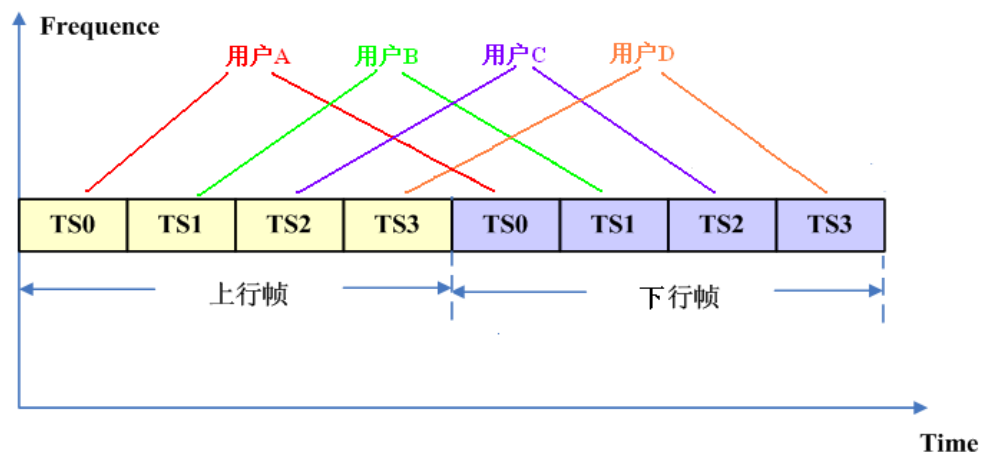
GSM中的时间提前问题

- 时间提前量(TA)也是以bit为单位的。因为在实际业务信息（如，话音）通信过程中，业务信息在时隙中应该占主要的比例（如，GSM业务突发业务信息占73%），不可能再留出非常大的保护间隔，但上述在BS处的时隙重叠问题仍然存在。GSM采用由基站向各移动台发送时间提前量（TA）的办法来避免重叠出现。因此，象业务突发中只保留8.25bits的保护间隔的原因就在于已经做过TA处理了。

TDMA/FDD与TDMA/TDD



(a) TDMA/FDD(如GSM, 每对载波上各 8个时隙)



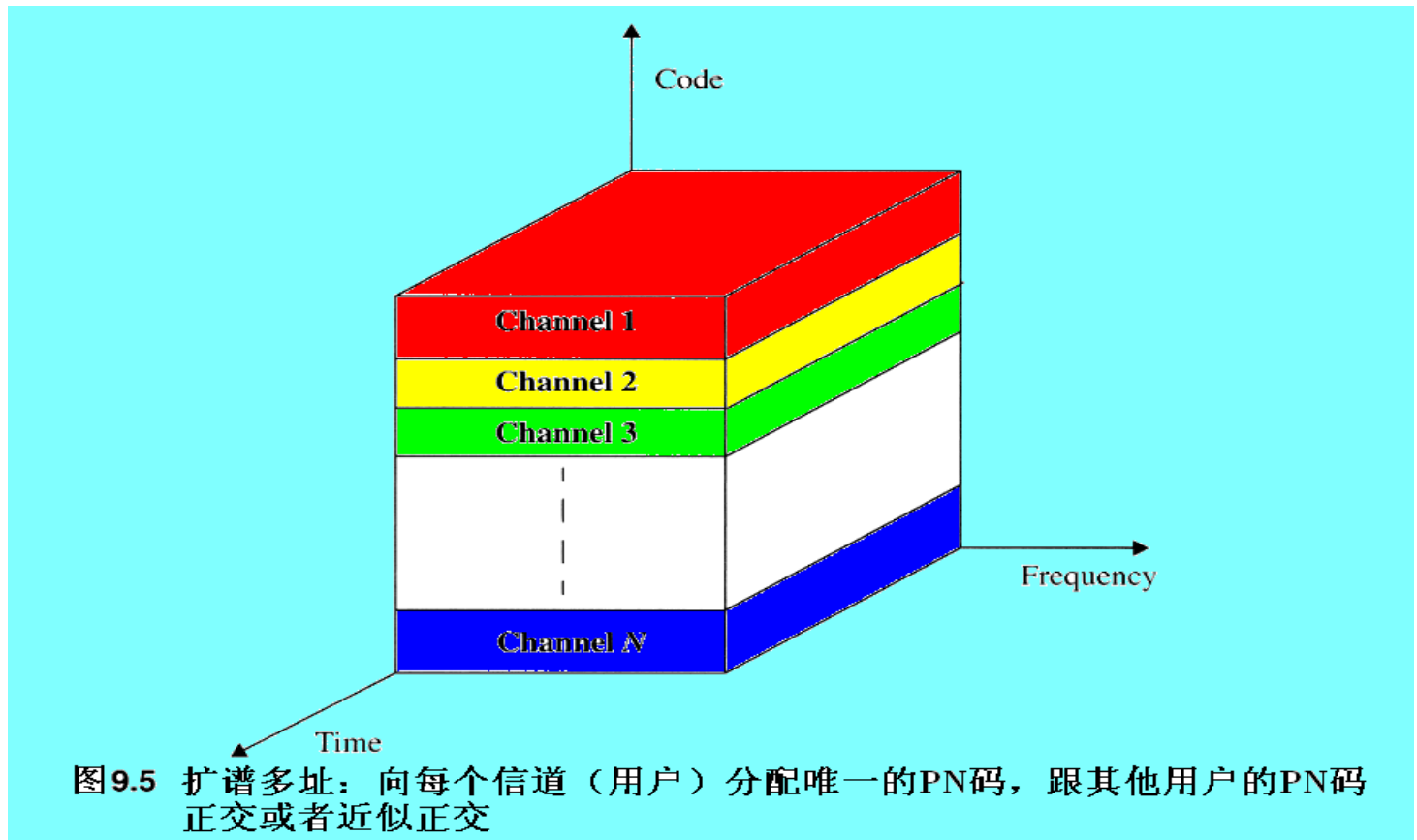
(b) TDMA/TDD(如“小灵通”, 每个载波4对时隙)



实际的TDMA系统比较

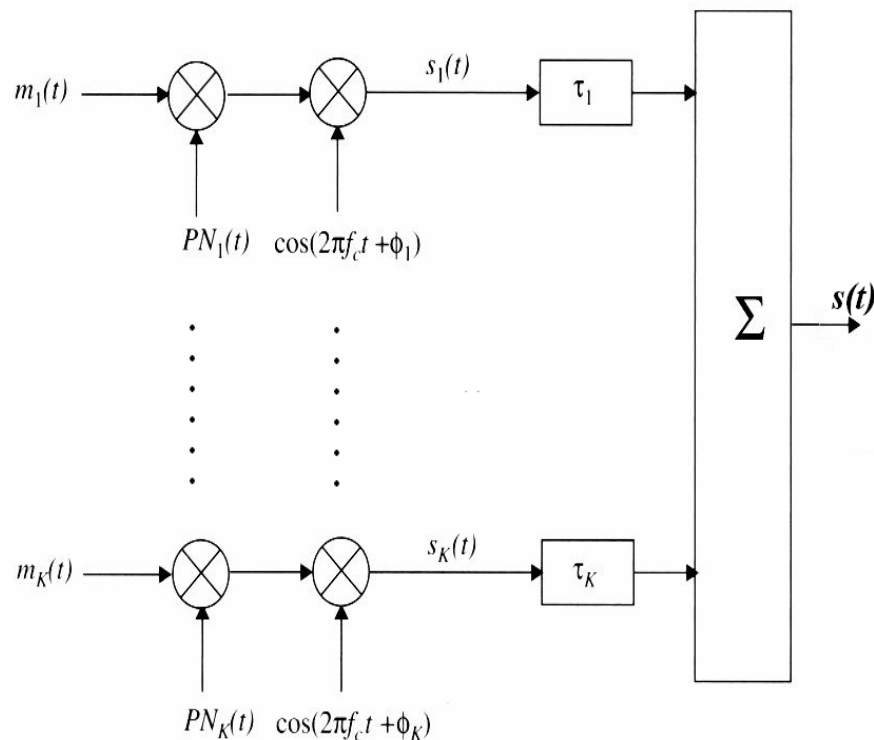
参数	AMPS	GSM	USDC	PDC
总带宽 (MHz)	25	25	25	25
话音信道数	833	1000	2500	3000
区群大小	7	4 or 3	7 or 4	7 or 4
信道数/基站	119	250 or 333	357 or 625	429 or 750
业务量(Erlangs/sq. km)	11.9	27.7 or 40	41 or 74.8	50 or 90.8
容量增益	1.0	2.3 or 3.4	3.5 or 6.3	4.2 or 7.6

码分多址 CDMA（即DS-SSMA）



用DSSS实现多址1

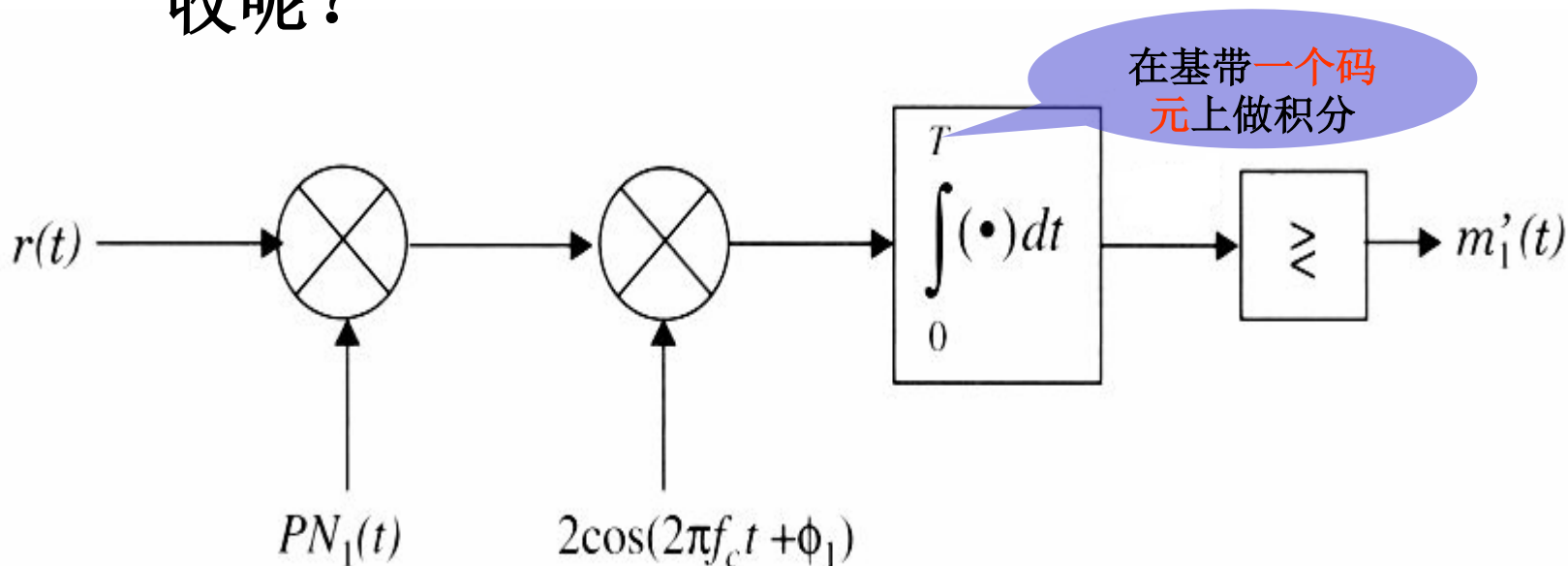
- 使用直接序列扩频技术区分用户的方法是给不同用户分配互不相同的扩频码，而不同用户可以同时、并占用相同载频发送。
- 当然，不同用户所使用的扩频码还必须具备一定条件。



基站处的扩频发射系统，可以同时针对 K 个用户的扩频信号发送出去，每个用户使用不同的伪随机码 PN_k ， $k=1, \dots, K$ 。

用DSSS实现多址2

- 以下为用户1处接收机的原理图。用户1将采用自己的扩频码 PN_1 进行解扩，但是应当注意到，基站可能同时发射针对多个用户的信号，该如何消除其他用户对用户1的影响，保证正确接收呢？





多用户时扩频码应具有的特点

- 扩频码应该是伪噪声（**PN**）码，即具有近似于噪声的功率谱密度，也就是要求扩频码在时域具有强的自相关峰值；
- 码族中各个码字间具有良好的互相关特性，即要求接近于零的互相关值；
- 码族之中应包含足够数量的扩频码。



Walsh序列族1

- 兼具理想的自相关特性和理想的互相关特性的码族并不好找，而且往往会“顾此失彼”。但是，在进行多址应用时，我们更看重的是互相关特性。具有理想自相关特性的正交序列族是可以找到的。比如：Walsh序列族。
- Walsh序列由以下Hadamard矩阵定义：

$$H_{had}^{(n+1)} = \begin{pmatrix} H_{had}^{(n)} & H_{had}^{(n)} \\ H_{had}^{(n)} & \bar{H}_{had}^{(n)} \end{pmatrix},$$

$$H_{had}^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

Walsh序列族2

- Walsh序列族中的各个序列对应于Hadamard矩阵的每一列。
- 例如：长度（亦称作周期）为4的Walsh序列对应于 $H_{had}^{(2)}$ ，而

$$H_{had}^{(2)} = \begin{pmatrix} H_{had}^{(1)} & H_{had}^{(1)} \\ H_{had}^{(1)} & \bar{H}_{had}^{(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

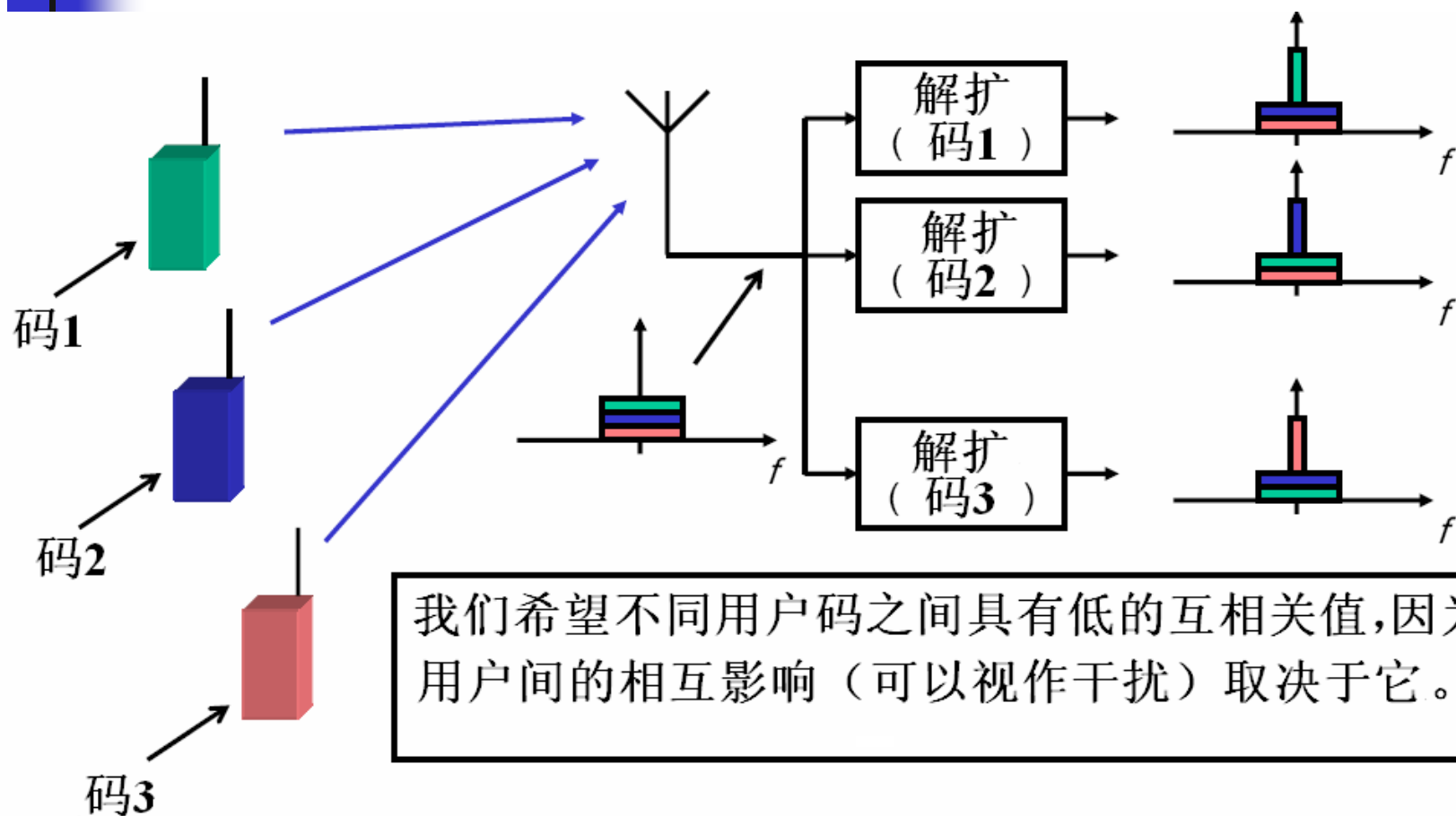
不难验证，在彼此对齐的情况下，它们相互正交。



IS95使用的扩频码

- IS95的下行链路（BS→MS）采用Walsh序列进行扩频，所用序列为**64个码片的序列**，即对应于 $H_{had}^{(6)}$ 的各列。扩频增益为64。
- 值得一提的是，IS95的上行链路并不将Walsh序列用于扩频。这是因为，下行链路可以保证针对各个用户的信号的同时发送，而就上行链路而言，不同用户的信号不可能同时到达基站。而Walsh序列仅在彼此间不存在时移时能够保证完全正交，在相互之间存在任意时移时，反而会具有较大的互相关值。于是上行链路采用同一 m 序列（长码）的不同时移版本实现不同用户的扩频。

解扩的实现



多址干扰和CDMA系统的功率控制问题

- 多址干扰指用于特指CDMA系统中，由于采用不同扩频码进行扩频而引起的相互干扰。在经不过信道传播以后，即使是理论上完全正交的码，由于衰落等因素的影响可能也不再具有零互相关值。在远近效应发生时，多址干扰甚至会导致系统无法正常运转。所以为了克服远近效应、减轻多址干扰、保证系统正常运转和提高系统容量就必须进行功率控制。
- 上行链路功率控制要达到的目标是：小区内所有用户发出的信号在到达基站时都具有相同的接收信号强度，并且各用户的接收信干比刚好等于系统所要求的最小信干比。



功率控制的方法

- 开环功率控制：不需要接收端的反馈，发射端根据自身测量得到的信息对发射功率进行控制的方法。开环功率控制不需要反馈信道，调整速度快，但调整精度不高。此外，开环功率控制还依赖于上下行链路信道的相关性。
- 闭环功率控制：发射端根据接收端送来的反馈信息对发射功率进行控制的方法。闭环功率控制需要反馈信道，调整速度较慢，但调整精度高。



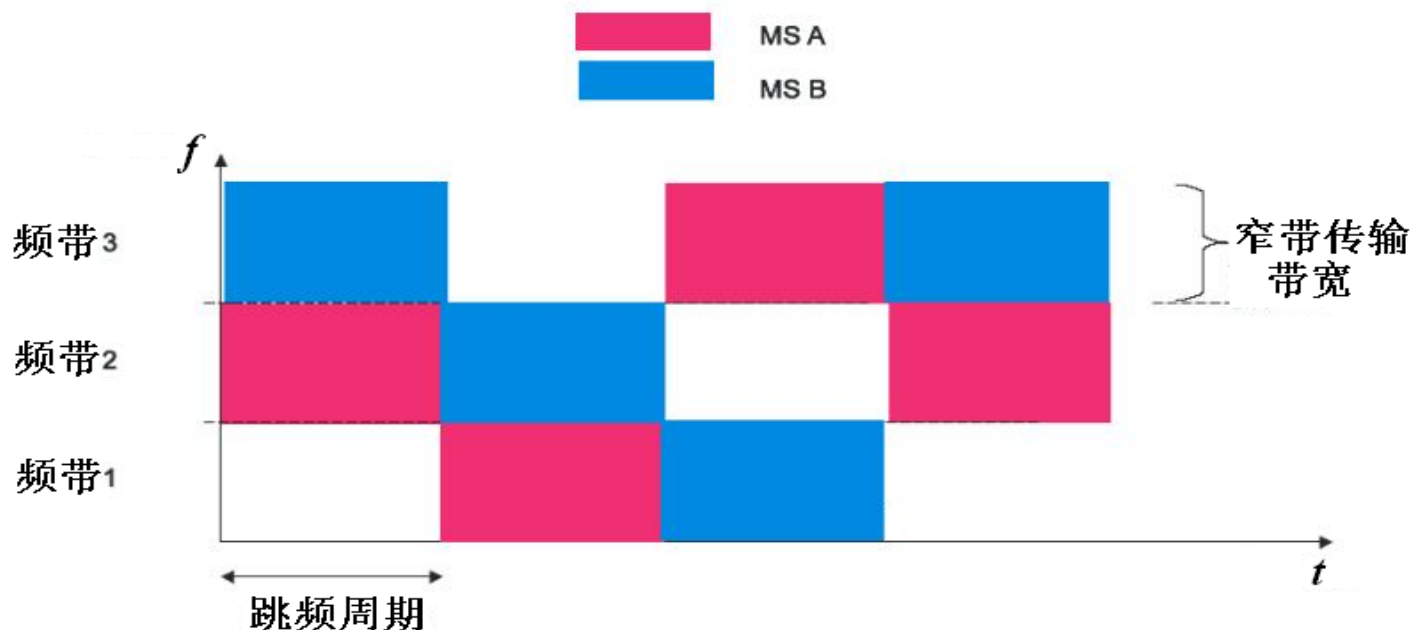
码分多址 CDMA的优点

- 完全频率复用，即区群大小 $N=1$ ，基本不用进行频率规划；
- 支持软切换，提高了切换性能；
- 高传输可靠性，采用**Rake**接收；
- 软容量，考虑干扰受限、**BS**处理理想功控，**BPSK**相干解调时，

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{3G_{ss}}{K-1}}\right), \quad K \text{ 为单个小区的用户数。}$$

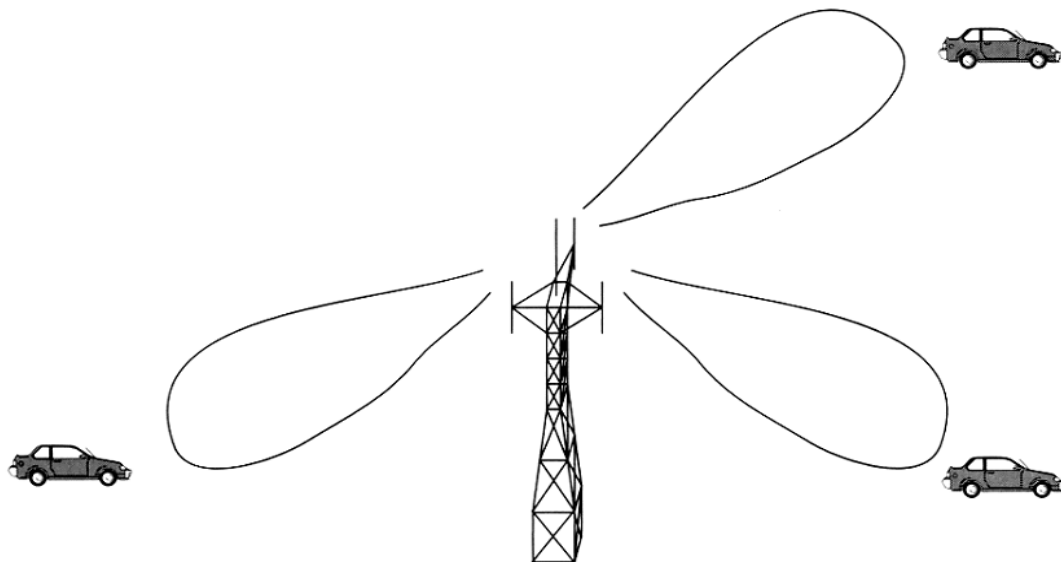
跳频多址SSMA

- CDMA属于扩频多址（SSMA）技术，常见的SSMA方式还有跳频多址（FHMA），同步的跳频多址如下图所示：



SDMA——基于智能天线技术

- 信号严格定向发送，减小了相互之间的干扰。——波束切换
- 对单个用户可以形成多个波束来实现多径的最大比合并，并在干扰方向上形成零陷。——自适应天线阵列



FDMA系统容量计算1

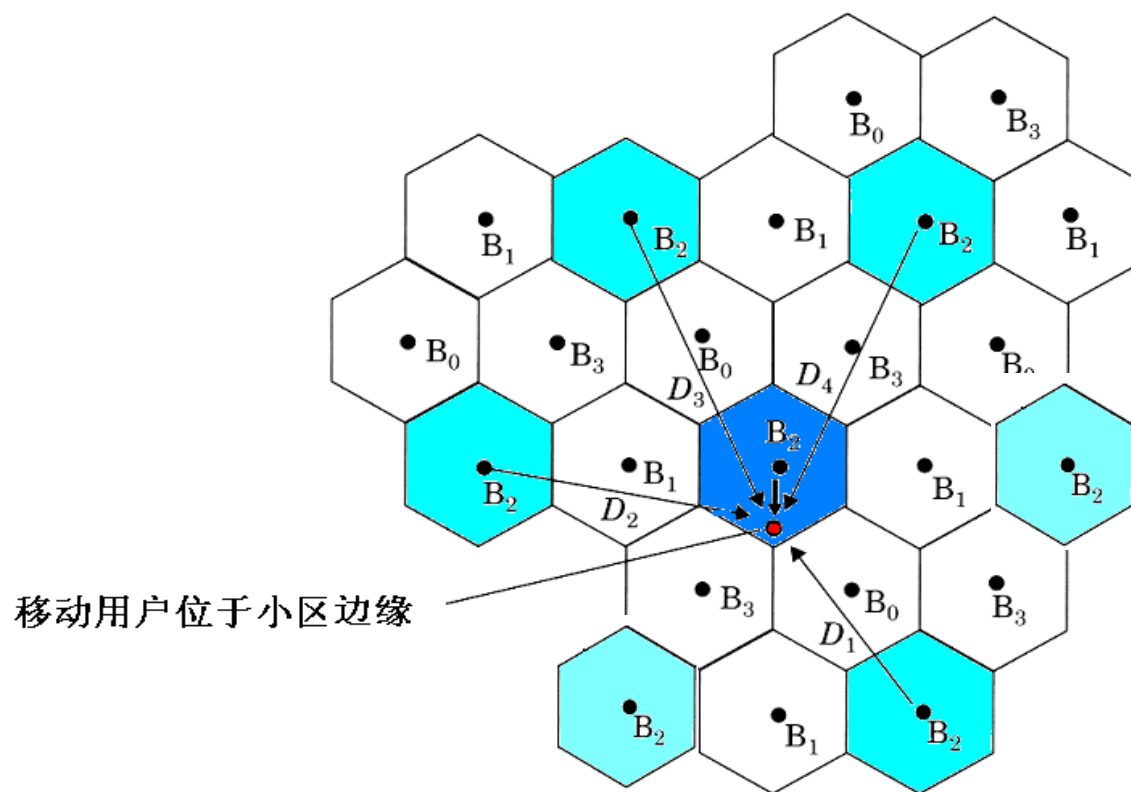


图 9.11 区群大小 $N=4$ 时,前向信道干扰图示。图中示出了4个共道(同频)干扰基站,它们对服务基站形成干扰。

FDMA系统容量计算2

- 容量定义：系统容量记作 m ， $m = \text{信道数} / \text{小区}$ ，

$$m = \frac{B_t}{B_c N},$$

其中， B_t 为总带宽， B_c 为频道带宽。 N 为区群大小。若仅考虑第一层同频小区，则信干比(载干比)为：

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-n}}{6D^{-n}} = \frac{1}{6} \left(\frac{D}{R} \right)^n = \frac{1}{6} Q^n = \frac{1}{6} (3N)^{\frac{n}{2}},$$

- 以上约束关系，如果系统可以在更低的信干比下获得满意的通信质量，那么也就可以采用更小的 N 值。



FDMA系统容量计算3

- $n=4$ 时， FDMA/FDD系统的容量为：

$$m = \frac{B_t}{B_c \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{C}{I} \right)_{\min}}} \quad \circ$$

- TDMA/FDD系统的容量：

$$m = \frac{sB_t}{B_c \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{C}{I} \right)_{\min}}} \quad ,$$

- 其中， s 为每载频的时隙数。



系统间的容量比较

- AMPS系统

$B_t=25\text{MHz}$, $B_c=30\text{kHz}$; 总信数833个。

$(C/I)_{\min}=18\text{dB}$, 相应的, $N=7$ 。

$m=119$ 信道/小区。

- USDC(即DAMPS)系统

$B_t=25\text{MHz}$, $B_c=30\text{kHz}$;

每载频3个时隙($s=3$), 总信道数2500个。

$(C/I)_{\min}=12\text{dB}$, 相应的, $N=4$ 。

$m=625$ 信道/小区。



蜂窝CDMA的容量

- CDMA系统的容量是干扰受限的，而在FDMA和TDMA中时带宽受限的。干扰的减少将导致CDMA系统容量的提高。CDMA系统的容量可表示为：

$$N = 1 + \frac{W / R}{E_b / N_0}$$

提高CDMA系统容量的方法

- 使用定向天线，如使用3个120°的定向天线会使得干扰降为原来的1/3，即用 $N_0' = N_0$ 来代替原来的 N_0 。
- 使用语音激活检测，在没有语音激活的阶段关掉发射机。语音激活用一个因子 α 来表示。
- 使用了定向天线和语音激活检测之后，每个扇区的用户容量为：

$$N_s = 1 + \frac{1}{\alpha} \left(\frac{W / R}{E_b / N_0'} \right)$$

