

第3章 蜂窝

- 3.1 大区制移动通信系统
 - 3.1.1 主要特点、优点和缺点
 - 3.1.2 问题
- 3.2 小区制移动通信系统 —— 蜂窝系统
 - 3.2.1 小区制简介
 - 3.2.2 小区分类
 - 1. 按覆盖范围分类
 - 2. 按形状分类
 - 3.2.3 小区的实现 —— 频率复用
 - 3.2.4 小区制系统的信道规划
 - 3.2.5 小区制系统的系统容量和干扰
 - 1. 系统容量
 - 2. 干扰
 - (1) 干扰的分类
 - (2) 干扰的影响
 - (3) 信干比的计算
- 3.3 小区制系统的策略
 - 3.3.1 信道分配策略
 - 3.3.2 切换策略
- 3.4 小区制系统的中继和服务等级
 - 3.4.1 概述
 - 3.4.2 中继理论和对应公式
 - 3.4.3 话务量
 - 3.4.4 LCC系统下的计算
 - 1. 计算 服务等级/阻塞率/呼损率 的第一种方法
 - 2. 计算 服务等级/阻塞率/呼损率 的第二种方法
- 3.5 提高蜂窝系统容量的方法
 - 3.5.1 小区分裂 splitting
 - 1. 定义：
 - 2. 基站发射功率的调整
 - 3. 代价
 - 3.5.2 扇区划分 sectoring
 - 1. 定义
 - 2. 如何提高系统容量
 - 3. 信干比计算
 - 4. 代价
 - 3. 微小区 Microcell zone

第3章 蜂窝

3.1 大区制移动通信系统

3.1.1 主要特点、优点和缺点

主要特点：

- 1. 基站天线很高，几十~几百米
- 2. 基站发射功率大：50~200W
- 3. 覆盖半径：30~50km

优点：网络结构简单，成本低

缺点：频谱利用率低，服务性能差，容量小，用户几十~几百个，一般用于专网。

3.1.2 问题

问题：提高覆盖半径

决定覆盖半径的因素：

1. 地球的曲率限制了传输的极限范围
2. 地形环境影响，信号传播可能产生盲区
3. 多径反射限制了传输距离
4. 移动台发射功率小，上行信号传输距离有限（上下行传输增益差可达6~12dB）

问题：上行问题

解决：

1. 设置分集接收台，基站发射用全向天线，接收用定向天线；
2. 提高基站接收灵敏度；

问题：大区制的频率资源利用效率极低

3.2 小区制移动通信系统 —— 蜂窝系统

3.2.1 小区制简介

小区制：

1. 利用频率复用的概念，将整个服务区域划分成若干小区，每个小区分别设置一个低发射功率的基站，负责本小区的通信；
2. 每个小区基站分配一组无线信道，仅在本小区内使用
3. 本小区所用的信道不能在相邻小区中重复使用

优点：提高频率利用率，组网灵活

缺点：网络构成复杂

3.2.2 小区分类

1. 按覆盖范围分类

基本小区：

1. 超小区： $r_0 > 20\text{km}$ （农村）
2. 宏小区： $r_0 = 1 \sim 20\text{km}$ （人口稠密地区）
3. 微小区： $r_0 = 0.1 \sim 1\text{km}$ （城市繁华区）
4. 微微小区： $r_0 < 0.1\text{km}$ （办公室、家庭）

2. 按形状分类

形状：

1. 条状服务区：

2. 面状服务区：

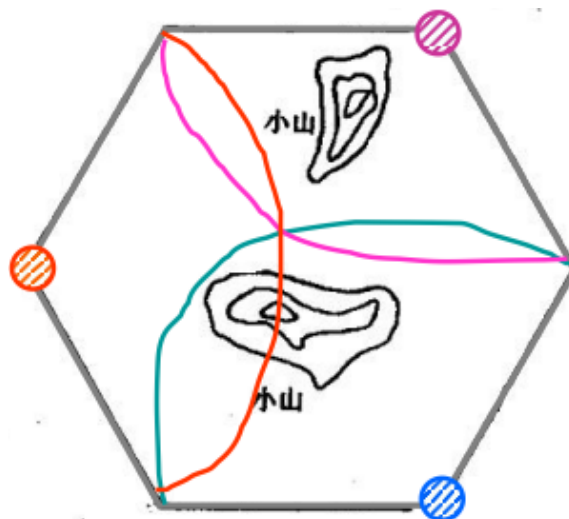
1. 小区形状：一般采用规则结构：圆形（全向天线），三角形，正方形，六边形等；

蜂窝（正六边形的由来）：对于同样大小的服务区域，采用正六边形构成小区，则所需的小区数最小且无重叠区

2. 基站对小区的激励方式：

1. 中心激励：基站位于小区中心，有时会有辐射阴影

2. 顶点激励：在顶点上设置基站，并采用三个互成120°的定向天线，以避免辐射阴影



3.2.3 小区的实现 —— 频率复用

频率复用：在不同基站间实现频率规划/分配的过程

1. 将可用信道分为N组，则N个相邻的小区组成一个簇（Cluster）
2. 簇内的每个小区使用每组信道中的不同的频率组（相邻不同）
3. 相邻簇重复使用相同的频率组分配模式

构成簇的基本条件：

1. 能彼此邻接且无空隙地覆盖整个面积。
2. 相邻簇中，同频道的小区距离相等，且为最大。

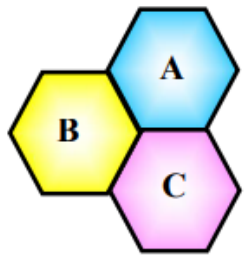
满足上述两个条件的簇的形状和簇内小区数N是有限的：

$$N = i^2 + ij + j^2$$

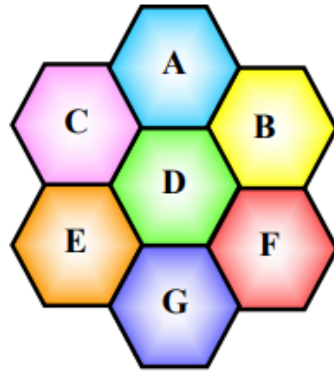
其中：i 和 j 都是非负整数，不同时为 0

<i>i</i>	1	0	1	0	2	1	0	2	1	0	3	2
<i>j</i>	1	2	2	3	2	3	4	3	4	5	3	4
<i>N</i>	3	4	7	9	12	13	16	19	21	25	27	28

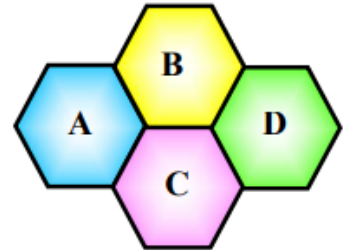
- 常见的六边形簇



$N=3, i=1, j=1$



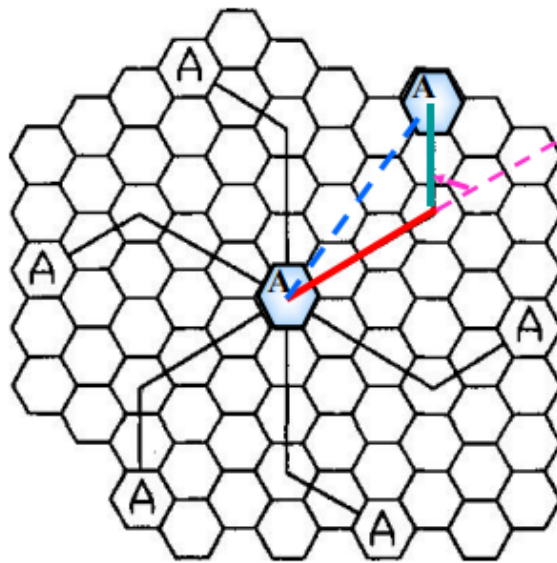
$N=7, i=1, j=2$



$N=4, i=0, j=2$

效果：N越小，则在小区面积不变的情况下，每个簇的面积越小；则在相同覆盖面积下，系统中簇复制越多；则系统容量越大，频率利用率越高

簇内同频小区位置的确定：沿着任意一条六边形边的垂线方向移动*i*个小区，并逆时针方向旋转60°，再移动*j*个小区。



3.2.4 小区制系统的信道规划

1. 控制信道

1. 初始化、呼叫请求等
2. 占频谱的5%
3. 一般情况下，一个小区仅需要一条控制信道
4. 控制信道的频谱复用策略需要更加可靠（控制信道采用 $N=21$ 的复用方案，而话音信道采用 $N=7$ 的方案）

2. 话音信道

1. 业务流
2. 占频谱的95%

3.2.5 小区制系统的系统容量和干扰

1. 系统容量

系统容量：固定频率资源下，系统可以使用的信道数，等价于可以容纳的用户数。

计算：

$$\begin{aligned} \text{假设} & \left\{ \begin{array}{l} \text{每个簇内的小区数为 } N \text{ 或 系统频率复用因子为 } \frac{1}{N} \\ \text{此系统的信道数为 } S \\ \text{此系统区域内簇的复制次数为 } M \text{ 次} \end{array} \right. \\ \text{则} & \left\{ \begin{array}{l} \text{每个小区的信道数 } k = \frac{S}{N} \\ \text{系统容量 } C = MS \end{array} \right. \end{aligned}$$

由此公式可知，对于同一块区域，因为每个簇都会占用一次完整频段，那么簇复制的次数越多，此区域内对频谱的利用率越大，即：带宽B不变则信道数S不变，簇复制次数M增大，则系统容量C增大

让簇复制次数增大的方法：

1. 若 每个小区的半径大小r不变，则 增大每个小区内的信道数k，则每个簇内的小区数N减小，相同区域内簇的复制次数增大

■ 频谱利用率：二频复用 > 四频复用

2. 若 每个小区内的信道数k不变，则 减小每个小区的半径大小，则相同区域内簇的复制次数增大

对于第一种方法：**减小小区半径**会带来基站数量急剧增加，成本上升；

对于第二种方法：**减小 N** 会导致频率复用更紧密，可能会加重干扰

2. 干扰

(1) 干扰的分类

注：噪声和干扰是并列的 —— 信噪比、信干比、信干噪比

干扰：

1. 同小区内：其它移动台 —— ？
2. 同簇内：簇内所有小区 —— 邻频干扰 + 功率干扰（接收器非线性效应）
3. 簇间：同频小区 —— 同频干扰

(2) 干扰的影响

1. 对控制信道的影响：信号发送失败，导致呼叫遗漏或阻塞；
2. 对话音信道的影响：通话质量下降，串扰等；

(3) 信干比的计算

在诸多干扰因素中，同频干扰主要决定了蜂窝系统的通话质量，故信干比中的干扰 I 仅考虑同频干扰

假设 每个六边形小区的半径为 R

同频复用距离 D ：两个同频小区之间的距离（由推导可得：）

$$D = \sqrt{3N} \cdot R$$

定义 同频复用比例 Q

$$Q = \frac{D}{R} \stackrel{\text{正六边形小区}}{=} \sqrt{3N}$$

计算 信干比（again：信干比中的干扰 I 仅考虑同频干扰）

移动信道，任一点接收到的平均信号能量： $P_r = P_0 \left(\frac{d}{d_0} \right)^{-n}$ 其中 n 为路径衰减因子

$$\text{信干比: } \frac{S}{I} \approx \frac{S}{I_{\text{同频}}} = \frac{S}{\sum_{i=1}^{i_0} I_{\text{同频}i}}$$

$$\text{对于在小区边界上的点: } \frac{S}{I} \approx \frac{S}{\sum_{i=1}^{i_0} I_{\text{同频}i}} = \frac{P_0 \left(\frac{R}{d_0} \right)^{-n}}{\sum_{i=1}^{i_0} P_0 \left(\frac{D_i}{d_0} \right)^{-n}}$$

$$\text{条件: } \begin{cases} \text{全向天线: } i_0 = 6 \\ \text{近似认为: } D_i = D \end{cases}$$

$$\text{则: } \frac{S}{I} \approx \frac{R^{-n}}{6 \times D^{-n}} = \frac{(\sqrt{3N})^n}{6}$$

可知当 N 增大时，信干比增大，但是频谱利用率下降

3.3 小区制系统的策略

3.3.1 信道分配策略

1. 固定信道分配策略：每个小区分配一组事先确定好的话音信道，小区中的任何呼叫都只能使用小区中的空闲信道。如果信道均已被占用，则呼叫阻塞。（本章主要内容）
2. 动态信道分配：呼叫请求到达时，为它服务的基站向移动交换中心（MSC）请求信道，并根据某种算法进行信道分配。（动态信道划分需要实时监控信道状态、话务量分布等信息，存储/计算量较大，但有利于提高信道的利用率，降低呼叫阻塞概率。）

3.3.2 切换策略

切换（handoff）：当一个移动台在通话过程中，从一个基站移动到另一个基站时，MSC自动地将呼叫转移到新的信道上。

在小区内分配空闲信道时，切换请求优于呼叫初始请求

符号定义：

$$\begin{cases} \text{维持通话的最小可接收信号强度 } P_{r,\min} \\ \text{切换启动信号强度 } P_{r,HO} \\ \Delta = P_{r,HO} - P_{r,\min} \end{cases}$$

若移动台一边通话，一边移动，则 Δ 的取值很重要：

1. Δ 过大：切换频繁，加重MSC负担
2. Δ 过小：（切换需要时间，在切换的过程中，移动台也在移动）可能在尚未完成切换时，通信已中断（MSC需要判断，移动台的信号电平的下降确实是因为正在远离基站，而不是因为其它原因的瞬时衰减）

3.4 小区制系统的中继和服务等级

3.4.1 概述

中继（Trunking）：允许大量用户在一个小区内共享相对较小数量的信道，即从可用信道库中给每个用户按需分配信道；

服务等级（Grade of Service, GOS）：中继系统最忙碌时，用户进入系统的能力，一般用呼叫阻塞概率，或呼叫延迟大于某一特定排队时间的概率进行描述；

3.4.2 中继理论和对应公式

中继理论：

1. 丢失呼叫清除（Lost Call Cleared, LCC）系统：
 1. 对呼叫请求不提供排队。用户请求后，如有空闲信道，则立即接入。如果所有信道都被占用，则呼叫阻塞，但可随后任意重试。具有最小的呼叫建立时间。
 2. 对应 Erlang B公式
2. 丢失呼叫延迟（Lost Call Delayed, LCD）系统：
 1. 将被阻塞的呼叫放入队列，当呼叫没有得到空闲信道时，该请求将被延迟直至出现空闲信道。
 2. 对应 Erlang C公式（*）

3.4.3 话务量

话务量强度：单位时间（小时）的呼叫时长，单位为Erlang

$$\text{每个用户的话务量强度: } A_u [\text{Erlang}] = \lambda H \begin{cases} \lambda [\text{calls/hour}] \text{ 单位时间内的平均呼叫数} \\ H [\text{hour}] \text{ 平均保持时间} \end{cases} \begin{cases} 2 \text{ calls/hour 家庭} \\ 5 \text{ calls/hour 办公室} \\ 35 \text{ calls/hour 呼叫中心} \end{cases}$$

$$\text{总话务量: } A [\text{Erlang}] = U A_u$$

$$\text{每条信道的话务量: } A_c [\text{Erlang}] = \frac{U A_u}{C}$$

3.4.4 LCC系统下的计算

1. 计算 服务等级/阻塞率/呼损率 的第一种方法

即：当流入业务量大于等于完成业务量时，损失话务量与流入话务量的比值

$$\text{设} \begin{cases} A \text{ 为 请求的话务量} \\ A' \text{ 为 成功完成的话务量} \\ \lambda \text{ 为 每小时的平均呼叫次数} \\ \lambda_0 \text{ 为 每小时的平均成功呼叫次数} \end{cases}$$

$$GOS = B = \frac{A - A'}{A} = \frac{\lambda H - \lambda_0 H}{\lambda H} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda}$$

2. 计算 服务等级/阻塞率/呼损率 的第二种方法

计算理想条件下LCC系统的阻塞率的前提条件：

1. 呼叫到达是 Poisson 过程；
2. 呼叫持续时间服从指数分布；
3. 无排队（即呼叫立即处理或立即被阻塞）；
4. 通话失败用户会放弃（或稍后重试，不计入本模型）；
5. 系统在稳态下工作。

根据排队论可得到：Erlang B 公式（这是假定用户数目无限的保守计算，实际上系统产生的阻塞率更低）

$$GOS = B = \frac{\frac{A^C}{C!}}{\sum_{k=0}^C \frac{A^k}{k!}}$$

（实际使用时：网页计算器 or 查表）

总结：

法一：请求的、完成的、阻塞率 互求

法二：总话务量 A、阻塞率 B、信道数 C 互求

3.5 提高蜂窝系统容量的方法

提高蜂窝系统容量 即 给单位覆盖区域提供更多的信道

3.5.1 小区分裂 splitting

1. 定义:

小区分裂 是 将拥塞的小区分成更小的小区的方法，每个小区都有自己的基站并相应地降低天线高度和减小发射机功率

2. 基站发射功率的调整

假设 小区分裂后，小区半径变为原来的一半：

$$R' = \frac{1}{2}R$$

为了保持小区边界（小区半径端点）的接收功率不变，则必须降低基站的发射功率

已知接收功率模型：

$$P_r = P_t \cdot \left(\frac{1}{R}\right)^n$$

则有：

$$P'_r = P'_t \cdot \left(\frac{1}{R'}\right)^n$$

令 分裂前后小区边界接收功率相等，有：

$$\begin{aligned}\Rightarrow P'_t \cdot \left(\frac{1}{R'}\right)^n &= P_t \cdot \left(\frac{1}{R}\right)^n \\ \Rightarrow P'_t &= P_t \cdot \left(\frac{R'}{R}\right)^n = P_t \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n\end{aligned}$$

3. 代价

1. 基站数量增加
2. 切换操作次数增加

3.5.2 扇区划分 sectoring

1. 定义

将一个小区划分为多个扇区（如三个 120° 或六个 60° 扇区），每个扇区使用**定向天线**覆盖。

具体实现方法：用方向性天线代替全向天线

2. 如何提高系统容量

在小区半径R不变的情况下，扇区划分降低了干扰I，因为要求的信干比SIR不变，可以降低复用因子N（同频小区更近，会提高干扰I），当系统面积不变时，则可以增大簇的复制次数M，从而提高系统总信道容量

$$C = MS = MkN$$

3. 信干比计算

(again and again: 干扰仅考虑同频干扰)

$$\frac{S}{I} = \frac{\left(\frac{D}{R}\right)^n}{i_0} = \frac{\left(\sqrt{3N}\right)^n}{i_0}$$
$$i_0 = \begin{cases} 6 & (\text{全向}) \\ 2 & (120^\circ \text{扇区}) \\ 1 & (60^\circ \text{扇区}) \end{cases}$$

4. 代价

1. 增加了每个基站上的天线数目
2. 扇区划分降低了中继效率，导致话务量的损失 (例3.9) (本质原因: 将大的信道池转换为了多个小组)
3. 增加了扇区之间的切换 (现代基站的扇区切换不需要MSC的帮助, 因此可以接受)

3. 微小区 Microcell zone