

## 蜂窝系统原理

本章将关注于蜂窝系统并主要讲解蜂窝通信的基础知识。在一个无线通信系统中，我们非常关注整个系统的用户容量（即整个无线网络所能支持的最大用户数量）。一种通信方案是使用大功率的天线覆盖整个网络，但是这并不是一个好的选择。本章介绍蜂窝网络使系统的容量增加的原理。

### 3.1 蜂窝系统

大多数商业广播电视系统的设计目标是尽可能多地扩大无线电覆盖面积。这些系统的设计者通常在国家有关部门所规定的最高位置架设天线并使用最大的功率去广播信号。因此，这一天线所用的频率在很大的距离范围内不能复用，不然两天线发射的信号可能造成干扰并影响信息传输的质量。两天线间间隔的面积可能远远大于它们所能覆盖的面积。

蜂窝系统采用的是一种截然不同的方法。它用小功率发射机在一个相对小的面积上高效地利用可供使用的频段。设计一个高效率蜂窝系统的关键是将每个可用频段的使用次数在一定区域内最大化。

蜂窝系统是被设计去控制多组低功率的无线电去覆盖整个服务区（见图 3-1）。每组无线电为附件的移动设备服务。被每一组无线电服务的区域称为小区。每个小区有一定数量的低功率无线电用于小区内的通信。小区内无线电功率会足够大到满足小区内所有移动节点（包括在小区边缘节点）的通信。最初的系统只有较少的使用者，因此采用 28km 的小区半径。在之后的成熟系统中就采用了 2km 来使得频率复用率足够的大。

随着系统流量的增加，系统加入了新的小区 and 信道。如有系统使用一种不合理的小区模式，这将使系统的频谱利用率变得很低，因为同信道之间的干扰会使得信道的复用变得艰难。另外，还会导致一种不经济的设备部署，需要一个小区接着另一个小区去重新部署。因此，每当系统进入建设阶段时，大量的工程量会被用在重新调整传输、切换和控制资源。利用规则的小区模式则可以消除这些困难。

在现实中，小区的覆盖面积是一个不规则的圆形。实际上的覆盖面积由地形以及其他一些因素来控制。为设计的目的并作为一次的近似，我们认为覆盖的面积是一个正多边形。例如，一个常功率的全方向天线，它的覆盖面积将会是一个圆形。为了达到没有

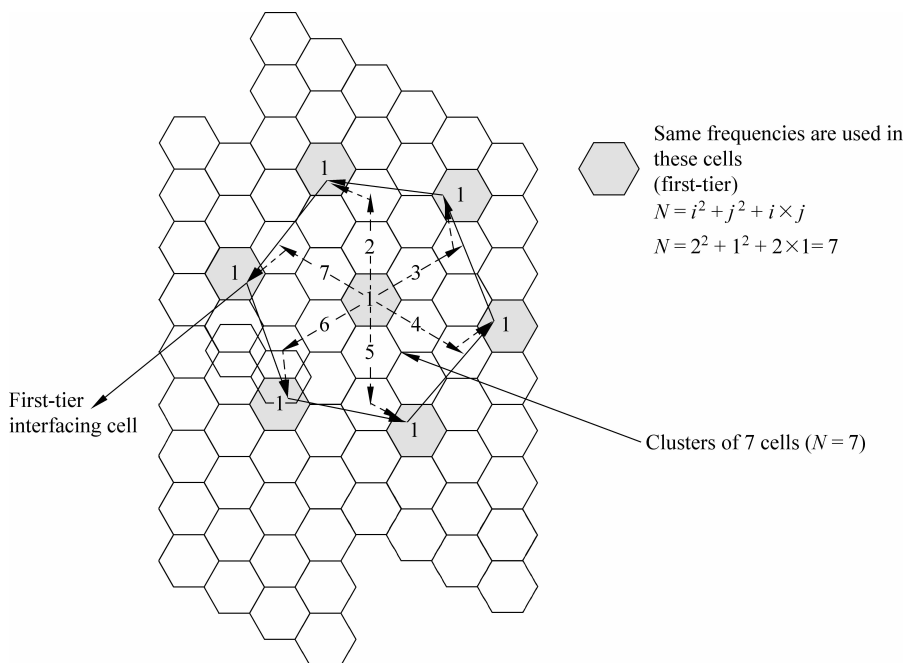


图 3-1 蜂窝通信系统

死角的全覆盖,需要一系列的正多边形来组成小区。任何正多边形,例如正三角形、正方形或是正六边形可以被用于小区设计。正六边形是一个常用的选择,这主要有两个原因:第一个正六边形的布局会需要更少的小区数,同时这也意味着需要更少的天线;第二个正六边形的布局和其他形状比起来更经济实惠。在实际操作中,常常是在地图上画上一系列的正多边形后,利用传输模型计算不同的方向的信噪比 SNR 或是利用近似求解的计算机程序。在本章接下去的部分里,我们将假设正多边形是覆盖面积。

一个小区可以由单个基站去提供服务,也可以是称为区群的多个小区。在蜂窝系统中,区群中各个基站都是以有线连接的方式连接至移动交换中心(MSC)。与基站相比, MSC 有着更强的计算能力,具有更多的功能。因此,绝大多数通信操作都会由 MSC 去处理完成。

### 3.2 移动性管理

虽然蜂窝的方法允许采用低功率发射机和频率复用来增大系统的容量,但是这些优点并不意味着是没有代价的。由于无线通信的显著特征是具有支持用户漫游的灵活性,而小的地理覆盖区域意味着移动用户需要常常从一个小区离开进入另一个小区。为了保持正在进行的通话的连续性,当移动台从当前服务基站的小区进入另一个覆盖区域时,该链路连接必须从当前服务基站切换到新基站。因此,必须采用一种有效且高效的切换机制来支持业务连续性,并保持端到端的 QoS(服务质量)要求。执行和管理切换的过程称为切换管理。

蜂窝通信的原理如下：移动主机(MH)被分配到一个家乡网络,并由一个地址进行区别,该地址称为家乡地址。在家乡网络中,一个称为家乡代理的代理机制跟踪 MH 的当前位置,以方便该 MH 的信息向目的地传递。随着 MH 远离其家乡网络,必须保持该 MH 与其家代理的联系,以便家乡代理能够跟踪 MH 的当前位置,从而达到传递信息的目的。在蜂窝通信中,跟踪用户的当前位置以保持 MH 与其他家乡代理之间的联系过程称为位置管理。

由于用户的移动性使得切换管理和位置管理成为必需,这些管理功能被认为是移动管理的两个组成部分。

### 3.2.1 切换管理

在一次通话过程中,当移动台进入不同的小区时,本次通话就必须传递到一个属于新小区的新信道上,这一操作过程就称为切换。切换操作包括新基站的识别以及在新基站支持数据和控制信号的信道分配。正如上面所提到的,MSC 具有执行多种不同功能的计算能力,因此,切换操作通常由 MSC 负责完成。MSC 跟踪器所管辖的所有小区的资源占用情况,当移动台在一次通话期间进入一个不同的小区时,MSC 就会确定新小区中未被占用的可用信道,并做出是否转移链路的决策。如果新基站可以提供用于处理载有信号的信号与控制信号的信道,从而支持切换连接,就会发生切换,否则就不会发生切换。

### 3.2.2 位置管理

如前所述,MH 总是与一个家乡网络以及属于其家乡网络代理管理的家乡地址联系在一起。当 MH 离开其家乡网络时,就会进入一个称为外地网络的区域,此时,MH 必须通过外地代理向其家乡代理进行注册,从而使家乡代理知道其当前位置,以方便消息传递。MH 在开启时向其家乡代理进行注册,当它进入外地网络时,需要通过外地代理向其家乡代理进行注册,即家乡代理与外地代理之间是相互联系的,当家乡代理要向 MH 传递信息时,它会通过外地代理将该信息传给该 MH。在注册过程中,家乡代理需要从外地代理所传递的身份鉴别信息中确认提交注册的移动主机确实属于其管辖范围。验证在注册过程中所提交的身份信息确实属于一个正确的 MH 的过程称为鉴权过程。

## 3.3 区群和频率复用

相邻同信道小区之间的间隔区域可以设置采用不同频率段的其他小区,从而提供频率隔离。使用不同频率段的一组小区称为一个区群,设  $N$  为区群的大小,表示其所包含的小区数目。这样,区群中的各个小区就包含可用信道总数的  $N$  分之一。从这个意义上讲, $N$  也称为蜂窝系统的频率复用因子。

### 3.3.1 通过频率复用扩大系统容量

假定为每个小区分配  $J$  个信道 ( $J \leq K$ ), 如果  $K$  个信道在  $N$  个小区进行分配, 分成唯一的互不相交的不同信道, 每组  $J$  个信道, 则

$$K = JN \quad (3-1)$$

总的来说, 一个区群中的  $N$  个小区全部可用频率。由于  $K$  为可用信道总数, 所以由式(3-1)可以看出, 随着分配给每个小区的信道数  $J$  的增大, 区群尺寸  $N$  会减少。因此, 通过减少区群尺寸, 就可以提高各个小区的容量。

区群可进行多次复制, 从而形成整个蜂窝通信系统。设  $M$  为区群复制的次数,  $C$  为采用频率复用的整个蜂窝系统的信道总数, 那么,  $C$  就是系统容量并且可以表示为

$$C = MJN \quad (3-2)$$

如果  $N$  减少,  $J$  按比例增大以满足式(3-1), 此时, 为了覆盖相同的地理位置, 就必须将更小的区群复制更多次数, 这意味着  $M$  必须增大。由于  $JN (=K)$  保持恒定并且  $M$  增大, 式(3-2)表明系统容量  $C$  随之增大, 即当  $N$  最小化时, 得到  $C$  最大化。稍后会知道最小化  $N$  将增大同信道干扰。

### 3.3.2 频率复用下的小区规划

前面已经指出, 本章的蜂窝通信的讨论是基于正六边形小区的二维排列链的。此时, 寻找离特定小区最近的同信道相邻小区的规划如下所述。

确定最近的同信道相邻小区的规划。如下两个步骤可以用来确定最近的同信道小区的位置。

步骤 1: 沿着任何一条六边形链移动  $i$  个小区。

步骤 2: 逆时针旋转  $60^\circ$  后再移动  $j$  个小区。

当  $i=3$  以及  $j=2$  时, 采用上述规则确定蜂窝系统中同信道小区位置的方法如图 3-2 所示, 图中同信道小区为带有阴影的小区。

蜂窝网络中区群的概念以及频率复用的思想如图 3-2 所示, 图中具有相同编号的小区使用相同的频率段, 这些同信道小区必须隔开一定的距离, 使得同信道干扰在指定的 QoS 门限值以下, 参数  $i$  与  $j$  是同信道小区之间最近的相邻小区个数的度量。区群尺寸  $N$  与  $i$  和  $j$  的关系可以用如下方程表示:

$$N = i^2 + ij + j^2 \quad (3-3)$$

例如, 在图 3-3(b) 中,  $i=2, j=2$ , 因此,  $N=7$ 。区群尺寸  $N=7$  时, 由于各小区都包含可用信道总数的  $1/7$ , 所以频率复用因子为 7。

蜂窝系统的优点如下。

(1) 可以采用低功率发射机。

(2) 允许进行频率复用。

频率复用要求对小区结构进行规划, 从而使得同信道干扰保持在一个可接受的水平。随着同信道小区之间距离的增大, 同信道干扰就会减少。如果小区尺寸一定, 则信

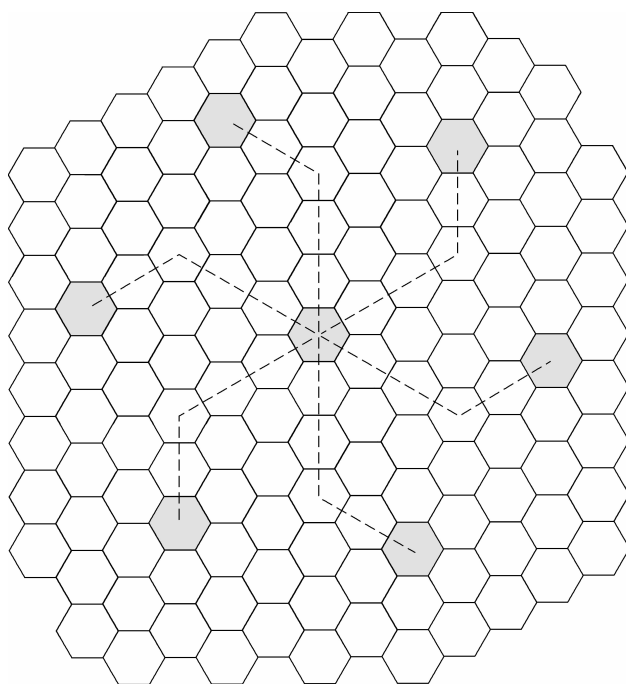


图 3-2 确定蜂窝系统中同信道小区位置的示意图

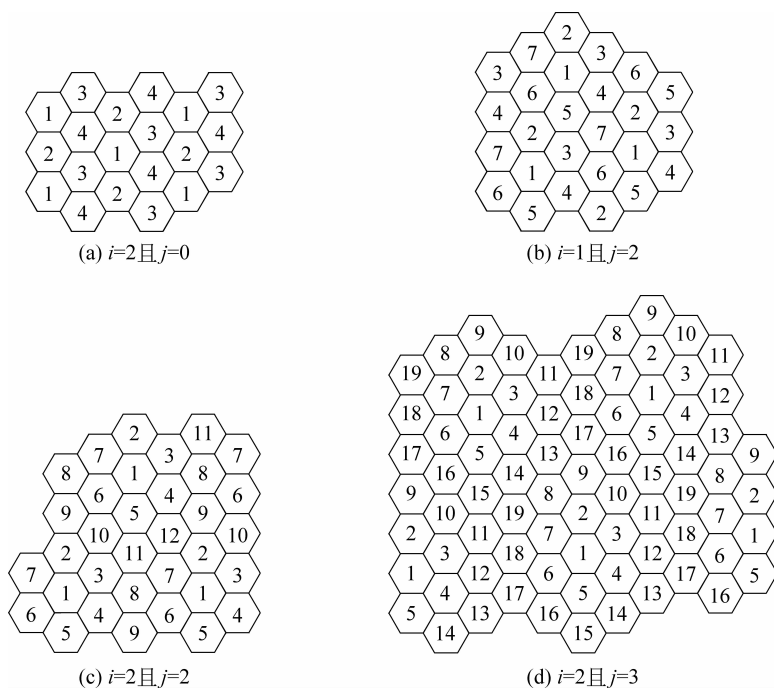


图 3-3 区群

号功率与同信道干扰功率之比的平均值将独立于各个小区的发射功率。任何各个同信道小区之间的距离均可采用六边形小区的几何尺寸进行测量。

### 3.3.3 六边形小区的几何结构

六边形小区阵列的几何阵列如图 3-4 所示,图中  $R$  为六边形小区的半径(从中心到顶点的距离)。一个六边形有 6 个等距离的相邻六边形。从图 3-4 可以看出,在分蜂窝阵列中,连接任何小区中心及其各相邻小区中心的直线之间的夹角为  $60^\circ$  的整数倍。注意图 3-4 中  $60^\circ$  角是指垂直直线与  $30^\circ$  直线构成的夹角,这两条直线均连接六边形小区中心的直线。

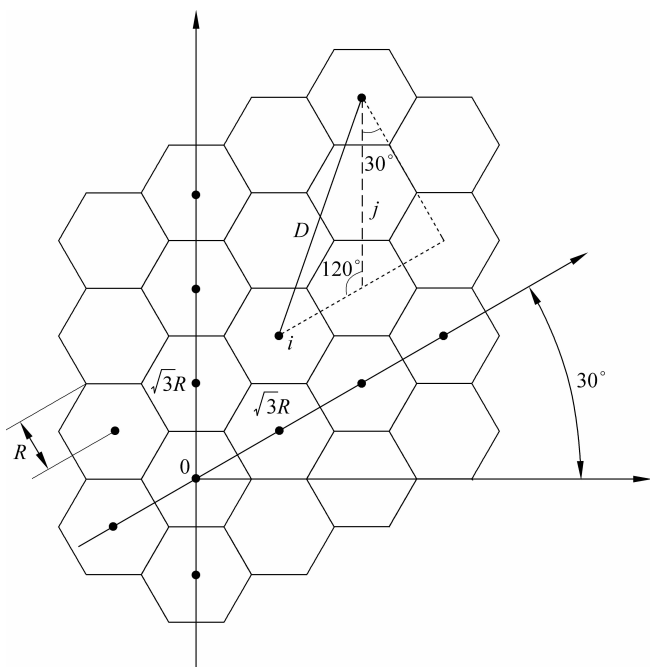


图 3-4 最近的同信道小区之间的距离

在六边形区域中,最近的同信道小区之间的距离可以从图 3-4 所示的几何图形计算出来。为了表示方便,将所研究的小区称为候选小区。两个相邻六边形小区中心之间的距离为  $\sqrt{3}R$ 。设  $D_{\text{norm}}$  为候选小区中心与最近的同信道小区之间的距离,它被两个相邻小区中心之间的距离  $\sqrt{3}R$  进行了归一化。注意,两个相邻小区之间的归一化距离( $i=1$  且  $j=0$ ,或者  $i=0$  且  $j=1$ )为单位 1,设  $D$  为相邻信道小区中心之间的实际距离,这样  $D$  就是  $D_{\text{norm}}$  与  $R$  的函数。

由图 3-4 所示的几何图形,易得

$$D_{\text{norm}}^2 = j^2 \cos^2(30^\circ) + (i + j \sin(30^\circ))^2 = i^2 + j^2 + ij \quad (3-4)$$

由式(3-4)和式(3-3)可得

$$D_{\text{norm}} = \sqrt{N}$$

由于两个相邻六边形小区中心之间的实际距离为 $\sqrt{3}R$ 。因此,候选小区中心与最近的同信道小区中心之间的实际距离为

$$D = D_{\max} \times \sqrt{3}R = \sqrt{3NR} \quad (3-5)$$

对于六边形小区而言,每个小区都有 6 个最近的同信道小区,同信道小区分层排列。通常,候选小区被第  $k$  层的  $6k$  个小区所包围,小区尺寸相同时,各层中的同信道小区都位于由该层同信道小区连接而成的六边形边界上。由于  $D$  是两个最近的同信道小区之间的半径,那么第  $k$  层的同信道小区连接而成的六边形的半径为  $kD$ 。 $i=2$  且  $j=1$  的频率复用方案中  $N=7$ ,其前两层同信道小区如图 3-5 所示,由该图容易观察到,第一层的半径为  $D$ ,第二次的半径为  $2D$ 。

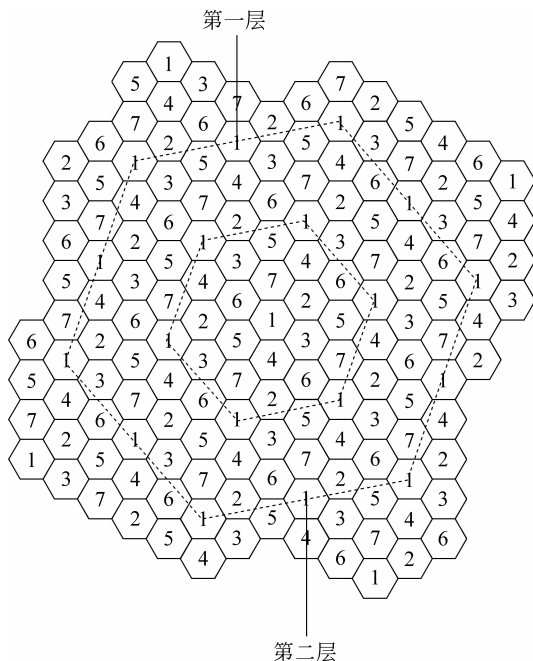


图 3-5  $N=7$  时的两层同信道干扰小区

### 3.3.4 频率复用比

频率复用比  $q$  定义为

$$q = \frac{D}{R} \quad (3-6)$$

因为频率复用会导致同信道小区的出现,所以  $q$  也成为同信道复用比。

将式(3-5)代入式(3-6)中,得到频率复用比  $q$  与区群尺寸(或频率复用因子)  $N$  之间的关系为

$$q = \sqrt{3N} \quad (3-7)$$

由于  $q$  随着  $N$  的增大而增大,并且小的  $N$  值影响蜂窝系统容量的增大,同时同信道干扰

也增大,因此,所选择的  $q$  或  $N$  应该使得信号与同信道干扰之比保持在可以接受的水平。几种频率复用方案以及相应的区群尺寸和频率复用比列于表 3-1 中,以便参考使用。

表 3-1 频率复用比与区群尺寸

| 频率复用方案( $i,j$ ) | 区群尺寸 $N$ | 频率复用比 $q$ |
|-----------------|----------|-----------|
| (1,0)           | 3        | 3.00      |
| (2,0)           | 4        | 3.46      |
| (2,1)           | 7        | 4.58      |
| (3,0)           | 9        | 5.20      |
| (2,2)           | 12       | 6.00      |
| (3,1)           | 13       | 6.24      |
| (3,2)           | 19       | 7.55      |
| (4,1)           | 21       | 7.94      |
| (3,3)           | 27       | 9.00      |
| (4,2)           | 28       | 9.17      |
| (4,3)           | 37       | 10.54     |

3.4 同信道与相邻信道干扰

在无线通信系统中,前向链路与反向链路所使用的信道在时间或在频率上进行分隔,从而允许双工通信。蜂窝系统所能提供的信道数量是有限的,蜂窝系统的容量就是由这一可利用的信道总数给予定义的。系统容量作为可用信道总数的函数取决于可用信道的分配方式,特别地,如果最近的小区之间的间隔足以使得任意给定频率它们之间的干扰被控制在一个可接受电平之下,那么两个或多个不同的小区就可以采用相同的一段频率或无线信道。采用相同频率段的小区称为同信道小区,同信道小区之间的干扰称为同信道干扰。频率或信道均代表无线资源。

本节讨论蜂窝阵列中候选小区的性能。任一给定的基站可以提供处理许多移动用户业务的能力。基站接收机接收到的来自目标用户的信号通常受同一小区中其他移动台发射信号、背景噪声以及相邻小区中移动台发射信号的干扰的影响。假定上行链路的传输与下行链路的传输在时域(即时分双工)或在频率(即频分双工)存在适当的间隔,此时,来自另一条链路的传输干扰就可以忽略不计。基站接收机收到的来自相同小区中其他移动台的干扰称为小区内干扰,而来自其他小区的干扰则称为小区间干扰。影响各移动主机接收性能的下行链路的小区间干扰所导致的问题要比基站接收机处上行链路干扰所导致的问题严重得多。其原因可归结为基站接收机比各移动用户接收机更为复杂这一事实。

如果整个蜂窝系统中不同的小区使用不同的频率段,那么小区间干扰就会控制在最

小水平,但是这时的系统容量又会受到限制;为扩大系统容量,必须采用频率复用。另一方面,频率复用后将引入来自采用相同频率段小区的同信道干扰,因此,需对频率复用进行仔细规划,从而使得同信道干扰保持在可接受的水平。

### 3.4.1 同信道干扰

正如之前所说,无线信道是干扰受限的。除同信道干扰外,其他邻近小区不同于候选小区的频率运行,所以来自非同信道小区的干扰是最小的。于是,同信道干扰在小区间干扰中起主要作用,这样在评估系统性能时,需将来自同信道小区的干扰考虑进去。为了简化后续分析,我们仅考虑平均信道质量作为与距离有关的路径损耗的函数,而不考虑由传播阴影和多径衰落造成的信道统计特性的细节。

用符号  $S$  与  $I$  分别表示接收机解调器输出端的有用信号功率与同信道干扰功率,设  $N_i$  表示产生同信道干扰的小区数,  $I_i$  表示由第  $i$  个同信道小区基站的发射信号产生的干扰功率。那么,在移动台接收机处信号功率与同信道干扰功率之比( $S/I$ )为

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{\sum_{i=1}^{N_i} I_i}$$

正如之前所讨论的,任一点处的平均接收信号强度按照发射机之间距离的幂指数规律衰减。

设  $D_i$  为第  $i$  个干扰源与移动台之间的距离,给定移动台接收到由第  $i$  个干扰小区产生的干扰与  $(D_i)^{-k}$  成正比,其中  $k$  为路径损耗指数。该路径损耗指数  $k$  通常由测量确定,在许多情况下,其取值范围是  $2 \leq k \leq 5$ 。

除同信道干扰外,时刻存在固有背景噪声的影响。但是,在干扰起主要作用的环境中,可以忽略背景噪声。已经指出,有用接收信号功率  $S$  正比于  $r^{-k}$ ,其中,  $r$  为移动台与其所属服务站之间的距离。如果所有基站的发射功率相同,并且在整个地理覆盖区域内路径损耗指数相同,则来自第  $i$  个同信道小区的同信道干扰  $I_i$ ,对所有  $i$  而言,仅取决于  $D_i$  与  $k$ 。典型移动台接收机处的  $S/I$  可以近似为

$$\frac{S}{I} = \frac{r^{-k}}{\sum_{i=1}^{N_i} D_i^{-k}} \quad (3-8)$$

同信道干扰的程度是移动台在其所属小区位置的函数。当移动台位于小区边界时(即  $r=R$ ),由于有用信号功率最小,所以此时发生同信道干扰的最坏情况。由于蜂窝系统具有六边形的形状,因此在第一层总存在 6 个同信道干扰小区,如果忽略来自第二层以及更高层的同信道干扰,则  $N_i=6$ ,在  $r=R$  的情况下,利用  $D_i \approx D, i=1, 2, \dots, N_i$ ,有

$$\frac{S}{I} = \frac{(D/R)^k}{N_i} = \frac{q^k}{N_i} = \frac{(\sqrt{3N})^k}{N_i} \quad (3-9)$$

于是,频率复用比可以表示为

$$q = \left( N_i \times \frac{S}{I} \right)^{1/k} = \left( 6 \times \frac{S}{I} \right)^{1/k} \quad (3-10)$$

当移动台位于小区边界时,会经历向前信道中同信道干扰的最坏情况。如果采用移动台与第一层干扰基站之间距离的某种更好的近似,如图 3-6 所示,则由式(3-8)可知, $S/I$  可以表示为

$$\frac{S}{I} = \frac{R^{-k}}{2(D-R)^{-k} + 2D^{-k} + 2(D+R)^{-k}} \quad (3-11)$$

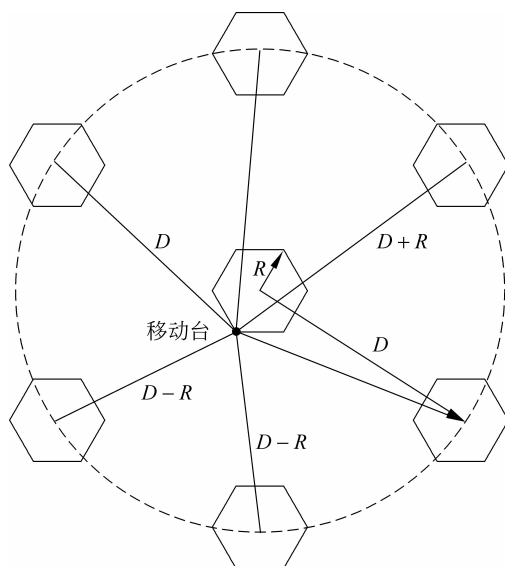


图 3-6  $N=7$  时同信道干扰的最坏情况

由于  $D/R=q$ ,当路径损耗指数  $k=4$  时,式(3-11)可以写为

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{2(q-1)^{-4} + 2q^{-4} + 2(q+1)^{-4}}$$

虽然频率复用因子增大后(如从 7 增大到 9)可以获得可接受的  $S/I$  电平,但  $N$  的增大却带来了系统容量的降低,因为 9 个小区复用时提供给各个小区的频率复用率为  $1/9$ ,而 7 个小区复用时频率利用率为  $1/7$ 。容量的下降可能是不允许的,从运营的角度讲,并不要求满足最坏情况,因为这种情况很少发生。最坏的情况会以一个很小但不为零的概率发生,从而在通话的某一间隔内造成性能低于规定水平。认识到这一事件后,设计人员通常希望找到最优的折中方案。

### 3.4.2 邻信道干扰

邻信道干扰(ACI)是由于有用信号相邻的信号频率产生的。ACI 主要是由于接收机滤波器不理想从而使邻近频率泄露到通带造成的。考虑两个使用相邻信道的移动用户的上行链路传输,其中一个用户距离基站非常近,另一个用户距离小区边界非常近,如果没有适当的传输功率控制,则来自距离基站近的移动台的接收功率远大于来自远处的移动台的接收功率,这种远近效应会大大增强接收信号对弱接收信号的 ACI。为了降低 ACI,应该:

- (1) 采用带外辐射低的调制方式(例如,MSK 优于 QPSK,GMSK 优于 MSK)。
- (2) 仔细设计接收机前端的带通滤波器。
- (3) 通过将相邻信道分配给不同的小区,使用适当的信道交织。
- (4) 如果区群尺寸足够大,就要避免在相邻小区中使用相邻信道,从而进一步降低 ACI。
- (5) 通过 TDD 或 FDD 适当地对上行链路与下行链路进行分隔。

## 3.5 扩大系统容量的其他方法

正如之前所讨论的,通过频率复用可以扩大蜂窝系统的容量。采用如下两种方式进行小区规划和天线设计,同样能够提高系统容量。

- (1) 小区分裂。
- (2) 天线扇分化。

### 3.5.1 小区分裂

如图 3-7 所示,进行小区分裂的一种方法是将拥塞的小区划分为更小的小区,划分后的各个小区都拥有各自的基站,并且相应地降低天线高度和发射功率。由于小区数目的增加,在相同覆盖面积内将存在更多的区群,这相当于对区群进行了多次复制,即前文所提到的复制因子  $M$  增大了,也就是说由于信道被复用的次数增加了。因此,采用小区分裂会提高蜂窝系统的容量。在图 3-7 中,假定中心区域的话务量饱和(即该区域的呼叫阻塞概率超过了可接受范围),原先位于中央半径为  $R$  的大小区分裂为半径为  $R/2$  的中小区,并且位于中央的中小区又进一步分裂为半径为  $R/4$  的小小区。小区分裂后会降

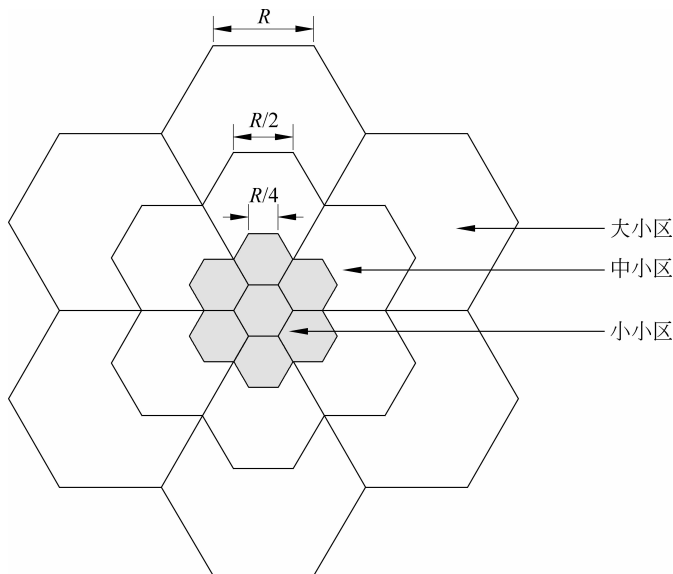


图 3-7 小区分裂示意图(半径由  $R$  变为  $R/2$  以及  $R/4$ )

低该地区的呼叫阻塞概率,同时也会增加移动台在小区之间切换的频度。

设  $d$  为发射机与接收机之间的距离,  $d_0$  为发射机与近区参考点之间的距离,  $P_0$  为在近区参考点处的接收功率。可知,平均接收功率  $P_r$  正比于  $P_0$ ,并且可以表示为

$$P_r = P_0 \left( \frac{d}{d_0} \right)^{-k} \quad (3-12)$$

其中  $d \geq d_0$ ,  $k$  正如上文所定义,为路径损耗指数。式(3-12)取对数得到

$$P_{r(\text{dBW})} = P_{0(\text{dBW})} - 10k \lg \frac{d}{d_0}, \quad d \geq d_0 \quad (3-13)$$

设  $P_{t_1}$  与  $P_{t_2}$  分别为大小区基站和中小区基站发射功率,在大(旧)小区边界处的接收功率  $P_r$  与  $P_{t_1} R^{-k}$  成正比,中(新)小区边界处的接收功率  $P_r$  与  $P_{t_2} (R/2)^{-k}$  成正比。根据接收功率相等,有

$$P_{t_1} R^{-k} = P_{t_2} (R/2)^{-k} \quad \text{或} \quad P_{t_1} / P_{t_2} = 2^k$$

上式取对数可得

$$10 \lg \frac{P_{t_1}}{P_{t_2}} = 10k \lg 2 \approx 3k(\text{dB})$$

当  $k=4$  时,  $P_{t_1} / P_{t_2} = 12(\text{dB})$ 。因此,小区分裂后,新小区半径是旧小区半径的二分之一时,发射功率可以降低 12dB。

### 3.5.2 定向天线(天线扇区化)

天线的基本形式是全向的。相对于全向天线而言,采用定向天线可以提高系统容量。由式(3-8)可知,最坏情况下的  $S/I$  为

$$\frac{S}{I} = \frac{R^{-k}}{\sum_{i=1}^{N_I} (D_i)^{-k}}$$

其中,  $N_I$  的值取决于采用的天线形式。在采用全向天线的情况下,对于第一层同信道小区而言,  $N_I = 6$ 。设  $D_i \approx D, i=1, 2, \dots, N_I$ ,

$$\left( \frac{S}{I} \right)_{\text{omni}} = \frac{1}{6} \times q^k$$

其中,  $q = D/R$ 。为了说明扇区化所带来的容量提高,可以将全向天线的情况作为一个基准。

在图 3-8 所示的六边形小区中,可以采用  $60^\circ$  的整数倍进行扇区划分。假设为 7 小区复用,对于 3 扇区情况(每个扇区  $120^\circ$ ),第一层的干扰源数目由 6 减少为 2。

当  $D_i \approx D$  时,

$$\left( \frac{S}{I} \right)_{\text{omni}} = \frac{1}{6} \times q^k \quad \text{和} \quad \left( \frac{S}{I} \right)_{120^\circ} = \frac{1}{2} \times q^k$$

此时信号与干扰之比的增加倍数为

$$\frac{(S/I)_{120^\circ}}{(S/I)_{\text{omni}}} = 3$$

这就是采用定向天线后,与全向天线情况相比,用各小区中扇区数目表示的容量提高的

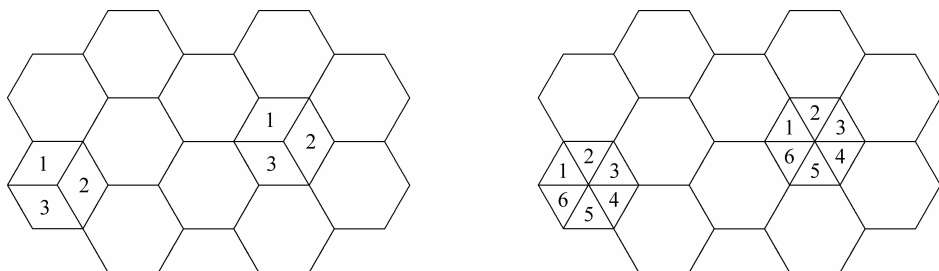
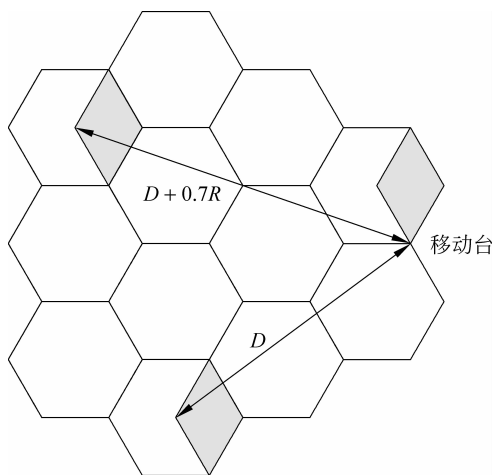


图 3-8 天线扇区化

理论值。注意,在各小区内,移动台必须在不同扇区之间进行切换,然而,该切换过程很容易由基站来处理。如果各小区中的可用信道总数需要划分给各个扇区,那么各小区的中继效率在无扇区的基础上会有所下降。

采用  $120^\circ$  扇区化的最坏结果如图 3-9 所示,图中移动台位于小区拐角处,  $R$  为小区半径,  $D$  为相邻同信道小区之间的距离。在 3 扇区情况下,移动台所经历的干扰来自两个干扰小区各自的相应扇区。由图中的距离估计以及  $k=4$  的路径损耗指数,可得:

$$\left(\frac{S}{I}\right)_{120^\circ} = \frac{R^{-4}}{D^{-4} + (D + 0.7R)^{-4}} = \frac{1}{q^{-4} + (q + 0.7)^{-4}} \quad (3-14)$$

图 3-9  $120^\circ$  扇区化时最坏情况示意图

## 3.6 信道分配策略

信道分配的两种基本方法是固定值信道分配和动态信道分配。

### 1. 固定信道分配(FCA)

在 FCA 方案中,为各小区分配一组预先确定的话音信道,小区中的任何呼叫请求只能被该特定小区中的未占用信道提供服务。为了提高信道利用率,可以考虑选择信道借

用。选择借用时,如果小区内的所有信道均已经被占用,并且相邻小区存在空闲信道,那么,就允许该小区从相邻小区借用信道,信道借用通常由 MSC 负责监管。

正如之前所提到的,由于 MSC 负责切换操作,所以 MSC 完全理解其所管辖的区群中容量的使用情况。因此, MSC 就是监督诸如信道借用等功能的自然子系统。

## 2. 动态信道分配(DCA)

在 DCA 方案中,语音信道并不是永久分配给不同的小区,每当有呼叫请求时,提供服务的基站就会向 MSC 请求信道, MSC(动态地)确定可用信道并相应地执行分配过程,为了避免同信道干扰,如果一个频率(无线信道)在当前小区或在任何落入频率复用最小限制距离内的小区没有被使用, MSC 则将该频率(无线信道)分配给呼叫请求。

由于在 MSC 控制之下所有可用信道可以被所有小区使用,因此,动态信道分配降低了呼叫阻塞的可能性,提高了系统中继容量。动态信道分配策略要求 MSC 连续地搜集关于所有信道的信道占有,话务量分布以及无线信号质量的事实数据。在任何情况下,为了进行切换管理, MSC 需要进行这样的数据搜集。

## 参 考 文 献

- [1] Jon W. Mark and Weihua Zhuang. Wireless Communications and Networking [M]. Pearson Education, 2005.
- [2] 吴功宜, 吴英. 物联网工程导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [3] Mischa Schwartz. Mobile Wireless Communications [M]. New York: Cambridge University Press, 2004.

## 3G、4G 和 5G

### 4.1 3G 概述

3G 是第三代移动通信技术,是将无线通信与国际互联网等多媒体通信结合的移动通信系统。3G 服务能够同时传送声音及数据信息,速率一般在几百 kb/s 以上。目前 3G 存在 3 种标准: CDMA2000、WCDMA、TD-SCDMA<sup>[1]</sup>。理论上 3G 下行速度峰值可达 3.6Mb/s(也有说 2.8Mb/s),上行速度峰值也可达 384kb/s。不可能像网上说的 2Gb/s,当然,下载一部电影也不可能瞬间完成。

国际电联已经确定的 3 个无线接口标准分别是美国的 CDMA2000、欧洲的 WCDMA、中国的 TD-SCDMA<sup>[2]</sup>。同时中国国内也支持国际电联确定的这 3 个无线接口标准。由于 GSM 设备采用的是时分多址,而 CDMA 使用码分扩频技术,先进功率和话音激活至少可提供大于 3 倍 GSM 网络容量,因而业界将 CDMA 技术作为 3G 的主流技术。

3G 发展十分迅猛,就国内来说,原中国联通的 CDMA 卖给中国电信,中国电信已经将 CDMA 升级到 3G 网络,3G 主要特征是可提供移动宽带多媒体业务。国际上已有 538 个 WCDMA 运营商在 246 个国家和地区开通了 WCDMA 网络,3G 商用市场份额超过 80%,而 WCDMA 向下兼容的 GSM 网络已覆盖 184 个国家,遍布全球,WCDMA 用户数已超过 6 亿。

#### 4.1.1 技术起源

1940 年,美国女演员海蒂·拉玛和她的作曲家丈夫乔治·安塞尔提出一个 Spectrum(频谱)的技术概念。这个被称为“展布频谱技术”(也称为码分扩频技术)的技术理论在此后带来了人们这个世界不可思议的变化,人们今天使用的 3G 技术就是由这个技术理论演变而来。

1938 年 3 月纳粹德国正式进入奥地利,随后,海蒂·拉玛也逃到伦敦,以远离她失败的婚姻和众多的纳粹“朋友”。她顺便也把纳粹无线通信方面的“军事机密”带到了盟国。这些机密主要是基于无线电保密通信的“指令式制导”系统,用于自动控制武器,精确打击目标,但为了防止无线电指令被敌军窃取,需要开发一系列的无线电通信的保密技

术——受过良好教育的她偷偷地吸收了许多极具价值的前瞻性概念。

这些技术当时并不被重视,但在 1942 年 8 月她还是得到了美国的专利,在美国的专利局,曾经尘封着这样一份专利:专利号为 2 292 387 的“保密通信系统”专利,美国国家专利局网站上的存档显示这个技术专利最初是用于军事用途的。

海蒂·拉玛最初研究这个技术是为帮助美国军方制造出能够对付纳粹德国的电波干扰或窃听的军事通信系统,因此这个技术最初的作用是用于军事。第二次世界大战结束后因为暂时失去了价值,美国军方封存了这项技术,但它的概念已使很多国家对此产生了兴趣,多国在 20 世纪 60 年代对此技术展开了研究,但进展不大。

直到 1985 年,在美国的圣迭戈成立了一个名为“高通”的小公司(现成为世界五百强),这个公司利用美国军方解禁的“展布频谱技术”开发出一个被命名为 CDMA 的新通信技术,就是这个 CDMA 技术直接导致了 3G 的诞生。世界 3G 技术的三大标准(美国的 CDMA2000、欧洲的 WCDMA、中国的 TD-SCDMA)都是在 CDMA 的技术基础上开发出来的,CDMA 就是 3G 的根本基础原理,而展布频谱技术就是 CDMA 的基础原理。

1995 年问世的第一代模拟制式手机(1G)只能进行语音通话。1996—1997 年出现的第二代 GSM、CDMA 等数字制式手机(2G)便增加了接收数据的功能,如接收电子邮件或网页<sup>[3]</sup>。

2008 年 5 月,国际电信联盟正式公布第三代移动通信标准,中国提交的 TD-SCDMA 正式成为国际标准,与欧洲的 WCDMA、美国的 CDMA2000 成为 3G 时代最主流的三大技术之一<sup>[4]</sup>。

作为一项新兴技术,CDMA、CDMA2000 已经风靡全球并已占据 20% 的无线市场。截至 2012 年,全球 CDMA2000 用户已超过 2.56 亿,遍布 70 个国家的 156 家运营商已经商用 3G CDMA 业务。包含高通授权 LICENSE 的安可信通信技术有限公司在内全球有数十家 OEM 厂商推出 EVDO 移动智能终端。2002 年,美国高通公司芯片销售创历史佳绩;1994 年至今,美国高通公司已向全球包括中国在内的众多制造商提供了累计超过 75 亿多枚芯片。3G 也就是在这个大背景下诞生的。

#### 4.1.2 标准参数

国际电信联盟(ITU)在 2000 年 5 月确定 WCDMA、CDMA2000、TD-SCDMA 三大主流无线接口标准,并写入 3G 技术指导性文件《2000 年国际移动通信计划》(简称 IMT-2000);2007 年,WiMAX 也被接受为 3G 标准之一<sup>[5]</sup>。

CDMA(Code Division Multiple Access,码分多址)是第三代移动通信系统的技术基础。第一代移动通信系统采用频分多址(FDMA)的模拟调制方式,这种系统的主要缺点是频谱利用率低,信令干扰话音业务。第二代移动通信系统主要采用时分多址(TDMA)的数字调制方式,提高了系统容量,并采用独立信道传送信令,使系统性能大大改善,但 TDMA 的系统容量仍然有限,越区切换性能仍不完善。CDMA 系统以其频率规划简单、系统容量大、频率复用系数高、抗多径能力强、通信质量好、软容量、软切换等特点显示出巨大的发展潜力<sup>[6]</sup>。下面分别介绍一下 3G 标准参数。

## 1. WCDMA

WCDMA 全称为 Wideband CDMA,也称为 CDMA Direct Spread,意为宽频分码多重存取,这是基于 GSM 网发展出来的 3G 技术规范,是欧洲提出的宽带 CDMA 技术,它与日本提出的宽带 CDMA 技术基本相同,目前正在进一步融合。WCDMA 的支持者主要是以 GSM 系统为主的欧洲厂商,日本公司也或多或少参与其中,包括欧美的爱立信、阿尔卡特、朗讯、北电,以及日本的 NTT、富士通、夏普等厂商。该标准提出了 GSM (2G)-GPRS-EDGE-WCDMA(3G)的演进策略。这套系统能够架设在现有的 GSM 网络上,对于系统提供商而言可以较轻易地过渡。预计在 GSM 系统相当普及的亚洲,这套新技术的接受度会相当高。因此 WCDMA 具有先天的市场优势。WCDMA 已是当前世界上采用的国家及地区最广泛的、终端种类最丰富的一种 3G 标准,占据全球 80%以上市场份额<sup>[7]</sup>。

ARTT FDD

异步 CDMA 系统:无 GPS。

带宽:5MHz。

码片速率:3.84Mcps。

中国频段:1940~1955MHz(上行)、2130~2145MHz(下行)。

## 2. CDMA2000

CDMA2000 是由窄带 CDMA(CDMAIS95)技术发展而来的宽带 CDMA 技术,也称为 CDMA Multi-Carrier,它是由美国高通北美公司为主导提出,摩托罗拉、Lucent 和后来加入的韩国三星公司都有参与,韩国成为该标准的主导者。这套系统是从窄频 CDMAOne 数字标准衍生出来的,可以从原有的 CDMAOne 结构直接升级到 3G,建设成本低廉。但使用 CDMA 的地区只有日、韩和北美,所以 CDMA2000 的支持者不如 WCDMA 多。不过 CDMA2000 的研发技术却是目前各标准中进度最快的,许多 3G 手机已经率先面世。该标准提出了从 CDMAIS95(2G)-CDMA20001x-CDMA20003x(3G)的演进策略。CDMA20001x 被称为 2.5 代移动通信技术。CDMA20003x 与 CDMA20001x 的主要区别在于应用了多路载波技术,通过采用三载波使带宽提高。中国电信正在采用这一方案向 3G 过渡,并已建成了 CDMAIS95 网络。

RTT FDD

同步 CDMA 系统:有 GPS。

带宽:1.25MHz。

码片速率:1.2288Mcps。

中国频段:1920~1935MHz(上行)、2110~2125MHz(下行)。

## 3. TD-SCDMA

TD-SCDMA 全称为 Time Division-Synchronous CDMA(时分同步 CDMA),该标准是由中国独自制定的 3G 标准,1999 年 6 月 29 日,中国原邮电部电信科学技术研究院(大

唐电信)向 ITU 提出,但技术发明始于西门子公司,TD-SCDMA 具有辐射低的特点,被誉为绿色 3G。该标准将智能无线、同步 CDMA 和软件无线电等当今国际领先技术融于其中,在频谱利用率、对业务支持具有灵活性、频率灵活性及成本等方面的独特优势。另外,由于中国内地庞大的市场,该标准受到各大主要电信设备厂商的重视,全球一半以上的设备厂商都宣布可以支持 TD-SCDMA 标准。该标准提出不经过 2.5 代的中间环节,直接向 3G 过渡,非常适用于 GSM 系统向 3G 升级。军用通信网也是 TD-SCDMA 的核心任务。相对于另两个主要 3G 标准 CDMA2000 和 WCDMA,它的起步较晚,技术不够成熟<sup>[8]</sup>。

RTT TDD

同步 CDMA 系统:有 GPS。

带宽:1.6MHz。

码片速率:1.28Mcps。

中国频段:1880~1920MHz、2010~2025MHz、2300~2400MHz。

#### 4. 功能对比

GSM 数字移动通信系统是由欧洲主要电信运营者和制造厂家组成的标准化委员会设计出来的,它是在蜂窝系统的基础上发展而成。包括 GSM900MHz、GSM1800MHz 及 GSM1900MHz 等几个频段。GSM 系统有几项重要特点:防盗拷能力佳、网络容量大、号码资源丰富、通话清晰、稳定性强不易受干扰、信息灵敏、通话死角少、手机耗电量低等。

CDMA 是在数字技术的分支——扩频通信技术上发展起来的一种崭新而成熟的无线通信技术。它能够满足市场对移动通信容量和品质的高要求,具有频谱利用率高、话音质量好、保密性强、掉话率低、电磁辐射小、容量大、覆盖广等特点,可以大量减少投资和降低运营成本。

3G 与 2G 的主要区别是在传输声音和数据的速度上的提升,它能够在全球范围内更好地实现无线漫游,并处理图像、音乐、视频流等多种媒体形式,提供包括网页浏览、电话会议、电子商务等多种信息服务,同时也要考虑与已有第二代系统的良好兼容性。为了提供这种服务,无线网络必须能够支持不同的数据传输速度,也就是说在室内、室外和行车的环境中能够分别支持至少 2Mb/s、384kb/s 以及 144kb/s 的传输速度(此数值根据网络环境会发生变化)<sup>[9]</sup>。

模拟移动通信具有很多不足之处,比如容量有限;制式太多、互不兼容、不能提供自动漫游;很难实现保密;通话质量一般;不能提供数据业务等。

第二代数字移动通信克服了模拟移动通信系统的弱点,话音质量、保密性得到很大提高,并可进行省内、省际自动漫游。但由于第二代数字移动通信系统带宽有限,限制了数据业务的应用,也无法实现移动的多媒体业务。同时,由于各国第二代数字移动通信系统标准不统一,因而无法进行全球漫游。比如,采用日本的 PHS 系统的手机用户,只有在日本国内使用,而中国 GSM 手机用户到美国旅行时,手机就无法使用了。而且 2G 的 GSM 的信号覆盖也盲区较多,一般高楼、偏远地方都会信号较差,都是通过加装蜂信

通手机信号放大器来解决的。

第三代移动通信和第一代模拟移动通信和第二代数字移动通信相比,第三代移动通信是覆盖全球的多媒体移动通信。它的主要特点之一是可实现全球漫游,使任意时间、任意地点、任意人之间的交流成为可能。也就是说,每个用户都有一个个人通信号码,带着手机,走到世界任何一个国家,人们都可以找到你,而反过来,你走到世界任何一个地方,都可以很方便地与国内用户或他国用户通信,与在国内通信时毫无分别。能够实现高速数据传输和宽带多媒体服务是第三代移动通信的另一个主要特点。这就是说,用第三代手机除了可以进行普通的寻呼和通话外,还可以上网读报纸、查信息、下载文件和图片;由于带宽的提高,第三代移动通信系统还可以传输图像,提供可视电话业务。

### 4.1.3 应用领域

#### 1. 宽带上网

它是 3G 手机的一项很重要的功能,人们能在手机上收发语音邮件、写博客、聊天、搜索等。不少人以为这些在手机上的功能应用要等到 3G 时代,但实际的无线互联网门户也已经可以提供。尽管 GPRS 的网络速度还不能让人非常满意,但 3G 时代来了,手机变成小计算机就再也不是梦想了。

#### 2. 手机商务

与传统的 OA 系统相比,手机办公摆脱了传统 OA 局限于局域网的桎梏,办公人员可以随时随地访问政府和企业的数据库,进行实时办公和处理业务,极大地提高了办公和执法的效率。

#### 3. 视频通话

3G 时代,传统的语音通话已经是基础功能了,视频通话和语音信箱等新业务才是主流,依靠 3G 网络的高速数据传输,3G 手机用户也可以“面谈”了。当用 3G 手机拨打视频电话时,不再是把手机放在耳边,而是面对手机,再戴上有线耳麦或蓝牙耳麦,你会在手机屏幕上看到对方影像,你自己也会被录制下来并传送给对方。

#### 4. 手机电视

从运营商层面来说,3G 牌照的发放解决了一个很大的技术障碍,TD 和 CMMB 等标准的建设也推动了整个行业的发展。手机流媒体软件会成为 3G 时代使用最多的手机电视软件。

#### 5. 无线搜索

对用户来说,这是比较实用型的移动网络服务,也能让人快速接受。随时随地用手机搜索将会变成更多手机用户一种平常的生活习惯。

## 6. 手机音乐

在无线互联网发展成熟的日本,手机音乐是最为亮丽的一道风景线,通过手机上网下载音乐是计算机的 50 倍。3G 时代,只要在手机上安装一款手机音乐软件,就能通过手机网络,随时随地让手机变身音乐魔盒,轻松收纳无数首歌曲,下载速度更快。

## 7. 手机办公

随着带宽的增加,手机办公越来越受到青睐。手机办公使得办公人员可以随时随地与单位的信息系统保持联系,完成办公功能。这包括移动办公、移动执法、移动商务等。极大地提高了办事和执法的效率。

## 8. 手机购物

不少人都有在淘宝上购物的经历,手机商城对年轻人来说也已经不是什么新鲜事。事实上,移动电子商务是 3G 时代手机上网用户的最爱。高速 3G 可以让手机购物变得更实在,高质量的图片与视频会话能使商家与消费者的距离拉近,提高购物体验,让手机购物变为新潮流。

## 9. 手机游戏

与计算机的网游相比,手机网游的体验并不好,但方便携带,随时可以玩,这种利用了零碎时间的网游是年轻人的新宠,也是 3G 时代的一个重要资本增长点。3G 时代到来之后,游戏平台会更加稳定和快速,兼容性更高,即“更好玩了”,像是升级的版本一样,让用户在游戏的视觉和效果方面感觉更有体验。

## 10. 手机终端

3G 手机是基于移动互联网技术的终端设备,3G 手机完全是通信业和计算机工业相融合的产物,和此前的手机相比差别实在是太大了,因此越来越多的人开始称呼这类新的移动通信产品为“个人通信终端”。

即使是对通信业最外行的人也可从外形上轻易地判断出一台手机是否是“第三代”:第三代手机都有一个超大的彩色显示屏,往往还是触摸式的。3G 手机除了能完成高质量的日常通信外,还能进行多媒体通信。用户可以在 3G 手机的触摸显示屏上直接写字、绘图,并将其传送给另一台手机,而所需时间可能不到 1s。当然,也可以将这些信息传送给一台计算机,或从计算机中下载某些信息;用户可以用 3G 手机直接上网,查看电子邮件或浏览网页;将有不少型号的 3G 手机自带摄像头,这将使用户可以利用手机进行计算机会议,甚至使数字相机成为一种“多余”。

距离国务院常务会议研究同意启动 3G 牌照仅一周,工业与信息化部就迅速向三大运营商发放了 3G 牌照。工业和信息化部宣布,批准中国移动通信集团公司增加基于 TD-SCDMA 技术制式的 3G 业务经营许可,中国电信集团公司增加基于 CDMA2000 技术制式的 3G 业务经营许可,中国联合网络通信集团公司增加基于 WCDMA 技术制式的