

第5章 组网技术

教学提示：移动通信网是指承接移动通信业务的网络，主要完成移动用户之间、移动用户与固定用户之间的信息交换。移动通信组网涉及的技术很多，本章主要讨论其中的网络结构、多址技术、越区切换技术、网络安全技术等内容。

教学要求：通过本章学习，学生应建立一个移动通信网的系统级概念，了解移动通信蜂窝组网的原理和移动通信网络结构。应重点掌握蜂窝组网技术、多址接入技术、越区切换准则与控制策略、网络鉴权与加密等。

5.1 移动通信网概述

5.1.1 移动通信网的基本概念

移动通信网是指承接移动通信业务的网络，主要用来完成移动用户之间以及移动用户与固定用户之间的信息交换，包括收发双方的通话业务、数据业务、传真业务、图像传输和视频通信等业务。要完成覆盖区域内的良好通信，离不开移动通信网的有力支撑。

按照其是否对公众开放，移动通信网可分为公用移动通信网和专用网。其中，公用移动通信网直接向社会公众提供移动通信业务，与公共交换电话网(PSTN)联系紧密，经专门的线路与PSTN连接。而专用网不进入PSTN，或很少与其联系，如公安指挥、交通管理、海关缉私等部门使用的通信网，属于专用移动通信网范畴。

5.1.2 移动通信组网的技术问题

移动通信在追求最大容量的同时，还要追求最大的覆盖，未来的目标是实现全球无缝覆盖，就是说无论用户移动到任何地方，移动通信系统都可以覆盖到。为了实现移动用户在大范围内有序的通信，使网络正常运行，移动通信组网过程中必须解决如下技术问题。

- (1) 频谱资源有限，如何实现共享的问题。
- (2) 蜂窝网中同频复用与同道干扰问题。
- (3) 多址接入问题。
- (4) 移动用户的越区切换和管理问题。
- (5) 网络互联和网络结构问题。
- (6) 信息安全问题。

5.1.3 移动通信网的组成

移动通信网一般由空中网络和地面网络两部分组成。

空中网络是移动通信网的主要组成部分，主要负责以下工作。

- (1) 多址接入：在频率资源有限条件下，采用不同的多址接入方式会获得不同的系统

容量。

(2) 频率复用和蜂窝小区：频率复用和蜂窝小区可以解决资源频率受限的问题，采用蜂窝组网的方式，能够大幅度增加系统容量。

(3) 切换和位置更新：为了保证通话的连续性，当正在通话的移动台进入相邻无线小区时，移动通信系统必须具备越区切换功能。不同多址接入方式采用的切换技术也不尽相同。另外，由于移动用户要在移动网络中任意移动，网络为了有效管理用户需要在任意时刻联系到用户。

地面网络部分主要包括如下内容。

(1) 服务区内各基站的相互连接。

(2) 基站与固定网络(PSTN、ISDN、数据网等)的连接。

图 5-1 描述了移动通信系统的基本网络组成。其中包括 MS(移动台子系统)、BSS(基站子系统)、NSS(网络子系统)、OSS(操作支持子系统)等，各子系统的功能将在 5.2 节中进行详细介绍。

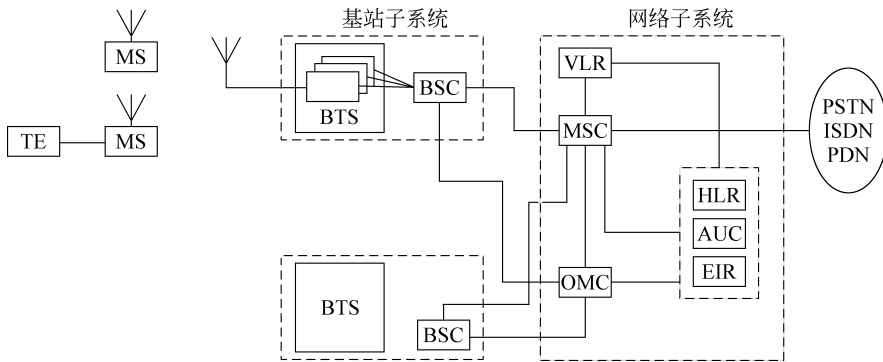


图 5-1 移动通信系统的基本网络组成

5.2 网络结构

5.2.1 基本网络结构

移动通信的基本网络结构如图 5-2 所示。基站通过传输链路与交换机相连，交换机再与固定电信网络或其他通信网相连，所以移动通信有以下 2 种通信链路。

(1) 移动用户 ↔ 基站 ↔ 交换机 ↔ 其他网络 ↔ 其他用户。

(2) 移动用户 ↔ 基站 ↔ 交换机 ↔ 基站 ↔ 移动用户。

基站与交换机之间、交换机与网络之间传输的数字信号形式通常为 PCM 多路时分复用信号。可以通过有线链路(如光纤、同轴电缆、双绞线等)或无线链路(如微波链路等)传输信号。

通常每个基站能够同时支持 50 路语音呼叫，每个交换机可支持近 100 个基站，交换机到固定网络之间需要 5000 个话路的传输容量。

移动通信网中的交换机称为移动交换中心(MSC)。MSC 除了要完成常规交换机的所有功能外，还要负责移动性管理和无线资源管理(包括越区切换、漫游、用户位置登记管理等)。

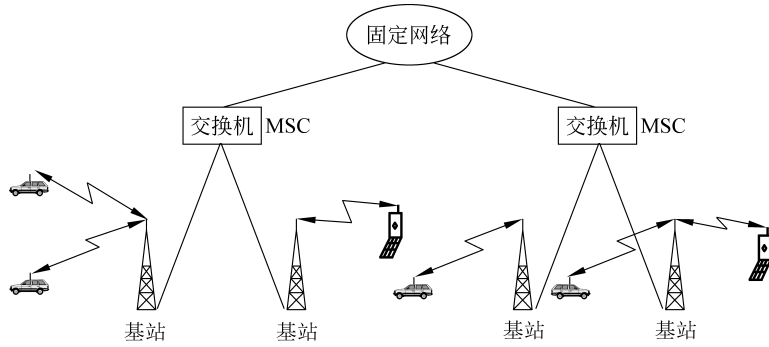


图 5-2 移动通信的基本网络结构

为便于网络组织和管理,蜂窝移动通信网中通常将一个移动通信网分为若干服务区,每个服务区继续划分为若干 MSC 区,每个 MSC 区又分为若干位置区,每个位置区由若干基站小区组成。一个移动通信网由多少个服务区或多少个 MSC 区组成,取决于移动通信网所覆盖地域的用户密度和地形地貌。当网络中存在多个服务区时,每个 MSC 要与本地的市话汇接局、本地长途电话交换中心相连。MSC 之间需互联互通才能构成一个功能完善的移动通信网络。

5.2.2 数字蜂窝移动通信网的网络结构

在模拟蜂窝移动通信系统中,移动性管理和用户鉴权及认证都包括在 MSC 中。在数字移动通信系统中,将移动性管理、用户鉴权及认证从 MSC 中分离出来,设置归属位置寄存器(HLR)和漫游位置寄存器(VLR)来进行移动性管理。图 5-3 为全球移动通信系统(GSM)网络结构图。

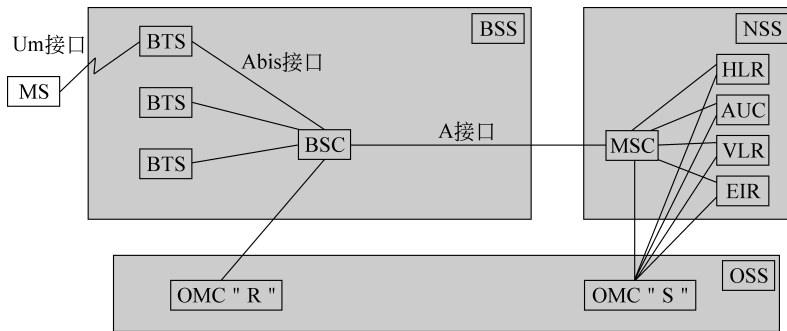


图 5-3 全球移动通信系统网络结构图

图中各子系统及主要模块功能和作用如下。

(1) 移动台子系统 (MS): MS 是移动系统的用户设备,由移动终端和客户识别卡 (SIM)两部分组成。由移动终端完成话音编/解码、信道编/解码、信息加密/解密、信息的调制/解调、信息发射/接收等功能。SIM 卡用于保存认证客户身份所需的所有信息,并执行一些与安全保密相关的功能,以防止非法客户入侵网络。SIM 卡还存储与网络和客户有关的管理数据,只有插入 SIM 卡后移动终端才能够接入网络。

(2) 基站子系统(BSS): 基站子系统提供公用陆地移动网(PLMN)的有线核心网和无线接入网之间的中继连接。可分为两部分: 一是通过无线接口与移动台通信的基站收发信台(BTS), 它完全由 BSC 控制, 主要负责无线传输, 完成无线与有线的转换、无线分集、无线信道加密、跳频等功能。二是与移动交换中心相连的基站控制器(BSC), 它具有对一个或多个 BTS 进行控制的功能, 主要负责无线网络资源的管理、小区配置数据管理、功率控制、定位和切换等, 属于强业务控制点。

(3) 网络子系统(NSS): 包括移动交换中心(MSC)、漫游位置寄存器(VLR)、归属位置寄存器(HLR)、鉴权中心(AUC)、设备标识寄存器(EIR)、短消息中心(SC)。

其中, MSC 为移动交换中心, 是无线电系统与公众电话交换网之间的接口设备, 为了建立与移动台的往来呼叫, 它需要完成全部必需的信令功能。MSC 主要负责路由选择、计费 and 费率管理、业务量管理以及向 HLR 发送有关业务量信息和计费信息。

HLR 为归属位置寄存器, 负责移动台数据库管理。主要负责计费管理、已登记的移动台中所有用户参数的管理和修改、对 VLR 的更新。

VLR 为漫游位置寄存器, 是动态数据库。主要负责移动台漫游号管理; 临时移动台标识管理; 访问的移动台用户管理; HLR 的更新; MSC 区、位置区及基站区的管理; 无线信道(如信道分配表、动态信道分配管理、信道阻塞状态)的管理。

AUC 为鉴权中心, 用于产生为确定移动客户的身份和对呼叫保密所需鉴权及加密的三元组(随机号码 RAND, 符合响应 SRES, 密钥 Kc)。

EIR 为设备标识寄存器, 也是一个数据库, 存储有关移动台设备参数。主要完成对移动设备的识别监视、闭锁等功能, 可以防止非法移动台的使用。

(4) 操作支持子系统 OSS: 操作支持子系统对 BSS 和 NSS 进行操作与维护管理, 主要设备是操作与维护中心(OMC)。OSS 的功能实体有网络管理中心(NMC)、安全性管理中心(SEMC)、用于用户识别卡管理的个人化中心(PCS)、用于集中计费管理的数据后处理系统(DPPS)、管理无线设备的 OMC-R、管理交换设备的 OMC-S 等。

移动通信网络接口及用途见表 5-1。包括以下几种。

表 5-1 移动通信网络接口及用途

接口名	定 位	用 途	接口名	定 位	用 途
Um	MS-BTS	无线接口	E	MSC-SM-GMSC	短消息传输
Abis	BTS-BSC	多种		MSC-MSC	切换
A	BSC-MSC	多种	G	VLR-HLR	用户信息管理
C	GMSC-HLR	主叫 HLR 寻址	F	MSC-EIR	手机身份验证
	SM-GMSC-HLR	主叫短消息寻址	B	MSC-VLR	多种
D	VLR-HLR	本地和用户信息管理	H	HLR-AUC	鉴权数据交换

(1) 移动通信系统的外部接口: 包括用户侧的接口、移动通信系统与其他电信网间的接口以及移动通信系统与运营者的接口。

(2) 移动交换子系统 MSS 内部接口: 包括用于连接移动交换子系统中各功能模块的 B、C、D、E、F、G 接口。具体连接及用途见表 5-1。

(3) 移动接入子系统内部接口：移动台与基站之间的接口(Um 接口)是移动台与基站收发信机之间的无线接口,是移动通信网的主要接口;基站控制器(BSC)与基站收发信台(BTS)之间的接口(Abis 接口);基站与移动交换中心之间的 A 接口。A 接口是网络中的重要接口,传递基站管理、呼叫处理与移动特性管理等信息,连接系统的基站和移动交换中心。

5.2.3 第三代移动通信网的网络结构

早期的移动通信系统主要以提供语音业务为主,仅能提供 100~200kbps 的数据业务,GSM 最高速率可达 384kbps。随着移动通信的日益普及,人们不仅需要话音业务,还需要数据、图像和视频业务。应此要求发展起来的第三代移动通信的业务能力比第二代有明显的改进,它能支持话音分组数据及多媒体业务,将无线通信与 Internet 等多媒体通信结合。能够处理图像、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。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率,在室内、室外和行车的环境中能够分别支持至少 2Mbps、384kbps 以及 144kbps 的传输速率。第三代移动通信标准 IMT-2000 给出的网络结构图如图 5-4 所示,它主要由四个功能子系统构成,即由核心网(CN)、无线接入网(RAN)、移动台(MT)和用户识别模块(UIM)组成。分别对应于 GSM 系统的交换子系统(SSS)、基站子系统(BSS)、移动台(MS)和 SIM 卡。

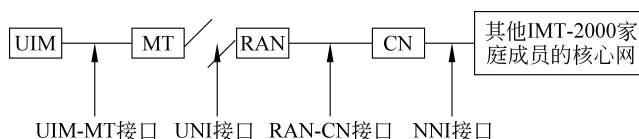


图 5-4 IMT-2000 给出的网络结构图

在标准 IMT-2000 中,ITU 定义了 4 个标准接口。

(1) 网络与网络接口(NNI): 由于 ITU 在网络部分采用了“家族概念”,因而此接口是指不同家族成员之间的标准接口,是保证互通和漫游的关键接口。

(2) 无线接入网与核心网之间的接口(RAN-CN),对应于 GSM 系统的 A 接口。

(3) 无线接口(UNI)。

(4) 用户识别模块和移动台之间的接口(UIM-MT)。

为了更好地管理各个用户的业务,第三代移动通信系统的结构分为物理层、链路层和高层。各层的主要功能描述如下。

物理层由一系列下行物理信道和上行物理信道组成。

链路层由媒体接入控制(MAC)子层和链路接入控制(LAC)子层组成;其中,MAC 子层根据 LAC 子层不同业务实体的要求来管理与控制物理层资源,并负责提供 LAC 子层业务实体所需的 QoS(服务质量)级别。LAC 子层负责提供 MAC 子层所不能提供的更高级别的 QoS 控制,这种控制可以通过 ARQ 等方式来实现,以满足来自更高层业务实体的传输可靠性。

高层集 OSI 模型中的网络层、传输层、会话层、表示层和应用层为一体。高层实体主要负责各种业务的呼叫信令处理、语音业务和数据业务的控制与处理。

5.2.4 4G 移动通信网的网络结构

4G 是第四代移动通信技术,相较于 3G 通信技术来说,它将 WLAN 技术和 3G 通信技术进行了很好的结合,能够快速传输数据、图像、高质量的音视频等。4G 通信技术让用户的上网速度可高达 100Mbps 以上,几乎能够满足所有用户对于无线服务的要求。

4G LTE 的网络架构分为 EPC 和 E-UTRAN 两部分,其网络结构如图 5-5 所示。

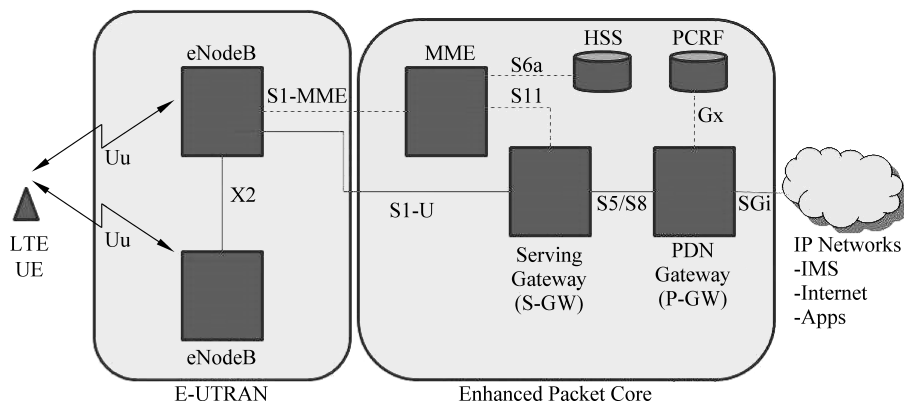


图 5-5 4G LTE 网络架构

EPC 定义了一个分组核心网,主要包括 MME、SGW、PGW、PCRF 和 HSS 等网元。其中,移动管理模块(MME)用于实现用户移动性管理、会话管理、接入鉴权等功能;服务网关(SGW)位于用户面,服务于接入 LTE 的用户终端(UE),完成用户和承载的计费;分组数据网关(PGW)位于用户面,主要负责连接外网,起到网关的作用;策略与计费控制单元(PCRF)完成对用户请求的业务授权,获取计费系统信息,反馈网络堵塞的情况等;归属用户服务器(HSS),用于存储用户识别标识、相关编号和路由信息,存储用户当前的位置信息,存储用户鉴权和授权的网络接入控制信息等。

E-UTRAN 是无线接入网部分。在 4G LTE 中 E-UTRAN 的实体就是 eNodeB,它不仅具有基站的功能,还有无线网络控制器的部分功能,使得 4G 网络更加简化,减少了通信协议的层次。

4G LTE 网络具有以下特点。

- (1) 从网络结构上看,4G 网络更扁平化,将控制功能与承载相分离。
- (2) 4G 网络采用全 IP 的网络结构,可实现固网和移动网融合。
- (3) 4G 无线接入网中的 eNodeB 和网关兼具无线网络控制器(RNC)的功能,无线网络中直接用 eNodeB 接入 EPC,使得整体结构更简化,并能降低时延。
- (4) 网元接口方面,合理采用 S1-Flex 和 X2 接口,实现多对多的连接方式。S1-Flex 是从 eNodeB 到 EPC 的动态接口,用于实现负载均衡、提高网络冗余性;X2 主要用于用户移动性管理,负责连接相邻的多个 eNodeB。
- (5) 传输速率方面,4G 较 3G 网速大幅提升,能达到 100Mbps 的下行速度。

5.2.5 5G 移动通信网的网络结构

5G 有两种组网模式：SA 和 NSA。SA 组网模式即独立组网，需要新建全套 5G 基础设施，NSA 组网模式即非独立组网，会利用部分 4G 基础设施。

5G 网络架构与 4G 类似，分为接入网和核心网，5G 网络架构如图 5-6 所示。

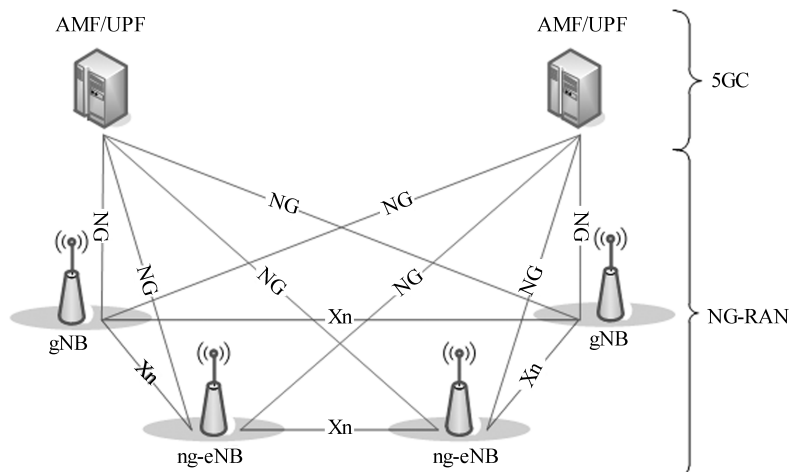


图 5-6 5G 网络架构图

5G 核心网(5GC)由接入和移动管理功能(AMF)、用户面管理功能(UPF)和会话管理功能(SMF)组成。其中,AMF 负责提供用户设备接入身份验证、授权、移动管理控制及 SMF 的选择;UPF 负责提供基于用户面的业务处理功能,如数据分组路由、转发、监测等;SMF 主要负责会话管理的相关工作,如 IP 地址分配、选择和控制用户界面、配置 UPF 的 QoS 策略等。

5G 核心网是在 4G 核心网 EPC 的基础上建立的,它主要有 3 方面的改进。

- (1) 基于服务的架构。
- (2) 支持网络切片。
- (3) 控制面和用户面分离。

5G 接入网称为 NG-RAN(NR),由 gNB(5G 基站)和 ng-eNB(下一代 4G 基站)组成,支持 5G 和 4G 之间的无线网络紧密互通。gNB/ng-eNB 主要功能包括小区间无线资源管理、无线承载控制、无线接入控制、测量配置与实现、动态资源分配等。

5.3 蜂窝技术

蜂窝是解决频率资源不足和用户容量不断增加问题的一项重大技术。它不需要做技术上的重大修改,就能在有限的频谱上为更多的用户服务。它是一个系统级的概念,其基本思想是用许多小功率的发射机来代替单个的大功率发射机,每一个小的覆盖区只提供服务范围内的一小部分覆盖。具体做法是将可用信道分组,分别分配给相邻的不同基站,所有的可用信道被分配给相对较小数目的相邻基站。相邻的基站要分配不同的信道

组,以保证基站之间及在它们控制之下的用户之间的干扰最小。只要基站之间的同频干扰足够低,就可以尽可能地进行频率复用,使可用信道可以在整个系统的地理区域内分配。随着服务需求的增长,可以通过增加基站的数目来提供额外的容量,而不会增加额外的频率。

5.3.1 蜂窝小区的概念

一般来说,移动通信网的区域覆盖方式可以分为两类:一是小容量的大区制;二是大容量的小区制。大区制主要用于专网或用户较少的地域。具有天线架设高、发射机输出功率大、服务区内所有频道都不能重复、覆盖半径为 30~50km 的特点。其优点是组成简单、投资少、见效快;缺点是其服务区内的所有频道(一个频道包含收、发一对频率)的频率都不能重复,频率利用率和通信容量都受到了限制。小区制则是利用频率复用的概念把整个服务区域划分为若干无线小区,每个小区分别设置一个基站。覆盖半径为 2~20km,发射机输出功率在 5~20W 即可。其优点是频率利用率高、组网灵活;缺点是网络构成复杂。

小区制中按服务区形状不同可以分为条状服务区、面状服务区。条状服务区主要用于覆盖公路、铁路、沿海水域等条状区域,如图 5-7 所示。

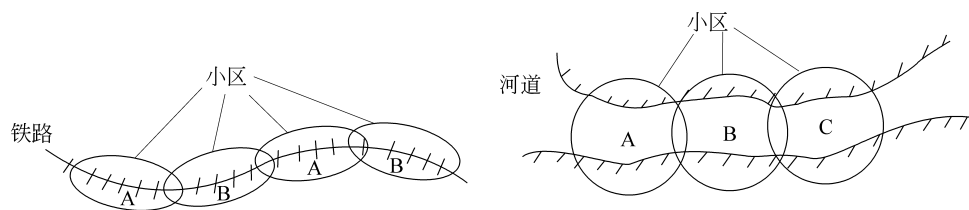


图 5-7 条状服务区

面状服务区中,通过各小区的交叠组合可以实现一个平面的覆盖。按交叠区的中心线所围成的面积形状不同可分为正三角形、正方形和正六边形三种,分别称为正三角形区域、正四边形区域和正六边形区域。可以证明,只有这 3 种正多边形可以无空隙、无重叠地覆盖一个平面区域,如图 5-8 所示。

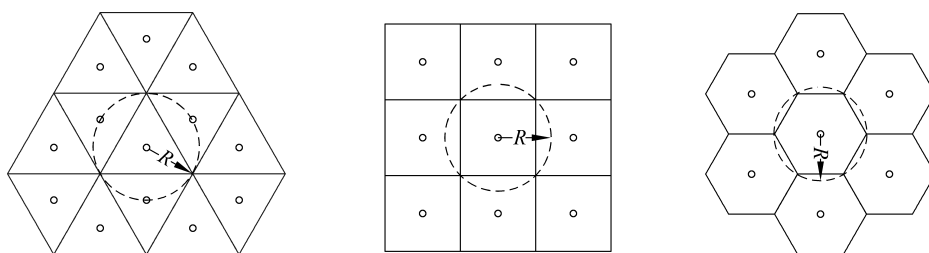


图 5-8 面状服务区

通过表 5-2 对这 3 种图形进行比较可知,正六边形小区具有中心距离最大、覆盖面积最大、重叠区面积最小的特点。也就是说,对于同样大小的服务区域,采用正六边形构成小区所需的小区数最少,因此所需的频率组数也最少,所以用正六边形组网是最经济的方式。

表 5-2 三种形状服务区的比较

单个区域形状	相邻区域中心距离	单个区域面积	交叠部分面积	交叠区宽度
正三角形	R	$\frac{3\sqrt{3}}{4}R^2$	$\left(2\pi - \frac{3\sqrt{3}}{2}\right)R^2$	R
正四边形	$\sqrt{2}R$	$2R^2$	$(2\pi - 4)R^2$	$(2 - \sqrt{2})R$
正六边形	$\sqrt{3}R$	$\frac{3\sqrt{3}}{2}R^2$	$(2\pi - 3\sqrt{3})R^2$	$(2 - \sqrt{3})R$

这种规则的小区图形仅具有理论分析和设计意义,实际中的基站天线覆盖区不可能是规则的正六边形。由许多正六边形小区作为几何图形覆盖整个服务区所构成的形状类似蜂窝的移动通信网称为小区制蜂窝移动通信网或蜂窝网。

在蜂窝移动通信网中,基站对小区的覆盖方式可以采用中心激励方式或顶点激励方式,如图 5-9 所示。中心激励方式中基地站在小区的**中心**,由全向天线覆盖无线小区。顶点激励方式中在每个正六边形不相邻的三个顶点上设置基站,并采用定向天线形成覆盖区。

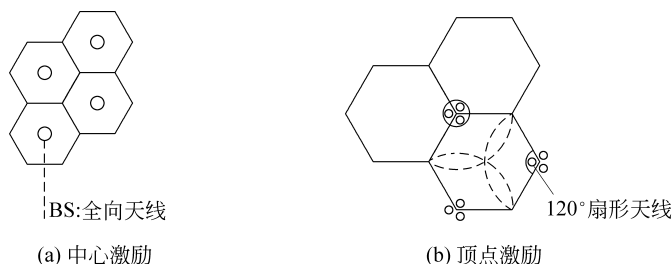


图 5-9 蜂窝移动通信网激励方式

5.3.2 频率复用

蜂窝移动通信系统依赖于整个覆盖区域内信道的智能分配和复用。通过将覆盖范围限制在小区边界范围内,相同的信道组就可以覆盖不同的小区,只要这些小区两两相隔的距离足够远,使得相互间的干扰水平在可接受的范围之内即可。为整个系统中的所有基站选择和分配信道组的设计过程叫频率复用或频率规划。频率复用意味着在一个给定的覆盖区域内,存在着许多使用同一组频率的小区,这些小区叫作同频小区,这些小区之间的信号干扰叫作同频干扰。

同频干扰不能简单地通过增大发射机的发射功率来克服,因为增大发射功率会增大对相邻同频小区的干扰。为了减小同频干扰,同频小区必须在物理上隔开一个最小的距离,为同频信号传播提供充分的隔离。

为避免相互干扰,相邻小区显然不能使用相同的信道。同时,为了保证同信道小区之间有足够的距离,附近的若干小区都不能用相同的信道。这些不同信道的小区组成一个区群,只有不同区群的小区才能进行信道再用。也就是说,共同使用全部可用频率的 N 个小区叫作一个区群(簇)。

区群组成要求:无空隙地覆盖全部服务区;相邻同信道小区距离相等,则同道再用距离最大。

可以证明,满足以上 2 条要求的区群大小 N 的表达式为

$$N = i^2 + ij + j^2 \quad (5-1)$$

式(5-1)中, i, j 为正整数,由此可算出 N 的可能取值。典型值有 3、4、7、9、12...

相应的区群形状如图 5-10 所示。

确定同频小区位置时,只需沿着任意一条六边形边的垂线方向移动 j 个小区,并逆时针方向旋转 60° ,再移动 i 个小区,图 5-11 为 $N=19(j=3, i=2)$ 的同频小区示意图。

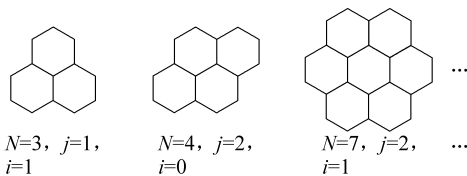


图 5-10 区群形状

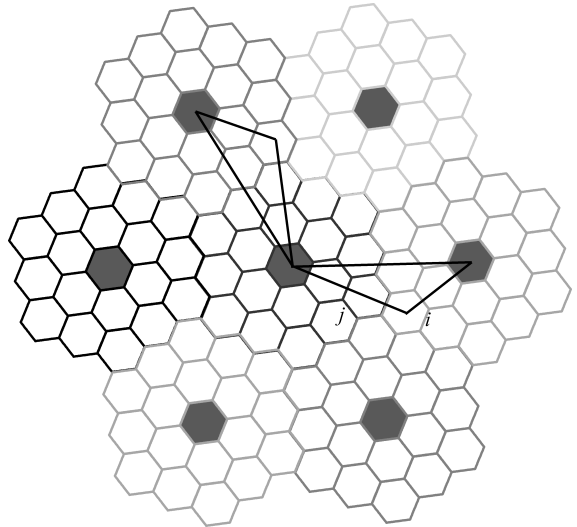


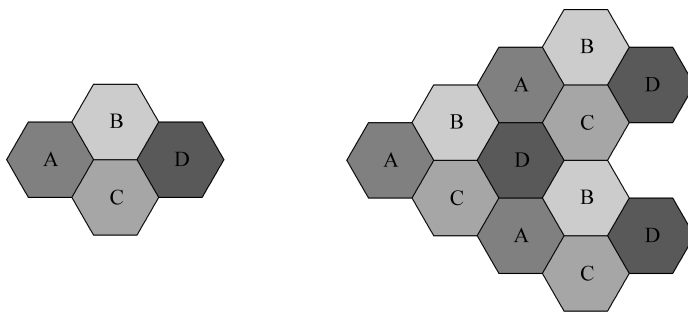
图 5-11 同频小区 ($j=3, i=2, N=19$)

【例 5-1】 画一个 $N=4$ 的蜂窝系统结构,要求至少包括 3 个区群,将区群中小区所用频率组用 A、B、C、D 标识。

解:

- (1) $N=4$ 对应的二维坐标: $j=2, i=0$ 。
- (2) $N=4$ 的基本区群形状如图 5-12(a) 所示。
- (3) 确定相邻区群。

所求蜂窝系统结构如图 5-12 所示。



(a) $N=4$ 的基本区群

(b) 3 个基本区群组成的蜂窝系统

图 5-12 例 5-1 用图