

Contents

1	概论	2
1.1	移动通信特点	2
1.1.1	什么是移动通信?	2
1.1.2	移动通信特点	2
1.2	常用移动通信系统	3
1.3	移动通信系统发展	3
1.3.1	各代通信系统特点	3
1.4	移动通信基本技术	4
1.5	蜂窝移动通信的组网技术	5
1.5.1	多址接入	5
1.5.2	工作方式	6
1.5.3	频率复用和蜂窝小区	7
1.5.4	多信道共用技术	9
1.5.5	网络结构	11
1.5.6	网络的控制与管理	12
2	移动信道的传播特性于模型	15
2.1	无线电波传播方式	15
2.1.1	直射波	15
2.1.2	反射波	15
2.1.3	绕射波	15

Chapter 1

概论

1.1 移动通信特点

1.1.1 什么是移动通信？

定义：移动通信就是通信双方至少有一方是处于运动中进行信息交换的通信方式。其移动性包括：

- 终端的移动性，特定的“终端号码（如手机串号，*#06#）”；手机，车载台
- 个人的移动性，特定的”个人号码，SIM 卡号”。

1.1.2 移动通信特点

1. 移动通信必须利用无线电波进行信息传输。
 - (a) 弥散损耗（自由传播损耗），随着传播距离的增加而损耗。
 - (b) 阴影效应，受到地形、地物的遮蔽而发生。
 - (c) 多径效应，信号经过多点反射，会从多条路径到达接受地点，这种多径信号的**幅度、相位和到达时间**都不一样，它们会叠加而产生“多径效应”。
 - (d) 多普勒-效应
2. 移动通信是在复杂的干扰环境中运行的。
 - (a) 外部干扰。天电干扰、工业干扰和信道噪声
 - (b) 系统间干扰。
 - i. 邻道干扰
 - ii. 互调干扰（当两个或多个干扰信号同时加到接收机时，**由于非线性**的作用，这两个干扰的组合频率有时会恰好等于或接近有用信号频率而顺利通过接收机，这种干扰就称为互调干扰，其中三阶互调最严重。）
 - iii. 同频道干扰（蜂窝移动通信）
 - iv. 多址干扰（多址干扰是指同 **CDMA** 系统中多个用户的信号在时域和频域上是混叠的。因为 **CDMA** 系统为码分多址，CDMA 系统采用的是不同的地址码来区分每个用户，但多个用户的信号在时域和频域上是混叠的，所以在频域在产生一定的同频和邻频干扰，则为多址干扰。）
 - v. 远近效应
 - (c) 抗干扰技术。扩频技术、信道编码与交织技术、信道均衡技术、分集技术、信道估计技术、信号检测技术和智能天线技术
3. 移动通信业务量的需求与日俱增，而频率资源非常有限。
4. 移动通信系统的网络结构多种多样，网络管理和控制必须有效。
5. 移动通信设备必须适于在移动环境中满足多种应用要求。

1.2 常用移动通信系统

1. 蜂窝移动通信系统
2. 公共陆地移动通信网络 (PLMN)
3. 无线市话系统 (WUTS)
4. 集群系统 (专网)→ 公安系统、水利系统、交通系统、电力系统、铁路系统。
5. 卫星移动通信系统。
6. 无线局域网。

1.3 移动通信系统发展

1.3.1 各代通信系统特点

第一代 模拟，仅限语音，仅限宏小区

第二代 数字，语音和数据通信，宏/微小区

第三代 频谱利用率高，传输速率按需分配

第四代 更高的数据速率和更大的系统容量，正交频分复用 (OFDM) 技术、

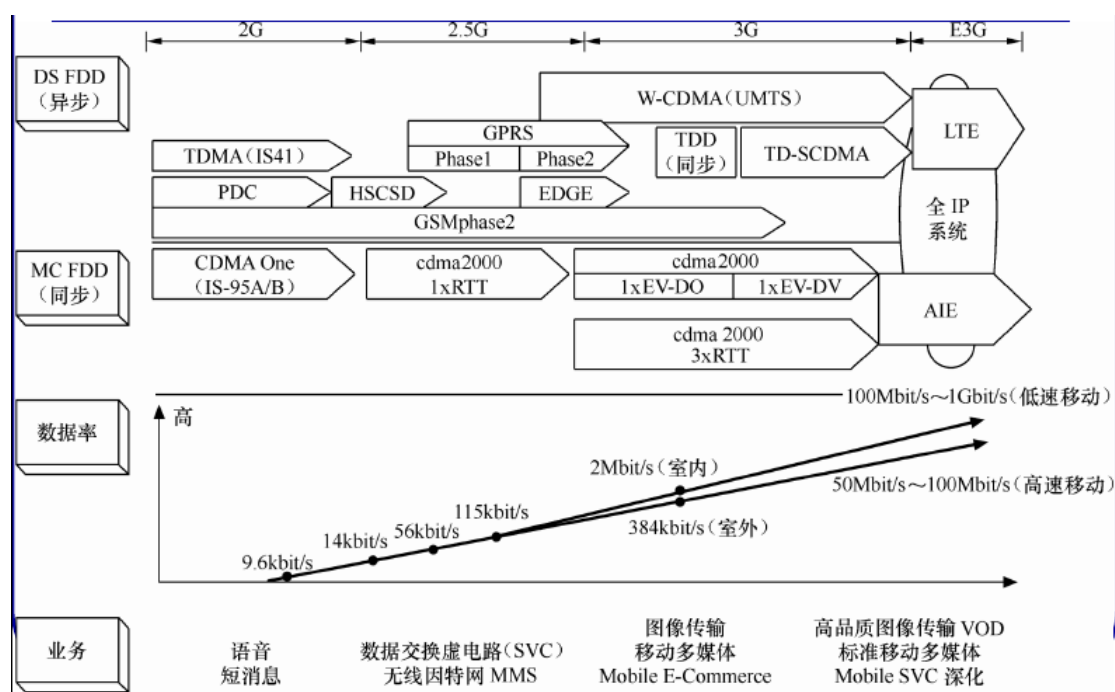


Figure 1.1: 移动通信系统发展

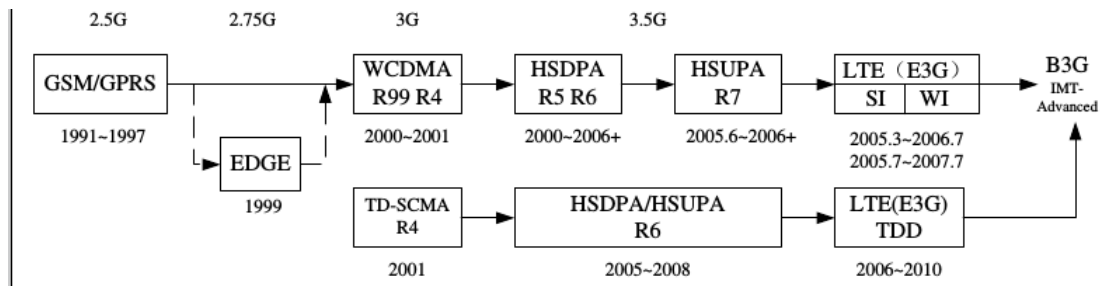


Figure 1.2: WCDMA&TD-SCDMA 发展

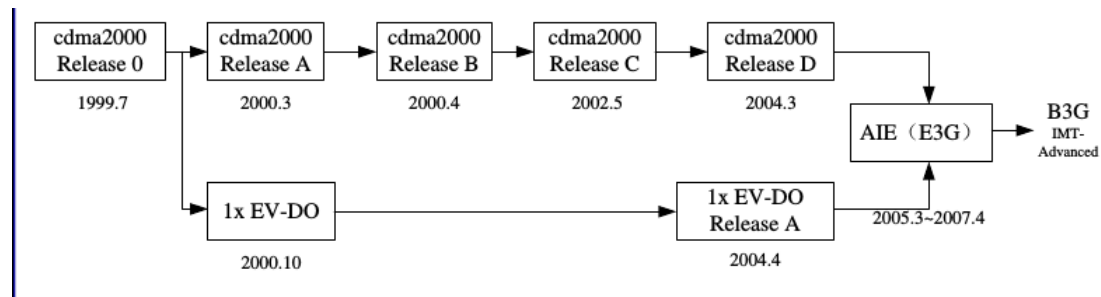


Figure 1.3: CDMA2000 发展

1.4 移动通信基本技术

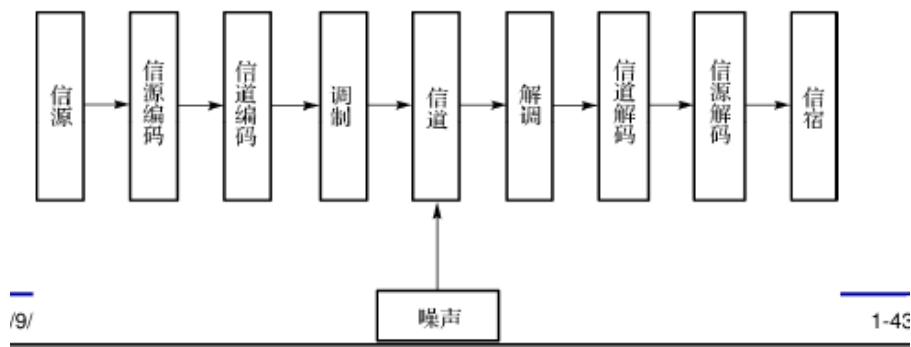


Figure 1.4: 信号传输过程

信源编码技术 以提高通信有效性为目的而对信源符号进行的变换。

1. 波形编码
2. 参数编码
3. 混合编码

信道编码技术 为了减少差错, 信道编码器对传输的信息码元按一定的规则加入保护成分 (监督元), 组成所谓“抗干扰编码”; 提高通信系统抗干扰能力, 实现可靠通信。
分组码、卷积码。

调制技术 使要传输的信息适合于信道特征, 达到有效、可靠的传输。
连续相位调制, 线性调制, PSK, QPSK, DQPSK, QAM 等。

电波传播特性的研究 总结和建立有普遍性的数学模型, 利用这些模型, 可以估算一些传播环境中的传播损耗和其它有关的传播参数。

1.5 蜂窝移动通信的组网技术

1.5.1 多址接入

1.5.1.1 什么是多址接入？

定义：移动通信系统中，使所有的用户共享有限的无线资源，实现不同用户不同地点同时通信，并尽可能减少干扰。

1.5.1.2 多路复用和多址接入区别

相同点：两者的理论基础都是信号的正交分割原理。

不同点：

- ”点对点“，多路复用
- ”点多多点”，多址接入

1.5.1.3 多址接入分类

1. 频分多址：第一代移动通信系统；TACS、AMPS。

特点：

- 一个频道传送一路电话，一旦给用户分配频道，移动台和基站同时连续不断发射
- 信道带宽较窄。
- 传输速率低，码元持续时间长，与平均延迟扩展相比很大，**码间干扰不需要均衡**
- 系统简单，但需要一个双工器，同时需要一个 RF（射频）滤波器。

展造成的符号间干扰低。

2. 时分多址：第二代移动通信系统：GSM。

特点：

- 多个用户共享一个载波频率，分享不同时隙。
- 分组可以实现不连续发送。
- **由于速率较高，往往需要均衡器。**
- 需要额外开销，如保护时隙，**同步**时隙等。
- 按照不同用户提供不同的带宽。

3. 码分多址：第三代移动通信系统：IS-95 CDMA、WCDMA。

特点：

- 通过不同的码序列来划分物理信道，信道在时间和频率上重合
- 码不但可以区分信道 (walsh 和 OVSF)，还可以区分基站 (gold) 或用户 (m 序列)
- CDMA 系统的许多用户共享同一频率
- 由于信号被扩展在一较宽频谱上，所以可**减小多径衰落**；
- 在 CDMA 系统中，信道数据速率很高，采用分集接收最大比合并技术，可获得最佳的抗多径衰落效果；
- 软切换和有效的宏分集
- 低信号功率谱密度

存在两个重要问题：

- (a) 多址干扰
- (b) 远近效应。

4. 空分多址。特点：

- 实现空间分割的基本技术就是**自适应阵列天线**，在不同的用户方向上形成不同的波束。
- 有效地克服**多径干扰和同频道干扰**

5. OFDMA. 正交频分多址接入

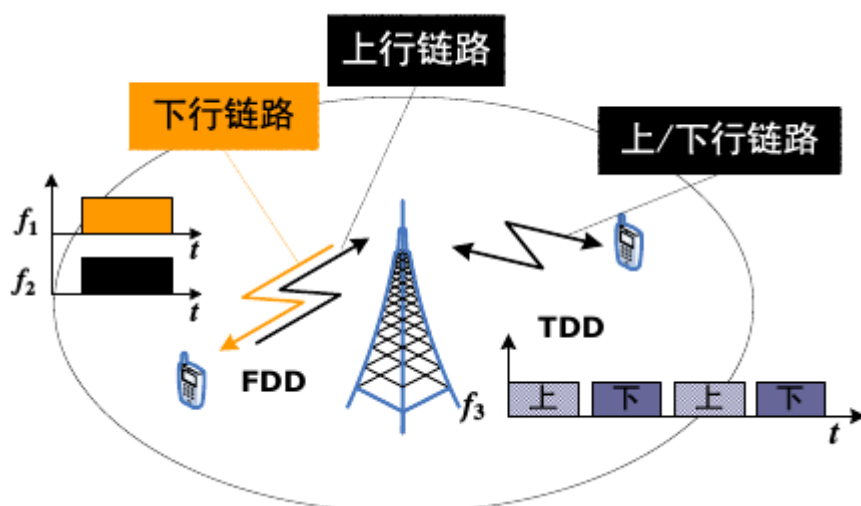
6. NOMA, 非正交频分多址接入

1.5.2 工作方式

1. 单工：：通信双方电台交替地进行收信和发信。**对讲机**。
2. 半双工：是指通信双方中，一方使用双频双工方式，即收发信机同时工作；另一方使用双频单工方式，即收发信机交替工作。**基站-手机**。基站处于全双工，手机处于半双工。
3. 全双工：是指通信双方收发信机均同时工作。收信和发信必须采用不同的工作频率，**打电话**
双工模式：
 - (a) 频分双工 FDD：通信双方收发信可同时进行，但收信和发信分别占用两个不同的频率。
 - (b) 时分双工 TDD：使用相同频率，但不同的时隙进行区分。

两种模式的区别：

- TDD 可灵活配置频率，使用 **FDD 系统不易使用的零散频段**；但为避免与其他无线系统之间的干扰，TDD 需预留较大的保护带，影响整体频谱利用效率。
- TDD 可以通过调整上下行时隙转换点，改变上下行时隙比例，可**很好地支持非对称业务**。TDD 系统**收发信道同频**，无法进行干扰隔离，速度越快，衰落变换频率越高，衰落深度越深；相当于混合行驶，容易撞车，因此必须要求**移动速度不能太高**。
- TDD 接收上/下行数据时，不需收发隔离器，只需一个开关即可，降低设备的复
- 由于 TDD 方式的时间资源分别分给了上行和下行，因此 **TDD 方式的发射时间大约只有 FDD 的一半**，如果 TDD 要发送和 FDD 同样多的数据，就要**增大 TDD 的发送功率**
- TDD 系统上行受限，因此 TDD 基站的**覆盖范围明显小于 FDD 基站**。
- FDD 模式的特点是在分离（上下行频率间隔 45MHz 190MHz 等）的两个对称频率信道上，系统进行接收和传送，用保护频段来分离接收和传送信道。相当于分道行驶，比较顺畅，所以 **FDD 速度会更快**。



1.5.3 频率复用和蜂窝小区

1.5.3.1 移动通信网的区域覆盖方式

1. 小容量的大区制 (发射功率大), 基站发射功率要大, 利用分集接收等技术来保证上行链路的通信质量。
2. 大容量的小区制, (频率复用), 同频干扰问题

1.5.3.2 区群

要想正多边形无空隙、无重叠地覆盖一个平面的区域，只有正三角形、正方形和正六边形三种形状

小区形状	正三角形	正方形	正六边形
邻区距离	r	r	r
小区面积	$1.3r^2$	$2r^2$	$2.6r^2$
交叠区宽度	r^2	$0.59r^2$	$0.27r^2$
交叠区面积	$1.2\pi r^2$	$0.73\pi r^2$	$0.35\pi r^2$

定义: 共同使用全部可用频率的 N 个小区组成一个区群。

特点:

1. 同一个小区，使用不同的频率。
2. 不同小区，可以使用相对应的频率。

组成区群的小区数对应的公式:

$$N = i^2 + ij + j^2 \quad (1.1)$$

一个共有 S 个信道的蜂窝系统 (一个区群), 每簇含有 N 个小区 (一个区群), 每个小区含有 K 个信道。则:

$$S = KN \quad (1.2)$$

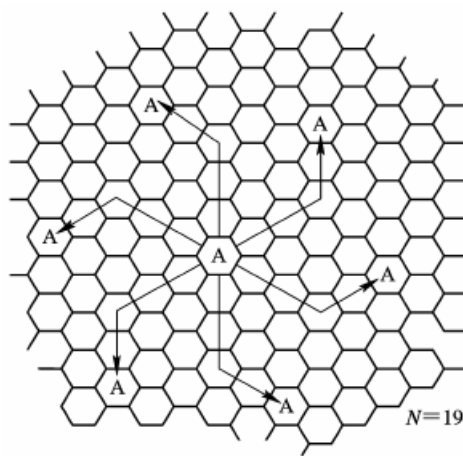
将这个簇重复 M 次, 则信道总数为 C :

$$C = MS = MKN \quad (1.3)$$

1.5.3.3 同频道距离

STEPS:

1. 首先垂直六边形的任一边延长 $Max\{i, j\}$ 个小区。
2. 逆时针旋转 60° ，在延长 $Min\{i, j\}$ 个小区。



$$i = 3, \quad j = 2$$
$$N = 19$$

Figure 1.5: 通频道距离确定

$$\begin{aligned}
D^2 &= I^2 + J^2 - 2IJ \cos 120^\circ \\
H &= \frac{\sqrt{3}}{2}R \\
I &= \sqrt{3}iR, J = \sqrt{3}jR \\
\Rightarrow D &= \sqrt{3N}R, \text{其中 } N = i^2 + ij + j^2
\end{aligned} \tag{1.4}$$

1.5.3.4 同频干扰

移动台的接收载波干扰比为:

$$\begin{aligned}
\frac{C}{I} &= \frac{C}{\sum_{i=1}^L I_i} \\
\frac{C}{I} &= \frac{(D/R)^n}{L} = \frac{\sqrt{3N}^n}{L}
\end{aligned} \tag{1.5}$$

其中, L 为同频干扰小区数, 由于一般是第一层起主要作用, 所以 L=6 (因为采用的是正六边形), 则公式可改写为:

$$\frac{C}{I} = \frac{(D/R)^n}{L} = \frac{\sqrt{3N}^n}{6} \tag{1.6}$$

n 常取 4, 用 Q 表示同频复用比例 $Q = \frac{D}{R}$ 。注意: $\frac{C}{I}$ 带入计算时要去分贝化。

1.5.3.5 蜂窝系统容量

通常衡量系统容量的指标是每小区的可用信道数来度量:

$$n = \frac{B_t}{B_c N} \tag{1.7}$$

- B_t 系统总带宽
- B_c 单个小区占用的信道带宽
- N 频率复用因子, 利用1.5载干比来计算

$$N = \sqrt{\frac{2}{3} \times \frac{C}{I}}$$

FDMA 系统

$$n = \frac{B_t}{B_c \sqrt{\frac{2}{3} \times \frac{C}{I}}} \tag{1.8}$$

TDMA 系统

$$\begin{aligned}
n &= \frac{B_t}{B'_c \sqrt{\frac{2}{3} \times \frac{C}{I}}} \\
B'_c &= \frac{B_c}{m}
\end{aligned} \tag{1.9}$$

- B'_c 是等效带宽。相当于原来一个频道带宽又分给了多个时隙。
- m 是每一频道包含的时隙数。

TDMA 采用了数字技术, 要求的载干比比 FDMA 的小, N 值也比较小。

CDMA 系统

$$n = \left[1 + \frac{W/R_b}{E_b/I_0} \times \frac{1}{d} \right] \times G \cdot F \quad (1.10)$$

- E_b/I_0 是归一化信噪比, 计算时需要去分贝化
- W/R_b 是系统的扩频因子, 即系统的处理增益。
- d 是占空比
- G 为扇区分区系数
- F 信道复用系数

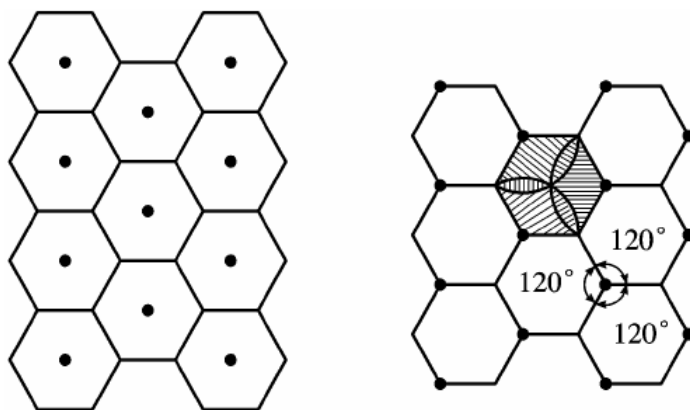
1.5.3.6 几种蜂窝系统的比较

- FDMA 和 TDMA 是频率受限系统, 影响因素: 频率与载干比
- CDMA 是干扰受限系统, 影响因素: 扩频处理增益, 信噪比, 占空比, 扇区分区系数, 信道复用系数等。

1.5.3.7 提高蜂窝系统容量的方法

1. 基站发射机位置

- (a) 中心激励小区: 安置在小区的中心
- (b) 顶点激励小区: 安置在六边形 3 个间隔的顶点上

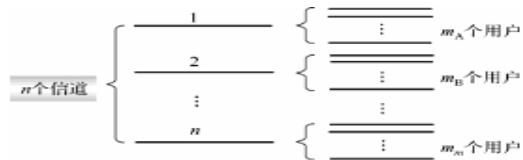


- 2. 小区分裂, 增加信道的复用次数。
- 3. 划分扇区, 使用定向天线减少同频干扰。
- 4. 新微小区, 在微小区运动时不需要进行越区切换, 保证覆盖范围的同时也减小了同频干扰。

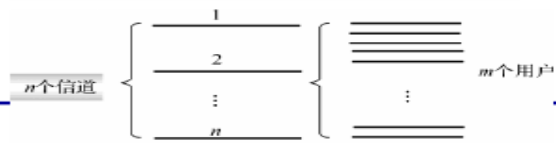
1.5.4 多信道共用技术

- 信道 → (1) 控制信道 CCH, (2) 业务信道 THH
- 信道共用, 原因: 移动通信的频率资源十分紧缺, 一个基站不可能为其所覆盖小区的每一个移动台预留一个专用的信道, 而是采用信道共用的方式。

➤ 单信道共用



➤ 多信道共用



2017/9/17

1.5.4.1 话务量

- 话音业务量，用话务量描述。
 - 流入话务量 $A = Ct$, C 为单位时间内平均发生的呼叫次数, t 为每次呼叫平均占用信道时间。
 - 完成话务量 $A_0 = C_0 t_0$, A_0 完成话务量, C_0 为呼叫成功次数, t_0 为呼叫平均占用信道时间。
- 非话音业务量，用信息流量来描述。

话务量是通过链路到达交换机的**总业务量**。现在要求系统能够容纳的系统用户数量，首先求解单个用户所需话务量：单个用户忙时话务量：

$$\alpha = CTk \frac{1}{3600} \quad (1.11)$$

其中, C , T 同上, k 为集中系数, 即忙时话务量对全天话务量之比。所以: n 个共用信道所能容纳的总用户数:

$$N = mn = \frac{A}{\alpha} \quad (1.12)$$

每个共用信道所能容量的用户数 m :

$$m = \frac{A/n}{\alpha} \quad (1.13)$$

n 为共用信道数个数。

1.5.4.2 呼损率和爱尔兰公式

流入话务量-完成话务量 = 损失话务量。**呼损率 B** = 损失话务量/流入话务量:

$$B = \frac{A - A_0}{A} \quad (1.14)$$

损失话务量越低服务质量越高, 公网长取 0.05, 要提高 B 只有降低 A 。
话务理论的经典公式-爱尔兰呼损公式:

$$B = \frac{A^n/n}{\sum_{i=0}^n A^i/i!} \quad (1.15)$$

其中,

- B , 呼损率
- A , 流入话务量
- n , 共用信道数

信道利用率公式

$$\eta = \frac{A(1 - B)}{n} \quad (1.16)$$

用途:

- 计算共用信道 n 。
- 计算总用户量 M 。

1.5.5 网络结构

一般而言，通信网由**核心网**和**接入网**组成

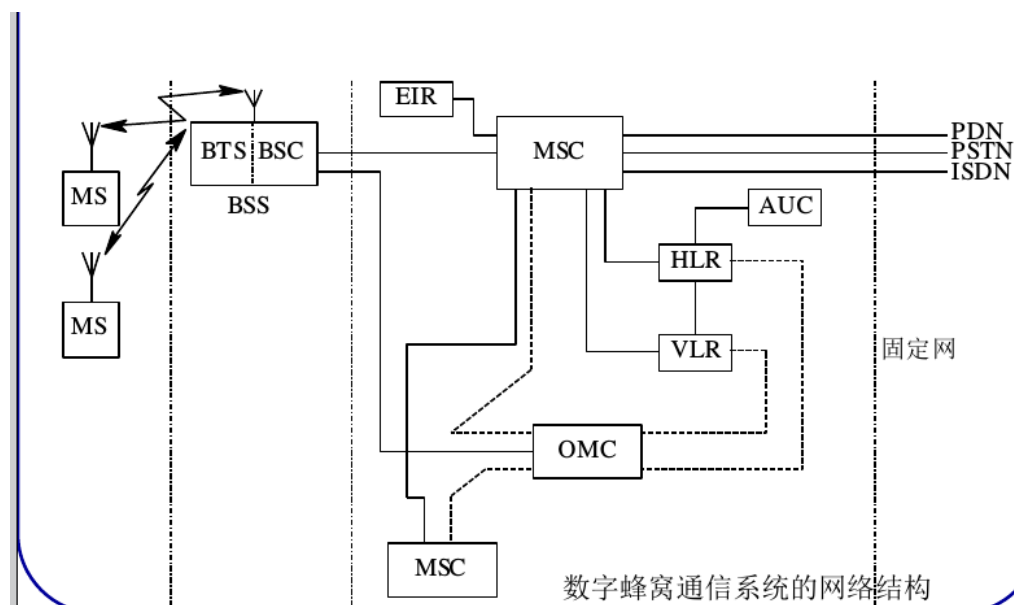


Figure 1.6: 网络结构

1. MS-移动台。如：手机，车载终端。
2. BTS-基站收发信机。处理网络侧的无线信号收发。和 MS 直接交互。
3. BSC-基站控制器。一个 BSC 连接 1-255 个 BTS，是连接无线网和地面核心网之间的重要桥梁。
4. MSC-移动交换中心。MSC 与 VLR 一一对应，工程上又称为 MSC/VLR。MSC 的主要功能有：
 - (a) 路由管理
 - (b) 业务量管理：短信，电话，流量。
 - (c) 计费和费率管理，为用户通信时间生成详细话单记录。
 - (d) 向 HLR 发送有关业务量和计费信息。
5. VLR-访问位置寄存器，功能：
 - (a) MS 漫游号码 (MSRN) 管理。
 - (b) TMSI 分配与管理。(临时用户移动用户标识，移动台地址)
 - (c) 用户参数管理
 - (d) 用户鉴权。
 - (e) HLR 更新。
 - (f) 管理 MSC 区、位置 (LA) 区及基站区。
 - (g) 无线资源管理。
6. HLR-归属位置寄存器。(一个用户只和一个 HLR 关联，即用户的 SIM 卡和 HLR 关联)
 - (a) 管理和维护在 HLR 中等级注册的所有用户的参数。用户的 MSISDN 号码 (被叫号码，如公司里的短号)；；用户定制的业务信息；智能业务 (VPN 组网等)；IMSI 号码 (SIM 卡号，唯一)。
 - (b) 计费管理，计费信息、通话时长、收发短信数量等
 - (c) VLR 更新，更新数据库中用户当前所在 VLR 的地址，并向该 VLR 发送用户相关参数，比如用户地址的业务信息

7. AuC-鉴权认证中心。管理用户的 IMSI、密钥、加解密参数、鉴权参数。
8. GMSC-关口移动交换中心，完成网间互联互通，通常无需配置 VLR
9. SMS-IW MSC-短消息业务互通移动交换中心。处理网络中短信业务的路由。
10. SMC-短消息中心，对本地网络中用户短消息进行存储转发。
11. EIR-设备标识寄存器，用于存储 MS 的 IMEI。

1.5.5.1 网络接口

Um 接口是 MS 和 BTS 之间的接口，参考 OSI7 层模型，分为物理层，数据链路层，网路层。是蜂窝移动通信系统中最复杂，最具开放性的一个接口。

1.5.6 网络的控制与管理

连接控制（管理）功能 当某一移动用户发起呼叫时，移动通信网络经过一系列预定程序控制，建立主/被通信链路，提供通信服务。这一个过程被称为接续过程，是移动通信系统的连接控制（管理）功能。

移动性管理功能 移动从一个位置区漫游到另一个位置区时，网络中的有关位置寄存器要随之对移动台的位置信息进行登记、修改或删除。如果用户是在**通信过程中越区**，网络要在不影响用户通信的情况下，控制该移动台进行越区切换。这种功能就是移动通信系统的移动管理功能。

无线资源管理 目标是在保证通信质量的条件下，尽可能提高通信系统的频谱利用率和通信容量。

1.5.6.1 越区切换

越区：移动台在**通过过程中**，MS 从一个 BTS 服务区进入另一个 BTS 服务区，MS 与原 BTS 之间无线链路转到 MS 与新 BTS 之间的无线链路上来

1 越区切换类型

1. 硬切换：断开与原 BTS 的链接，再建立和新 BTS 的链接。GSM
2. 软切换：先建立与新 BTS 的链接，再断开和原 BTS 的连接。CDMA
3. 接力切换，断开和原 BTS 的连接和建立和新 BTS 的连接象接力比赛交接棒，TD-SCDMA。

2 越区切换的判定准则

1. 相对信号强度准则。
 2. 门限规定的相对信号强度准则。
 3. 具有滞后余量的相对信号强度准则。
 4. 具有门限规定和滞后余量的相对信号强度准则。
- 商业

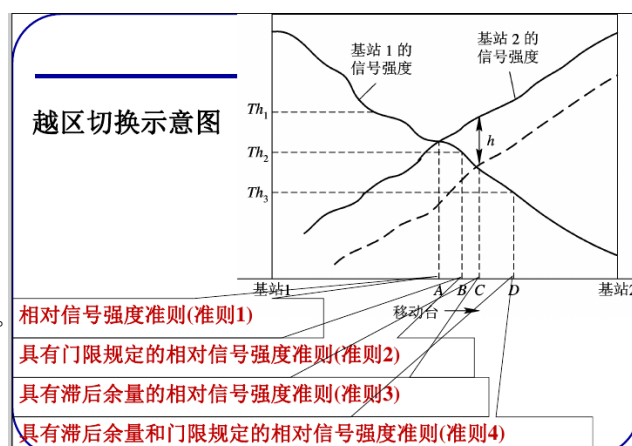


Figure 1.7: 越区切换判定准则

3 越区切换的控制策略

1. 移动控制, 测量和判定过程全部由 MS 完成; PHS
2. 网络控制, 测量和判定过程全部由网络完成; AMPS
3. 移动台辅助控制, 测量由移动台来完成, 判决由网络来完成。

4 越区切换时的信道分配

方法: 为了使得越区失败的概率尽量小, 常用的做法是在每个小区预留部分信道专门用于越区切换。

特点: 可用新信道数, 增加了呼损率, 但减少了通话被中断的概率。

1.5.6.2 位置管理

主要依靠 VLR (管理位置区的移动用户), HLR (存储用户信息) 两个寄存器完成。

- **位置登记:** 当用户 1. 关机或者在 2. 位置区¹ (LAI 或 REG_ZONE(CDMA)) 之间移动或者经历了一个 3. 固定的时间间隔的时候, 移动台需要向网络报告它的位置。
- **类型:** 开机登记、关机登记、基于时间登记、基于位置区变更登记。

当一个移动终端 (MT) 进入一个新的 LA 时, 位置登记过程分为三个步骤:

- 在管理新 LA 的新 VLR 中登记 MT;
- 修改 HLR 中记录服务该 MT 的新 VLR 的 ID;
- 在旧 VLR 和 MSC 中注销该 MT。

位置登记具体过程: 共 6 步

- ① MS通过C3的基站向MSC/VLR2发送登记消息, VLR2记录MS当前所在的LA/REG_ZONE.
- ② VLR2向MS归属地HLR发送登记消息, HLR记录MS当前所在的VLR2的地址信息。
- ③ HLR将MS相关数据发送给VLR2。
- ④ VLR2通过MSC、BSC、BTS给MS发确认消息。
- ⑤ HLR通知MS原来所在的VLR1删除和MS相关的数据。
- ⑥ VLR1个HLR发确认消息。

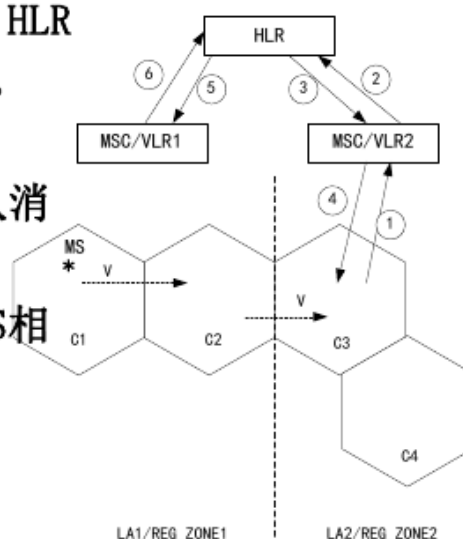


Figure 1.8: 位置区切换过程

¹在组网时, 基站需要设置一个 LAI (位置区识别码), 配置有相同 LAI 的基站构成一个位置区

VLR2 是如何知道 HLR 位置？

MS 发起位置登记请求有两种情况：

- 使用 IMSI 发起请求，则 VLR2 可直接通过 IMSI 判断出 HLR 位置。
- 使用 TMSI 发起请求，则 VLR2 可找到原来分配该 TMSI 的 VLR，VLR2 通过该 TMSI 联系 VLR1，并从 VLR1 获取 MS 的 IMSI，从而判断出 HLR 位置。

呼叫转移具体过程：共 7 步

- ① 主叫MS1拨打被叫MS2的MDN号码，通过BTS、BSC将被叫号码MDN发送到原端交换机MSC1
- ② MSC1启动号码分析程序，找到被叫号码MS所属HLR，并向该HLR发送路由查询消息。
- ③ HLR从数据库中找到MDN对应的记录，找到MS2所在的VLR，即VLR2，并向VLR2发送路由查询消息。
- ④ VLR2为MS2生成一个漫游号码MSRN，并将该号码返回给HLR
- ⑤ HLR将该MSRN号码返回给VLR1
- ⑥ VLR1根据该MSRN可以建立和目的端交换机MSC/VLR2的中继连接。
- ⑦ MSC/VLR2对LA2/REG_ZONE2中的所有BTS发起寻呼操作。

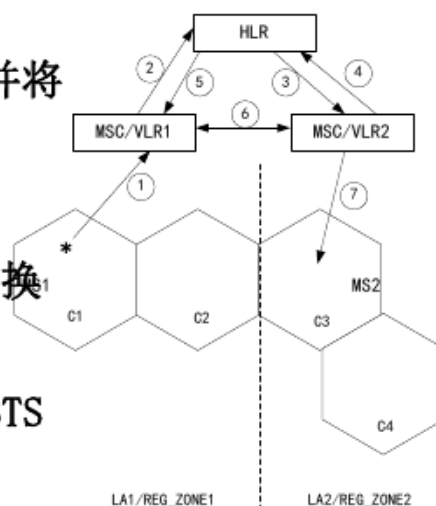


Figure 1.9: 呼叫传递过程

位置区设置问题

位置区大小 从位置登记来看，位置区越大越好，因为这样可以较少 MS 跨区移动概率。从呼叫传递来看，位置区越小越好，因为在 VLR 进行寻呼 MS 时，寻呼被叫 MS 所浪费的寻呼资源就越少。

位置区划分 相邻位置区之间用户移动的概率尽量小。避免一个位置区跨越两个或多个 BSC 的情况。

Chapter 2

移动信道的传播特性于模型

2.1 无线电波传播方式

移动通信使用甚高频 (VHF) 和特高频 (UHF) 等频段传输.

VHF: 1–10m, 30–300MHZ

UHF: 10–100CM, 300MHZ–3GHZ

当频率 $f > 30$ MHZ 时, 传播通路主要有: 直射波、反射波、地表面波。

2.1.1 直射波

直射波传播, 可按自由空间传播来考虑。

条件: 自由空间传播是指天线周围为无限大真空时的电波传播

现象 不发生反射、折射、绕射、散射和吸收等现象, 但电波经过一段路径传播之后, 能量仍会衰减, 这是由电磁波能量扩散而引起的传播损耗 (弥散损耗或称为自由空间传播损耗)。

$$L_{fs}(dB) = 32.44 + 20lg_d(km) + 20lg_f(MHZ) \quad (2.1)$$

传播接受能量排序: 直射 > (反射、绕射) > 散射。

2.1.2 反射波

物体尺寸比传输波长大多 (如地面, 墙面), 则容易发生镜面反射。

2.1.3 绕射波

尖利边缘 (山丘)。

余隙: 障碍物顶点 P 到直射线 TR 的距离, 称为菲涅尔余隙。阻挡时为负 (即当障碍物高于 TR 线时), 反之为正。**附加损耗可通过查表得到**, 该损耗和相对余隙 x/x_1 有关, 其中 x_1 第一菲涅尔半径, x 为余隙长度。

$$x_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (2.2)$$

2.1.4 散射

比传输波长小的多的物体 (粗糙表面、不规则物体), 并且单位体积内阻挡体的个数很堵的情况。

2.1.5 反射、绕射和散射的关系

	阻挡体
反射	比传输波长大的多的物体 (地面、墙面)
绕射	尖利边缘 (山丘)
散射	比传输波长小的多的物体 (粗糙表面、不规则物体)