

# 现代移动通信 原理与技术

■ 付秀花 王家政 编著

*Xiandai Yidong Tongxin  
Yuanli yu Jishu*



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 现代移动通信原理与技术

付秀花 王家政 编著

000040799

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

全书共分8章,分别介绍了移动通信的特点和发展历史,无线电波传播特性和移动无线信道建模,移动通信中常用的调制解调技术,无线链路性能增强技术及其抗干扰抗衰落能力的实现方式,蜂窝组网技术,2G的典型代表GSM及其增强型技术GPRS,3G的3种主流技术标准及其的技术特征、网络结构以及系统发展,4G的技术标准及其技术特征、网络结构、系统发展等。

本书适合作为高等院校通信等相关专业教材,也可供相关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代移动通信原理与技术 / 付秀花,王家政编著. — 北京 :  
国防工业出版社, 2019.4

ISBN 978 - 7 - 118 - 11787 - 5

I. ①现… II. ①付…②王… III. ①移动通信 - 研究 IV.  
①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 035997 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

涿州宏轩印刷服务有限公司

新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 20 1/2 字数 466 千字

2020 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

移动通信是通信领域中最具活力、最具发展前途的一种通信方式,也是近些年发展最迅速的技术领域之一。目前,移动通信在关键技术、系统演进、业务推陈出新等方面都取得了巨大进步。为满足广大读者全面、系统地了解移动通信基本原理、关键技术和系统发展的需求,编者在多年从事移动通信教学的基础上,以基础性、系统性、全面性、先进性为指导原则,历经多次使用修订,终使本书出版。为帮助读者更好地学习和理解,本书在内容安排和撰写上力求做到以下方面:

(1) 重视基础知识介绍,具体知识介绍力求全面准确。同时,书中设计了较多的例题和课后思考题。

(2) 重视基础理论和关键技术内容的过程推导和总结分析,力求推导过程简洁清晰。同时,注重介绍关键技术在实际中的应用。

(3) 对 2G、3G、4G 移动通信系统的介绍保证知识脉络一致,系统介绍清晰完整,详略得当。

全书共分 8 章。第 1 章介绍移动通信的特点和发展历史,并对常见的移动通信典型系统进行简单介绍。第 2 章分析无线电波传播特性和移动无线信道建模,介绍电波传播损耗预测模型。第 3 章介绍移动通信中常用的调制/解调技术。第 4 章介绍无线链路性能增强技术,主要包括扩频通信、分集技术、均衡技术、MIMO 技术,了解它们抗干扰抗衰落能力的实现方式。第 5 章介绍蜂窝组网技术,主要包括频率复用技术、多址接入技术、CDMA 系统中的地址码技术、蜂窝网络的容量分析、无线信道分配和多信道共用、CDMA 系统中的功率控制、蜂窝网络的移动性管理等。第 6 章介绍 2G 的典型代表 GSM 及其增强型技术 GPRS。第 7 章介绍 3G 的 3 种主流技术标准,包括 WCDMA、CDMA2000、TD-SCDMA,了解它们的技术特征、网络结构以及系统发展。第 8 章介绍 4G 的技术标准,主要介绍 LTE-Advance 的技术特征、网络结构、系统发展等。

尽管编者在撰写时尽心尽力、小心谨慎,力求内容全面准确、文字精炼无误,但由于水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,真诚希望广大读者对于本书的缺点和错误给予指正,并请不吝赐教。

编者

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第1章 概述 .....             | 1  |
| 1.1 移动通信的概念和特点 .....     | 1  |
| 1.1.1 移动通信的概念 .....      | 1  |
| 1.1.2 移动通信的特点 .....      | 1  |
| 1.2 移动通信的工作方式 .....      | 2  |
| 1.3 移动通信的发展 .....        | 4  |
| 1.3.1 移动通信的发展历史 .....    | 4  |
| 1.3.2 我国移动通信的发展 .....    | 7  |
| 1.4 典型的移动通信系统 .....      | 8  |
| 1.4.1 无线电寻呼系统 .....      | 8  |
| 1.4.2 无绳电话系统 .....       | 9  |
| 1.4.3 数字蜂窝移动通信系统 .....   | 10 |
| 1.4.4 数字集群移动通信系统 .....   | 14 |
| 1.4.5 卫星移动通信系统 .....     | 15 |
| 1.4.6 无线局域网 .....        | 16 |
| 1.5 通信行业标准化组织 .....      | 18 |
| 1.5.1 国际标准化组织 .....      | 18 |
| 1.5.2 国内标准化组织 .....      | 22 |
| 1.6 本书内容安排 .....         | 22 |
| 第2章 无线电波传播与移动无线信道 .....  | 24 |
| 2.1 无线电波的传播特性 .....      | 24 |
| 2.1.1 无线电频段划分 .....      | 24 |
| 2.1.2 移动无线电波主要传播方式 ..... | 25 |
| 2.1.3 移动无线信道衰落特征 .....   | 26 |
| 2.2 自由空间的电波传播 .....      | 28 |
| 2.2.1 自由空间传播损耗 .....     | 28 |
| 2.2.2 视距传播 .....         | 29 |
| 2.3 3种基本电波传播机制 .....     | 30 |
| 2.3.1 反射 .....           | 30 |

|            |                          |           |
|------------|--------------------------|-----------|
| 2.3.2      | 绕射 .....                 | 32        |
| 2.3.3      | 散射 .....                 | 35        |
| 2.4        | 移动无线信道建模 .....           | 35        |
| 2.4.1      | 多普勒效应 .....              | 36        |
| 2.4.2      | 多径信道的信道模型 .....          | 37        |
| 2.4.3      | 多径信道参数描述 .....           | 38        |
| 2.4.4      | 接收信号的统计分析 .....          | 44        |
| 2.5        | 电波传播损耗预测模型 .....         | 48        |
| 2.5.1      | 地形和地物 .....              | 49        |
| 2.5.2      | 室外传播预测模型 .....           | 50        |
| 2.5.3      | 室内传播预测模型 .....           | 55        |
| 2.6        | 无线信道的噪声和干扰 .....         | 57        |
| 2.6.1      | 噪声 .....                 | 58        |
| 2.6.2      | 同频干扰 .....               | 59        |
| 2.6.3      | 邻频干扰 .....               | 59        |
| 2.6.4      | 互调干扰 .....               | 60        |
| 2.6.5      | 时隙干扰和码间干扰 .....          | 62        |
| <b>第3章</b> | <b>移动通信中的调制/解调 .....</b> | <b>65</b> |
| 3.1        | 移动通信对调制技术的要求 .....       | 65        |
| 3.2        | 最小移频键控 (MSK) .....       | 66        |
| 3.2.1      | 2FSK .....               | 66        |
| 3.2.2      | MSK .....                | 69        |
| 3.3        | 高斯最小移频键控 (GMSK) .....    | 72        |
| 3.3.1      | 高斯滤波器的传输特性 .....         | 72        |
| 3.3.2      | GMSK 信号的波形和相位路径 .....    | 75        |
| 3.3.3      | GMSK 信号的调制与解调 .....      | 77        |
| 3.3.4      | GMSK 信号功率谱 .....         | 79        |
| 3.4        | QPSK 调制 .....            | 80        |
| 3.4.1      | 二相调制 (BPSK) .....        | 80        |
| 3.4.2      | 四相调制 (QPSK) .....        | 81        |
| 3.4.3      | 偏移 QPSK (OQPSK) .....    | 86        |
| 3.4.4      | $\pi/4$ -QPSK .....      | 88        |
| 3.5        | 正交频分复用 (OFDM) .....      | 92        |
| 3.5.1      | 概述 .....                 | 92        |
| 3.5.2      | OFDM 原理 .....            | 93        |

|              |                       |            |
|--------------|-----------------------|------------|
| 3.5.3        | OFDM 系统的频域分析 .....    | 94         |
| 3.5.4        | OFDM 系统的实现 .....      | 95         |
| <b>第 4 章</b> | <b>无线链路性能增强 .....</b> | <b>99</b>  |
| 4.1          | 扩频通信 .....            | 99         |
| 4.1.1        | 扩频通信基本原理 .....        | 99         |
| 4.1.2        | 直接序列扩频通信系统 .....      | 102        |
| 4.1.3        | 跳频扩频通信系统 .....        | 110        |
| 4.1.4        | 扩频通信的性能指标 .....       | 112        |
| 4.1.5        | 扩频码的同步 .....          | 114        |
| 4.2          | 分集技术 .....            | 118        |
| 4.2.1        | 分集技术的分类 .....         | 119        |
| 4.2.2        | 分集合并技术和性能分析 .....     | 121        |
| 4.2.3        | RAKE 接收机 .....        | 129        |
| 4.3          | 均衡技术 .....            | 130        |
| 4.3.1        | 无码间干扰传输的条件 .....      | 131        |
| 4.3.2        | 均衡器设计原理 .....         | 134        |
| 4.3.3        | 时域均衡器 .....           | 135        |
| 4.3.4        | 自适应均衡器 .....          | 142        |
| 4.4          | MIMO 技术 .....         | 144        |
| 4.4.1        | MIMO 技术原理 .....       | 145        |
| 4.4.2        | MIMO 系统的信道容量 .....    | 146        |
| 4.4.3        | 空间复用和 BLAST 编码 .....  | 149        |
| 4.4.4        | 空间分集和空时编码 .....       | 151        |
| 4.4.5        | MIMO 技术的应用 .....      | 157        |
| <b>第 5 章</b> | <b>移动蜂窝组网 .....</b>   | <b>159</b> |
| 5.1          | 频率复用与蜂窝小区 .....       | 159        |
| 5.1.1        | 移动通信网的覆盖方式 .....      | 159        |
| 5.1.2        | 频率复用和同频干扰 .....       | 162        |
| 5.1.3        | 蜂窝系统的扩容 .....         | 166        |
| 5.2          | 多址接入技术 .....          | 169        |
| 5.2.1        | 频分多址(FDMA) .....      | 169        |
| 5.2.2        | 时分多址(TDMA) .....      | 171        |
| 5.2.3        | 码分多址(CDMA) .....      | 172        |
| 5.2.4        | 空分多址(SDMA) .....      | 174        |

|              |               |            |
|--------------|---------------|------------|
| 5.2.5        | 正交频分多址(OFDMA) | 175        |
| 5.3          | CDMA 中的地址码    | 176        |
| 5.3.1        | 地址码设计的要求      | 176        |
| 5.3.2        | 地址码基础知识       | 177        |
| 5.3.3        | PN 码          | 179        |
| 5.3.4        | Walsh 序列      | 184        |
| 5.3.5        | OVSF 码        | 187        |
| 5.3.6        | 地址码的应用        | 188        |
| 5.4          | 蜂窝网络的容量分析     | 190        |
| 5.4.1        | FDMA 网络的容量    | 190        |
| 5.4.2        | TDMA 网络的容量    | 190        |
| 5.4.3        | CDMA 网络的容量    | 191        |
| 5.5          | 信道分配和多信道共用    | 193        |
| 5.5.1        | 信道分配          | 193        |
| 5.5.2        | 多信道共用         | 196        |
| 5.5.3        | 话务量与呼损率       | 199        |
| 5.6          | CDMA 系统中的功率控制 | 203        |
| 5.6.1        | 反向功率控制        | 204        |
| 5.6.2        | 前向功率控制        | 208        |
| 5.7          | 蜂窝网络的移动性管理    | 209        |
| 5.7.1        | 切换            | 210        |
| 5.7.2        | 位置管理          | 212        |
| <b>第 6 章</b> | <b>GSM 系统</b> | <b>214</b> |
| 6.1          | GSM 系统概述      | 214        |
| 6.1.1        | GSM 系统的发展     | 214        |
| 6.1.2        | GSM 的频带划分     | 215        |
| 6.1.3        | GSM 系统的业务     | 217        |
| 6.2          | GSM 系统的网络与接口  | 219        |
| 6.2.1        | GSM 的网络结构     | 219        |
| 6.2.2        | 接口和协议         | 222        |
| 6.3          | GSM 系统的信道     | 224        |
| 6.3.1        | 逻辑信道及分类       | 225        |
| 6.3.2        | GSM 帧结构和突发脉冲  | 226        |
| 6.3.3        | 逻辑信道到物理信道的映射  | 229        |
| 6.3.4        | 帧偏离与时间提前量     | 232        |

|            |                                             |            |
|------------|---------------------------------------------|------------|
| 6.4        | GSM 的无线数字传输 .....                           | 232        |
| 6.4.1      | GSM 的抗衰落技术 .....                            | 232        |
| 6.4.2      | GSM 的语音处理过程 .....                           | 236        |
| 6.5        | GSM 系统的号码与地址识别 .....                        | 237        |
| 6.5.1      | GSM 的区域划分 .....                             | 237        |
| 6.5.2      | 号码与识别 .....                                 | 238        |
| 6.6        | 呼叫接续和移动性管理 .....                            | 240        |
| 6.6.1      | 位置管理 .....                                  | 240        |
| 6.6.2      | 越区切换 .....                                  | 243        |
| 6.6.3      | 安全管理 .....                                  | 245        |
| 6.6.4      | 呼叫接续 .....                                  | 249        |
| 6.7        | 通用分组无线业务 (GPRS) .....                       | 251        |
| 6.7.1      | GPRS 概述 .....                               | 251        |
| 6.7.2      | GPRS 网络结构 .....                             | 252        |
| 6.7.3      | GPRS 的空中接口 .....                            | 255        |
| 6.7.4      | GPRS 的移动性管理和会话管理 .....                      | 257        |
| <b>第7章</b> | <b>第三代移动通信系统 .....</b>                      | <b>261</b> |
| 7.1        | 3G 概述 .....                                 | 261        |
| 7.1.1      | 3G 的提出和目标 .....                             | 261        |
| 7.1.2      | 3G 标准和标准化组织 .....                           | 262        |
| 7.1.3      | 3G 频谱分配 .....                               | 263        |
| 7.1.4      | 迎接 3G——中国电信业第三次重组 .....                     | 264        |
| 7.2        | WCDMA .....                                 | 265        |
| 7.2.1      | WCDMA 系统发展和网络结构 .....                       | 265        |
| 7.2.2      | WCDMA 空中接口 .....                            | 268        |
| 7.2.3      | WCDMA 信道结构 .....                            | 270        |
| 7.2.4      | HSPA 和 HSPA+ .....                          | 272        |
| 7.3        | CDMA 2000 .....                             | 277        |
| 7.3.1      | CDMA 2000 系统发展 .....                        | 277        |
| 7.3.2      | IS-95A .....                                | 278        |
| 7.3.3      | CDMA 2000 1x .....                          | 282        |
| 7.3.4      | CDMA 2000 1xEV-DO 和 CDMA 2000 1xEV-DV ..... | 285        |
| 7.4        | TD-SCDMA .....                              | 287        |
| 7.4.1      | TD-SCDMA 的提出和发展 .....                       | 287        |
| 7.4.2      | TD-SCDMA 的空中接口 .....                        | 289        |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 7.4.3 TD-SCDMA 的关键技术 .....     | 292        |
| <b>第8章 第四代移动通信系统 .....</b>     | <b>298</b> |
| 8.1 LTE 概述 .....               | 298        |
| 8.1.1 LTE 的提出和标准化进程 .....      | 298        |
| 8.1.2 LTE 的设计目标和特点 .....       | 299        |
| 8.2 LTE 物理层关键技术 .....          | 301        |
| 8.2.1 LTE 帧结构 .....            | 301        |
| 8.2.2 OFDMA .....              | 304        |
| 8.2.3 SC-FDMA .....            | 304        |
| 8.2.4 MIMO .....               | 305        |
| 8.3 LTE 系统和协议栈 .....           | 306        |
| 8.3.1 LTE 网络架构 .....           | 306        |
| 8.3.2 LTE 空中接口协议栈 .....        | 308        |
| 8.3.3 LTE 信道结构 .....           | 310        |
| 8.4 LTE-Advanced .....         | 312        |
| 8.4.1 LTE-Advanced 发展 .....    | 312        |
| 8.4.2 LTE-Advanced 需求和技术 ..... | 312        |
| 参考文献 .....                     | 315        |

# 第1章 概述

在近三四十年的时间内,移动通信(Mobile Communications)得到了迅速的发展和普及,深刻地改变了人类的生产、生活、交流和思维方式,对社会发展产生了重要的影响,是目前通信领域中最具活力、最具发展前途的一种通信方式。为了更好地掌握移动通信的基本原理、关键技术及网络系统,本章首先概要介绍移动通信的概念、特点及工作方式,然后介绍移动通信的发展历史及其在我国的发展,最后对常见的移动通信典型系统进行简单介绍。

## 1.1 移动通信的概念和特点

### 1.1.1 移动通信的概念

虽然移动通信的发展可追溯到一百多年前,但其实人们对移动通信的概念并没有一个公认的一致定义,而且移动通信发展到今天,其概念范围也扩展了许多。目前国内普遍认为,移动通信是指通信双方至少有一方在移动中(或者临时停留在某一非预定的位置上)进行信息传输和交换,包括移动体(车辆、船舶、飞机或行人)和移动体之间的通信、移动体和固定点(固定无线电台或有线用户)之间的通信。采用移动通信技术和设备组成的通信系统即为移动通信系统。

人与人之间通信的最终目标是个人通信(PCN),个人通信的任务是实现“5W”服务,即实现无论任何人(Whoever)、在任何地方(Wherever)、在任何时间(Whenever)、与其他任何人(Whomever)、进行任何种类(Whatever)通信的目标。显然,移动通信是实现这一美好目标的关键和必经之路。然而,移动通信的作用可能并不止于此,在近几年发展势头迅猛的物联网(Internet of Things, IoT)即“物物相连的互联网”中,移动通信仍然并将继续扮演着重要角色,并会在未来物联网的发展中发挥重要作用。

与移动通信关系密切的另一个概念是“无线通信”(Wireless Communications)。广义上讲,无线通信是指依靠空中无线电波进行信息传输和交换的任何通信系统,因此,移动通信属于无线通信的范畴。但是,二者侧重点又有所不同,无线通信关注无线传输;而移动通信除此之外,还侧重于移动性。因此,严格来说,移动通信和无线通信是两个不同的概念。

### 1.1.2 移动通信的特点

移动通信的主要特点如下:

(1) 利用无线电波进行信息传输,传输损耗大,信号衰落随机性强。

在移动通信中,移动台和基站间必须使用无线电波来传递信息。然而,无线传播特性

一般较差,一是表现在相对于有线传输,无线信号的传输损耗比较大,而且随着传输距离的远近,信号的传输损耗差别比较大;二是无线信号在空中呈现多径传播,容易导致多径衰落,再加上多径信道中地形、地物的不同以及信道的时变性,使到达接收机的信号呈现出一定的衰落特性,且具有较强的随机性。因此,在设计移动通信系统时,必须采用抗衰落能力强的技术来提高接收信号的质量和可靠性。

### (2) 用户数多,可利用频谱资源有限。

可以说,移动通信是用户数增长最迅速的一种通信方式,目前拥有的移动用户数非常多。尽管无线电波的频谱范围比较广,但适用于移动通信的频段仅限于特高频(UHF)和甚高频(VHF),所以,移动通信可用的无线频谱资源是非常有限的。为满足大量用户的通信,移动通信只能开发多种多址接入技术及系统扩容技术来提升系统容量。常用的多址接入技术有频分多址接入(FDMA)、时分多址接入(TDMA)、码分多址接入(CDMA)和正交频分多址接入(OFDMA)等。

### (3) 各种噪声和干扰造成工作环境恶劣。

无线电波在信息传输过程中不可避免会受到外部各种噪声的影响,如各种工业噪声、城市噪声、车辆发动机点火噪声以及大气噪声和宇宙噪声等;此外,移动通信还会受到系统自身产生的各种干扰,如同频干扰、邻道干扰、互调干扰等,在CDMA系统中还存在多址干扰以及近端无用强信号对远端有用弱信号的干扰(CDMA系统中称为“远近效应”)等。因此,在设计移动通信系统时,必须采用抗干扰能力强的技术来减轻或消除这些有害噪声和干扰的影响。

### (4) 通信的移动性造成通信系统复杂。

在移动通信系统中,由于终端用户的移动性,无论是业务量还是信令流量或其他一些网络参数,都具有较强的流动性、突发性和随机性,需要采用动态无线信道分配、功率控制、位置更新、越区切换、自适应无线链路控制等移动性管理和无线资源管理技术。这就使移动通信网络的结构比较复杂,网络管理和控制也比较复杂。

### (5) 对移动台的要求高。

移动台必须适应于在移动环境下使用,基本要求是体积小、重量轻、省电、携带方便、操作和维修方便等,一些特殊性质的移动台还要保证在剧烈震动、冲击、高低温变化等恶劣环境下正常工作。根据工作性质的不同,移动台一般有手持机、车载台和机载台等。现在,用户终端尤其是手持机越来越成为一种个人消费品,为满足不同人群的需求,用户终端必须能适应新技术、新业务的发展。移动终端的设计和制造是移动通信系统良好运营的重要保障。

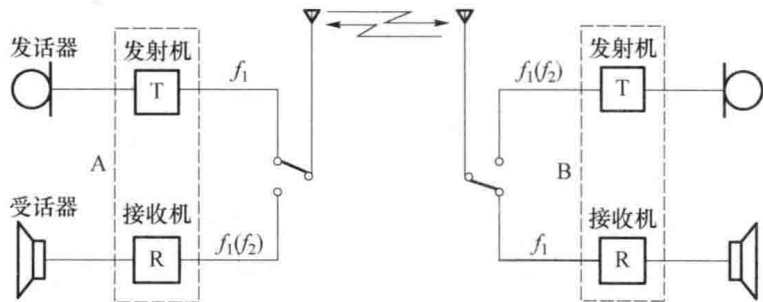
## 1.2 移动通信的工作方式

根据通话状态和频率使用的方法,移动通信的工作方式分为单工通信、双工通信、半双工通信和移动中继方式。

### 1. 单工通信

所谓单工通信,就是指消息只能单方向传输,通信双方电台交替地进行收信和发信,在一段时间内,通信双方中只有一个可以发送,另一个只能接收。根据通信双方是否使用

相同的频率,单工通信又分为同频单工和双频单工,如图 1.1 所示。同频单工是指通信电台的发射和接收使用同一个频率( $f_1$ )。双频单工是指在空中接口有两个频率( $f_1$  和  $f_2$ ),一个用于发射(上行),另一个用于接收(下行)。



同频单工：收发均采用 $f_1$ ；双频单工：收发分别采用 $f_1$ 和 $f_2$

图 1.1 单工通信

单工通信常用于点对点通信。平时,通信双方的接收机都处于接听状态。其中 A 方需要讲话时,先按下“按 - 讲”开关,B 方接收;讲话结束时,A 方再次按下“按 - 讲”开关,关闭发射机,重新开启接收机,处于接听状态。B 方需要讲话时也进行同样的操作过程,从而实现双向通信。

这种工作方式的优点是收/发信机可以使用同一副天线,而不需要天线共用器,设备简单,功耗小。其缺点是操作不方便,由于“按 - 讲”开关的切换,往往出现通话断续的现象。单工通信一般应用于专业性强的领域,如道路交通指挥系统。

### 2. 双工通信

所谓双工通信,就是指通信双方可以同时进行信息的接收和发送,双方收/发信机同时工作,任何一方讲话时,都可以听到对方的语音,如图 1.2 所示。双工通信中需要一定的技术来区分双向信道,蜂窝移动通信系统使用两种双工制式:频分双工(FDD)和时分双工(TDD)。FDD 是指上下行链路频道不同;TDD 是指上下行链路使用相同的频道,依靠时间的不同来区分信道方向。

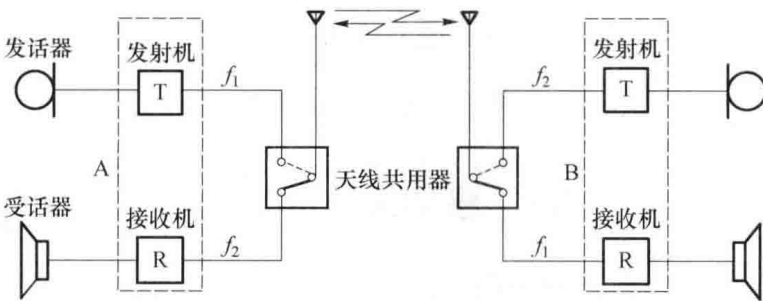


图 1.2 双工通信

### 3. 半双工通信

所谓半双工通信,就是指通信双方中;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,如图 1.3 所示。这种方式在移动通信系统中一般是在移动台采用单工方式,而在基站采用双工方式,基站同时收/发工作。半双工通信一般用于专业移动通信系统中,如汽车调度系统。

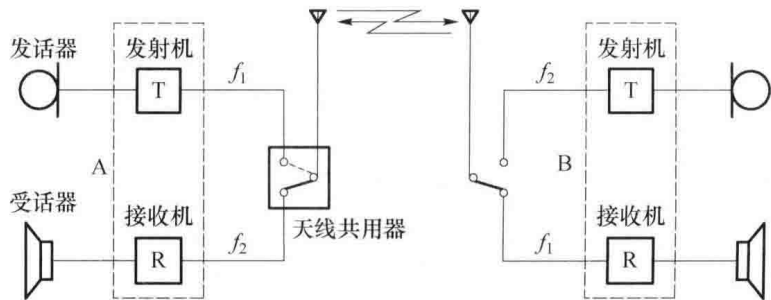


图 1.3 半双工通信

4. 移动中继方式

两个移动台之间(或移动台和基站之间)直接通信距离一般只有几千米,经过中继站转接后通信距离可增加到几十千米,扩大了通信范围。一般采用一次中继转接,多次中继会使信噪比严重下降。移动中继又分为单工中继和双工中继两种方式,如图 1.4 所示。单工中继只需要一套收/发信机,采用全向天线;双工中继需两套收/发信机,需采用两副定向天线,且需对准中继方向。若有一端是移动台,则用一副定向天线和一副全向天线。

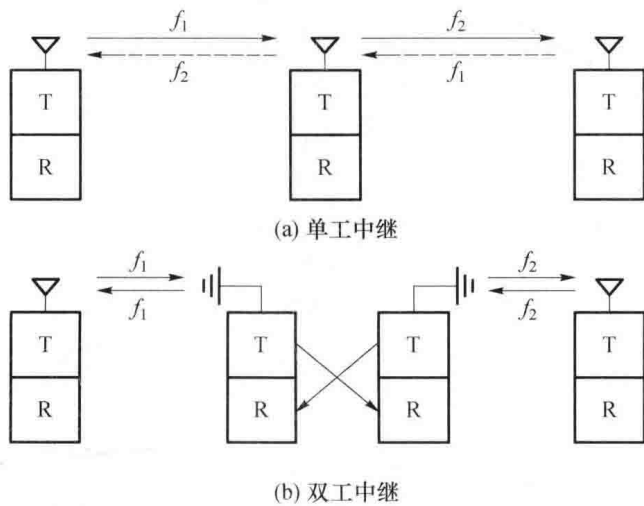


图 1.4 移动中继通信

# 1.3 移动通信的发展

## 1.3.1 移动通信的发展历史

人们普遍认为 1897 年是人类移动通信的元年。这一年,意大利人马可尼在一个固定站和一搜拖船之间完成了一项无线电通信实验,实现了在英吉利海峡中行驶的船只之间保持持续的通信。也就是说,移动通信几乎伴随着无线通信的出现而诞生了。现代意义上移动通信系统的发展开始于 20 世纪 20 年代,大致经历了如下 5 个阶段的发展。

### 1. 第一阶段:20 世纪 20 至 40 年代,早期发展阶段

在这一期间,人们初步进行了一些传播特性的测试,并且在几个短波频段上开发出专用移动通信系统。这一阶段的代表是美国底特律市警察使用的车载无线电系统,系统工作频率为 2MHz,到 20 世纪 40 年代已经提高到 30~40MHz。这一阶段的特点是:专用系统开发,工作频率较低,工作方式为单工或半双工方式。

### 2. 第二阶段:20 世纪 40 年代中期至 60 年代初期,公用移动通信时代开始

在此时期,公用移动通信服务开始问世。1946 年,根据美国联邦通信委员会(FCC)的计划,贝尔公司在圣路易斯城建立了世界上第一个公用汽车电话网络,称为“城市系统”。该系统使用了 3 个频道,间隔为 120kHz,通信方式为单工。随后,德国、法国、英国等相继开发出公用移动电话系统。美国贝尔实验室完成了人工交换系统的接续问题。这一阶段的特点是:从专用网向公用网过渡,接续方式为人工,网络的容量较小。

### 3. 第三阶段:20 世纪 60 年代中期至 70 年代中期,移动通信系统改进与完善阶段

这一阶段是移动通信系统改进与完善的阶段。在此期间,美国推出了改进型移动电话系统(IMTS),使用 150MHz 和 450MHz 频段,采用大区制、中小容量,实现了无线频道自动选择并能够自动接续到公用电话网。这一阶段的特点是:采用大区制,中小容量,实现了自动选频与自动接续。

### 4. 第四阶段:20 世纪 70 年代中期至 80 年代中期,蜂窝小区出现

这一时期最重要的突破是,贝尔实验室在 20 世纪 70 年代提出了蜂窝网的概念,并开发出基于蜂窝网技术的移动通信系统,即第一代模拟蜂窝移动通信系统(1G)。蜂窝网络,即所谓的小区制系统,由于实现了频率复用,大大提高了频谱的利用率,极大地提高了系统的容量。同时,由于微电子技术、通信网络技术、调制编码技术以及计算机技术的发展,移动通信在交换、信令传输、无线调制和编码技术等方面都取得了很大的发展。这一阶段是移动通信的蓬勃发展期,其特点是:蜂窝小区的应用使系统容量急剧增加,通信性能不断完善,技术的发展呈加快趋势。第一代模拟蜂窝移动通信系统的典型代表有美国的先进移动电话系统(AMPS)、英国的全向接入通信系统(TACS)、瑞典等北欧四国的北欧移动电话系统(NMT)。

虽然第一代模拟移动通信取得了很大成功,但也暴露出很多问题,如制式太多、互不兼容、通话质量不高、不能提供数据业务、不能提供自动漫游、频谱利用率较低、移动设备复杂、费用较贵以及易被窃听等,最主要的问题是其系统容量已不能满足迅速增长的移动用户需求。

### 5. 第五阶段:20 世纪 80 年代中期至今,数字移动通信时代

这是移动通信系统发展和成熟时期,主要特点是实现了数字化通信。该阶段又分为 2G、3G、4G 等。

#### 1) 2G

第二代移动通信系统(2G)是为了解决 1G 模拟系统中存在的一些根本性技术缺陷,通过数字通信技术发展起来的。2G 系统以传输语音和低速数据业务为目的,因此又称为窄带数字移动通信。2G 一经出现就产生了竞争,竞争的结果是产生了 2G 时代的两大典型系统,即以美国的码分多址(CDMA)技术为代表的窄带 CDMA(IS-95)系统和以欧洲的时分多址(TDMA)技术为代表的全球移动通信(GSM)系统。此外还有北美的另一个数字

蜂窝标准——高级移动电话系统(DAMPS),即IS-54,以及日本的个人数字蜂窝系统(PDC)。2G数字移动网络具有保密性和抗干扰性强、语音质量好、系统容量大、频谱利用率高、功能强大等优点。缺点是:主要提供数字语音业务,具有部分数据传输能力,但传输速率非常低,如基于GSM的数据传输率仅为9.6kbps。

为了向用户提供高速数据传输业务,在2000年又推出了一种新的通信技术——通用分组无线业务(GPRS),该技术是在GSM的基础上向3G的一种过渡技术,也称为2.5G技术。GPRS在移动用户和分组数据网络之间提供了一种无线连接,可以给移动用户提供高速无线IP和X.25分组数据接入服务。在这之后,人们又推出了增强型数据速率GSM演进技术(EDGE),也称为2.75G技术。EDGE提供了一个从GPRS到第三代移动通信的过渡性方案,EDGE技术主要在欧洲市场得到应用。

## 2) 3G

第三代移动通信系统(3G)的目标就是移动宽带多媒体通信。3G最早由国际电信联盟(ITU)于1985年提出,当时称为“未来公众陆地移动通信系统”(Future Public Land Mobile Telecommunication System, FPLMTS),1996年更名为IMT-2000(International Mobile Telecommunication-2000),即该系统工作在2000MHz频段,最高数据传输速率可达2000kbps,预期在2000年左右得到商用。为实现上述目标,对3G无线传输技术提出了一些具体要求,包括:①高速数据传输以支持多媒体业务,要求室内环境至少2Mbps,室外步行环境至少384kbps,室外车辆运动环境至少144kbps;②数据传输速率能够实现按需分配;③上下行链路能适应上下行业务不对称的需求。

3G有三大主流标准,分别是欧洲提出的WCDMA、美国提出的CDMA 2000和我国提出的TD-SCDMA。由于其众多的技术优势,3G系统均采用CDMA作为技术核心。CDMA 2000是在IS-95基础上发展而来,而WCDMA是在GSM基础上发展而来,3G最初基本只是美国和欧洲两大阵营的较量。1999年11月,ITU-R TG8/1第18次会议通过了“IMT-2000无线接口技术规范”建议,其中我国提出的TD-SCDMA技术写在了第三代无线接口规范建议的IMT-2000 CDMA TDD部分中。此举标志着我国通信技术实现了由跟踪到创新、突破的重大转变,是我国移动通信产业对世界电信技术发展所作出的重大贡献。CDMA 2000采用FDD方式,CDMA 2000 1x EV-DO Rel A版本可在1.25MHz的带宽内提供最高3.1Mbps的下行数据传输速率。WCDMA采用FDD方式,包括一系列版本,从R99、R4版本,扩展到R5、R6、R7等,可在5MHz的带宽内,提供最高21Mbps的用户数据传输速率。TD-SCDMA结合了FDMA、TDMA、CDMA的优点,采用TDD双工方式,基于R4版本,可在1.6MHz的带宽内,提供最高384kbps的用户数据传输速率。根据中国电信业第二次重组方案,我国3G牌照的发放方式是:中国移动获得TD-SCDMA牌照,中国电信获得CDMA 2000牌照,中国联通获得WCDMA牌照。

继ITU发布以上三大3G标准后,由英特尔、IBM、三星等公司主导的无线互联网技术WiMAX成为了第四个全球3G标准。WiMAX(Worldwide Inter-operability for Microwave Access)即全球微波互联接入,也就是IEEE 802.16,即无线城域网(MAN),是一项新兴的宽带无线接入技术,采用了代表未来通信技术发展方向的正交频分复用(OFDM)/OFDMA、MIMO等先进技术,能提供面向互联网的高速连接,数据传输距离最远可达50km。WiMAX还具有QoS保障、数据传输速率高、业务丰富多样等优点。

### 3) 4G

第四代移动通信系统(4G)的目标是希望能满足更大的带宽需求,利用统一的 IP 技术,满足系统在广覆盖、高质量、低成本上支持的高速数据传输和高分辨率多媒体服务的需要。4G 国际标准工作历时 3 年,2012 年初,ITU 正式审议确立 IMT-Advanced(俗称“4G”)国际标准。4G 国际标准有两项,分别是 LTE-Advanced 和 Wireless MAN-Advanced(IEEE 802.16m),前者包括 LTE-Advanced 的 FDD 部分和中国提交的 TD-LTE-Advanced 的 TDD 部分,总体基于 3GPP 的 LTE-Advanced;后者是基于 IEEE 802.16m 的第二代增强型技术(WiMAX2)。

LTE-Advanced 的相关特性如下。

- (1) 带宽:100MHz;
- (2) 峰值速率:下行 1Gbps,上行 500Mbps;
- (3) 峰值频谱效率:下行(30bps)/Hz,上行(15bps)/Hz;
- (4) 针对室内环境进行优化;
- (5) 有效支持新频段和大带宽应用;
- (6) 峰值速率大幅提高,频谱效率有限改进。

IEEE 802.16m 可在高移动模式或高效率、强信号模式下提供 1Gbps 的下行速率,具有以下优势。

- (1) 提高网络覆盖,改善链路预算;
- (2) 提高频谱效率;
- (3) 提高数据和 VOIP 容量;
- (4) 低时延及 QoS 增强;
- (5) 功耗节省。

### 1.3.2 我国移动通信的发展

30 多年前,中国开始引入移动通信技术。在短短 30 多年的时间内,中国的移动通信产业经历了从无到有、从小到大、从弱到强的艰苦历程。现在,中国移动通信已经形成了完整的产业链,成为世界上移动用户最多的国家。纵观我国移动通信的发展,可以分为以下 4 个阶段。

#### 1. 模拟时期:从无到有的突破

1987 年 11 月 18 日第一个 TACS 模拟蜂窝移动电话系统在广东省建成并投入商用。之后,我国各地开始建设移动电话网,分别采用了爱立信和摩托罗拉两大公司的移动电话系统,称为 A 网和 B 网,二者均属于模拟网。A 网地区使用 A 网手机,B 网地区使用 B 网手机,二者不能互通。1996 年实现全国联网。随着 2G 数字移动通信网络的发展,2001 年底我国关闭了模拟网络。

#### 2. 数字时期:从小到大的腾飞

1993 年,我国开始建设 GSM 网络(称为 G 网)。G 网工作在 900MHz 频段,随着移动用户数量的迅速增长,GSM 网络又扩展到 1800MHz 频段(称为 D 网,即 DCS 1800 系统)。这一时期发生的大事主要有:1994 年 3 月邮电部移动通信局成立;1994 年年底广东首先开通了 GSM 数字移动电话网;1995 年 4 月中国移动在全国 15 个省市相继建网,GSM 数