



普通高等教育**电子通信类**国家级特色专业系列规划教材

移动通信原理与系统

李旭 艾渤 钟章队 编著



科学出版社

普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列规划教材

移动通信原理与系统

李旭 艾渤 钟章队 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列规划教材,主要介绍移动通信基本原理、主要系统及关键技术等内容。

全书分两部分,共12章。第一部分(第1~4章)讲述移动通信原理,包括移动通信概述,无线电波传播与无线信道技术,蜂窝系统原理,移动通信系统结构、协议与信令及编号方案。第二部分(第5~12章)讲述移动通信系统与关键技术,包括GSM、GPRS系统与均衡技术,CDMA系统与多用户检测技术,OFDM系统与同步、峰均比关键技术,MIMO及多用户协作通信技术,WiMAX系统与集中式调度关键技术,无线Mesh网络与链路控制关键技术,UWB与认知无线电技术,LTE与无线资源管理。

本书全面地介绍了移动通信原理、系统与技术,既有基础原理,又有专业的技术细节,同时包含工程实践经验,可作为普通高等院校工科电子信息工程、通信工程、信息工程专业及理科电子信息科学专业本科生教材,也可作为相关专业硕士研究生、从事该领域工作的技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

移动通信原理与系统/李旭,艾渤,钟章队编著. —北京:科学出版社, 2011.5

(普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列规划教材)
ISBN 978-7-03-030709-5

I. ①移… II. ①李…②艾…③钟… III. ①移动通信-通信系统-高等学校-教材 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第057949号

丛书策划:匡敏 潘斯斯
责任编辑:潘斯斯 张丽花 / 责任校对:陈玉凤
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京华正印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年5月第一版 开本:787×1092 1/16

2011年5月第一次印刷 印张:18

印数:1—3 500

字数:420 000

定价:36.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近年来,移动通信飞速发展,给人类文明和社会生活带来翻天覆地的变化,世界各国在通信领域投入了大量的人力和物力,并进行了大规模的建设。从第一代模拟蜂窝网电话系统到第二代数字蜂窝通信系统,再到第三代移动多媒体通信系统,再到第四代高速移动通信系统,每次变革都是一次技术的创新,都带来更广泛、更便捷的应用。在我国,移动通信发展的起步虽晚,但发展极其迅速,逐渐与国际接轨。移动通信技术也成为高等院校通信工程、电子信息工程等专业学生必须具备的知识结构的重要部分。希望读者通过学习本书,能够了解当今移动通信的基本理论、主要系统与关键技术,为学习移动通信奠定坚实的基础。

1. 编写目的和原则

本书为适应移动通信技术发展需要而编写,为读者构建有层次的、完整的知识体系和结构,强调理论与实际相联系,培养科学的研究方法及工程实践能力。内容上着重阐明移动通信系统的基本原理和基本技术,避免烦琐的数学推导,紧跟当前发展现状,内容新颖充实。

2. 主要特色

本书具有系统性、实用性、前沿性等特色。

系统性:强调知识结构的系统性和完整性,以系统和技术为中心介绍移动通信的基本原理和基本技术,便于读者对于移动通信形成整体的概念。

实用性:每章都加入了案例分析,理论与实际相结合,注重综合运用知识的能力培养,便于读者对于技术的理解和掌握。

前沿性:针对当今移动通信的研究现状和发展趋势,介绍涉及的关键技术和热点技术(如WiMAX、LTE等),开阔视野,拓展思路。

本书内容丰富,层次分明,重点突出,有利于读者全方面了解移动通信相关原理与技术,并掌握科学的学习方法。

3. 主要内容

全书分两部分,共12章。

第一部分(第1~4章)讲述移动通信原理,包括移动通信概述,无线电波传播与无线信道技术,蜂窝系统原理,移动通信系统结构、协议与信令及编号方案。

第二部分(第5~12章)讲述移动通信系统与关键技术,包括GSM、GPRS系统与均衡技术,CDMA系统与多用户检测技术,OFDM系统与同步、峰均比关键技术,MIMO及多用户协作通信技术,WiMAX系统与集中式调度关键技术,无线Mesh网络与链路控制关键技术,UWB与认知无线电技术,LTE与无线资源管理。

4. 编写分工

本书由李旭教授主编,其中第1、3、4、9~12章由李旭教授、钟章队教授编写,第2、5~8章由

艾渤教授编写。全书由李旭教授统稿。

感谢北京交通大学电子信息工程学院和轨道交通控制与安全国家重点实验室给予的支持。在本书编写过程中,刘颖教授给予了很大的支持,并担任主审,在此深表谢意。研究生李富艳、陈诚、韩宗佑、徐展、唐艳、李世杰、刘佳、刘俊莹、张建于、王韵琪、杨晓崧、田沃、张学臻、董俊、娜仁高娃、陈瑞风、陈炳昊、郭瑛、陈欣、魏宏、何睿斯、高林毅为本书承担了查阅资料、校稿、仿真、文字编辑和排版等工作,感谢他们的辛苦工作。

由于作者水平有限,加之移动通信技术涉及面广、发展速度快,书中难免存在疏漏之处,恳请同行和读者指正,也希望广大读者对本书提出宝贵意见。

作 者

2011年4月

目 录

前言

第 一 部 分

第 1 章 移动通信概述	1
1.1 移动通信的概念	1
1.2 移动通信的分类和组成	2
1.2.1 移动通信结构	2
1.2.2 移动无线通信的分类	3
1.3 移动通信的发展历程与发展趋势	6
1.3.1 发展历程	6
1.3.2 发展趋势与长期演进	10
1.4 移动通信的关键技术.....	11
1.4.1 物理层的关键技术	11
1.4.2 数据链路层的关键技术	12
1.4.3 网络层的关键技术	12
1.4.4 其他层与跨层的关键技术.....	13
1.5 移动通信的业务.....	14
1.6 标准化组织.....	14
本章小结	16
思考题与习题	16
参考文献	16
第 2 章 无线电波传播与无线信道技术	18
2.1 电波传播理论的发展.....	18
2.2 无线电波的传播机制.....	19
2.2.1 直射	19
2.2.2 反射	20
2.2.3 绕射	21
2.2.4 散射	21
2.3 无线电波的衰落特性.....	22
2.3.1 大尺度衰落	22
2.3.2 小尺度衰落	24
2.3.3 多普勒频移	30
2.4 无线电波传播模型.....	30

2.4.1	电波传播模型综述	30
2.4.2	宏小区传播模型	31
2.4.3	微小区传播模型	35
2.4.4	微微小区传播模型	37
2.4.5	室内传播模型	38
本章小结	.....	39
思考题与习题	.....	40
参考文献	.....	40
第3章	蜂窝系统原理	42
3.1	频率复用	42
3.1.1	大区制移动通信网	42
3.1.2	频率复用	42
3.1.3	小区制蜂窝移动通信网	43
3.1.4	GSM 网的频率复用方式	44
3.2	干扰分析	45
3.2.1	同频干扰	45
3.2.2	邻频干扰	46
3.2.3	互调干扰	47
3.3	提高蜂窝小区容量的方法	47
3.3.1	小区分裂	47
3.3.2	划分扇区	48
3.3.3	分区微小区	48
3.3.4	评价指标	49
3.4	信道分配方法与案例	49
3.4.1	信道分配策略	49
3.4.2	固定的信道分配方案	50
3.4.3	动态的信道分配方案	51
3.5	话务量与呼损率	52
3.5.1	呼叫话务量与呼损率概念	52
3.5.2	爱尔兰 B 公式和爱尔兰 C 公式	53
3.5.3	案例	54
3.6	位置区理论	54
3.7	小区结构	57
3.7.1	宏蜂窝、微蜂窝和微微蜂窝系统	57
3.7.2	智能小区	58
3.7.3	异构网络融合	60
本章小结	.....	61
思考题与习题	.....	61

参考文献	61
附录 爱尔兰 B 表	62
第 4 章 移动通信系统结构、协议与信令及编号方案	65
4.1 移动通信系统网络结构、关键单元及功能	65
4.1.1 GSM/GPRS 网络结构、功能单元与接口	65
4.1.2 CDMA 2000 网络结构、功能单元与接口	73
4.1.3 LTE 网络结构、功能单元与接口	76
4.2 移动通信系统协议栈	78
4.2.1 GSM 协议	78
4.2.2 IEEE 802.16 WiMAX 协议	79
4.2.3 LTE 协议	80
4.3 移动通信网络信令	81
4.3.1 信令的基本概念	81
4.3.2 信令的分类	81
4.3.3 No. 7 信令	82
4.4 编号方案与专网 GSM-R 编号案例分析	84
4.4.1 GSM 编号方案	84
4.4.2 IS-95 编号方案	86
4.4.3 专网 GSM-R 编号方案——案例说明	87
本章小结	92
思考题与习题	93
参考文献	93

第二部分

第 5 章 GSM、GPRS 系统与均衡技术	94
5.1 GSM 系统	94
5.1.1 GSM 系统的基本特点	94
5.1.2 GSM 系统的频段和信道	94
5.1.3 GSM 系统的帧结构	96
5.1.4 GSM 系统中的身份标识码	96
5.1.5 GSM 系统的承载业务	97
5.1.6 GSM 系统的移动网络功能	100
5.2 GPRS 系统	100
5.2.1 GPRS 系统的主要特点	100
5.2.2 GPRS 的业务功能	101
5.3 均衡原理及算法	105
5.3.1 均衡器原理与实现	105
5.3.2 均衡器结构及分类	106

5.3.3 均衡算法	109
本章小结	114
思考题与习题	114
参考文献	115
第 6 章 CDMA 系统与多用户检测技术	116
6.1 概述	116
6.1.1 CDMA 技术标准的演进	117
6.1.2 双模式数字蜂窝系统的概念	117
6.1.3 扩频的概念及方法	118
6.2 CDMA 系统	119
6.2.1 CDMA 系统频率和信道规范	120
6.2.2 CDMA 系统下行信道	121
6.2.3 CDMA 系统上行信道	122
6.2.4 CDMA 系统的调制方式	123
6.2.5 CDMA 系统的时间基准	123
6.2.6 CDMA 系统的特点	124
6.2.7 CDMA 系统的容量	126
6.2.8 CDMA 系统的功率控制技术	127
6.3 多用户检测技术	129
6.3.1 多用户检测技术概述	130
6.3.2 多用户检测技术的分类	131
6.3.3 多用户检测技术的发展前景	135
本章小结	136
思考题与习题	136
参考文献	136
第 7 章 OFDM 系统与同步、峰均比关键技术	138
7.1 多载波调制	138
7.1.1 单载波调制技术概述	138
7.1.2 多载波调制技术概述	138
7.1.3 多载波调制技术的发展	140
7.2 OFDM 系统及其数字实现	140
7.2.1 OFDM 系统概述	140
7.2.2 OFDM 系统中的关键技术	142
7.2.3 OFDM 系统中的数字实现	143
7.3 同步:频率偏移和时间偏移	144
7.3.1 同步技术概述	144
7.3.2 符号定时同步	146
7.3.3 频率同步	154

7.3.4	采样钟同步	161
7.4	峰均功率比降低技术	166
7.4.1	OFDM 系统的高峰均功率比	166
7.4.2	峰均功率比降低技术	167
7.4.3	峰均功率比降低——限幅技术	168
7.4.4	峰均功率比降低——频域导频技术	169
7.4.5	峰均功率比降低与 PA 线性化技术	174
	本章小结	178
	思考题与习题	178
	参考文献	178
第 8 章	MIMO 及多用户协作通信技术	183
8.1	多输入多输出(MIMO)技术	183
8.1.1	系统概述	183
8.1.2	MIMO 模型	184
8.1.3	编码技术	185
8.1.4	信道容量	186
8.2	多用户协作通信技术	192
8.2.1	协作通信与协作分集	192
8.2.2	多用户分集	193
8.2.3	波束赋形	196
8.2.4	多用户分集性能	196
	本章小结	198
	思考题与习题	198
	参考文献	200
第 9 章	WiMAX 系统与集中式调度关键技术	201
9.1	WiMAX 系统与标准	201
9.1.1	WiMAX 概述	201
9.1.2	IEEE 802.16 系列标准	201
9.2	WiMAX 系统的技术优势与应用	202
9.2.1	WiMAX 系统的技术优势	202
9.2.2	WiMAX 系统的应用	202
9.3	OFDM 技术与 MIMO 技术	203
9.3.1	OFDM 技术	203
9.3.2	MIMO 技术	205
9.4	IEEE 802.16 PMP 模式下 MAC 层	206
9.4.1	业务流管理	207
9.4.2	业务流标识、连接标识和业务类	208
9.4.3	分类符	208

9.4.4 动态业务管理	209
9.5 IEEE 802.16 的 ARQ 机制	209
9.5.1 IEEE 802.16 的 ARQ 机制简介	209
9.5.2 ARQ 块	210
9.5.3 ARQ 参数	210
9.5.4 ARQ 反馈消息格式	211
9.6 WiMAX 的移动性支持	212
9.6.1 移动性管理的主要内容和要求	213
9.6.2 系统内切换	213
9.6.3 系统间切换	215
本章小结	217
思考题与习题	217
参考文献	217
第 10 章 无线 Mesh 网络与链路控制关键技术	218
10.1 无线 Mesh 网络简介及其应用	218
10.1.1 无线 Mesh 网络	218
10.1.2 无线 Mesh 网络的优势	219
10.1.3 无线 Mesh 网络的应用方案	220
10.2 无线 Mesh 网络的关键问题	222
10.2.1 无线 Mesh 网络的媒体接入控制(MAC)	222
10.2.2 无线 Mesh 网络的路由问题	222
10.2.3 无线 Mesh 网络中的 QoS 问题	223
10.2.4 无线 Mesh 网络中的安全问题	226
10.3 无线 Mesh 网络 MAC 层协议	228
10.3.1 IEEE 802.11 MAC 层协议	228
10.3.2 IEEE 802.16 Mesh MAC 协议	233
10.3.3 IEEE 802.15.4 Mesh MAC 层协议	238
10.4 无线 Mesh 网络路由协议	242
10.4.1 表驱动路由选择协议	242
10.4.2 按需驱动路由选择协议	246
10.4.3 混合式路由选择协议	249
10.4.4 其他的路由选择协议	249
本章小结	250
思考题与习题	250
参考文献	251
第 11 章 UWB 与认知无线电技术	253
11.1 UWB 的发展及其标准化	253
11.2 UWB 的优势与挑战	254

11.2.1	UWB 的优势	254
11.2.2	UWB 所面临的挑战	255
11.3	UWB 关键技术分析	255
11.3.1	UWB 脉冲信号的产生	255
11.3.2	UWB 脉冲检测与多址	257
11.4	UWB 认知无线电技术	257
11.4.1	UWB 与认知无线电相结合的意义	257
11.4.2	UWB 认知无线电的关键技术	258
11.4.3	认知无线电的标准化	258
	本章小结	259
	思考题与习题	259
	参考文献	259
第 12 章	LTE 与无线资源管理	260
12.1	演进路线与目标	260
12.2	无线资源管理	261
12.2.1	概述	261
12.2.2	接入控制	261
12.2.3	功率控制	262
12.2.4	分组调度	266
12.3	移动性管理	269
12.3.1	安全机制	269
12.3.2	切换管理	271
12.3.3	位置管理	274
	本章小结	274
	思考题与习题	275
	参考文献	275

第一部分

第 1 章 移动通信概述

1.1 移动通信的概念

移动通信,顾名思义,进行移动通信的通信双方至少有一方处于运动状态。因此,移动通信包括两种基本形式,即移动体与固定点之间的通信和移动体之间的通信。移动通信的基础是无线通信,最高目标是实现 5W 通信,即任何人(whoever)在任何时间(whenever)和任何地点(wherever)与任何人(whomever)进行任何类型(whatever)的信息交换。

与固定通信相比,移动通信具有下列特点。

1. 通信环境多变

移动台处于运动环境中,信道特征随着通信环境的变化而变化,如图 1-1 所示。通信环境的两个主要变化因素是通信路径的变化和通信距离的变化。通信环境存在多种信号,移动台接收的信号由直射波、反射波、绕射波和散射波组成。信号的多径传播导致接收电平在较小范围内的衰落称为小尺度衰落。小尺度衰落一般服从莱斯或瑞利分布。在移动台的移动过程中,建筑物或其他障碍物的阻挡导致接收信号损耗的现象称为阴影效应。阴影效应导致信号接收电平的均值变化范围较大,体现了慢衰落损耗的特点。慢衰落损耗一般遵循对数正态分布^[1]。

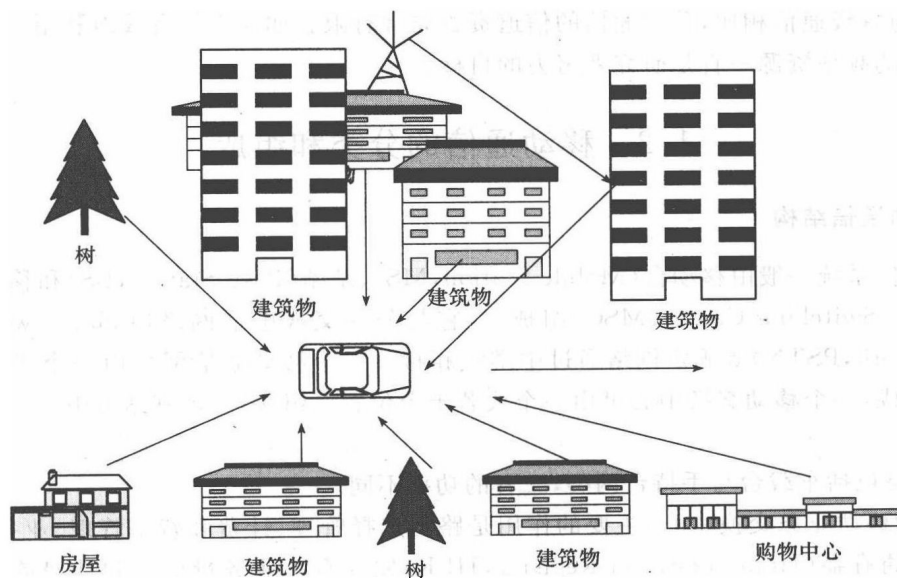


图 1-1 用户移动性与信号衰落

2. 干扰种类多,影响大

移动通信网除了受到各种外部干扰,如人为噪声、城市噪声和天电干扰等外(图 1-2),移动通信系统自身还会产生各种干扰,如同频干扰、邻频干扰、互调干扰和多址干扰等。因此,抗干扰措施在移动通信系统设计中至关重要,必须予以充分考虑。常用的抗干扰措施包括利用信道编码进行检错和纠错、分集技术、自适应均衡、扩频和跳频、多用户检测技术、扇区天线、多波束天线和自适应天线阵列等^[2]。

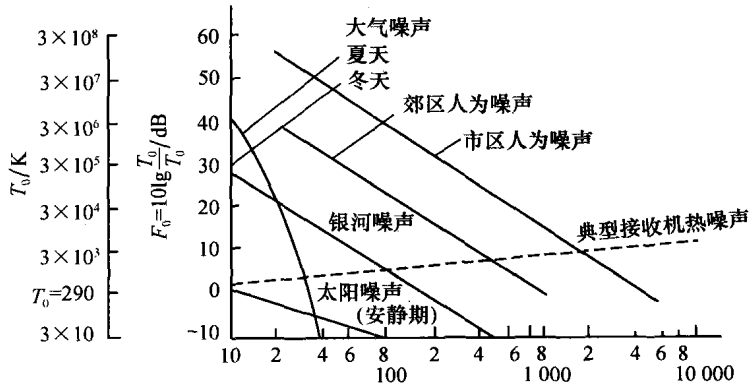


图 1-2 移动通信中的外部噪声

3. 设备要求高,网络结构复杂

对于基站设备,需合理解决其放置位置和天线的角度等一系列问题。对于移动台设备,为了提高其移动性,要求设备体积小、易携带,同时还应保证不同应用条件下的特殊要求。移动通信网要实现有线通信网中并不存在的多种功能,如新移动台接入、无线信道分配、移动越区切换等。诸多功能的实现增加了移动通信网络的结构复杂度。

此外,与有线通信相比,移动通信的信道资源非常有限。如何更加有效地利用现有的频率资源并开发新的频率资源一直是研究者努力的目标。

1.2 移动通信的分类和组成

1.2.1 移动通信结构

移动通信系统一般由移动台(Mobile Station, MS)、基站(Base Station, BS)和移动业务交换中心(Mobile Switching Center, MSC)组成^[3],它与公共交换电话网络(Public Switched Telephone Network, PSTN)等固定网络通过中继线相接。一个移动通信网可由一个或若干个移动交换中心组成,一个移动交换中心可由一个或若干个位置区组成,一个基站可由一个或若干个无线小区组成。

MS 主要包括车载台与手持台两类,二者的功率不同。

MSC 为移动业务交换中心,主要的作用是路由选择管理、计费 and 费率管理、业务量管理,并向归属位置寄存器(Home Location Register, HLR)发送有关业务量信息和计费信息。位置区由若干个基站组成,可以定位被呼移动台所在的位置。

BS 与 MSC 之间、移动交换中心与公共交换电话网络(PSTN)之间可采用有线链路,如光

纤、同轴电缆和双绞线等；也可以采用无线链路，如微波链路和毫米波链路等。每个交换机可以支持近 100 个基站，每个基站可以同时支持 50 路语音呼叫，交换机到固定网络之间至少需要 5000 个话路的传输容量。

我国主要使用的是 GSM(Global System for Mobile communications)网络结构，采用三级网络结构：设立一级汇接中心、省二级汇接中心、移动本地网。

1.2.2 移动无线通信的分类

移动通信网络存在多种分类方式：按服务范围，可分为公用网和专用网。按使用环境，可分为陆上通信网、海上通信网和空中通信网。按工作方式，可分为单工通信网、双工通信网和半双工通信网。按信号形式，可分为模拟通信网和数字通信网。按覆盖范围，可分为个域网、局域网、城域网和广域网。按业务类型，可分为电话网、数据网和多媒体网等。按信道接入方式，可分为集中式调度网络和分布式调度网络：集中式调度网络由中心节点统一分配信道使用权，如传统的蜂窝通信网络；分布式调度网络则由各个节点通过一定的竞争机制争用信道使用权，如 Ad Hoc 网络和网格网络(无线 Mesh 网络)。

随着相关技术的不断发展，移动通信的内涵必将进一步丰富。

1. 移动通信的工作方式^[4]

1) 单工通信方式

单工通信方式：指同一时刻信号只能在一个方向上传输。单工方式最典型的应用包括无线电寻呼系统、广播电台、收音机和报警系统等。单工通信可进一步划分为同频单工和异频单工两种方式，其区别在于收发信机是否使用相同的频率。

同频单工通信方式是指通信双方使用相同的频率 f_1 工作，发送时不接收，接收时不发送。各接收机平常处于守候状态。如图 1-3 所示，当甲方要发话时，按下送话器的按讲开关(PTT, Push to Talk)，即关掉接收机，将天线接至发射机的输出端，使发射机处于发射状态。这时，乙方处于接收状态，即可实现由甲方至乙方的信息传输。同理，乙方至甲方的信息传输也可实现。

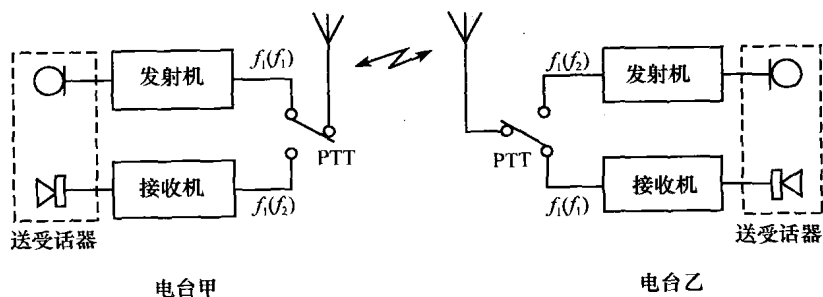


图 1-3 单工通信方式示意图

异频单工通信方式是使用两个不同的频率 f_1 和 f_2 分别进行发送和接收。同一部电台的发射机和接收机交替进行工作。

单工通信方式具有多种优点：设备简单，可共用收发天线，不需基站转接，功耗较小。但是，单工通信方式也具有一定缺点，如邻频干扰和基站间干扰明显，频率利用率低等。

2) 双工通信方式

双工通信方式可进一步分为频分双工(Frequency Division Duplexing, FDD)和时分双工

(Time Division Duplexing, TDD)。

FDD 是一种通信双方收发信机利用不同信道进行收发信息的通信方式,如图 1-4 所示。FDD 适用于上下行通信量近似相等的业务,如以语音为代表的对称业务。FDD 允许信息收发同时进行,接收与发送过程分别使用不同的信道。为了提高抗干扰能力,收发信道之间存在一定宽度的保护频段,因此频谱利用率有所下降。FDD 系统的复杂度较高,设备成本相对也较高。

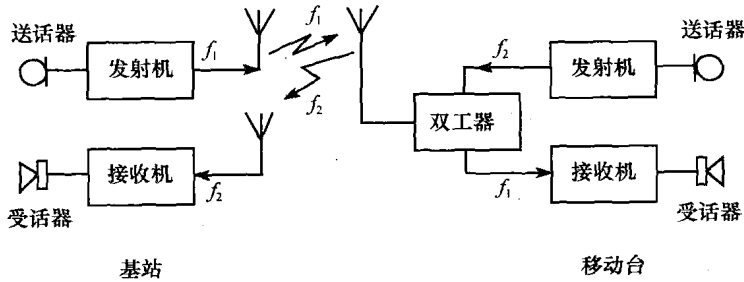


图 1-4 双工通信方式示意图

虽然收发过程均采用相同的信道,但是 TDD 以不同的时隙区分收发过程。TDD 适用于上下行通信量不对等或者变动较频繁的业务,如数据业务。在这些业务应用中,TDD 可以灵活地改变上下行通信的时隙分配比例。TDD 系统的复杂度较低,设备成本也相对较低。

3) 半双工通信方式

半双工通信方式如图 1-5 所示,基站和移动台分别使用两个频率,基站采用双工方式,而移动台采用单工的“按讲”方式。其优点是:移动台采用异频单工,设备简单,耗电少;收发采用不同的频率,有利于频率分配,且受邻近电台的干扰小。其缺点是:移动台需要按键发话,操作不方便,一般适用于专用移动通信系统。

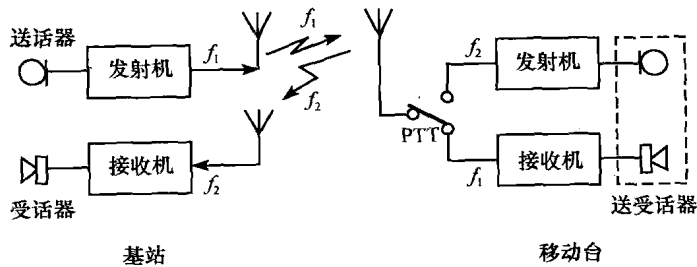


图 1-5 半双工通信方式示意图

4) 移动中继方式

中继站的作用是将信号进行再生、放大处理,再转发给下一个中继站,这样既能增强信号的传输质量,还能增大通信距离。移动中继方式的缺点是在增加信号功率增益的同时,也会放大噪声的功率,从而使信噪比下降。尤其是中继次数较多时,这种现象更为明显。

中继方式又分为单工中继和双工中继:单工中继采用全向天线,只需一套收发信机;双工中继通常采用两副定向天线对准中继方向,并且需两套收发信机。若一方是移动台,则需要一副定向天线和一副全向天线,如图 1-6 所示。

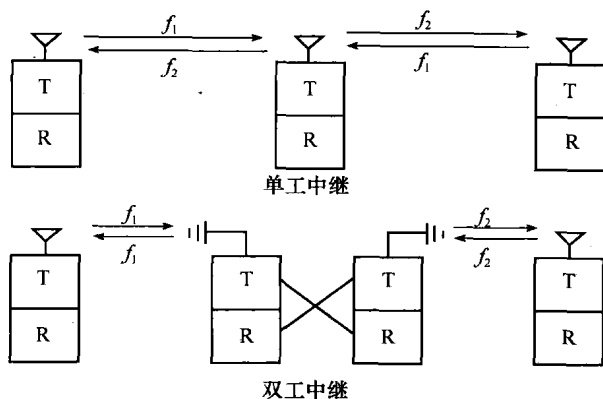


图 1-6 移动中继方式示意图

2. 移动通信的多址方式

移动通信按其多址方式^[5]可分为频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)、时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)、码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)和空分多址(Space Division Multiple Access, SDMA)等。FDMA、TDMA 和 CDMA 分别是第一至第三代移动通信的多址方式,如图 1-7 所示。FDMA 方式主要通过为每一用户划分不同的频段而区分不同的用户;TDMA 方式允许多个用户共享一个载频,每个用户占用彼此不重叠的时隙;CDMA 方式允许多用户共享同一频率,有多少个不同的正交码序列就有多少个不同的地址码,即码分信道。SDMA 方式(图 1-8)通过空间的分割来区别不同的用户,基本原理是

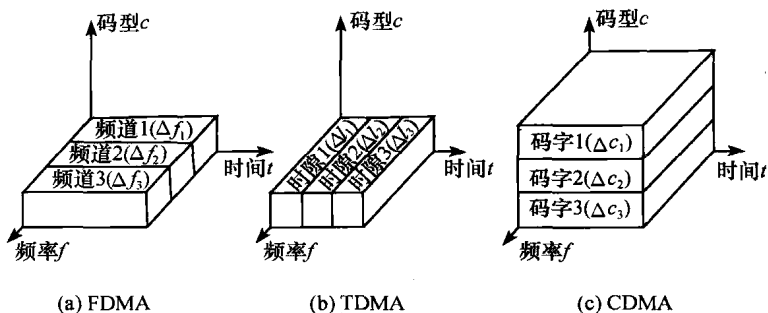


图 1-7 FDMA、TDMA 和 CDMA 原理示意图

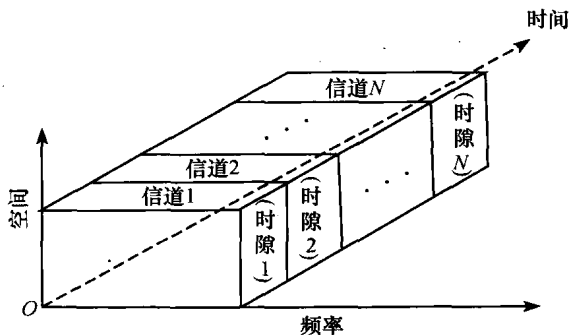


图 1-8 SDMA 原理示意图