

 同济大学研究生教材

宽带无线通信

Broadband Wireless Communications

薛小平 金彦亮 武 卓 编著

同济大学研究生教材

宽带无线通信

薛小平 金彦亮 武 卓 编著

内容提要

本书主要介绍宽带无线通信的理论和技術。全书共分为8章,内容包括正交频分复用、多输入多输出等宽带无线通信的基本原理,LTE/LTE-A的基本概念及其无线资源管理,无线局域网络中的介质访问控制技术、资源管理,WiMAX的概念及其资源管理以及移动性管理的理论及演进等。

本书力求将基本理论知识和实际系统及应用相结合,配有大量图表便于读者理解。本书可以作为通信工程、电子信息、计算机等相关专业的研究生教材和参考书,也可以作为宽带无线通信技术研究人员的参考书及通信工程技术人员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

宽带无线通信 / 薛小平,金彦亮,武卓编著. —上海:

同济大学出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-5608-6554-6

I. ①宽… II. ①薛… ②金… ③武… III. ①宽带通信系统—无线电通信—通信技术 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 233034 号

同济大学研究生教材

宽带无线通信

薛小平 金彦亮 武卓 编著

责任编辑 张平官 李小敏 责任校对 徐春莲 封面设计 张微

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 20.5

印 数 1—1100

字 数 512000

版 次 2016 年 10 月第 1 版 2016 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6554-6

定 价 58.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前言

通信领域发生着深刻的变化,人们试图将传统的承载单一信息的网络演化成能承载多种业务、具有 QoS 保障、支持移动的泛在通信网络。

早在 20 世纪 80 年代,研究人员就试图研究单一固定网络承载多种业务的通信系统,提出了综合业务数字网(Integrated Service Digital Networks, ISDN)。早期的 ISDN 以数字网络为基础,承载多种业务,通常称为窄带综合业务数字网(N-ISDN);在窄带综合业务数字网的基础上,研究人员进一步提出了以信元交换为核心的宽带综合业务数字网(B-ISDN),并在干线通信网上得到了应用。综合业务数字网采用单一网络承载多种业务的思想,受到了学术界和工业界的关注。研究人员不断地探索移动环境下的综合业务网络,试图在无线通信系统中,建立起支持多种业务形式、高速、移动和 QoS 的新一代泛在通信网络。

近 20 年来,移动通信网和互联网的发展极其迅速,已经在全球各国得到了广泛的应用。由于这两种网络的初始设计目标的差异,两种网络在服务能力方面存在着较多的差异。

移动通信网是一种支持终端移动性的网络,最初是为话音业务设计的。这种网络适合于话音通信,但对数据业务的支持能力有限。为使传统的移动通信网同时支持话音和数据业务,移动通信系统采用不同的通信方式来支持不同的业务类型:话音服务采用电路交换,数据业务则采用分组交换(IP 交换)。近年来,随着 IP 技术的不断成熟和发展,针对 LTE 及未来的移动通信网络,提出了采用统一的 IP 通信方式,实现对话音和数据业务的支持。

无线通信由于受移动终端和基站间的无线通信环境以及移动性的影响,长期以来,移动终端的数据接入速率无法与有线通信相比拟。第二代数字移动网络在传统电路交换的基础上,增加了数据域的业务支持,但典型的数据域的接入速率仅为几十比特/秒;第三代移动通信系统增强了数据域的接入速率,在静止及无线通信条件较好的区域,数据通信峰值速率可达 2Mbps。近年来,随着无线通信理论和技术,如 OFDM, OFDMA, MIMO 等的成熟与发展,高速数据接入成为现实,新一代的移动通信系统(LTE)已经商用化,数据通信速率有了革命性的飞跃。

互联网最初用于承载数据业务,但由于分组传输过程中的拥塞等情况,容易出现分组传输的延时、抖动等问题,对话音、视频等实时业务的支持能力长期以来是学术界和工业界所关注的热点。随着研究的深入,研究人员提出了很多有效地改善 IP 网络传播性能的方法和技术,如 IETF(互联网工程任务组)的区分服务和集成服务;以及以 H. 26X 和 SIP 为基础的软交换技术等,在一定程度上改善了互联网对实时业务的支持能力。

最初的互联网并没有考虑对终端移动性、网络移动性等的支持,互联网长期以来以固定网络的形态为用户提供服务。为满足终端和网络移动性的需求,在宽带无线接入的基础上实现互联网终端和网络的移动, IETF 提出了移动 IP 的概念,试图使互联网可支持终端移动性,实现移动互联网;同时也提出了 NEMO(网络移动性)和移动组播等多种使互联网中的终端和网络移动的新方法。

在宽带无线的终端接入方面, IEEE 802 委员会做出了很多努力,制定了无线局域网络、WiMAX 等国际标准,实现了让互联网终端通过宽带接入技术,自由地接入互联网,试图使互

联网的终端能像移动通信系统中的终端一样移动。尤其是,无线局域网和 WiMAX 技术的接入带宽也在不断地扩展,从最初的百米范围内 10 兆带宽的固定无线接入,发展现在几公里范围内支持移动的数百兆接入带宽。

无论是移动通信网还是互联网都期望为用户提供高速的数据业务,支持终端移动性,满足用户对 QoS 的要求,并利用一个网络完成各种通信业务(语音、数据和多媒体)等,事实上,两者的长远目标是一致的。

针对目前宽带无线通信领域内理论和技术的发展,为满足研究生的课程学习需要,同济大学与上海大学通过多年的教学实践,并借鉴国内外的权威文献、标准和资料,合作编著了这本教材,内容涉及正交频分复用(OFDM)、多输入多输出(MIMO)等宽带无线通信的基本原理,LTE/LTE-A 的基本概念及其无线资源管理,无线局域网络中的介质访问控制技术、资源管理等关键问题,WiMAX 的概念及其资源管理,以及移动性管理的理论及演进等,希望有助于读者深入理解和认识宽带无线通信。

同济大学薛小平教授承担本书的第 1,4,7,8 章的编写,上海大学金彦亮副教授承担本书的第 5,6 章的编写,上海大学武卓博士承担本书的第 2,3 章的编写工作。

本书的出版得到了同济大学基金资助,得到了同济大学、上海大学很多专家和学者的帮助和支持;本书的最后尽管给出了参考文献,但也有一些文献和资料没有列入参考文献,本书作者对全书中引用文献和资料的作者,表示感谢。

本书在写作和出版的过程中,得到了同济大学很多老师和研究生的帮助和支持。同济大学 2015 级信息与通信工程系的研究生试用了本教材,并纠正了原教材中许多表述及写作过程中的错误;张芳博士对全书进行了全面的校核,修订了其中一批错误;博士生张春花、硕士研究生闵宗茹、武青云、尹纯、陈康强、冯丽娟等也参与了全书的校核工作,在此向他们的工作表示由衷感谢。由于时间仓促,书中仍不免存在错误,欢迎读者通过各种方式批评指正。

薛小平

2016 年 8 月于同济大学

目 录

前言

第1章 绪 论	(1)
1.1 无线通信的起源	(1)
1.2 早期的无线通信	(2)
1.3 模拟蜂窝移动通信	(3)
1.3.1 蜂窝系统	(4)
1.3.2 移动性管理	(4)
1.3.3 多址技术	(5)
1.3.4 智能终端及数据业务	(5)
1.3.5 模拟无线通信向数字无线通信发展	(6)
1.4 宽带无线通信	(6)
1.4.1 移动通信系统中宽带无线接入	(6)
1.4.2 面向竞争信道的宽带无线接入	(11)
1.4.3 其他的宽带无线技术	(12)
1.5 新型的无线通信系统	(13)
1.5.1 无线自组织网络	(13)
1.5.2 家庭网络	(14)
1.5.3 无线传感器网络	(14)
1.6 新型通信方式及体制的研究	(14)
第2章 无线通信基础	(18)
2.1 无线通信	(18)
2.1.1 视距通信	(18)
2.1.2 衰减	(19)
2.1.3 自由空间损耗	(19)
2.1.4 噪声	(20)
2.1.5 多径效应	(21)
2.1.6 多普勒效应	(22)
2.2 分集技术	(22)
2.3 交织技术	(25)
2.3.1 交织技术基本原理	(26)
2.3.2 交织器的分类	(26)
2.4 均衡	(29)

2.4.1 均衡器的基本原理	(30)
2.4.2 时域均衡	(30)
2.5 多址接入技术	(35)
2.5.1 频分多址	(35)
2.5.2 时分多址	(36)
2.5.3 码分多址	(39)
2.5.4 空分多址	(44)
2.5.5 ALOHA 协议	(46)
2.6 本章小结	(50)
第3章 宽带无线通信基础	(51)
3.1 OFDM	(51)
3.1.1 OFDM 的基本原理	(52)
3.1.2 保护间隔和循环前缀	(54)
3.1.3 OFDM 的特性	(55)
3.1.4 OFDM 的关键技术	(57)
3.2 正交频分多址接入(OFDMA)	(61)
3.2.1 OFDMA	(61)
3.2.2 OFDMA 系统的资源分配	(63)
3.2.3 OFDMA 系统的自适应资源分配算法	(64)
3.3 MIMO	(67)
3.3.1 MIMO 信道容量	(68)
3.3.2 空时编码技术	(71)
3.3.3 智能天线	(78)
3.4 MIMO-OFDM	(80)
3.4.1 MIMO-OFDM 系统结构	(81)
3.4.2 MIMO-OFDM 关键技术	(82)
3.5 协作通信	(86)
3.5.1 协作通信的基本原理	(86)
3.5.2 协作通信的中继合作模式	(86)
3.5.3 协作通信的中继策略	(87)
3.5.4 协作通信的关键技术	(89)
3.6 机会通信	(95)
3.6.1 多用户分集	(95)
3.6.2 多用户分集与传统分集方式的比较	(98)
3.6.3 多用户分集的实现方法	(98)
3.7 本章小结	(102)

第4章 宽带移动通信及其资源管理	(103)
4.1 LTE/LTE-A 网络的基本概念	(103)
4.2 宽带移动通信系统中的资源管理	(105)
4.2.1 无线资源管理	(105)
4.2.2 分组调度器的概念	(106)
4.2.3 常用的分组调度算法	(108)
4.3 无线协作通信及其资源管理	(109)
4.3.1 中继协作通信	(109)
4.3.2 多点协作(CoMP)	(110)
4.3.3 协作通信系统及其挑战	(115)
4.4 异构 LTE/LTE-A	(119)
4.4.1 异构网络中的 RRM 问题及挑战	(120)
4.4.2 带有 Femtocell 的异构 LTE/LTE-A 中的 RRM	(122)
4.4.3 带有中继节点的异构 LTE/LTE-A 中的 RRM	(133)
4.4.4 中继增强 OFDMA 网络的 RRM	(135)
4.5 载波聚合及其无线资源管理	(144)
4.5.1 载波聚合的场景	(144)
4.5.2 载波聚合的实现方式	(146)
4.5.3 载波聚合无线资源管理框架	(148)
4.5.4 载波聚合无线资源管理算法	(151)
4.6 自优化网络	(160)
4.6.1 LTE SON 组成及其网络架构	(161)
4.6.2 自配置技术	(162)
4.6.3 自优化网络技术	(162)
4.6.4 自愈	(164)
4.7 本章小结	(165)
第5章 无线局域网及其传播机制	(166)
5.1 无线局域网基础	(166)
5.2 WLAN 中的介质访问控制机制	(167)
5.2.1 DCF 机制	(168)
5.2.2 PCF 机制	(171)
5.2.3 IEEE 802.11 MAC 层 QoS 机制	(171)
5.3 Ad hoc 网络	(176)
5.3.1 Ad hoc 网络中的隐藏和暴露终端	(176)
5.3.2 认知 Ad hoc 的 MAC 层协议	(179)
5.4 Ad hoc 网络路由机制	(183)
5.4.1 Ad hoc 网络平面路由协议	(183)

5.4.2	Ad hoc 网络分层路由协议	(187)
5.4.3	Ad hoc 网络组播路由协议	(191)
5.5	机会网络	(193)
5.5.1	机会转发机制	(193)
5.5.2	基于机会通信的数据分发	(198)
5.6	VANET 路由协议	(198)
5.6.1	基于连通的路由	(200)
5.6.2	基于移动预测的路由	(201)
5.6.3	基于基础设施的路由	(202)
5.6.4	基于概率的路由	(203)
5.6.5	基于地理位置的路由	(204)
5.7	本章小结	(206)
第 6 章	WiMAX 及其关键问题	(207)
6.1	WiMAX	(207)
6.1.1	WiMAX 的拓扑结构	(208)
6.1.2	WiMAX 物理层	(210)
6.1.3	WiMAX 介质访问控制层	(220)
6.2	混合自动重传(HARQ)	(222)
6.2.1	自动重传技术	(222)
6.2.2	HARQ 及其实现	(222)
6.2.3	WiMAX HARQ 的研究进展	(224)
6.3	WiMAX 的 QoS 机制	(228)
6.3.1	WiMAX PMP 模式的业务类型	(228)
6.3.2	请求/授权机制	(230)
6.3.3	WiMAX MAC 层调度器及研究进展	(232)
6.3.4	无信道感知调度器	(234)
6.3.5	信道感知调度器	(237)
6.3.6	WiMAXMesh 模式的调度机制	(240)
6.4	移动 WiMAX 的移动性管理	(245)
6.4.1	系统内切换	(245)
6.4.2	系统间切换	(247)
6.4.3	基于 MIH 的异构网络移动性管理	(248)
6.5	本章小结	(252)
第 7 章	移动性管理	(253)
7.1	移动性管理的基本概念及其演进	(253)
7.2	移动通信系统中的移动性管理	(255)
7.2.1	位置管理	(256)

7.2.2	位置更新策略及算法	(257)
7.2.3	寻呼算法	(261)
7.2.4	切换管理	(262)
7.2.5	移动性管理中的安全机制	(265)
7.3	LTE 中的移动性管理	(265)
7.3.1	LTE 移动性管理	(266)
7.3.2	LTE 移动性管理中的安全机制	(267)
7.3.3	LTE 移动性管理实例	(268)
7.4	MIP	(272)
7.4.1	移动 IPv4 (MIPv4)	(272)
7.4.2	移动 IPv6	(276)
7.4.3	MIPv6 中的关键问题	(277)
7.5	MIP 的移动性管理及性能优化	(279)
7.5.1	网络层移动性管理	(279)
7.5.2	链路层移动性管理	(284)
7.5.3	跨层移动性管理	(286)
7.5.4	MIPv6 的性能优化方法	(288)
7.6	移动组播	(292)
7.7	网络移动性	(294)
7.8	本章小结	(297)
第 8 章	其他宽带无线技术	(298)
8.1	蓝牙	(298)
8.1.1	蓝牙演进	(298)
8.1.2	蓝牙的体系结构	(298)
8.1.3	蓝牙网络拓扑结构	(301)
8.2	超宽带 UWB	(302)
8.2.1	UWB	(302)
8.2.2	UWB 的技术原理	(303)
8.3	光载无线通信关键技术	(307)
8.4	本章小结	(309)
参考文献		(310)

第1章 绪 论

人类社会的核心特征是信息交流,包括语言、文字和图像等。古老的信息交流方式,如面对面的语言交际、文字和资料的传播等为人类的信息交流提供了直接而简便的方法,但这些形式的交流受到很多的限制,如传播速度慢、信息不能共享,无法实现高效、快捷的信息交流等。

自从发现电以来,电信号作为现代通信的基本承载方式,在通信领域发挥了极其重要的作用。通信从传统电路交换演化为基于分组交换的现代信息通信,且能支持终端和网络的移动;在应用方面,从仅有的话音通信演化为集话音、数据、图像于一体的多媒体通信系统。通信作为人类社会的神经系统,对社会经济的发展及个人生活都产生了深远的影响。

1.1 无线通信的起源

无线通信源于电的发现及其本质规律的认知。200多年来,很多著名科学家从发现电,到形成系统的电磁场理论、现代通信系统原理等作出了重要贡献。富兰克林首先发现电的存在;法拉第发现了电磁感应现象;麦克斯韦建立了电磁场理论,并预言了电磁波的存在;赫兹利用实验证实了电磁波的存在;马可尼首次实现了无线通信;贝尔获得了美国的电话专利;奈奎斯特提出了抽样定理,为数字通信奠定了基础等,这些开创性的工作奠定了现代通信技术的基础,开辟了信息交流的新纪元。

无线通信顾名思义,就是没有通信线路的通信形式,通过电磁波利用空气传播信息。从电磁波频段来看,现在几乎所有的频段均可用于通信,包括电磁波、微波、红外线、可见光、紫外线、X射线等,目前太赫兹已经进入研究领域,通信可用的频率范围越来越广泛。

在研究的过程中,研究人员发现电磁波具有以下特性:

(1) 无线频谱是稀缺资源,无线电频谱须由区域性或全球性的管理机构控制。工作于特定频段的区域性或全球性无线通信系统须遵守相应管理机构对这一频段作出的种种规定。在几个GHz的频段上,无线通信器件容易做到大小合适、功耗适中、成本低廉,但这一频段的应用较多。

(2) 无线信道随机多变。当信号通过电磁波在无线信道中传播时,墙壁、地面、建筑物和其他物体会对电磁波形成反射、散射和绕射,从而导致信号通过多条路径到达接收机,造成多径效应,多径效应会导致信号的衰落。若发射机、接收机或周围的物体在运动,多径反射和衰减的变化将使接收信号经历随机波动。在有线通信中信号的传输过程仅有衰减和噪声的干扰,接收端的信号相对稳定且没有多径效应和随机波动。无线信道的多径效应和时变特性限制了无线信道的频带利用率。

(3) 无线干扰。由于无线电波能全向传输,导致一定区域范围内的无线信号可相互干扰,为克服干扰必须把共享信道分成若干互不干扰的子信道,再分配给各个用户,限制了无线通信系统的容量;此外,无线电波能全向传输的特性也使无线通信的安全难以保证,任何人通过射频频天线可轻松地截获电波。

多年来,研究人员为克服无线干扰、应对信道的时变特性,充分利用频率资源等进行了不懈的努力,实现了全球范围内的宽带移动通信。

1.2 早期的无线通信

19世纪揭示了电及电磁场的本质,从19世纪末至20世纪上半叶,无线通信进入了早期的应用阶段,主要的应用包括无线电报、扩频通信、微波通信等。在这一时期无线通信主要以大功率发射机为研究目标,试图使无线信号传得更远,实现长距离通信。

1. 无线电报

早期的无线通信通常采用大功率的发射台,无线传输距离均在几十公里以上,如早期的无线电报采用大功率的发射台,将信息发送至遥远的接收方。

19世纪上半叶,许多科学家从事无线通信的研究。莫尔斯在1837年成功地发明了电码,建立了长距离的通信网和横跨大西洋的电缆,但架电线、铺电缆十分困难。

1895年,马可尼在自家的花园里成功地进行了无线电波传递实验;1898年在英吉利海峡两岸成功地进行了无线电报跨海试验,通信距离为45km;1899年又建立了106km距离的通信联系。许多科学家认为无线电波应和光一样,沿直线传播,且地球表面是弯曲的,所以无线信号无法跨越大西洋到达彼岸。但马可尼从远距离无线电波的成功实践和发射台一端接地的事情出发,坚信无线电波可能沿地球表面进行长距离的传播。1900年10月,马可尼在英国建立了一座强大的发射台,采用10kW的音响火花式电报发射机;1901年12月,马可尼在加拿大用风筝牵引天线,成功地接收到了来自大西洋彼岸的无线电报,最终证实了自己的想法。1909年无线电报已经在通信领域中得到了广泛的应用,许多国家的军事要塞、海港船舰都装备有无线电报设备。

2. 大区制通信

大区制蜂窝的概念可追溯到1915年在纽约和旧金山之间建立的无线话音传输,早期的无线通信系统通常在其覆盖区域中心设置大功率的发射机,采用高架天线把信号发送到整个覆盖地区(半径可达几千米)。这种系统能提供给用户使用的信道数极为有限,无法满足用户的需要,例如,20世纪70年代在美国纽约开通的IMTS系统,仅能提供12对信道,即网中仅允许12对用户同时通话。

20世纪40—60年代,出现了具有拨号功能、半双工功能的无线通信系统,但主要应用于专用通信。无线通信系统基于噪声受限原理,采用与无线广播和电视广播相同的方法,即系统设计成以最大信号覆盖整个服务区域,通过简单地使用高功率发射机提供一个足够的衰落冗余,以保证在最深瑞利情况下,接收机也能接收到满足要求的信号。系统天线尽量高,功率尽量大,以求有较好的信噪比和较大的基站覆盖,通常将这类系统称之为大区制。

3. 扩频通信与码分多址

20世纪40年代初,海蒂·拉玛提出希望研发能抵挡敌军电波干扰或防窃听的秘密军事通信系统(Secret Communications System)。二战期间,参战各方通常采用无线信号引导鱼雷,引导鱼雷的通信信号是在一个单独的频道上传输,敌方探测到引导频道,可通过干扰无线信号,使鱼雷偏离攻击目标。海蒂设想在鱼雷发射和接收两端,同时用数个窄频信道传播信息,这些信号按一个随机的信道序列发射,接收端则按相同的顺序将离散的信号组合起来。这样对不知信道序列的接收方来说,接收到的信号就是噪声。与此同时,由于接收端只需要对数

个特殊频段的特定序列信号敏感,对常规的噪声免疫力很好,而敌方又不可能实现全频段的干扰。凭借海蒂·拉玛和乔治·安太尔的智慧以及其他科学家的帮助,这项研究得以完成,两人于1942年8月获得了美国的专利,即“扩频通信技术”。

扩频通信的思想被用于CMDA(码分多址),高通公司利用这一思想建立码分多址技术,码分多址系统通常采用直序扩频或者跳频扩频方式,采用不同的码字区分不同的用户。

4. 微波通信

微波通信使用波长为 $1\text{mm}\sim 1\text{m}$ 的电磁波进行通信,包括地面微波接力通信、对流层散射通信、卫星通信、空间通信及工作于微波波段的移动通信。

通常,由于地球曲面的影响以及空间传输的损耗,每隔 50km 左右,需设置中继站,将电波放大转发而延伸,因此,这种通信方式也称为微波中继通信或微波接力通信。长距离微波通信干线可以经过几十次中继而传至数千公里仍可保持很高的通信质量。

微波的发展与无线通信的发展是分不开的。1901年马克尼使用 800kHz 中波信号进行了从英国到北美纽芬兰的世界上第一次横跨大西洋的无线电波的通信试验,开创了人类无线通信的新纪元。20世纪20年代初,人们发现了短波通信,直到20世纪60年代卫星通信的兴起,短波通信一直是国际远距离通信的主要手段,并且对目前的应急和军事通信仍然很重要。

1931年,在英国多佛与法国加莱之间建起世界上第一条微波通信电路。第二次世界大战后,微波接力通信得到迅速发展。1955年对流层散射通信在北美试验成功。20世纪50年代开始进行卫星通信试验,60年代中期投入使用。由于微波波段频率资源极为丰富,而微波波段以下的频谱十分拥挤,为此移动通信等也向微波波段发展。此外数字技术及微电子技术的发展,也促进了微波通信逐步从模拟微波通信向数字微波通信过渡。

微波通信是20世纪50年代的产物,由于其通信的容量大而投资费用省(约占电缆投资的 $1/5$),建设速度快,抗灾能力强等优点而取得迅速的发展。20世纪40—50年代产生了传输频带较宽、性能较稳定的微波通信,成为长距离大容量地面干线无线传输的主要手段,模拟调频传输容量高达2700路,也可同时传输高质量的彩色电视,而后逐步进入中容量乃至大容量数字微波传输。

由于各波段的传播特性各异,可用于不同的通信系统。例如,中波主要沿地面传播,绕射能力强,适用于广播和海上通信;短波具有较强的电离层反射能力,适用于环球通信;超短波和微波的绕射能力较差,可作为视距或超视距中继通信。

1.3 模拟蜂窝移动通信

20世纪70年代至80年代初期,由于蜂窝理论的应用,频率复用概念得以实用化,移动通信系统才真正进入实用化。移动通信系统通常由接入网和核心网组成,接入网是指移动终端与基站间的无线接入部分,第一代移动通信系统仅支持话单业务,第二代移动通信系统则引入了数据业务。核心网是指由基站、交换、路由设备等构成的固定通信网络,以支持各种用户业务。

1.3.1 蜂窝系统

美国电报电话公司贝尔实验室的研究人员于20世纪50—60年代提出了蜂窝概念。蜂窝系统把整个服务区域划分成若干个较小的区域(Cell,在蜂窝系统中称为小区),各小区均用小功率的发射机(即基站发射机)进行覆盖,许多小区像蜂窝一样能布满(即覆盖)任意形状的服务地区。蜂窝系统基于这样的思想:传输信号的功率随着距离的增大而减小。把两个用户在空间上分隔足够远的距离,就能使他们之间的干扰非常小,这两个用户就可使用相同的频率进行各自的通信,从而使频率被充分利用,系统所能承载的用户数也因此而大量增加。

蜂窝移动通信系统基于干扰受限,通过分割小区可有效地控制干扰,相隔一定距离的基站,重复使用相同的频率,从而实现频率重用,大大提高了频谱的利用率,有效地提高了系统的容量,蜂窝电话网是迄今为止最成功的无线网络。同时由于微电子技术、计算机技术、通信网络技术及通信调制编码理论和技术的发展,移动通信在交换、信令网络体制和无线调制编码技术等方面有了长足的发展。

“蜂窝”概念的提出使无线电话系统的普及向前迈进了一大步,解决了公用移动通信系统容量大与频率资源有限的矛盾。城市地区现今的蜂窝系统大多采用很小的小区。从系统的角度看:任意大小的小区可支持的用户数仅与频带能划分的子信道有关,而与覆盖大小无关,因此对于给定的覆盖范围,采用大量微小区时,单位面积上可支持的容量要显著高于只采用少量宏小区的情形。

蜂窝小区使网络设计变得更加复杂,移动台在微小区滞留的时间较短,需快速处理切换。蜂窝小区使位置管理也变得更复杂,因为用户所在地可能被多个蜂窝小区覆盖。

1.3.2 移动性管理

尽管蜂窝系统可解决系统容量的问题,但用户希望在运动的过程中能保持通信,尤其是在蜂窝小区的边缘,从一个小区进入另一个小区时,会出现通信连接中断的情况。为解决这个问题,研究人员提出了移动性管理的概念,移动性管理是移动通信系统的核心和关键,包括位置管理和切换管理。

移动通信网实时跟踪并记录移动终端的位置信息,是移动通信系统提供各项网络服务的基础。为解决位置跟踪问题,网络内部设置了两个寄存器(即数据库),即HLR(Home Location Register,归属位置寄存器)和VLR(Visitor Location Register,访问位置寄存器)。HLR用于记录MSCS(Mobile Switching Center Server,移动交换中心服务器)和VLR(Visitor Location Register,访问位置寄存器)的地址;VLR记录位置区域标识(Location Area Identity, LAI),LAI也被记录在SIM(Subscriber Identity Module,客户识别模块)卡中,位置更新过程确保三者信息一致。移动终端在开机、位置区发生变化、周期性位置更新定时器到达等各种条件下向网络上报自己的位置信息。

用户从一个MSCS/VLR覆盖区域移动到另一个MSCS/VLR覆盖区域的位置更新过程如下:移动台从当前位置区移向另一个MSCS/VLR覆盖的无线区域时,若移动终端发现在本位置区域内接收到的无线信号减弱,而从相邻的另一个位置区域的信号增强,则向新VLR发送注册消息,告诉其具体的位置信息,MSCS/VLR收到后会对用户进行鉴权,确定网络的

合法用户后,则向 HLR 发送位置更新消息,通知“IMSI(International Mobile Subscriber Identification Number,国际移动用户识别码)号码为 $\times\times\times$ 的移动台在这里”,HLR 收到后会更新其记录的用户新的 MSCS 和 VLR 地址信息,并通知以前服务的 VLR,告诉它“IMSI 号码为 XXX 的移动台已经不在原来的地方了”,旧 VLR 删除用户数据,新 VLR 插入用户数据,位置更新完成后,VLR 和 SIM 卡中记录用户最新的位置信息。

移动性管理中的切换管理还需考虑用户在网络中移动时业务不中断。例如在高速行驶的列车上进行了长时间通话,由于行驶的列车在通话期间会穿越多个蜂窝小区及位置区域,在穿越这些蜂窝小区或位置区域时,必须进行无线接入的切换,以确保正在进行的通话不会中断。切换包括软切换和硬切换两种,无论哪种切换都依据终端所接收到的信号强度来判断是否要进行切换,为确保切换的顺利完成,研究人员基于信号强度提出了多种切换算法。这些算法可在移动通信网络、移动台辅助或移动台执行完成。

借鉴移动通信系统的移动性管理思想,研究人员提出了移动 IP(Internet Protocol,互联网协议)的方法,并正在进行实用化研究,为 Internet 支持移动通信奠定了基础。

1.3.3 多址技术

在无线通信系统中,多用户同时通过同一个基站与其他用户进行通信,必须对不同用户和基站发出的信号赋予不同特征。这些特征使基站从众多手机发射的信号中区分特定的用户,通常将这种技术称为多址技术,也称频谱共享。

多址技术是将信号空间沿着时间轴、频率轴或是码空间轴进行分解来实现的。蜂窝系统属于干扰受限系统,干扰远远大于背景噪声,系统中用户数的增加主要受干扰程度的限制,任何能减小干扰的技术都能直接提高系统容量和性能。多址技术是指把处于不同地点的多个用户接入一个公共传输媒质,实现各用户之间通信的技术。

多址技术分为频分多址(FDMA)、时分多址(TDMA)、码分多址(CDMA)、空分多址(SDMA)。频分多址以不同的频率信道来实现通信;时分多址以不同时间隙来实现通信;码分多址则是以不同的代码序列来实现通信;空分多址是以不同的方位信息来实现多址通信的。近年来,人们对正交可变扩频因子码(OVSF)进行了广泛研究,以期解决其生成方法、可用数目和复用等问题;研究人员对 CDMA/PRMA 多址协议也给予了关注,这一多址技术被视作传统分组预约多址(PRMA)协议扩展。

1.3.4 智能终端及数据业务

随着大规模集成电路技术、计算机技术及互联网的发展等,智能终端在移动通信系统中得到了广泛的研究和发展。移动智能终端拥有接入互联网能力,通常搭载各种操作系统,可根据用户需求定制各种功能。目前,常见的智能终端操作系统包括安卓、iOS 等。

现实生活中常见的智能终端包括移动智能终端、车载智能终端、智能电视、可穿戴设备等,这些终端在无线通信的支持下,可随时随地与其他的终端进行通信。智能终端的出现,改变了传统移动通信的模式和移动通信的系统架构,将移动通信的应用推向了宽带化的应用,为全 IP 通信奠定了技术基础。

1.3.5 模拟无线通信向数字无线通信发展

第一代移动通信系统以话音业务为主,但模拟移动通信系统制式不统一,业务简单,无法实现全球漫游。从20世纪80年代中期开始,欧洲推出了泛欧数字移动通信网(GSM)体系;美国和日本也制订了各自的数字移动通信体制(IS-95/DAMPS)。第二代移动通信系统除了实现了话音通信外,首次引入了低速数据业务。从1996年开始,为解决中速数据传输问题,提出了2.5代的移动通信系统,如GPRS(General Packet Radio Service,通用分组无线服务)和IS-95B。为实现简单性,第二代移动通信系统采用电路域和分组域来分别支持话音业务和数据业务。

但第二代移动通信系统的数据业务速率低,无法满足用户对数据业务的需求,为增加数据接入带宽,移动通信系统的接入带宽朝着宽带化方向演进,包括基于电路域和分组域的第三代移动通信系统(The 3rd Generation, 3G),以及仅支持分组域的四代移动通信系统(The 4th Generation, 4G),成功地实现了从电路交换到电路交换加分组交换,直到全分组交换的移动通信系统。

1.4 宽带无线通信

宽带无线通信顾名思义是要为用户提供宽带接入服务。移动通信网由AN+CN组成,CN是固定网络,AN主要涉及用户设备(UE)和演进的基站(eNB)。宽带移动通信的核心要素是提升AN的数据接入带宽。AN的数据接入带宽成为了划分每代移动通信系统的标志,如2.5G支持44Kbps的数据接入带宽;3G则支持2Mbps的接入带宽;4G支持1000Mbps的接入带宽。

为支持高速数据接入,研究人员经多年的研究,开发了多项关键核心技术,本节简要地综述主要的研究和应用进展。

1.4.1 移动通信系统中宽带无线接入

近年来,为解决移动终端到接入点的宽带通信问题,人们进行了长期的研究,提出了很多有效的可增强接入速率的理论和机制,主要包括:

1. 复用理论与技术

1) 正交频分复用

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)的概念于20世纪50—60年代提出,并于70年代公开了OFDM的专利。OFDM的基本思想是通过采用允许子信道频谱重叠,但相互间又不影响的频分复用(FDM)方法来并行传送数据。

早期的OFDM系统中,发射机和相关接收机所需的副载波阵列是由正弦信号发生器产生的,系统复杂且昂贵。1972年Weinstein和Ebert提出建议:使用离散傅里叶变换实现OFDM系统中的全部调制和解调功能,简化了振荡器阵列以及相关接收机本地载波之间严格同步的问题,为实现OFDM的全数字化方案做了理论上的准备。

20世纪80年代后,OFDM的调制技术再一次成为研究热点,Hirosaki于1981年用DFT

完成的 OFDM 调制技术,成功试验了 16QAM 多路并行传送 19.2Kbit/s 的电话线 MODEM。

20 世纪 90 年代后,OFDM 的应用又涉及了利用移动调频和单边带(SSB)信道进行高速数据通信、陆地移动通信、高速数字用户环路(HDSL)、非对称数字用户环路(ADSL)及高清晰度数字电视(HDTV)和陆地广播等各种通信系统。

正交频分复用实际上是多载波调制(Multi-Carrier Modulation, MCM)的一种。OFDM 的核心思想是:将信道分成若干正交子信道,将高速数据信号转换成并行的低速子数据流,调制到每个子信道进行传输。正交信号可在接收端采用相关技术分开,可减少子信道之间的相互干扰 ICI(信道间干扰)。每个子信道上的信号带宽小于信道的相关带宽,因此每个子信道可看成平坦性衰落,从而消除符号间干扰。由于每个子信道的带宽仅仅是原信道带宽的一小部分,信道均衡变得相对容易。

在 OFDM 传输过程中,高速信息数据流通过串并变换,分配到速率相对较低的若干子信道中传输,每个子信道中的符号周期相对增加,以减少因无线信道多径时延扩展所产生的时间弥散性对系统造成的码间干扰。由于引入保护间隔,在保护间隔大于最大多径时延扩展的情况下,可最大限度地消除多径带来的符号间干扰。如果用循环前缀作为保护间隔,还可避免多径带来的信道间干扰。

OFDM 系统是正交的子载波,可利用快速傅里叶变换(FFT/IFFT)实现调制和解调。对于 N 点的 IFFT 运算,需要有 N^2 次复数乘法,而采用常见的基于 2 的 IFFT 算法,其复数乘法仅为 $(N/2)\log_2 N$,可显著降低运算复杂度。

为消除多径所造成的 ISI(子载波之间的正交性遭到破坏而产生不同子载波之间的干扰),在 OFDM 系统的发射端加入保护间隔。在 OFDM 符号保护间隔内填入循环前缀,以保证在 FFT 周期内 OFDM 符号的时延副本所包含的波形周期个数也是整数。时延小于保护间隔的信号就不会在解调过程中产生 ISI。2005 年 12 月,OFDM 被选定为 LTE(4G)的基本传输技术,即下行采用 OFDM。

2) 空间复用技术-MIMO

空分复用(Spatial Multiplexing)工作在 MIMO 天线配置下,能在不增加带宽的条件下,相比 SISO(单输入单输出)系统成倍地提升信息传输速率,有效地提高了频谱利用率。在发射端,高速率的数据流被分割为多个较低速率的子数据流,不同的子数据流在不同的发射天线上在相同频段上发射出去。若发射端与接收端的天线阵列之间构成的空域子信道足够不同,即能在时域和频域之外额外提供空域的维度,使得在不同发射天线上发送的信号之间能相互区别,因此接收机能区分出这些并行的子数据流,而无需付出额外的频率或者时间资源。空间复用技术在高信噪比条件下能极大提高信道容量,并且能在“开环”,即发射端无法获得信道信息的条件下使用。Foschini 等人提出的“贝尔实验室分层空时”(BLAST)是典型的空间复用技术。

MIMO(Multiple-Input Multiple-Output,多输入多输出)技术指在发射端和接收端分别使用多个发射天线和接收天线,使信号通过发射端与接收端的多个天线进行发送和接收,以充分利用空间资源。通过多个天线实现多发多收,在不增加频谱资源和天线发射功率的情况下,可成倍地提高系统信道容量。

MIMO 技术由来已久,早在 20 世纪初马可尼就提出利用 MIMO 来抗衰落。在 20 世纪 70 年代有人提出将多入多出技术用于通信系统,但对无线移动通信系统多入多出技术产生巨大推动的奠基工作则是 20 世纪 90 年代由 AT&T Bell 实验室的学者完成的。