



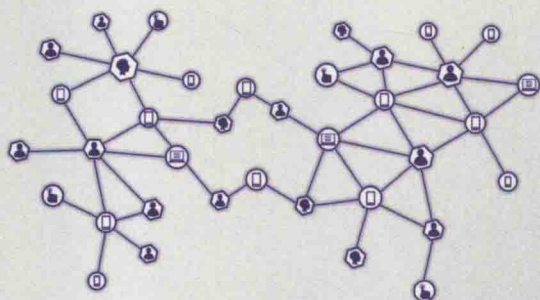
普通高等教育“十二五”规划教材

软件定义的 无线接入网络架构

与关键技术

RUANJIAN DINGYI DE WUXIAN JIERU
WANGLUO JIAGOU YU GUANJIAN JISHU

路兆铭 王鲁晗 温向明 主编



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



普通高等教育“十二五”规划教材

软件定义的无线接入 网络架构与关键技术

主 编 路兆铭 王鲁晗 温向明
编 者 陈 昕 雷 涛 马 璐 赵 星
管婉青 张 彪 刘唯毓 夏修妍



北京邮电大学出版社
[www. buptpress. com](http://www.buptpress.com)

内 容 简 介

本书采用 SDN 的思想演进未来无线接入网络,将网络控制与数据转发分离,为网络管理者提供开放操作平台,同时采用了先进的无线资源管理策略。该演进方案可以有效抑制未来无线网络密集部署带来的干扰,加快无线网络中新业务、新技术的部署速度,提升终端用户的业务体验质量,促进未来无线网络发展。

本书主要围绕以下三个关键问题:(1)未来无线接入网络能力的开放;(2)异构无线接入网络无缝融合;(3)高密度覆盖下无线业务 QoE 的保障。开展如下内容论述:(1)可编程数据面,主要讨论虚拟化可重构基站技术和动态多模基带池技术;(2)高效无线接入控制平台,主要包括对控制平台架构、无线资源抽象和网络状态感知的论述;(3)开放无线网络架构下网络管理关键技术,主要包括异构网络移动性管理,无线业务 QoE 感知技术以及弹性网络资源分配策略等。

图书在版编目(CIP)数据

软件定义的无线接入网络架构与关键技术 / 路兆铭, 王鲁晗, 温向明主编. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2015.9

ISBN 978-7-5635-4487-5

I. ①软… II. ①路… ②王… ③温… III. ①无线接入技术—研究 IV. ①TN925

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 198100 号

书 名: 软件定义的无线接入网络架构与关键技术

著作责任者: 路兆铭 王鲁晗 温向明 主编

责任编辑: 满志文

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发行部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 15.75

字 数: 392 千字

版 次: 2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-4487-5

定 价: 32.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

无线接入网络宽带化的发展和移动终端能力的不断开放,带来了无线业务的爆发式增长。未来无线接入网络,不仅需要能够支撑业务容量的高速增加,还需要融合多种异构接入方式,满足终端用户越来越苛刻的业务体验需求。针对以上所述无线接入网络中所面临的问题,在本书中,拟引入控制与数据分离的无线接入网络架构,讨论在该架构下异构网络融合和资源管理等关键技术。本书将围绕以下三个关键问题展开:

1. 未来无线接入网络能力的开放:如何解决无线网络封闭性和无线业务泛在化之间的矛盾?

在无线接入网络中,随着终端硬件计算能力的不断提升,ANDROID,IOS 等终端开放操作系统已经成为主流。开放操作系统通过给用户和开发人员提供友好开发接口,已经实现了终端能力的逐步开放,带来了终端应用的爆发式增长。与此同时,无线接入网络却仍然处于十分封闭的状态,对网络的管理和升级需要对网络设备和协议进行复杂的配置和操作,封闭的无线接入网络和开放的移动终端之间产生了一个巨大的矛盾,导致网络的升级和革新无法适应并喷式涌现的新业务。这需要将软件定义网络(SDN)的理念引入到无线接入网络中,设计可编程的数据面,抽象无线网络资源,定义可以给用户提供友好接口的控制面,实现无线接入网络能力的开放。

2. 异构无线接入网络无缝融合:如何解决未来无线接入网络中多种接入方式共存和一致性网络资源管理之间的矛盾?

在无线接入网络的发展过程中,出现了各种各样的接入方式,在我们周围的自由空间中,常常会存在着三种以上的无线接入方式。然而,事实上我们只能够选择其中的一种或者两种接入,即使我们所在的接入网络已经处于满负载运行,周围的其他接入网络处于十分空闲的状态,要通过无线接入网络之间的高效协作,在不同的无线接入方式之间实现无缝的移动性和动态的流量转移,也是十分困难的事情。因此,需要通过在不同无线接入网络之间建立统一的网络管理平台,通过不同接入方式之间的高效协作,实现用户在异构接入网络之间的无缝移动性和负载转移。

3. 高密度覆盖下无线业务 QoE 的保障:如何解决未来无线网络中不可预测的动态干扰和苛刻的用户 QoE 需求之间的矛盾?

随着用户业务数据量和种类的飞速增加,无线网络需要高密度的接入点部署来提供更高的数据速率。然而,高密度的接入点部署会给网络中的用户带来不可预测的动态干扰,影响网络中业务特别是实时业务的质量。这就需要一方面分析无线网络中动态干扰的特征及产生原因,另一方面研究容易受到此类干扰影响的业务的 QoE 感知模型,通过对无线资源的合理配置和调度,最大限度降低干扰对业务质量的影响,保障终端用户 QoE。

本书由路兆铭、王鲁晗、陈昕全文审稿并统稿,雷涛,马璐,赵星,管婉青,张彪,刘唯毓,夏修妍等参与了本书的编写工作。在此,对关心支持本书和本书编者的领导、同事和朋友们表示由衷的感谢!尤其对“网络体系构建与融合”北京市重点实验室的各位老师和同学表示感谢!

由于编者水平有限,加之时间较紧,因此疏漏瑕疵之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 无线接入网络的演进概述	1
1.1 无线接入网络简述	1
1.2 无线接入技术的演进过程	2
1.2.1 蜂窝无线通信系统的演进	2
1.2.2 无线局域接入网的演进	7
1.2.3 演进中的其他无线接入技术	10
1.2.4 未来无线接入网络需求与挑战	13
1.3 无线接入网络中的新技术	15
1.3.1 软件定义网络	15
1.3.2 虚拟化	19
1.3.3 大规模多输入/多输出技术	24
1.3.4 全双工	26
1.3.5 毫米波	27
1.4 本章小结	31
参考文献	31
第 2 章 软件定义的无线接入网络架构	33
2.1 SDN 简介	33
2.1.1 SDN 架构的几种定义	34
2.1.2 SDN 的特性	38
2.2 基于 SDN 的无线接入网络架构	39
2.2.1 可编程数据面及南向协议关键技术	40
2.2.2 无线接入网络控制器及北向协议关键技术	44
2.2.3 无线接入网络的可编程配置管理	48
2.2.4 无线资源虚拟化 WRV	51
2.3 现有无线接入网络架构	51
2.3.1 OpenADN 架构	52
2.3.2 CloudMAC 架构	55
2.3.3 OpenRoads 架构	58
2.3.4 OpenRAN 架构	59
2.4 本章小结	61
参考文献	61

第 3 章 可编程数据面及其关键技术	63
3.1 软件无线电概论	63
3.1.1 软件无线电概念	64
3.1.2 软件无线电体系结构	65
3.1.3 软件无线电关键技术	67
3.1.4 软件无线电技术优势	69
3.1.5 软件无线电技术的应用	70
3.2 通用的软件无线电平台	71
3.2.1 GNU Radio	71
3.2.2 USRP	75
3.2.3 SORA 系统	86
3.2.4 其他的 SDR 平台简介	88
3.3 软件无线电实现的各种制式接入网络	90
3.3.1 OpenBTS	90
3.3.2 OpenLTE	94
3.4 软件定义的无线接入网中的 SDR 技术	100
3.5 本章小结	103
参考文献	103
第 4 章 无线接入网络控制器及其关键技术	105
4.1 网络控制器的功能与演进	105
4.1.1 无线局域网(WLAN)中的控制器	105
4.1.2 第三代移动通信系统中的 RNC	108
4.1.3 第四代移动通信系统中的“控制器”及其功能	110
4.1.4 未来无线接入网络中的控制器	116
4.2 软件定义网络中的控制器	116
4.2.1 基于 SDN 的控制器及其功能	116
4.2.2 无线网络中的 SDN 控制器	125
4.2.3 基于 SDN 的未来无线接入网络控制器中的关键技术及研究方向	130
4.3 本章小结	135
参考文献	135
第 5 章 南向及北向协议	137
5.1 SDN 体系下的接口技术	137
5.1.1 南向网络控制接口	138
5.1.2 初步定型的南向接口协议	139
5.1.3 北向业务支撑接口	145
5.1.4 东西向扩展接口	146
5.2 SDN 的南向接口与协议	149

5.2.1	OpenFlow V1.3 协议	149
5.2.2	无线 SDN 接入网中的南向协议	156
5.2.3	OF-CONFIG:OpenFlow 配置与管理协议	160
5.3	SDN 网络的北向接口	164
5.3.1	ONF 的北向工作小组	164
5.3.2	SOAP 协议	165
5.3.3	基于 REST API 的 SDN 北向接口	170
5.3.4	REST 与 SOAP 比较	175
5.4	本章小结	176
	参考文献	176
第 6 章	异构无线接入网络间的无缝融合	178
6.1	异构无线接入网络简介	178
6.1.1	并存发展的无线接入技术	178
6.1.2	异构无线接入网络的融合	182
6.2	现有的异构无线网络移动性管理方法	183
6.2.1	异构网络的移动性管理概述	183
6.2.2	现有的异构无线接入网络间的无缝移动技术	186
6.3	基于 SDN 的无线局域网间的无缝切换	193
6.3.1	SWAN 概述	194
6.3.2	SWAN 的典型网络应用	200
6.3.3	SWAN 的其他可扩展应用场景	202
6.3.4	关键技术	204
6.4	本章小结	208
	参考文献	209
第 7 章	弹性无线资源管理	211
7.1	移动通信系统无线资源管理机制	211
7.1.1	无线资源管理组成概述	211
7.1.2	无线资源管理关键技术	213
7.1.3	无线资源分配与调度算法	216
7.2	异构网络无线资源管理	224
7.2.1	异构网络无线资源管理架构	225
7.2.2	异构网络无线资源抽象与虚拟化	229
7.3	弹性无线资源管理机制	235
7.3.1	基于 SDN 的弹性无线资源管理架构	236
7.3.2	面向业务 QoE 的弹性无线资源分配模型	239
7.4	本章小结	242
	参考文献	242

第1章 无线接入网络的演进概述

1.1 无线接入网络简述

从信息论的角度讲,通信是指信息的传递和交换。如打电话,它是利用电话线路来传递和交换消息;人和人之间的谈话,是利用声音来传递和交换消息;古时候用的“消息树”、“烽火台”和现代仍使用的“信号灯”等则是利用光的方式传递消息。通信的目的是传递信息,信息具有不同的形式,例如:语言、文字、数据、图像、符号等。随着社会的发展,信息的种类越来越多,人们对传递信息的要求和手段也越来越高。在通信的实现过程中,信息的传递是通过信号来进行的,如:红绿灯信号、狼烟、电压、电流信号等,信号是信息传递的载体。通信技术的发展历史,伴随着信息传递载体的不断变革,自从马可尼第一次向世人展示了无线电波通信的神奇,无线通信技术就开始了不断创新的发展历程。

无线通信网络,严格意义上来说,指的是接入侧使用无线传输,即网络结点到用户终端之间,部分或全部采用了无线手段,向用户终端提供电话和数据服务。典型的无线接入系统由控制器、操作维护中心、基站、固定用户单元和移动终端等几个部分组成。

(1) 控制器通过其提供的与交换机、基站和操作维护中心的接口与这些功能实体相连接。控制器的主要功能是处理用户的呼叫(包括呼叫建立、拆线等)、对基站进行管理,通过基站进行无线信道控制、基站监测和对固定用户单元及移动终端进行监视和管理。

(2) 操作维护中心负责整个无线接入系统的操作和维护,其主要功能是对整个系统进行配置管理,对各个网络单元的软件及各种配置数据进行操作;在系统运转过程中对系统的各个部分进行监测和数据采集;对系统运行中出现的故障进行记录并告警。除此之外,还可以对系统的性能进行测试。

(3) 基站通过无线收发信机提供与固定终接设备和移动终端之间的无线信道,并通过无线信道完成语音呼叫和数据的传递。控制器通过基站对无线信道进行管理。基站与固定终接设备和移动终端之间的无线接口可以使用不同技术,并决定整个系统的特点,包括所使用的无线频率及其一定的适用范围。

(4) 固定用户单元是固定终接设备为用户提供电话、传真、数据调制解调器等用户终端的标准接口-Z接口。它与基站通过无线接口相接。并向终端用户透明地传送交换机所能提供的业务和功能。固定终接设备可以采用定向天线或无方向性天线,采用定向天线直接指向基站方向可以提高无线接口中信号的传输质量、增加基站的覆盖范围。根据所能连接的用户终端数量的多少;固定终接设备可分为单用户单元和多用户单元。单用户单元(SSU)只能连接一个用户终端,适用于用户密度低、用户之间距离较远的情况;多用户单元则可以支持多个用

户终端,一般较常见的有支持 4 个、8 个、16 个和 32 个用户的多用户单元,多用户单元在用户之间距离很近的情况下(比如一个楼上的用户)比较经济。

(5) 移动终端从功能上可以看作是将固定终端设备和用户终端合并构成的一个物理实体。由于它具备一定的移动性,因此支持移动终端的无线接入系统除了应具备固定无线接入系统所具有的功能外,还要具备一定的移动性管理等移动通信系统所特有的功能。

1.2 无线接入技术的演进过程

现代意义下的无线通信起源于 1895 年马可尼成功的无线传输,几年后,马可尼跨越英吉利海峡 51 公里无线电通信试验成功,并获得英国政府颁发无线电专利,使得无线通信正式进入实用阶段。经过一个多世纪的发展,无线通信网络获得了飞速的发展,无论是无线通信的距离、通信的质量、终端的体积、终端性能还是传输的速度,都取得了令人难以置信的进步。技术的更新也带动了新的需求,从当初的寻呼系统,到 20 世纪后期语音信号,再到 21 世纪初的数字多媒体业务,每一代技术的革新也带动了新业务的发展。

如今,无线接入网络(Radio Access Network,RAN)已经遍布人们中的每一个角落,依据国际电信联盟(ITU)2013 年年初的调研显示,世界上共有 68 亿移动电话用户,其中一半以上(35 亿)在亚太地区,移动宽带用户从 2007 年的 2.68 亿大增至 2013 年的 21 亿——平均年增长率高达 40%。有预测表明,到 2019 年,全球移动宽带用户数将达到 76 亿,占移动用户总数的 80%以上,智能手机用户数有望达到 56 亿。欧洲的智能机用户数将达到大约 7.65 亿,超过其人口总数。另外,根据中国工业和信息化部于 2015 年 4 月公布的数据,我国移动用户数总规模达 12.93 亿户,新部署的 4G 移动电话用户月均净增超过 2000 万,移动宽带用户占比近 50%。在新一代无线通信网络中,加入了机器与机器(Machine To Machine,M2M)通信的架构设计,一个万物互联的时代已经为时不远。

从无线接入技术的角度来看,不仅有覆盖了全球绝大部分地区并提供广泛语音数据接入的蜂窝移动网络;有为局部热点地区提供高速率、高带宽接入的无线局域网;有适用于短距离、低成本传输的蓝牙系统;有可为全球用户提供大跨度、大范围、远距离的漫游和机动灵活的移动通信服务的卫星接入网,还有目前还处于实验室阶段的光脉冲无线传输信息技术(Light Fidelity,LiFi)。从接入的范围来看,无线接入技术可以分为广域网接入、城域网接入和局域网接入。这些技术各有所长,相辅相成,广泛运用在信息共享、人员社交、电子商务、工业自动化、紧急救援、太空探索、军事等方面,为人类的生活与科学探索带来了巨大的动力。

1.2.1 蜂窝无线通信系统的演进

早在 19 世纪末,人们就发现可以通过无线电波进行信息的传递,但是受制于通信效率、系统容量、设备精度、环境干扰等问题,无线通信在那个年代是一种昂贵、低效且不可靠的通信方式。然而随着蜂窝网概念的提出,真正解决了公用移动通信系统要求容量大与无线频谱资源有限之间的矛盾,使得移动通信系统真正意义上实用化、公众化。此外大规模集成电路技术的发展和微处理器技术的日趋成熟,为大型通信网的控制和管理提供了技术手段,也为移动通信系统的可靠性和抗干扰能力提供了技术基础。自从 20 世纪 70 年代贝尔实验室首次提出了先

进移动电话系统(AMPS),建成了蜂窝移动通信网,大大提高了系统容量。同时摩托罗拉公司在通信电子器件上的革命,使得移动终端成为可能,移动通信技术的发展走进了日新月异的时代。

蜂窝系统的基本原理是频率复用,它利用无线信号功率随着距离增大而减小的特性,允许空间上分开一定距离的两个点使用相同的频率。蜂窝系统将覆盖区域分成互不重叠的小区,每个小区使用一组信道。同一组信道可以被一定距离之外的另一个小区重复使用,如图 1.1 所示。每个小区中心放有基站控制整个小区的各种操作。蜂窝移动通信系统是无线广域网接入的典型代表,就正式运营而言,不过 30 多年的时间,就其发展历程而言,大约每 10 年就更新一代。20 世纪 80 年代我国引进了第一代通信系统 TACS(Total Access Communications System),到 90 年代初逐渐遍布全球的第二代 GSM 通信系统,再到 21 世纪初的三足鼎立的 3G 时代,以及至今基于 MIMO-OFDM 的 4G 通信系统,蜂窝网络的演进实现了个人通信的伟大蓝图,接下来正要起步的 5G 无线网络,将会有怎么样的创举呢?我们将会拭目以待。

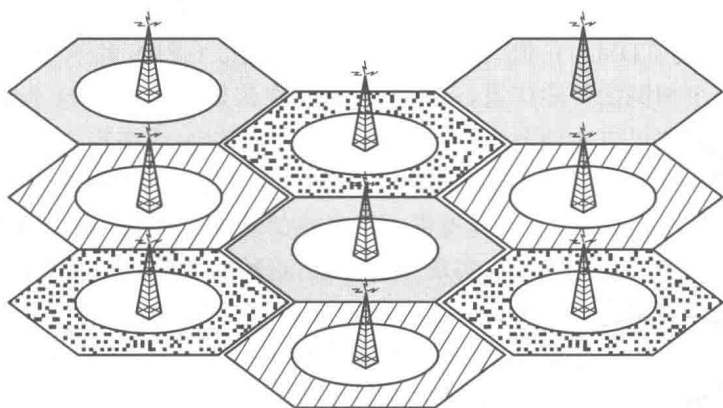


图 1.1 基于频率复用的蜂窝小区

第一代(即 1G, the first generation)移动通信系统的主要特征是采用模拟技术和频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)技术、有多种制式。我国主要采用欧洲的 TACS 系统,其传输速率为 2.4 kbit/s,其他主流技术还有北美的 AMPS 系统。在第一代蜂窝系统中,蜂窝中心可以根据信号强度灵活地分配信道给每个手持终端,允许相同的频率在完全不同的位置复用,并且不会有干扰。这使得在一个地区内,大数量的手持终端被同时支持成为可能。第一代移动通信有代表性的终端设备就是众所周知的“大哥大”。第一代移动通信系统在商业上取得了巨大的成功,但是其弊端也日渐显露出来,如频谱利用率低、业务种类有限、无高速数据业务、制式太多且互不兼容、保密性差、易被监听和盗号、设备成本高、体积大、重量大。所以第一代移动通信技术作为 20 世纪 80 年代到 90 年代初的产物已经完成了任务退出了历史舞台。模拟蜂窝移动通信的出现可以说是移动通信的一次革命。其频率复用大大提高了频率利用率并增大系统容量,网络的智能化实现了越区转接和漫游功能,扩大了客户的服务范围,但上述模拟系统总结起来有四大缺点:

- (1) 各系统间没有公共接口;
- (2) 很难开展数据承载业务;
- (3) 频谱利用率低无法适应大容量的需求;
- (4) 安全保密性差,易被窃听,易做“假机”。

第一代移动通信系统的不兼容特性给用户,尤其是欧洲国家带来了巨大的不便,欧洲各国迅速的达成一致,制定了一个统一的标准——GSM,GSM在FDMA的基础上加入了TDMA和慢跳频技术,分别提升了系统容量与安全性;话音调制采用频移键控;运行在900 MHz是1800 MHz频段。北美在第二代移动通信中产生了多种制式方案,主要有采用FDMA与TDMA相结合,采用相移键控的IS-136标准,以及采用DS-CDMA和相移键控的IS-95标准。这些新的标准形成了第二代移动通信网络(2G)。第二代移动通信网络引入数字无线电技术组成的数字蜂窝移动通信系统,提供更高的网络容量,改善了话音质量和保密性,并为用户提供无缝的国际漫游。当今世界市场的第二代数字无线标准,包括GSM、D-AMPS。PDC(日本数字蜂窝系统)和IS-95CDMA等,均仍然是窄带系统。现有的移动通信网络主要以第二代的GSM和CDMA为主,采用GSM GPRS、CDMA的IS-95B技术。同时,用户也不满足蜂窝网的语音业务,用户需求开始向无线分组数据业务蔓延,为了应对这一发展趋势,ETSI提出了通用分组无线服务技术(General Packet Radio Service, GPRS)。GPRS经常被描述成“2.5G”,也就是说这项技术位于第二代(2G)和第三代(3G)移动通信技术之间。它通过利用GSM网络中未使用的TDMA信道,提供中速的数据传递。GPRS基于分组交换,也就是说多个用户可以共享一个相同的传输信道,每个用户只有在传输数据的时候才会占用信道。这就意味着所有的可用带宽可以立即分配给当前发送数据的用户,这样更多的间隙发送或者接受数据的用户可以共享带宽。WEB浏览,收发电子邮件和即时消息都是共享带宽的间歇传输数据的服务。GPRS突破了GSM网只能提供电路交换的思维方式,只通过增加相应的功能实体和对现有的基站系统进行部分改造来实现分组交换,这种改造的投入相对来说并不大,但得到的用户数据速率却相当可观。后来为了支持高速分组数据业务,IS-95采用捆绑扩频码技术,数据提供能力可达115.2 kbit/s,全球移动通信系统(GSM)采用增强型数据速率(EDGE)技术,速率可达384 kbit/s。

第二代通信系统相较于第一代通信系统,在多个方面有了更加成熟的考虑。频谱效率方面,由于采用了高效调制器、信道编码、交织、均衡和语音编码技术,使系统具有高频谱效率。容量方面,由于每个信道传输带宽增加,使同频复用载干比要求降低至9 dB,故GSM系统的同频复用模式可以缩小到4/12或3/9甚至更小(模拟系统为7/21);加上半速率语音编码的引入和自动话务分配以减少越区切换的次数,使GSM系统的容量效率(每兆赫每小区的信道数)比TACS系统高3~5倍。话音质量方面,鉴于数字传输技术的特点以及GSM规范中有关空中接口和语音编码的定义,在门限值以上时,话音质量总是达到相同的水平而与无线传输质量无关。安全性方面,通过鉴权、加密和TMSI号码的使用,达到安全的目的。鉴权用来验证用户的入网权利;加密用于空中接口,由SIM卡和网络AUC的密钥决定;TMSI是一个由业务网络给用户指定的临时识别号,以防止有人跟踪而泄漏其地理位置。移动性方面,实现了在SIM卡基础上的漫游,漫游是移动通信的重要特征,它标志着用户可以从一个网络自动进入另一个网络。GSM系统可以提供全球漫游,当然也需要网络运营者之间的某些协议,例如计费。

数据业务需求的急剧增长,极大地推动了第三代移动通信系统(3G)的诞生。第三代移动通信系统是宽带数字通信系统。由国际电信联盟(ITU)发起,又称为国际移动通信2000标准(International Mobile Telecom System, IMT-2000)意即该系统工作在2000 MHz频段,最高业务速率可达2000 kbit/s,预期在2000年左右得到商用。它的目标是提供移动宽带多媒体业务,能实现全球无缝覆盖,具有全球漫游能力并与固定网络相兼容。它可以实现小型便携式终

端在任何时候、任何地点进行任何种类的通信。第三代移动通信技术的标准化工作由 3GPP 和 3GPP2 两个标准化组织来推动和实施。目前,在世界范围内应用最为广泛的第三代移动通信系统体制为 WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access)、CDMA2000 (Code Division Multiple Access 2000)及我国提出的 TD-SCDMA (Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access),另外还有 WiMAX-TDD、DECT 和 UMC-136。

IMT-2000 是一个全球无缝覆盖、全球漫游,包括卫星移动通信、陆地移动通信和无绳电话等蜂窝移动通信的大系统。它可以向公众提供前两代产品不能提供的各种宽带信息业务,如图像、音乐、网页浏览、视频会议等。它是一种真正的“宽频多媒体全球数字移动电话技术”,并与改进的 GSM 网络兼容。它的基本目标为:形成全球统一的频率和统一的标准;实现全球的无缝漫游;提供多种多媒体业务。ITU 对 IMT-2000 的无线传输技术提出的基本速率要求如下:

- (1) 室内环境至少 2 Mbit/s;
- (2) 室外步行环境至少 384 kbit/s;
- (3) 室外车载运动中至少 144 kbit/s;
- (4) 传输速率能够按需分配;
- (5) 上、下行链路适应于传输不对称业务的需要。

虽然 ITU 对 3G 标准的发展起着积极的推动作用,但是 ITU 的建议并不是完整的规范,各种技术细节主要是由 3GPP 和 3GPP2 两大标准组织根据 ITU 的建议来进一步完成的。在 3G 移动网络中,不仅仅是无线网络侧发生演进,核心网也向着全 IP 网络过渡。目前 3G 已经形成了三种制式三足鼎立的局面。其中,WCDMA 和 TD-SCDMA 标准由 3GPP 开发和维护,CDMA2000 标准由 3GPP2 开发和维护。

WCDMA 使用的部分协议与 2G GSM 标准一致,最适合 GSM 系统到 3G 的平滑过渡,受到广大厂商的青睐。具体一点来说,WCDMA 是一种利用码分多址复用方法的宽带扩频 3G 移动通信空中接口。WCDMA 采用直接扩频,载波带宽为 5 MHz,数据传送可达到 2 Mbit/s (室内)及 384 kbit/s (移动空间)。它采用 DS-FDD 双工模式,与 GSM 网络有良好的兼容性和互操作性。WCDMA 采用最新的异步传输模式(ATM)微信元传输协议,能够允许在一条线路上传送更多的语音呼叫,呼叫数由现在的 30 个提高到 300 个,在人口密集的地区线路将不再容易堵塞。另外,WCDMA 还采用了自适应天线和微小区技术,大大地提高了系统的容量。WCDMA 名字跟 CDMA 很相近,同时 WCDMA 跟 CDMA 关系也很微妙。两者都基于码分多址技术,都使用了美国高通(Qualcomm)的部分专利技术。一般认为 WCDMA 的提出是部分厂商为了绕开专利陷阱而开发的,其方案已经尽可能地避开高通专利。

TD-SCDMA 是由我国信息产业部电信科学技术研究院提出,与德国西门子公司联合开发。主要技术特点有:时分同步码分多址技术,智能天线技术和软件无线技术。它采用 TDD 双工模式,载波带宽为 1.6 MHz。TDD 是一种优越的双工模式,因为在第三代移动通信中,需要大约 400 MHz 的频谱资源,在 3 GHz 以下是很难实现的。而 TDD 则能使用各种频率资源,不需要成对的频率,能节省未来紧张的频率资源,而且设备成本相对较低,比 FDD 系统低 20%~50%,特别对上下行不对称,不同传输速率的数据业务来说 TDD 更能显示出其优越性。也许这也是它能成为三种标准之一的重要原因。另外,TD-SCDMA 独特的智能天线技术,能大大提高系统的容量,特别对 CDMA 系统的容量能增加 50%,而且降低了基站的发射功率,减少了干扰。TD-SCDMA 软件无线技术能利用软件修改硬件,在设计、测试方面非常

方便,不同系统间的兼容性也易于实现。当然 TD-SCDMA 也存在一些缺陷,它在技术的成熟性方面比另外两种技术要欠缺一等。因此,信息产业部也广纳合作伙伴一起完善它。

CDMA2000 是由美国高通公司提出。它采用多载波方式,载波带宽为 1.25 MHz。CDMA2000 共分为两个阶段:第一阶段将提供 14 kbit/s 的数据传送率,而当数据速度加快到 2 Mbit/s 传送时,便是第二阶段。到时,和 WCDMA 一样支持移动多媒体服务,是 CDMA 发展 3G 的最终目标。CDMA2000 和 WCDMA 在原理上没有本质的区别,但 CDMA2000 做到了对 CDMA 系统的完全兼容,为技术的延续性带来了明显的好处:成熟性和可靠性比较有保障,同时也使 CDMA2000 成为从第二代向第三代移动通信过渡最平滑的选择。但是 CDMA2000 的多载传输方式比起 WCDMA 的直扩模式相比,对频率资源有极大的浪费,而且它所处的频段与 IMT-2000 规定的频段也产生了矛盾。相对于 WCDMA 来说,CDMA2000 的适用范围要小些,使用者和支持者也要少些。三种 3G 技术主要指标比较如表 1.1 所示。

表 1.1 三种 3G 技术主要指标比较

	WCDMA	TD-SCDMA	CDMA 2000
频率间隔/MHz	5	1.6	1.25
速率/(兆码片·秒 ⁻¹)	3.84	1.28	1.2288
帧长/ms	10	10(分为两个子帧)	20
基站同步	不需要	需要	需要,典型方法是 GPS
功率控制	快速功控:上、下行 1500 Hz	0~200 Hz	反向:800 Hz
			前向:慢速、快速功控
下行发射分集	支持	支持	支持
频率间切换	支持,可用压缩模式进行测量	支持,可用空闲时隙进行测量	支持
检测方式	相干解调	联合检测	相干解调
信道估计	公共导频	DwPCH, UpPCH, 中间码	前向、反向导频
编码方式	卷积码	卷积码	卷积码
	Turbo 码	Turbo 码	Turbo 码

3GPP 在 2004 年年底启动了长期演进(Long Term Evolution, LTE)技术的标准化工作,开启了 4G 移动网络的序幕,该技术包括 TD-LTE 和 FDD-LTE 两种制式,严格来说 LTE 智能算作 3.9G,只有升级版的 LTE Advanced 才满足国际电信联盟对 4G 的要求。4G 是集 3G 与 WLAN 于一体,并能够快速传输数据、高质量、音频、视频和图像等,4G 能够以 100 Mbit/s 以上的速度下载,比目前的家用宽带 ADSL 快 25 倍,并能够满足几乎所有用户对于无线服务的要求。此外,4G 可以在 DSL 和有线电视调制解调器没有覆盖的地方部署,然后再扩展到整个地区。与之前移动通信系统相比,LTE 具有如下技术特点:支持最大带宽为 20 MHz,采用了 OFDM 技术,全面提高传输速率和频谱利用率;采用多输入/多输出(MIMO)技术利用多发射、多接收天线进行空间分集的技术,大大提高容量;系统的整体架构基于分组交换实现,同时通过系统设计和严格的 QoS 机制,保证实时业务的服务质量;系统支持多种带宽,除了 20 MHz 的最大带宽外,还能够支持 1.5 MHz、3 MHz、5 MHz、10 MHz 和 15 MHz 等系统带宽,以及“成对”与“非成对”的频谱部署,保证网络部署时的灵活性。LTE 系统网络架构更加扁平化、简单化,减少了网络结点和系统复杂度,从而减小了系统时延,也降低了网络部署和维

护成本,LTE 系统也支持与其他 3GPP 系统互操作。LTE 系统架构如图 1.2 所示。

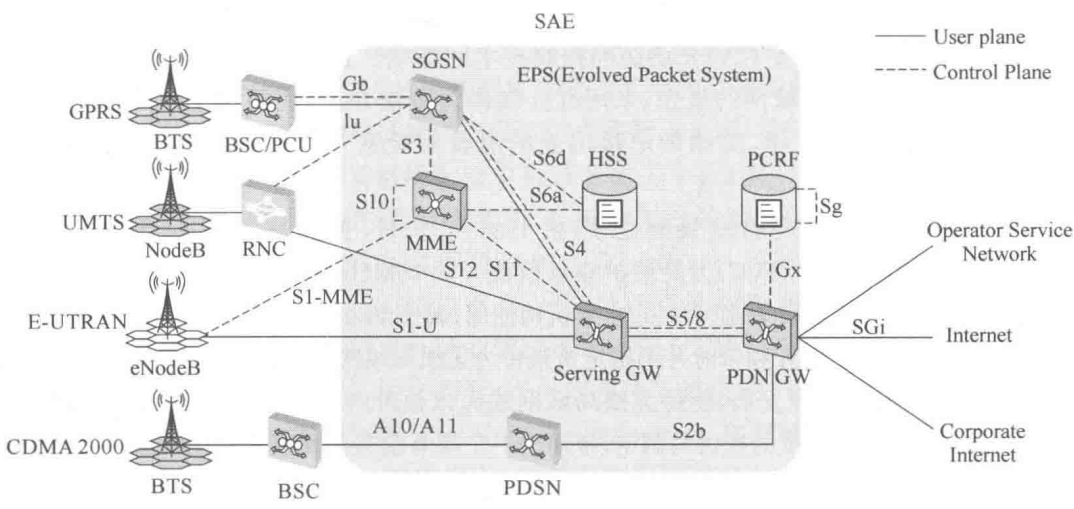


图 1.2 LTE 系统架构图

LTE 相关技术标准化接近于完成之时,3GPP 开始了 LTE-Advanced 项目,LTE-A 不仅是 3GPP 形成欧洲 IMT-Advanced 技术提案的一个重要来源,还是一个后向兼容的技术,完全兼容 LTE,是演进而不是革命。LTE-A 主要有以下几个特点:扁平化的网络体系设计,针对室内和热点游牧场景进行优化,有效支持新频段和大带宽应用,大幅提升峰值速率,改进频谱效率,支持网络的自优化和自配置,有效降低网络的成本和功耗。从 3G 到 LTE 涌现出了大量的新技术,蜂窝小区的链路容量已经逼近了香农限,从单纯的链路预算的角度来看,LTE-Advanced 目标中所要求的高速数据速率需要很高的信道信噪比,而这个信噪比在传统的广域蜂窝网络中是不可能达到的,因此 LTE-Advanced 主要强调了从 LTE 的平滑演进,不再进行大规模的技术革新,而是在 LTE 已有技术的基础上,对无线资源进行更加高效、动态的管理和网络层的优化。LTE-Advanced 中的主要技术包括多频段协同与频谱整合、中继技术、分布式天线和小区间协作技术等。

当前,我国正处于 3G 与 4G 交替的阶段,中国移动、联通、电信三家都在努力地推广 4G 网络,而学术界针对 5G 的讨论也逐渐兴起。5G 到底是一个什么样的网络,目前还没有定论,当下主流观点是基于 SDN 与 NFV 实现核心网功能,采用大规模天线阵列、超密集组网提升无线接入容量,融合现存的各种制式网络,形成全覆盖无缝的智能网络,未来蜂窝无线网络的推进势在必行。

1.2.2 无线局域接入网的演进

无线广域网在部署网络时候,更多的时候是从宏观的角度考虑,其传输速率、接入容量、覆盖范围等指标是一个统计的平均值。实际上,我们不能要求所有用户均匀地站立于基站的覆盖区域内,反而用户的分布具有极强的不均衡性,这也使得的无线资源的需求也是不均衡的,在一个宏基站中,通常存在一个或多个对资源需求极高的区域,称之为热点区域。工程人员通常采用在热点地区,增加部署无线局域网(Wireless Local Area Networks,WLAN)来提升局部的接入容量与传输速率,其覆盖范围从几十到几百米。

无线局域网的研究从 20 世纪 70 年代初就开始了,最早的无线局域网雏形系统可追述到

1971年由夏威夷大学设计的 ALOHAnet,它采用了无线接入的最早的 Aloha 随机接入方式,也构成了无线局域网载波侦听多路访问/冲突避免(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance,CSMA/CA)介质访问控制技术的基础。1979年,瑞士 IBM Rueschlikon 实验室首先提出了无线局域网的概念,采用红外线作为传输介质,主要用于生产车间,降低布线难度与电磁干扰。1980年,美国加利福尼亚的惠普实验室开启了第一个无线局域网研究项目。

无线局域网里程碑式的发展标志是在 1985 年 5 月,美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission,FCC)为局域扩频通信而开放 ISM(Industrial Scientific Medical)频带。此频段主要是开放给工业、科学、医学三个主要机构使用,属于 Free License,并没有所谓使用授权的限制。虽然 FCC 在开放 ISM 频带时并不指定该频带为无线局域网的特许频带,但是由于近年来无线局域网技术及产品的迅速发展,使得无线局域网成为该频带内最主要的产品。随着国际上,欧洲、美国等对无线局域网标准的探讨与制定,带动出一个很有前景的无线局域网市场。虽然目前已有的无线局域网产品大部分仍工作在 ISM 频带内,但也并不是所有的无线局域网都会在该频带内,如欧洲 ETSI 制定的 HIPERLAN 标准所用的频带为 5.15~5.30 GHz 和 17.1~17.3 GHz。

目前,从事无线局域网标准化工作的机构主要有三个,即 ETSI、IEEE 和 WINFORUM。ETSI 下设两个分会 RES-3/DATA 和 RES-10,分别从事数字增强无绳通信(DECT)标准和 HIPERLAN 标准。DECT 标准于 1992 年提出是一个开放型的、不断演进的数位通信标准,主要用于无绳电话系统,可为高用户密度,小范围通信提供话音和数据高质量服务无绳通信的框架;HIPERLAN 标准始于 1991 年,有 5.15~5.30 GHz 和 17.1~17.3 GHz 两个频段,5 GHz 频段的标准已于 1995 年 1 月完成,于 1996 年初获得批准,数据速率大约 24 Mbit/s,支持多媒体通信;17 GHz 频段的标准工作将提供 155 Mbit/s 的数据速率,支持 ATM。IEEE 机构的无线局域网协议族 IEEE 802.11 标准化工作始于 1990 年,于 1997 年 6 月获得通过。该标准采用 ISM 频带中的 2.4 GHz 频段,规范了在物理层(Physical Layer,PHY)与媒体访问控制层(Media Access Control Layer,MAC)的标准,数据速率可达到 1 Mbit/s,2 Mbit/s。目前 IEEE 802.11 协议已经扩展成一系列协议,成为一个庞大的协议族。802.11 协议族也成为当前应用最广泛的无线局域网标准。

无线局域网协议至今已经经历了多代演进,最初无线局域网呈现百家争鸣,多种协议共同发展的状态,最近则呈现 IEEE 802.11 一家独大的态势。IEEE 802.11 协议族以及独特的技术是市场号召力,成为当前无线局域网技术的事实标准。自从 1997 年 IEEE 制定出第一个无线局域网标准 IEEE 802.11 标准以来,基于 802.11 标准的无线局域网已经历经五代演进。IEEE 802.11 是第一代无线局域网标准之一,也是国际电气和电子工程师联合会(IEEE)发布的第一个无线局域网标准,是其他 IEEE 802.11 系列标准的基础标准。该标准定义了物理层和介质访问控制 MAC 协议的规范,允许无线局域网及无线设备制造商在一定范围内建立互操作网络设备。现在常常把 IEEE 802.11 作为无线局域网的代名词。

第一代 IEEE 802.11 标准有两个版本:1997 年版和后来补充修订的 1999 年版,即 802.11a。IEEE 802.11 无线网络标准规定了 3 种物理层传输介质工作方式。其中 2 种物理层传输介质工作方式在 2.4~2.4835 GHz 微波频段(ISM 频段),采用扩频传输技术进行数据传输,包括跳频序列扩频传输技术(Frequency-Hopping Spread Spectrum,FHSS)和直接序列扩频传输技术(Direct Sequence Spread Spectrum,DSSS)。另一种方式以光波段作为其物理层,也就是利用红外线光波传输数据流。在 IEEE 802.11 的规定中,这些物理层传输介质中,FHSS 及红外线技术的无线网

络则可提供 1 Mbit/s 传输速率(2 Mbit/s 为可选速率),而 DSSS 则可提供 1 Mbit/s 及 2 Mbit/s 工作速率。修订版本的 IEEE 802.11a 标准,将工作频率由原来的 2.4 GHz 变为了 5 GHz,因此各热点间的冲突概率变小,物理层速率最高可达 54 Mbit/s,传输层速率最高可达 25 Mbit/s。然而由于 802.11a 标准推出的时间很迟,FCC 也没有及时地为其批准足够的频率资源,导致 802.11a 的使用范围越来越窄,直到双频,双模式或者三模式的无线网卡出现,情况才有所好转。

IEEE 802.11b 是当前无线局域网标准中最著名的一个,也是当前最为普及的标准,绝大多数的 WiFi 都指的是 802.11b 的无线局域网(WiFi 是无线局域网联盟的商业商标,而不是标准)。其工作依然在 2.4 GHz,最高速率可以到达 11 Mbit/s,另外也可根据实际情况采用 5.5 Mbit/s、2 Mbit/s 和 1 Mbit/s 自适应速率。802.11b 的典型覆盖距离在室外是 300 米,在室内最长为 100 米,基本满足了热点区域的覆盖需求,并且支持在区域内的异频部署,有三个 2.4 GHz 互补重叠的频段,以提高用户容量,在一定程度下提供用户的漫游与切换服务。该标准运作模式基本分为两种:点对点模式(point to point mode)和基础设施模式(infrastructure mode)。点对点模式是指站点(如:无线网卡)和站点之间的通信方式。只要 PC 插上无线网卡即可与另一具有无线网卡的 PC 连接,对于小型的无线网络来说,是一种方便的连接方式,最多可连接 256 台 PC。而基本模式是指无线网络规模扩充或无线和有线网络并存时的通信方式,这是 802.11b 最常用的方式。此时,插上无线网卡的 PC 需要由接入点与另一台主机连接。接入点负责频段管理及漫游等指挥工作,一个接入点最多可连接 1024 台设备(无线网卡)。当无线网络结点扩增时,网络存取速度会随着范围扩大和结点的增加而变慢,此时添加接入点可以有效控制和管理频宽与频段。无线网络需要与有线网络互连,或无线网络结点需要连接和存取有线网的资源和服务器时,接入点可以作为无线网和有线网之间的桥梁。由于该协议对应硬件价格低廉,部署成本低,且能够提供基本满足用户在网页,即时消息方面的需求,802.11b 协议目前在市场上仍然占据着很大的比例。802.11 标准发展进程如图 1.3 所示。

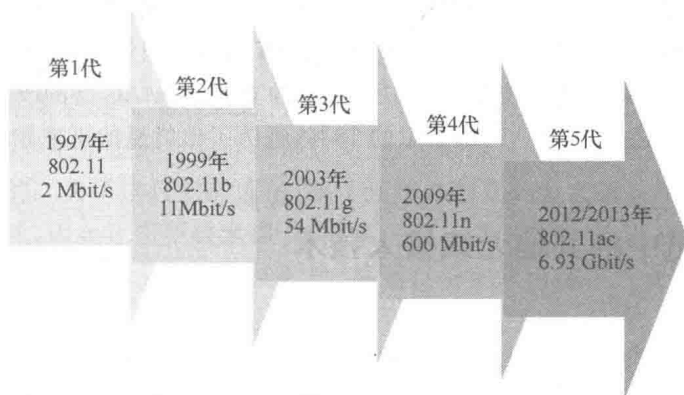


图 1.3 802.11 标准发展进程

尽管如此,面对网络技术的迅猛发展,以及人们对数据传输速度的渴望,2003 年 7 月,IEEE 再推更高速率的 802.11g 无线局域网标准作为第三代无线局域网标准,既实现了 802.11b 的远距离信号覆盖,又实现了 802.11a 的高传输速率。其关键技术大致有 3 种,直序列扩频调制技术及补码键控技术、包二进制卷积(Packet Binary Convolutional Code,PBCC)和正交频分复用技术(Orthogonal Frequency Division Multiplexing,OFDM)。IEEE 802.11g 也工作在 2.4 GHz 频段,运用了 OFDM 调制技术,IEEE 802.11g 也可以实现 6 Mbit/s、9 Mbit/s、12 Mbit/s、18 Mbit/s、

24 Mbit/s、36 Mbit/s、48 Mbit/s 和 54 Mbit/s 的传输速率。由于它仍然工作在 2.4 GHz 频段,并且保留了 IEEE 802.11b 所采用的 CCK(补码键控)技术,可与 IEEE 802.11b 的产品保持兼容,高速率和兼容性是它的两大特点。虽然作为 802.11b 的后继者,但是 802.11g 的设备在 802.11b 的网络环境下使用只能使用 802.11b 标准,又因为之前 802.11b 设备已经得到了广泛部署,因此 802.11g 的实力并没有完全显现。

802.11g 标准推出后,为实现更高带宽和质量的 WLAN 服务,能真正达到以太网的性能水平,IEEE 与 2004 年成立了 802.11n 任务组,但由于利益和技术等各方因素,直至 2009 年 802.11n 标准才算正式确立下来,迫使第四代 802.11 标准推迟了两年。新的 802.11n 标准,引入了 MIMO 与 OFDM 技术,使传输速率由 802.11a/g 的 54 Mbit/s 提升至 300 Mbit/s(理论速率最高可达 600 Mbit/s)。此外,802.11n 通过多组独立天线组成的智能天线阵列,可以动态调整波束,保证让 WLAN 用户接收到稳定的信号,并可以减少其他信号的干扰。因此其覆盖范围可以扩大到好几平方公里,使 WLAN 移动性极大提高,更加强了信号的稳定性。为了实现技术的兼容性,802.11n 引入了可编程数据面的思想,采用软件无线电技术,使得不同系统的基站和终端都可以通过这一平台的不同软件实现互通和兼容,这意味着 WLAN 将不但能实现 802.11n 向前后兼容,而且可以实现 WLAN 与无线广域网络的结合,比如 3G。

无线局域网的 5G 比蜂窝网络的 5G 来的更早些。面对高清、4K 视频、游戏等高宽带业务,802.11n 标准显然已有些力不从心。于是 2013 年 6 月,Wi-Fi 联盟宣布正式发布 IEEE 802.11ac 无线标准认证,标志着 5G Wi-Fi 时代终于来临。5G Wi-Fi 即 802.11ac 与 802.11n 相比,是一个更快更稳定的 Wi-Fi 版本,传输速率每秒高达 1.3Gigabits(理论值),是现有 802.11n 标准网速的两倍。另外,802.11ac 标准利用一种“波束形成”的新技术,可将无线信号集中到一个指定区域,使文件下载速度更快、点对点分享、视频音乐的缓冲也将更为流畅。802.11ac 的设备采用了工作在频率 5 GHz 的芯片,能同时覆盖 5 GHz 和 2.4 GHz 两大频段。除了更快,它还能改善无线信号覆盖范围小的问题,虽然 5 GHz 比 2.4 GHz 的衰减更强,难穿过障碍物,但由于覆盖范围更大,考虑到信号会产生折射,新标准反而会更容易使各个角落都能收到信号。802.11ac 继承了大部分 802.11n 的技术,最大的区别就体现在对 5 GHz 频段的支持上,MAC 层的改进并不多。2014 年,802.11ac 占全球 1.76 亿接入点(AP)出货量的 18%,经历了出货量的迅速增长,逐步成为无线局域网的主流标准。

1.2.3 演进中的其他无线接入技术

1. WiMax

WiMax(Worldwide Interoperability for Microwave Access),即全球微波互联接入。WiMax 也称 802.16 无线城域网或 802.16,也是由 IEEE 提出的一项技术标准。WiMax 是一项新兴的宽带无线接入技术,能提供面向互联网的高速连接,数据传输距离最远可达 50 km。WiMax 还具有 QoS 保障、传输速率高、业务丰富多样等优点,其技术起点较高,采用了代表未来通信技术发展方向的 OFDM/OFDMA、AAS、MIMO 等先进技术。WiMax 是又一种为企业和家庭用户提供“最后一英里”的宽带无线连接方案。目前 WiMax 已经成为 3G 的第四个标准,号称 3.5G。WiMax 曾对 3G 可能构成的威胁,使 WiMax 在一段时间备受业界关注。

WiMax 技术能够提供比 3G 更高速的宽带接入,并且其实现的 50 公里的无线信号传输距离是无线局域网所不能比拟的,网络覆盖面积是 3G 发射塔的 10 倍,只要少数基站建设就能实现全城覆盖,这样就使得无线网络应用的范围大大扩展。但是,WiMax 严格意义讲不是