



第三届全国期刊奖百种重点期刊 中国科技核心期刊
工信部优秀科技期刊 中国五大文献数据库收录期刊

ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN

中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

www.zte.com.cn/magazine

2014年4月 • 第2期

专题：第5代移动通信需求与技术探索



《中兴通讯技术》第6届编辑委员会委员名单

主 任 钟义信（北京邮电大学教授）

副主任 侯为贵（中兴通讯股份有限公司董事长） 糜正琨（南京邮电大学教授）

编委（按姓氏拼音排序）

- 艾 波** 中国联通学院党委书记,北京大学兼职教授,北京邮电大学兼职教授
- 曹淑敏** 工信部电信研究院院长、教授级高工
- 陈建平** 上海交通大学电子信息与电气工程学院电子工程系教授
- 陈 杰** 中兴通讯股份有限公司高级副总裁
- 陈前斌** 重庆邮电大学通信与信息工程学院执行院长、教授
- 陈锡生** 南京邮电大学通信与信息工程学院教授
- 程时端** 北京邮电大学网络技术研究院教授
- 高 文** 中国工程院院士,北京大学信息科学技术学院教授
- 葛建华** 西安电子科技大学通信工程学院副院长、教授
- 顾晓仪** 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院教授
- 郭云飞** 解放军信息工程大学副校长
- 管海兵** 上海交通大学电子信息与电气工程学院副院长、教授
- 侯为贵** 中兴通讯股份有限公司董事长
- 何士友** 中兴通讯股份有限公司执行副总裁
- 洪 波** 中兴发展股份有限公司总裁
- 纪越峰** 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院执行院长、教授
- 江 华** 中兴通讯股份有限公司副总裁
- 蒋林涛** 工信部电信研究院科技委主任、教授级高工
- 雷震洲** 工信部电信研究院科技委副主任、教授级高工
- 李红滨** 北京大学科研部副部长,信息科学技术学院教授
- 李建东** 西安电子科技大学副校长、教授
- 李乐民** 中国工程院院士,电子科技大学通信与信息工程学院教授
- 李融林** 华南理工大学电子与信息学院教授
- 李少谦** 电子科技大学通信抗干扰技术国家重点实验室主任、教授
- 李 星** 清华大学电子工程系教授,CERNET网络中心副主任
- 马建国** 天津大学电子信息工程学院院长、教授
- 孟洛明** 北京邮电大学职称评审委员会主任,学术委员会副主任,网络与交换技术国家重点实验室主任、教授
- 糜正琨** 南京邮电大学通信与信息工程学院教授
- 庞胜清** 中兴通讯股份有限公司高级副总裁
- 史立荣** 中兴通讯股份有限公司总裁
- 孙枕戈** 中兴通讯股份有限公司副总裁
- 孙知信** 南京邮电大学物联网学院院长、教授
- 谈振辉** 北京交通大学原校长,电子信息工程学院教授
- 唐雄燕** 中国联通网络技术研究院首席专家、教授级高工
- 田文果** 中兴通讯股份有限公司执行副总裁
- 童晓渝** 中电科软件信息服务有限公司董事、高级副总裁
- 王 京** 清华大学教授,清华大学信息科学与技术国家实验室副主任
- 王文东** 北京邮电大学网络技术研究院副院长、教授
- 王晓明** 中兴通讯微电子研究院院长
- 王育民** 西安电子科技大学通信工程学院教授
- 韦乐平** 中国电信集团公司科技委主任、教授级高工
- 卫 国** 中国科学技术大学信息科学技术学院教授
- 邬贺铨** 中国工程院原副院长、院士
- 吴克利** 香港中文大学电子工程系教授
- 徐安士** 北京大学信息科学技术学院教授
- 须成忠** 美国韦恩州立大学电子与计算机工程系主任、教授,中科院深圳先进技术研究院首席科学家、云计算中心主任
- 续合元** 工信部电信研究院通信标准研究所总工、教授级高工
- 薛一波** 清华大学CPU&SOC中心副主任,信息技术研究院研究员
- 杨义先** 北京邮电大学信息安全中心主任,灾备技术国家工程实验室主任、教授
- 杨 震** 南京邮电大学校长、教授
- 尤肖虎** 东南大学信息科学与工程学院院长、教授
- 乐光新** 北京邮电大学信息与通信工程学院教授
- 张宏科** 北京交通大学下一代互联网国家工程实验室主任、教授
- 张 平** 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室主任、教授
- 张同须** 中国移动通信集团设计院副院长兼总工
- 张智江** 中国联合网络通信有限公司网络建设部总经理、教授级高工
- 赵厚麟** 国际电信联盟(ITU)副秘书长、俄罗斯电信科学院院士
- 赵慧玲** 中国电信股份有限公司北京研究院总工程师、教授级高工
- 赵先明** 中兴通讯股份有限公司执行副总裁
- 郑纬民** 清华大学计算机系高性能计算研究所所长、教授,中国计算机学会理事长
- 钟义信** 北京邮电大学计算机学院教授
- 朱近康** 中国科技大学信息科学技术学院教授



目次

中兴通讯技术 总第115期 第20卷 第2期 2014年4月

专题：第5代移动通信需求与技术探索

- 02 5G 业务需求分析及技术标准进程 王志勤, 罗振东, 魏克军
- 05 基于热点城区测算中国2020年移动通信频谱需求 黄标, 王坦
- 11 面向未来移动通信的超蜂窝网络架构 赵明, 许希斌, 牛志升
- 17 面向5G基于C-RAN宏微协作的极简数据载波设计 陈亚迷, 李刚, 崔春风
- 22 采用网络编码的双向中继信道中软信息的传输方法 卢科学, 许进, 张帅
- 26 大规模MIMO无线通信关键技术 尤力, 高西奇
- 29 压缩感知技术在未来移动通信系统中的应用 王喜瑜, 鲁照华, 陈宪明
- 33 第5代移动通信测试技术 杨旸, 王浩文, 许晖

专家视点

- 36 移动的代价：无线通信有线化 卫国

运营应用

- 41 LTE FDD的覆盖增强技术 李强华, 王彬

研究论文

- 45 移动智能终端操作系统技术发展 王跃, 许志远, 严珏玮
- 49 遗传算法在用户感知评估建模中的应用 罗荣慧, 马志斌

开发园地

- 53 分布式链路聚合技术及其应用 魏月华, 杜玉强, 黄璐

系列讲座

- 58 智能无线电技术(2) 宋腾辉, 窦峥, 林云

综合信息

全球LTE用户数2019年将超过20亿(44)

期刊基本参数: CN 34-1228/TN*1995*b*16*64*zh*P*¥ 20.00*15000*14*2014-04

办刊宗旨

以人为本, 荟萃通信技术领域精英;
迎接挑战, 把握世界通信技术动态;
立即行动, 求解通信发展疑难课题;
励精图治, 促进民族信息产业崛起。

Contents

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol.20 No.2 Apr. 2014

Special Topic: Mobile Communication Requirements and Technology Exploration of 5G

- 02 5G Service Requirements and Progress
on Technical Standards WANG Zhiqin, LUO Zhendong, WEI Kejun
- 05 Calculating Spectrum Requirements for Urban Hotspots
in China in 2020 HUANG Biao, WANG Tan
- 11 Future Mobile Communication Oriented Hyper Cellular
Access Network Architecture ZHAO Ming, XU Xibin, NIU Zhisheng
- 17 Macro-Assisted Ultra-Lean Data Carrier
and Architectural Design CHEN Yami, LI Gang, CUI Chunfeng
- 22 A Soft Information Delivery Scheme in Two-Way Relay Channels
with Network Coding LU Kexue, XU Jin, ZHANG Shuai
- 26 Key Technologies in Massive MIMO Wireless Communication YOU Li, GAO Xiqi
- 29 Compressive Sensing in Future Mobile
Communication Systems WANG Xiyu, LU Zhaohua, CHEN Xianming
- 33 Testing Technologies for 5th Generation
Communication Systems YANG Yang, WANG Haowen, XU Hui

Expert View

- 36 The Cost of Mobility: Wireless Communication Cabling WEI Guo

Operational Application

- 41 Coverage Enhancement Technology for LTE FDD LI Qianghua, WANG Bin

Research Paper

- 45 Development of Mobile Intelligent-Terminal
Operating System WANG Yue, XU Zhiyuan, YAN Juwei
- 49 Genetic Algorithms Application in Customer Experience
Evaluation Model LUO Ronghui, MA Zhibin

Development Field

- 53 Distributed Link Aggregation and Its Applications WEI Yuehua, DU Yuqiang, HUANG Lu

Lecture Series

- 58 Intelligent Radio Technology (2) SONG Tenghui, DOU Zheng, LIN Yun

敬告读者

本刊享有所发表文章的版权,包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版版权,所支付的稿酬已经包含上述各版本的费用。

未经本刊许可,不得以任何形式全文转载本刊内容;如部分引用本刊内容,须注明该内容出自本刊。

邮购须知

本刊常年办理邮购订阅业务,欢迎订阅。订阅方法:从邮局汇款至编辑部,在汇款单上将订阅者的详细地址、收件人姓名及联系电话填写清楚,并在汇款单附言栏注明所购杂志期次及数量。

专题:第5代移动通信需求与技术探索

专 | 题 | 导 | 读

在以LTE为代表第4代移动通信正在普及应用的时候,第5代移动通信(5G)的研发已经拉开了帷幕。在过去30多年里,移动通信提高系统容量的方法主要有3个:增加无线传输带宽、提高无线传输链路的频谱效率和增加小区密度。而技术革新最多、最有成效的是无线传输技术,通过引入高阶调制和高性能信道编码等技术有效改善了频谱效率。特别是在第4代移动通信中采用了多天线技术,并通过引入空间资源改善了频谱效率。在未来10~15年,移动通信业务数据量将有数千倍的增加,我们采用什么技术来满足这个需求将成为5G研发需要面对的问题。

目前,移动通信的主要需求是来自移动互联网的发展,特别是智能终端的发展激发了移动通信数据业务量的猛增。未来将有更多类型的终端引入达到移动通信网络中,移动通信终端的数量将远远超过人口数量,数据业务成为绝对的主流。5G移动通信的主要技术突破点仍然是新频段、无线传输技术和蜂窝组网技术。5G移动通信可能采用5GHz以上的频段增加带宽,而28GHz、47GHz和60GHz将可能用于微功率小区和室内覆盖,解决高密度数据量的热点覆盖需求。大规模MIMO是一种充分利用空间资源的技术,可用于5G移动通信系统中提高频谱效率和功率效率的有效手段,当天线数量增加到上百根后也会引发一系列的技术难题。增加小区密度,多系统、多层次异构协同组网是提高单位面积数据量的最有效手段,但是,多小区的干扰协同与抑制、多系统间的协作与资源调度成为高密度异构小区的主要瓶颈,我们需要全新的思路来解决。

此外,移动通信对新技术的引入方式也在发生着本质的变化,从早期的与场景无关的普适技术到现在依场景优化的自适应技术;1G和2G使用单一技术满足所有的应用场景,无疑将只能针对最恶劣的使用场景进行优化,系统整体性低;3G和4G使用了AMC、智能天线和MIMO等技术,更加精确地利用无线传输信道的特征,可以在更多的使用场景达到最优,整体性能较高;到了5G,这个特点将更加突出,现在提出的一些新技术都是在特定场景中使用的,可达到更高的系统性能。

5G移动通信的研究才刚刚开始,本专题只是涉及了部分5G相关技术。希望通过这些论文能部分反映中国在5G移动通信领域的研发现状,并促进未来5G移动通信技术的研究。

王京

2014年2月20日

本期专题策划人



王京

清华大学电子工程系教授;清华信息科学与技术国家实验室(筹)副主任,清华大学信息技术研究院无线中心主任;“863”计划重大项目“卫星移动通信关键技术研究”总体专家组专家,“863”计划重大项目“第五代移动通信(5G)系统前期研究”总体专家组专家,国家科技重大专项“新一代宽带移动通信网”总体专家组专家,工业和信息化部IMT-2020推进组专家,中国通信学会常务理事,北京通信学会副理事长;主要研究领域为宽带无线移动通信和卫星移动通信,包括无线传输与组网技术、大规模天线、认知无线电、分布式无线通信系统、超蜂窝网络和智能协同通信等;曾获国家科技进步二等奖和国防科技二等奖;发表论文150余篇,申请发明专利30余项。

2014年第1—6期专题计划

- 1 社会网络技术、应用与市场**
王玉峰 南京邮电大学通信与信息工程学院教授
- 2 第5代移动通信需求与技术探索**
王京 清华大学信息技术研究院教授
- 3 网络以及功能虚拟化**
虞红芳 电子科技大学通信与信息工程学院教授
李乐民 电子科技大学通信与信息工程学院院士
- 4 智慧城市**
祁庆中 上海信天通信有限公司总经理
- 5 下一代无源光网络技术与应用**
陈雪 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院教授
- 6 可见光通信技术**
陈建平 上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室教授

5G 业务需求分析及技术标准进程

5G Service Requirements and Progress on Technical Standards

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 02-0002-003

摘要: 认为移动互联网和物联网是第五代移动通信技术(5G)发展的主要驱动力;无线流量 20 年上万倍的增长、追求极致的用户体验是 5G 面临的直接挑战。认为 5G 系统与第四代移动通信技术(4G)相比较,传输速率、时延、连接数、流量密度、移动性等成为关键技术指标;预计到 2020 年中国还需要 600 MHz 以上的频谱资源支撑宽带业务的发展。认为向 5G 发展存在 3 种技术路线:LTE-Advanced 演进、下一代无线局域网及可能的革命性路线。

关键词: 5G; 业务需求; 标准化; 频谱; 移动互联网; 物联网

Abstract: Mobile internet and internet of things are considered the main driving forces of 5G. Wireless data traffic will increase a thousand-fold over the next 20 years, and perfect user experience will be expected. These are challenges for 5G. Transmission rate, latency, number of connections, traffic volume density, and mobility will be the KPIs of 5G. China requires more than 600 MHz of spectrum to meet the demand of broadband services going into 2020. There are three technical roadmaps for 5G: LTE-Advanced evolution, next-generation WLAN, or some other revolutionary technology.

Keywords: 5G; service requirement; standardization; spectrum; mobile Internet; Internet of things

王志勤/WANG Zhiqin
罗振东/LUO Zhendong
魏克军/WEI Kejun
(工业和信息化部电信研究院通信标准
研究所, 北京 100191)
(Institute of Communication Standards
Research, China Academy of Telecom
Research, MIIT, Beijing 100191, China)

器对机器通信(M2M)连接数近 15 亿个;与 2010 年相比,中国移动数据流量增长 350 倍,移动用户月均流量增长 130 倍,其中视频类业务流量占比将超过 70%。如果面向 2030 年,则中国的移动数据流量增长将超过 4 万倍,移动用户月均流量增长 1 万倍,上海、北京等发达城市和西单、国贸等热点区域的增长幅度将更大。具体如图 1、图 2 所示。

业务应用驱动,提升用户体验成

移动通信大约每 10 年推出新一代的技术。2010 年国际电联 (ITU) 确定 LTE-Advanced 为第四代移动通信技术(4G)国际标准。目前,4G 已在全球开始规模商用,业界开始启动面向 2020 年及未来的第五代移动通信技术(5G)的研究工作。5G 研究处于初期阶段,主要集中在 5G 需求、频谱、关键技术及预标准化^[1-15]。

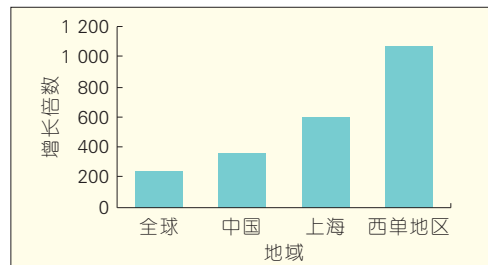
1 5G 业务需求及主要技术挑战

移动互联网和物联网市场与业务应用的迅猛发展成为推动 5G 发展

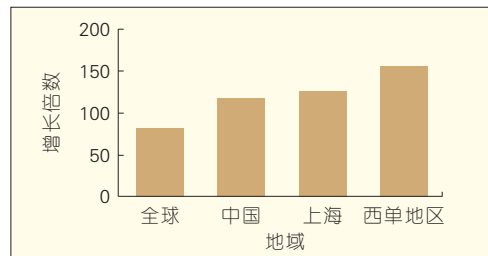
的主要驱动力。这迫切要求 5G 具有媲美光纤的接入速率、千亿设备的连接能力、享受本地操作的实时体验、随时随地的宽带无线接入能力,促使 5G 成为构建泛信息化社会的重要基础设施。

1.1 市场与业务需求

智能终端、连接数激增,无线流量 20 年呈万倍增长。智能终端的普及、移动应用的蓬勃发展,促使移动互联网呈现出爆炸式发展。而物联网面向多种行业应用,呈现出多样化发展趋势,其泛在化特征日益显现。根据工业和信息化部电信研究院的预测,到 2020 年,中国的移动用户数将突破 22 亿户,物联网机



▲ 图 1 2010—2020 年移动数据流量增长倍数



▲ 图 2 2020—2030 年移动数据流量增长倍数

收稿日期: 2014-01-02
网络出版时间: 2014-03-02
基金项目: 国家科技重大专项
(2013ZX03003016)

为 5G 技术挑战的源动力。移动互联网领域,智能终端显示、计算等能力不断提升,云计算模式日渐成熟,增强现实等新型应用成为主流。用户追求极致的使用体验,要求获得与光纤相似的接入速率、媲美本地操作的实时体验以及随时随地的宽带接入能力。物联网领域,服务对象将扩展至各行业用户,M2M 终端数量将大幅激增,应用无所不在,与行业应用的深入结合将导致应用场景和终端能力呈现巨大的差异。这使得物联网行业用户提出了灵活适应差异化、支持丰富无线连接能力和海量设备连接的需求。此外,网络与信息安全的保障,低功耗、低辐射,实现性能价格比的提升成为所有用户的诉求。

1.2 5G 技术主要应对的挑战

5G 主要业务包括移动互联网及物联网业务应用。参考 3GPP 业务分类,我们对移动互联网业务进行了分类,并新增了 M2M 类业务。具体分类如图 3 所示。

移动互联网的流类和会话类业务,由于超高清、3D 和浸入式显示方式的出现,用户体验速率对无线技术形成新的挑战,例如 8K(3D)的无压缩视频传输速率可达 100 Gb/s,经过百倍压缩后,也需要 1 Gb/s。

交互类业务也发展迅猛,如 Juniper 公司预测 2018 年增强现实用户达 2 亿户,IDC 公司预测 2017 年游戏下载量将占总下载量的 40%。对交互类挑战最大的是交互的快速响应能力,要达到用户对时延基本无感知的使用体验。

传输类业务在采用云存储方式之后,大量数据需要在无线接口传送,用户希望能够达到与光纤可类比的接入体验,这无疑对传输速率也提出了挑战。在消息类业务中,OTT 消息类业务将逐步成为主导性应用,其大量数据包频发消耗信令资源问题迫切需要解决。

物联网采集类业务以海量连接数量的激增对无线技术形成挑战,而控制类业务中,如车联网、自动控制等时延敏感业务要求时延低至毫秒量级,且需要保证高可靠性。

哪些场景及业务应用是现有 4G 技术无法实现,而需要在 5G 阶段重点解决的? 5G 技术需要达到的技术指标数值是多少? 这里,我们选择了办公室、密集住宅区、快速路、体育场等多种典型场景并结合视频播放、增强现实、OTT 消息、车联网等多种典型应用进行综合分析,设定每种场景下典型的业务应用类别,确定业务模型和用户模型,计算出受限的技术指标值。经过每种场景的分析,在一些场景下,无线技术成为瓶颈,存在挑战的主要场景存在于密集住宅区的用户体验速率、办公室场景下的高流量密度、地铁场景下的连接数密度、高铁环境的高速移动性等指标。

经过分析,我们认为 5G 与 4G 相比较,需满足以下关键技术指标:

- 传输速率提高 10 ~ 100 倍,用户体验速率 0.1 ~ 1 Gb/s,用户峰值速率可达 10 Gb/s。
- 时延降低 5 ~ 10 倍,达到毫秒量级。
- 连接设备密度提升 10 ~ 100

倍,达到每平方公里数百万个。

- 流量密度 100 ~ 1 000 倍提升,达到每平方公里每秒数十太比特。

- 移动性达到 500 km/h 以上,实现高铁环境下的良好用户体验。

此外,能耗效率、频谱效率及峰值速率等指标也是重要的 5G 技术指标,需要在 5G 系统设计时综合考虑。

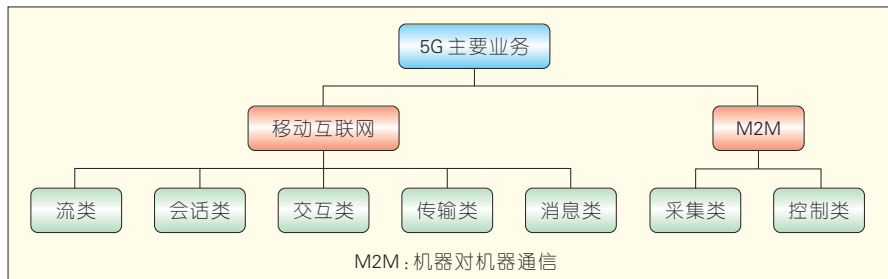
2 面向 2020 年的频谱需求研究

频谱资源是引领无线移动通信持续创新发展的重要动力源泉。由于频谱资源是国际共用、国家支配的稀缺性战略资源。因此,需要实现频谱资源的科学管理,一方面,要为新的频谱需求及时规划分配资源,以促进相关行业和产业的发展;另一方面,也要对频谱需求做出合理估计,避免超前分配导致的资源浪费。

当前,中国的国际移动通信系统(IMT)包括 2G、3G 系统,以及刚商用的 4G(LTE)系统。中国为 IMT 系统划分频率总计 687 MHz,其中时分双工(TDD)频率总计 345 MHz,频分复用(FDD)频率总计 342 MHz。

面对未来巨大的移动数据业务需求,业界考虑从技术演进、频率分配、网络建设和异构网络分流等方面解决网络压力,其中,为 IMT 系统分配新的频率资源是最直接、最有效的手段之一。现有划分用于 IMT 系统的频率或将难以适应未来业务量急速发展带来的频谱缺口。目前,国际标准组织 ITU 已经着手研究为 IMT 系统分配新的频率资源。针对中国 2020 年面临的 IMT 系统频率缺口问题,各相关机构与部门已开始研究制订中国中长期的宽带无线频率规划,并积极参与到国际上关于划分新的 IMT 频率工作当中,向 ITU 提交中国在 IMT 频率需求和合适频段(SFR)方面的建议。

根据中国移动通信业务市场需求,在充分分析国际主流机构的 IMT 频谱需求测算方法基础上,结合中国



▲ 图 3 5G 业务类别

IMT 实际运营情况,中国 IMT-2020 (5G)推进组提出了适合中国国情的 IMT 频谱需求测算方法。经过计算,得出 2020 年频谱需求及对应的频谱缺口,如表 1 所示。

针于 IMT 具体频率范围,一方面,需要在低频段优质资源中,将具备 IMT 使用条件的频段充分挖掘,包括 450~470 MHz、698~806 MHz、3 400~3 600 MHz 等已经标示为 IMT 的频段,及 3 300~3 400 MHz、4 400~4 500 MHz 和 4 800~4 990 MHz 等 WRC-15 1.1 在研的候选频段;另一方面,在毫米波无线通信设备发展日渐成熟的趋势下,有必要寻求高频段潜在可用频谱资源,开展相关研究,如 6~7 GHz、26 GHz、28 GHz 等。

3 5G 技术标准路径

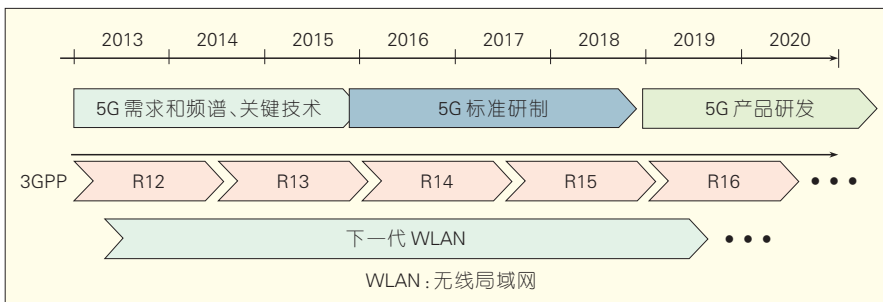
2012 年,国际电联 ITU 已启动 5G 需求、频谱及技术趋势等研究工作。欧盟、韩国等政府纷纷开始启动 5G 研究项目,积极引导技术发展,争取在新一轮的国际竞争中占据优势地位。5G 发展的阶段划分如图 4 所示。中国也在 2013 年成立了 IMT-2020(5G)推进组推进 5G 的发展。根据国际整体情况,预计 2015 年将形成 5G 愿景、关键能力需求及频谱规划,之后将启动 5G 标准化工作,并在 2020 年后开始商用。因此,“十三五”期间将是 5G 概念提出、技术标准形成、产品研发的关键期。

4G 即将进入规模商用,而 5G 是继 4G 后新一代的移动通信技术。4G 向 5G 的技术产业发展紧密衔接,存在 3 条演进路线。首先,LTE/LTE-Advanced 是事实上的全球统一 4G 标准,将会在 5G 阶段继续演进;其次,无线局域网(WLAN)具有良好的产业和用户基础,下一代 WLAN 将提升运营商业支撑能力,是一种重要补充技术;此外,我们还应特别关注可能出现的革命性 5G 技术。

LTE-Advanced 的技术标准主要在 3GPP 国际标准化组织制订。业界

▼表 1 各方法频率需求预测结果与对应缺口

需求	M.1768 系列方法	GSMA 系列方法	FCC 系列方法	IMT-2020(5G)推进组方法
2020 年需求/MHz	1 490 ~ 1 810	1 864 ~ 1 869	1 540 ~ 1 800	1 350 ~ 1 810
需求缺口/MHz	903 ~ 1 123	1 177 ~ 1 182	853 ~ 1 113	663 ~ 1 123



▲图 4 5G 发展的阶段划分

初步认为在 3GPP R14 阶段(预计于 2016 年)将启动面向 5G 的标准研究工作。目前,LTE-Advanced 特别注重热点/室内场景的优化,及与 WLAN 的融合发展。LTE-Advanced 向热点/室内(LTE-Hi)、设备间直接通信(D2D)、M2M、集群通信/公共安全等领域拓展。针对目前宽带无线大量流量源于热点与室内环境,LTE-Advanced 的重要特征正是提供密集/热点网络的解决方案。通过提升小小小区的频谱效率、运营效率、移动性,减少小区间干扰等手段来大幅度提升容量,实现业务分流、灵活的网络部署,更高效的频率复用。同时,通过网络管理、无线资源调度等紧耦合方式实现与 WLAN 的深度融合发展。

WLAN 则向高效率、可运营的方向发展。2013 年 3 月,IEEE 已经启动了下一代 WLAN 标准——高效率无线局域网(HEW)研究,旨在提升实际网络运行环境中 WLAN 的频谱效率和实际承载吞吐量。预计 HEW 标准化将于 2018—2019 年结束。

5G 无线关键技术方向包括:

(1)新型信号处理技术,如更先进的干扰消除信号处理技术、新型多载波技术、增强调制分集等。

(2)超密集网络和协同无线通信技术,如小基站的优化、分布式天线的协作传输、分层网络的异构协同、

蜂窝/WLAN/传感器等不同接入技术的协同通信等。

(3)新型多天线技术,如有源天线阵列、三维波束赋型、大规模天线等等。

(4)新的频谱使用方式,如 TDD/FDD 的融合使用、实现频谱共享的认知无线电技术等。

(5)高频段的使用,如 6 GHz 以上高频段通信技术等。

为适应移动互联网发展,移动网络向着扁平化、控制与转发分离、智能化、虚拟化等方向发展,与无线网络资源协同紧密结合,实现互联网内容的有效存储与转发,新型移动网络架构成为 5G 研究的重点,并将带动新型移动网络技术及设备的研发。

4 结束语

移动互联网和物联网的强劲推动力驱动下产业能力快速提升,面向 2020 年及未来的 5G 时代正向我们走近,高流量、低时延、高智能、低能耗的 5G 无线技术及新型网络成为技术研究方向,充足的频率资源是 5G 发展的基础,全球统一的频谱、统一的标准是产业的诉求也是 5G 获得成功的关键。

参考文献

[1] WWRF. Visions and research directions for

➡下转第 25 页

基于热点城区测算中国 2020 年移动通信频谱需求

Calculating Spectrum Requirements for Urban Hotspots in China in 2020

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 02-0005-06

摘要: 提出了一种适合中国国情的频谱需求的预测方法。该预测方法充分借鉴了国际现有方法,可合理满足未来国际移动通信系统(IMT)的发展需求,实现频率资源的科学分配和使用,避免盲目规划导致的资源浪费。该预测方法从业务密集地区着手,通过调研运营商第一手数据,给出了更加精确的测算结果,可供中国运营商评估现有频谱使用情况、论证阶段频谱需求时使用。

关键词: 频谱需求预测;热点地区;国际移动通信系统;第五代移动通信

Abstract: This paper describes a new method for estimating future spectrum requirements in China. Such a method is necessary to meet the requirements of future international mobile telecommunication systems (IMTs), scientifically allocate and use radio spectrum resources, and avoid resource wastage as a result of poor planning. In this method, we select a hotspot zone and gather first-hand data from operators in order to obtain more accurate estimations. Our method can also be to evaluate existing spectrum usage and short-term spectrum requirements of operators.

Key words: spectrum requirements estimation; hotspots; IMT; 5G

黄标/HUANG Biao
王坦/WANG Tan

(国家无线电监测中心/国家无线电频谱管理中心,北京 100037)
(The State Radio Monitoring Center/The State Radio Spectrum Management Center, Beijing, 100037, China)

行概述分析。

1.1 国际电联无线电部门 M.1768 建议书的预测方法

国际电联无线电部门 (ITU-R) M.1768 建议书的预测方法^[1]流程如图 1 所示。该方法曾用于 2007 年世界无线电通信大会 (WRC) 的研究周期内,预测 2010—2020 年 IMT 频谱需求;目前在 WRC-15 研究周期仍被 ITU-R 5D 工作组作为主要方法,并进行参数修订;该方法适合世界范围或一个国家的整体平均测算,微观、细致,但参数与计算较为繁琐。

M.1768 建议书的默认参数是面向全球的典型值,其难以准确反映中国特点,需要对该方法中的一些参数进行更新,甚至新增个别参数。在中国使用该方法向 ITU-R 提交的测算中,对相关参数进行了修订^[2],测算表明,中国到 2020 年时的频谱需求总量为 1 490 ~ 1 810 MHz。

1.2 全球移动通信协会的预测方法

全球移动通信协会 (GSMA) 频谱需求预测方法^[3]专注于国家或者地区

近年来,中国的国际移动通信系统 (IMT) 产业保持较快增长。2013 年 1 至 9 月,中国移动电话用户净增 9 439.8 万户,总数达 12.07 亿户。3G 移动电话用户净增 13 479.4 万户,对移动电话用户的增长贡献达到 141.5%,3G 用户总数达到 3.79 亿户,在移动电话用户中渗透率由 2012 年同期的 19.4% 跃升至 30.5%^[1]。12 月 4 日,工业和信息化部颁发“LTE/第四代数字蜂窝移动通信业务”经营许可,意味着中国 4G 时代正式到来。

目前,中国为 IMT 系统规划的频率总计达到 687 MHz。然而,移动通信业务由于用户大幅增加,加上智能终端带来的爆炸式数据流量^[2],使得移动通信频谱资源短缺的状况日益突出^[3]。为了实现频谱资源的科学管理,一方面,要为新的频谱需求及时规划分配资源,以促进相关行业和产业的发展;另一方面,也要对频谱需求做出合理预测,避免盲目规划导致的资源浪费。

1 现有全球频谱需求预测方法概述

目前,全球存在多种 IMT 系统频谱需求预测方法,本节对相关方法进

收稿日期: 2013-12-30
网络出版时间: 2014-02-23
基金项目: 国家科技重大专项 (2012ZX03006003004)

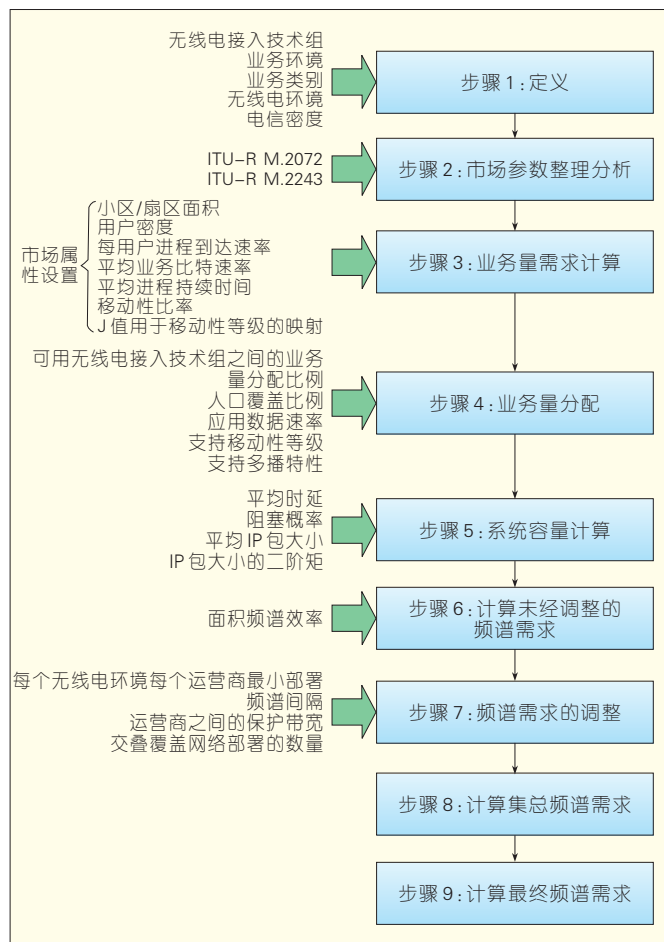


图 1
M.1768 建议书的预
测方法流程和相关的
输入参数

的业务总量预测及其分布情况。工业和信息化部电信研究院在 GSM A 方法^[7]的基础上调整了部分预测流程,综合考虑中国移动通信发展的宏观历史数据,对未来数据进行合理假设和预测。所有未来参数均参考 2012 年及之前的运营商年报数据并进行合理预测。基于 GSM A 方法调整的中国频谱需求预测方法流程如图 2 所示。采用该流程预测的最终结果为 2020 年中国的频谱需求将达到 1 864 MHz。

1.3 美国联邦通信委员会的预测方法

美国联邦通信委员会(FCC)的预测方法^[8]首先选取基准年的数据作为起点,然后通过叠加业务量增长、站址增长与频谱利用率增长3个加权因子直接得到结果。美国FCC频谱需求预测方法流程如图3所示。FCC

约,数据易得,但颗粒度较粗。通过此方法,最终测算中国2020年频谱需求为1 540~1 800 MHz。

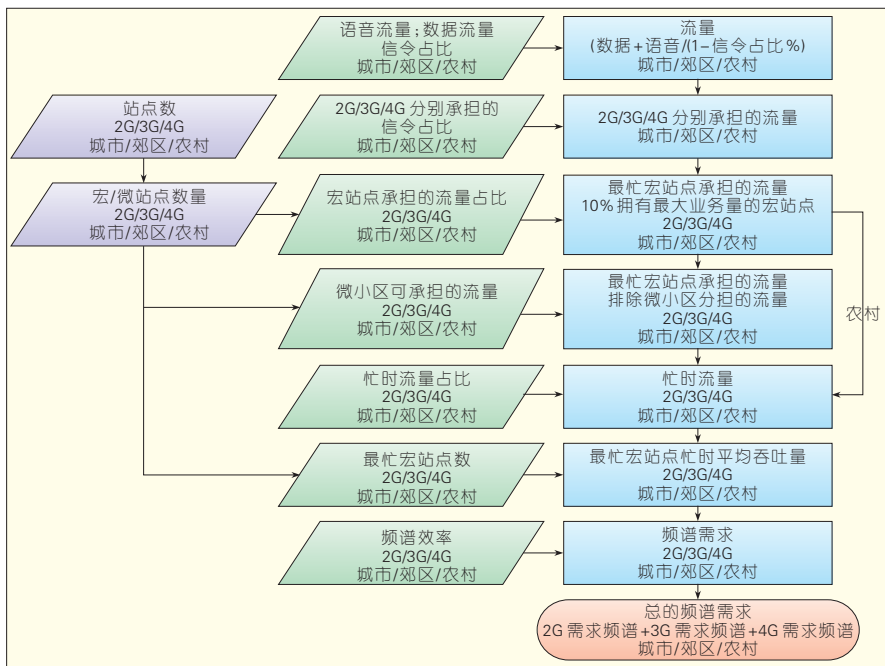
2 基于热点的中国频谱需求预测方法

现有方法中, M.1768 方法的输入参数类别多、调研周期长,难以与中国运营商现网数据统计情况对接; GSM A 方法仅使用运营商年报总数,其逐级测算的多个分流因子均来自其他推测,在实际中难免存在偏差; FCC 方法适用于总体粗略估算,结果有待进一步验证。因此,通过对现有国际频谱需求预测方法的研究与调研分析,结合中国移动通信系统实际部署特点以及运营商的参数统计类型特征,本文提出了一套适用于评估中国频谱需求的测算方法。方法的核心思想是基于频谱需求“瓶颈”在城区,从业务密集地区着手,通过调研运营商第一手数据,给出更加精确的测算结果。

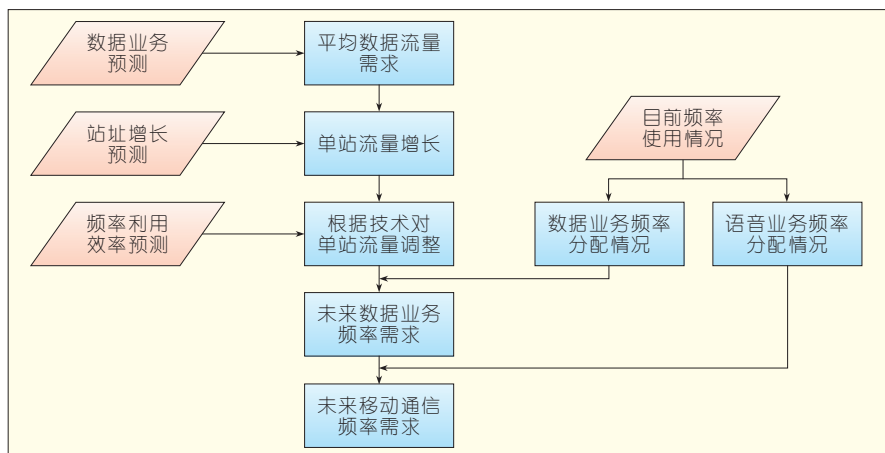
2.1 方法概述

本文提出的预测方法主要包括6个主要步骤(计算流程如图4所示):

方法从宏观出发,整体估计,直观简



▲图2 基于GSMA方法调整的中国频谱需求预测方法流程



▲ 图3 美国 FCC 频谱需求预测方法流程

- (1) 业务量增长预测
- (2) 业务量第一次分流：无线接入技术(RAT)分流
- (3) 业务量第二次分流：基站类型分流
- (4) 基站数目增长预测
- (5) 计算各场景下的频谱需求
- (6) 频谱需求合并及调整

2.2 场景选择

频谱需求预测模型中,场景的选取是非常重要的环节,它将影响整个测算方法的框架和测算结果。在本方法中,考虑到 IMT 网络运营和业务服务质量的要求,以覆盖运营商核心用户相对集中的网络繁忙地区作为观测和重点评估对象。

为了使测算结果准确,用作频谱需求预测的场景需要满足以下的一些特征:

- (1) 场景业务量密度足够大

业务量密度越大,单站承载的业务量越大,那么所需要部署的频谱资源也就越多。如所选择的场景业务量密度是中国最高的,这意味着根据所选择的场景测算的频谱带宽基本可以满足中国所有地区的频谱需要。

- (2) 场景网络部署情况足够典型

选择场景所在区域的室内外宏站、微站建设密度和分布要符合中国一般建设规律,这样保证了所选场景的网络承载能力具有代表性,可以用

作中国网络承载能力的一般标准。

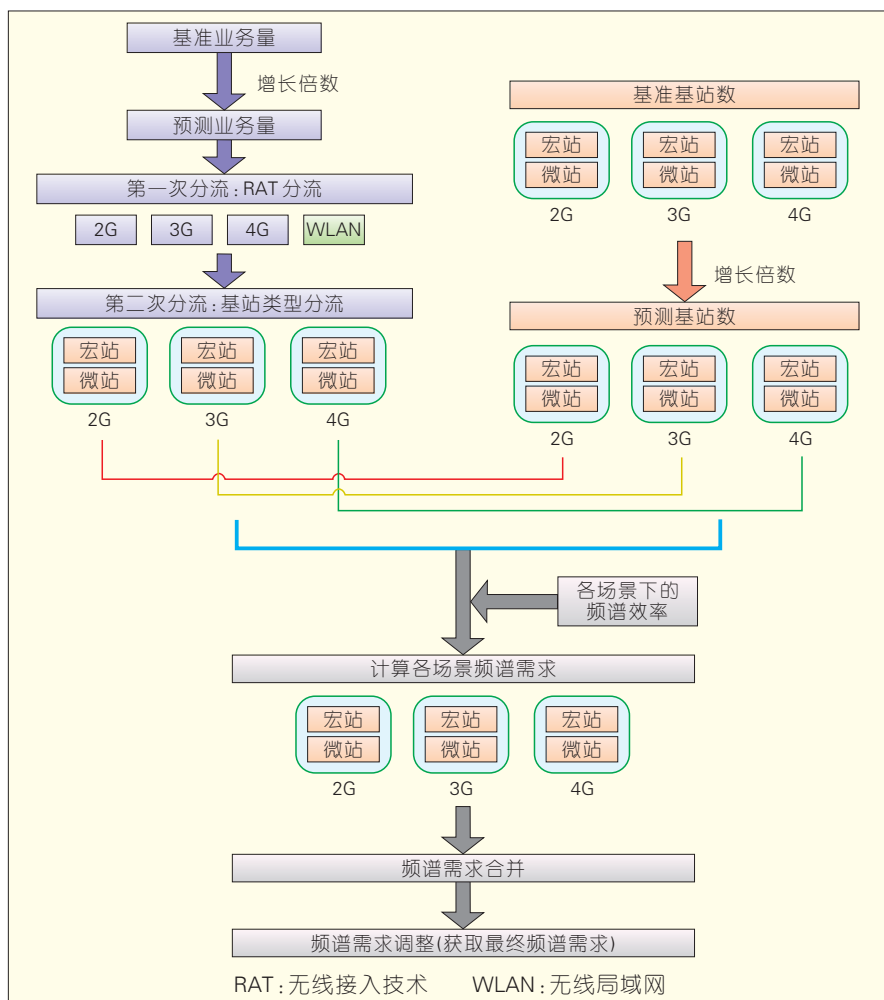
- (3) 选择的场景足够大

选择场景中若包含连片的具有一定数量规模的基站部署,则可以有

效避免因数据随机性造成的计算误差,也保证了预测结果的稳定性、可重复验证性。

对运营商提供的现网数据进行分析,北京、上海、广州、深圳 4 个城市是中国范围内业务量密度最高的 4 个城市。其中,北京市为首都、政治中心、文化中心,尤其因为其特殊的政治地位,对通信网络质量和保障能力要求最高,是最理想的频谱需求预测城市。

经过综合考虑,本方法最终以西单-金融街地区为重点,选取一个近似矩形的区域,具体范围:西至北礼士路、南礼士路;北至西直门外大街、西直门内大街及其向东的延长线;东至德胜门内大街、西什库大街、府右街;南至长安街及其沿线。选取



▲ 图4 本文提出的新方法的主要流程

的热点区域如图 5 所示。

2.3 数据调研

方法中具体的参数值需要现有运营商的网络运营数据作为支撑,调研数据包括不同制式的基站数、站址数,以及单个基站平均月忙时业务量等,获得的数据结果如表 1 所示。

2.4 测算流程

测算内容包括:业务类型、业务量增长倍数、基站类型与频率复用能力、基站规模、频谱效率等。

(1) 业务类型

本方法中,将 IMT 系统的业务类型主要分为语音业务和数据业务。基准数据业务通过调研区域内各类基站业务量求和得到,未来增长倍数依据数学拟合预测得到,给出保守与乐观估计。语音业务包括传统语音业务和 LTE 承载的语音(VoLTE)带来的语音业务。本方法认为传统纯语音业务量与用户数不再增长,频谱需求维持不变;VoLTE 带来的语音业务量包含在数据业务量中。

(2) 业务量增长倍数

该部分依托 2013 年最新业务量统计数据,推算 2020 年业务量规模。本方法分别通过基于 S 生长曲线模型非线性最小二乘法^[9]与灰度预测模型^[10]给出了需求增长的大致区间,为 99~138 倍。基于 S 生长曲线模型非线性最小二乘法与灰度预测模型时 IMT 数据业务量增长趋势预测结果分别如图 6 与图 7 所示。

(3) 基站类型与频率复用能力

该部分依据国际标准化演进情况、中国运营商建设预期以及设备商产品情况统筹考虑。根据中国 IMT 系统现网情况,针对中国 IMT 系统的基站类型预测与 ITU-R 的划分^[11]有所区别。未来几年中国的基站类型主要包括宏基站、室外小基站、室内小基站和室分站,如表 2 所示。其中,对于同频组网的基站类型应取其频谱需求的较大值。频谱总需求=2G

需求+3G 需求+4G 需求,其中:2G 需求=MAX(2G 宏站需求、2G 室分站需求);3G 需求=MAX(3G 宏站需求、3G 室外小基站需求)+3G 室分站需求;4G 需求=MAX(4G 宏站需求、4G 室外小基站需求)+MAX(4G 室内小基站、4G 室分站需求)。

(4) 基站规模

使用“虚拟站址”概念,在该地区将“3 家”运营商基站数归一化为“1 家”。针对宏站与室分站,依托 3 家运营商当前站址建设数量的平均水平估算,认为到 2020 年不再增长。基站规模预测如表 3 所示。针对小基站,对其建设能力一般保守估算,且由于小基站与对应宏站可频率复用,其取值范围的波动对需求结果并无实质性影响。

(5) 频谱效率

使用“工程频谱效率”,在标准化

评估谱效率基础上,依据运营商现网实际部署能力进行折算。工程频谱效率如表 4 所示。其中 2G 对应 GSM、IS-95 等系统;3G 对应 WCDMA、CDMA2000、TD-SCDMA 等系统;4G 对应 LTE/LTE-Advanced、HSPA+ 等系统。划分制式主要依据其技术指标;对同一代制式谱效率进行归一化。

2.5 测算结果

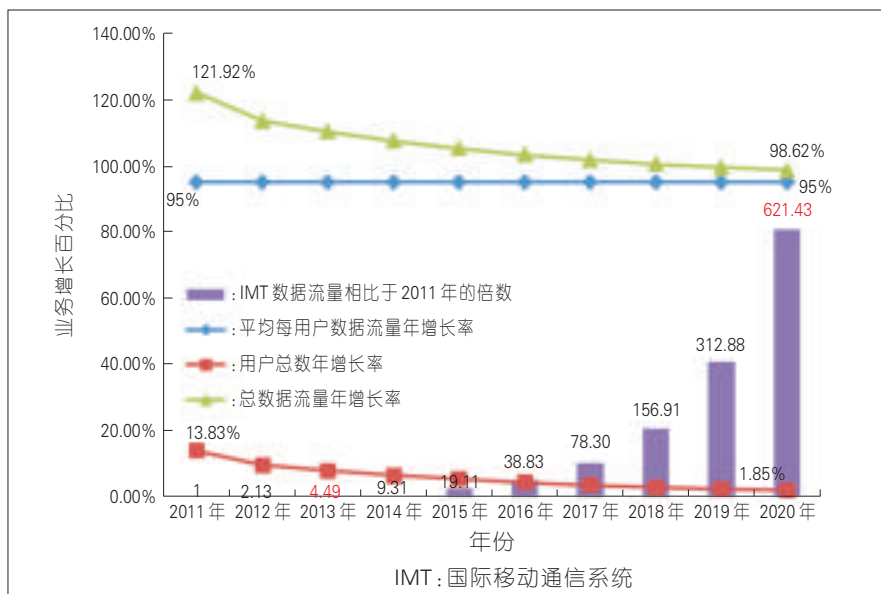
(1) 语音方面(不含 VoLTE 等)



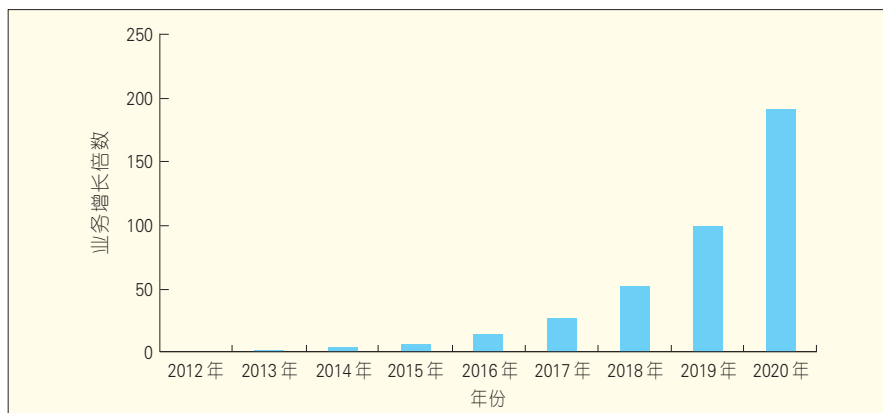
▲图 5 本文测算时选取的热点区域

▼表 1 部分调研结果(注:因北京区域数据涉及运营机密,表中数据用字母代替)

内容	运营商 A	运营商 B	运营商 C
基站数(2G)	X_2 (宏蜂窝 a、微蜂窝 b)	y (室外 g、室内 h)	Z_2 (室外 i、室内 j)
基站数(3G)	X_3 (宏蜂窝 c、微蜂窝 d)	y (室外 g、室内 h)	Z_3 (室外 k、室内 l)
基站数(4G)	X_4 (宏蜂窝 e、微蜂窝 f)	—	—
流量(2G)	语音业务量 V_2 、数据业务量 D_2	语音业务量 V_1 、数据业务量 D_1	语音业务量 V_2 、数据业务量 D_2
流量(3G)	语音业务量 V_3 、数据业务量 D_3	语音业务量 V_1 、数据业务量 D_1	语音业务量 V_3 、数据业务量 D_3



▲图 6 基于 S 生长曲线模型非线性最小二乘法时 IMT 数据业务量增长趋势预测结果



▲图7 基于灰色预测模型时IMT数据业务量增长趋势预测结果

本文认为传统纯语音业务的频谱需求不再增长,未来基于分组交换的新增语音业务(如VoLTE)归入数据业务。依照现有各运营商用于语音业务的频谱总量,该部分需求如表5所示。

(2)数据方面

依照各运营商用于数据业务的频谱总量,该部分需求如表6所示。

(3)总频谱需求

合并语音、数据两方面(参考当前实际情况,将2G数据业务频谱需求并入2G语音频谱需求),总频谱需求如表7所示。

2.6 对比分析

现有频率需求测算的各类方法相互补充,多层次、多维度的论证了中国频率需求。其中,本文所提出的基于热点地区的测算法,基于频谱需求“瓶颈”在城区,抓住了矛盾的主要方面,具备颗粒度细、数据详实、直观透明等特点,且数据获取范围均适应中国运营商现网数据统计能力,所调研数据亦为最新结果。在相关方法中,该方法更加贴近中国IMT国情。各方法特点与适用性如表8所示。

3 需求缺口与候选频段

按照上述研究结论,面向2020年,IMT频谱需求赤字数量不可小觑。在各行业对频谱资源争夺日趋激烈的今天,这将给无线电管理部门

的未来工作带来极大的挑战。

为IMT系统寻求更多的频谱资源

▼表2 基站类型预测

基站制式	宏站	室外小基站	室内小基站	室分站
2G	✓	—	—	✓
3G	✓	✓	—	✓
4G	✓	✓	✓	✓

▼表3 该地区基站规模预测

基站数量	宏基站	室外小基站	室内小基站	室分站
2G 预测	72	—	—	192
3G 预测	72	72	—	192
4G 预测	72	72	192	192

▼表4 工程频谱效率

谱效率/bps/(Hz·小区)	宏基站	室外小基站	室内小基站	室分站
2G	0.1	0	0	0.1
3G	0.6	0.6	0	0.6
4G	1.35	1.8	1.8	1.35

▼表5 2020年语音业务频谱需求

内容	运营商A	运营商B	运营商C
2G 语音	2×20 MHz 2×25 MHz	2×6 MHz 2×20 MHz	约20 MHz
3G 语音	约10 MHz	2×5 MHz	约20 MHz
合计	2G约140 MHz、3G约40 MHz,合计180 MHz		

▼表6 2020年数据业务频谱需求

2020年业务量	低	中	高
2G总频谱需求/MHz	30	35	40
3G总频谱需求/MHz	410	490	570
4G总频谱需求/MHz	760	900	1 060
数据业务总频谱需求/MHz	1 200	1 425	1 670

源,一方面,需要在低频段优质资源中,将具备IMT使用条件的频段充分地挖掘,包括450~470 MHz、698~806 MHz、3 400~3 600 MHz等在《中华人民共和国无线电频率划分规定》中已标记为IMT的频段^[12],及3 300~3 400 MHz、4 400~4 500 MHz和4 800~4 990 MHz等WRC-15相关议题在研的候选频段。当前,相关研究目前已深入开展,对此本文不再赘述。另一方面,在毫米波无线通信设备发展日渐成熟的趋势下^[13],还有必要寻求高频段潜在可用频谱资源。

现阶段,中国在6 GHz以上的高频段业务中,一般划分为固定业务、

▼表7 2020年频谱需求

2020年业务量	低	中	高
2020年总频谱需求/MHz	1 350	1 570	1 810

▼表8 现有频率需求测算方法总结

方法	M.1768系列方法	GSMA系列方法	FCC系列方法	新方法
适用性	世界/国家范围总体测算	国家范围总体测算	国家范围总体估算	地区范围精确测算
角度	微观	宏观	宏观	微观
颗粒度	精细	较精细	粗	精细
参数获取	参数类别多、调研周期长	运营商年报	运营商年报	针对特定区域调研,周期短
复杂度	高	中	低	中
预测结果 (2020年)/MHz	1 490 ~ 1 810	1 864 ~ 1 869	1 540 ~ 1 800	1 350 ~ 1 810
需求缺口/MHz	903 ~ 1 123	1 177 ~ 1 182	853 ~ 1 113	663 ~ 1 123

无线定位业务、无线电导航业务以及卫星固定、卫星广播等空间业务,使用的典型系统包括(但不限于)1~30 GHz 数字微波接力系统,X波段航海、空管等雷达系统,以及 Ku、Ka 波段等卫星系统。

高频段用于无线通信系统主要表现在两方面,一是用于点对多点的宽带无线通信系统,2006年,将59~64 GHz 规划用于无线微功率(短距离)无线电技术应用^[14],该频段已划为国际上标准化的 IEEE 802.11 ad 频段;2013年将42.3~47.0 GHz、47.2~48.4 GHz 规划用于宽带无线接入系统,该频段为国际上标准化的 IEEE 802.11 aj 频段。二是点对点的无线传输系统,用于未来小基站的回传^[15],2013年,将40.5~42.3/48.4~50.2 GHz 规划用于点对点无线接入系统,同时也批准了71~76 GHz、81~86 GHz 频段用于微波固定无线接入技术在移动通信基站回传系统的试验。

未来在高频段选取潜在候选频段,应主要考虑以下原则:

- 已标示为移动业务
- 对已有卫星业务频段的保护(主要针对空地对地)
- 对无源业务(如射电天文)的保护
- 寻找尽可能连续的宽带频谱资源(如连续500 MHz)

针对以上背景,高频段目前或可考虑如5 925~7 075 MHz与28 GHz附近等频段。这些频段主要是卫星固定业务(地对空)链路,由卫星地球站发射,空间站接收。对此,方面需要考虑IMT对空间站的集总干扰,另一方面要考虑大功率地球站发射对IMT系统的干扰。对此可考虑将其作为初步候选频段开展研究。若初步可行,可根据详细共存研究结论,进一步分析确认应用场景、射频指标等共存条件。

4 结束语

本文在充分借鉴国际现有方法的基础上,提出了适合中国国情的频谱需求测算方法。方法从业务密集地区着手,通过调研运营商第一手数据,给出了更加精确的测算结果。此外,针对IMT频谱需求缺口,本文就IMT未来使用6 GHz以上诸如5 925~7 075 MHz、28 GHz等高频段的可行性进行了展望,以期后续工作提供借鉴意义。

参考文献

- [1] 工信部:2013年前10月全国移动电话用户净增1.04亿户[EB/OL]. (2013-12-10). <http://finance.people.com.cn/n/2013/1122/c1004-23628723.html>.
- [2] Global mobile network traffic - a summary of recent trends. [EB/OL]. (2013-12-10). [www.gsma.com/spectrum/wp-content/](http://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2012/03)

[uploads/2012/03](http://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2012/03).

- [3] Forecast of mobile broadband development in the Asia Pacific Region [R]. CJK-IMT WG, 2012.
- [4] ITU-R. M.1768. Methodology for calculation of spectrum requirements for the future development of the terrestrial component of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000 [S]. ITU, 2006.
- [5] ITU-R. M.2135. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced [S]. ITU, 2008.
- [6] A new model for spectrum Estimation. [EB/OL]. (2013-12-10). http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1100705.
- [7] 工业和信息化部电信研究院. IMT 频谱需求预测研究 [R]. CCSA TC5 WG8 第57次会议, 2013.
- [8] Federal Communications Commission. Mobile Broadband: The Benefits of Additional Spectrum [S]. 2010.
- [9] 徐国祥. 统计预测和决策 [M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2012.
- [10] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [11] ITU-R. M.2078. Estimated spectrum bandwidth requirements for the future development of IMT-2000 and IMT-Advanced [S]. ITU, 2006.
- [12] 中华人民共和国工业和信息化部. 中华人民共和国无线电频率划分规定 [S]. 2014.
- [13] Millimeter Wave Cellular A road to 5G [EB/OL]. (2013-12-10). http://ieee-icc.org/2013/Rappaport_icc%202013%20mmwave%20plenary%20presentation.pdf.
- [14] 中华人民共和国工业和信息化部. 关于60GHz频段微功率(短距离)无线电技术应用有关问题的通知 [R]. 信无函〔2006〕82号, 2006.
- [15] NAKAMURA T, NAGATA S, BENJEBBOUR A, et al. Trends in small cell enhancements in LTE advanced [J]. Communications Magazine, IEEE, 2013, 51(2): 98-105.

作者简介



黄标, 国家无线电监测中心/国家无线电频谱管理中心副总工程师、频谱工程处处长, 中国IMT-2020(5G)推进频率组组长; 从事系统间电磁兼容分析研究、电波测量和电磁环境保护研究以及5G关键技术的研究和评估工作; 已发表学术论文30余篇, 获中国通信学会

科学技术奖一等奖1项、二等奖4项, 获中国通信标准化协会科学技术奖二等奖、三等奖各1项。



王坦, 北京邮电大学博士毕业; 现工作于国家无线电监测中心/国家无线电频谱管理中心频谱工程处; 从事频率规划、电磁兼容分析的研究与评估工作; 已发表学术论文20余篇, 其中SCI检索3篇, EI检索10余篇。

面向未来移动通信的超蜂窝网络架构

Future Mobile Communication Oriented Hyper Cellular Access Network Architecture

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 02-0011-06

摘要: 提出了一种面向未来移动通信的超蜂窝网络架构设计,其核心技术包括:超蜂窝无线组网技术、接入网虚拟小区技术和云平台支撑技术。超蜂窝无线组网技术的特点是空口控制与业务覆盖的分离,进而演进为对空口资源和流程的重构;接入网虚拟小区技术的特点是处理逻辑与空口覆盖的分离,进而演进为以用户为中心、结合SDN(Software-defined networking,软件定义网络)技术的接入网处理重构;云平台支撑技术的特点是接入网处理与计算资源的分离,进而演进为面向运营、平台化和虚拟化的计算重构。超蜂窝网络架构的设计与大规模天线阵、高频段大带宽通信的新兴物理层传输技术有很好的统一性,并且衍生出了一些新颖的跨层跨域的统一研究方法。

关键词: 超蜂窝网络架构;虚拟化;平台化;空口覆盖分离;接入网处理重构;接入网计算重构;大规模天线阵

Abstract: This paper describes hyper-cellular access network architecture (HCAN) for future mobile communication systems. Three base technologies are used: hyper-cellular architecture (HCA), collaborative access network (CAN), and access network supporting platform (CAN-Platform). HCA decouples control and traffic in the air interface and re-constructs air interface resource and process flow. CAN decouples process and air interface coverage and then reconstructs the RAN in a user-oriented, SDN-like way. CAN-Platform decouples process and computing and then evolves into the operations-oriented, platform and virtualized computing reconstruction. HCAN is an integral design suitable for emerging PHY technologies, such as large-scale MIMO and high-spectrum wideband communication. With such integral design, an interesting cross-domain, cross-layer study framework can be built.

Keywords: hyper cellular access network; virtualization; platform; air interface coverage decouple; re-construction of access network process; re-construction of access network computing; large-scale antenna array

赵明/ZHAO Ming

许希斌/XU Xibin

牛志升/NIU Zhisheng

(清华大学 清华信息科学与技术国家实验室
(筹),北京 100084)

(Tsinghua National Laboratory for Information
Science and Technology (TNList), Tsinghua
University, Beijing 100084, China)

• 2012年运营商承受的业务压力,在此前的预测中到2020年才会发生。

• M.2072中预测移动数据业务总量将在2015年超越移动话音业务,事实上,这个情形在2009年已经发生。

进而,ITU-R综合了若干咨询公司的分析报告给出了新的预测:移动数据业务的年化增长率(CAGR)将超过158%,从而移动通信业务总量将在2020年超过现有规模的1 000倍,在2030年超过10 000倍,与此对应的将是蜂窝小区的空前密集部署,对移动通信的峰值速率和业务延迟都有更高的要求。此外,终端数量饱和之后还会进一步形成对消费者的包围,应用种类进一步渗透生活的方方面面,多种无线接入技术(RAT)形成统一移动通信网络服务。所有的这一切都意味着普适通信(Pervasive Communication)时代的到来,与此对应,5G要求更直接的用户感受(QoE),比如:小于1 ms的接入时延、网络自组织和自调整、更安全的网络、更丰富的通信方式。

随着移动数据业务超越移动语音业务,相应的总体业务模式和网络

从2008年开始,移动通信行业迎来了一轮前所未有的数据业务大爆炸时期,不仅移动数据业务经历了快速增长,移动业务特征也发生了颠覆性的变化。这种增长速度超乎

于5年前所有分析师的预测,甚至ITU-R也不得不修正其在2005年发布报告M.2072中的预测^[1]。ITU-R回顾了2005—2011年的行业发展,并在2012年出版的M.2243^[2]中修正其预测,其关键结论有:

• 移动数据业务大爆炸比M.2072的预测早两年发生。

• 现实中移动数据业务流量5倍于M.2072预测的上轨。

收稿日期:2014-01-02

网络出版时间:2014-03-06

基金项目:国家重点基础研究发展(“973”)计划(2012CB316000);国家高新技术研究发展(“863”)计划(2014AA012103)

特性发生了变化,来自不同类型用户的业务贡献也有所不同,不同地理位置上的业务分布也极大不同,不同的业务种类在时间上也有不同的变化模式。这种快速增长和业务的高度变化性和不均与特征,很快就对传统的移动通信技术和网络架构产生了挑战。

下一代网络架构的设计如何满足爆炸式的容量需求、快速的发展速度和多样化的业务需求,与此同时,还需要应对逐渐走低的数据业务收入和随之而来的巨额基础建设投资;如何降低运营成本(OPEX)和资本性支出(CAPEX)成为课题。

由此可见,2020年后5G网络架构面临的是一个多维的需求维度,传统的单一维度评价准则已不适用。我们可将5G移动通信网络架构面临的多维需求概括为:

(1) 域效

5G网络架构需要能有效地在不同地理位置部署蜂窝小区,以适应巨大的数据业务密度要求。

(2) 谱效

因为数据业务的数据速率与用户QoE有很直接的关联,所以人们追求在小区内任意位置都能获得满意的QoE,所以对移动通信效率的关注点从传统的峰值频谱效率(PSE)转换到了小区频谱效率(CSE)。

(3) 能效

随着人们对绿色通信的期望,系统的平均每比特能耗也是关注热点之一。

(4) 体验

用户的真实业务体验已经不再直接映射为峰值速率和业务延迟等指标,5G网络架构需要能以用户感受为优化目标自适应地对网络进行管理。

(5) 弹性

弹性即网络可扩展性。新业务快速部署,后向兼容和一致性等对5G网络架构的弹性设计的需求,是为了应对业务种类的快速演进和业

务容量的增长速度。

1 面向新需求的移动通信新技术

为了应对上述来自业务需求层面的挑战,近年来已经有很多新技术出现:

(1) 空口覆盖的分离设计——信令与业务分离的异构组网技术

根据无线接入中不同信道的特征和需求,对其采用不同的组网方式,并在统一的系统架构下相互协作。这是一种由来已久从组网实践中发展出来的技术,TD-SCDMA技术标准中从N频点组网到多载波HSPA技术^[3-4],都对分离覆盖有所考虑;清华大学从绿色通信的角度,提出了控制信息的广域覆盖与业务数据的密集覆盖这种超蜂窝无线组网技术^[5];LTE-A中的异构网络(Hetnet)组网方案^[6];DOCOMO提出的Phantom Cell主要考虑低频宏站广域覆盖,辅助高频小基站局部覆盖,满足对LTE网络的容量增长需求^[7]。分离是为了实现多系统、多网络、多覆盖间的资源协作,以控制信令无缝覆盖来保障业务基站动态、柔性(按需)覆盖。

(2) 接入网处理的分离设计——协作处理技术

接入网处理与小区相分离,比如协作多点发送与接收(CoMP)中用户数据的接收处理已经脱离某一个小区的范畴,而是多个小区联合进行处理^[8];分布式无线通信系统(DWCS)中的以用户为中心的分布式天线系统设计^[9],尝试了空口信号与基站分离;比如超蜂窝无线组网方案中控制与业务异质覆盖对应的接入网处理中控制与业务的处理已经脱离某一具体实体小区,而是与以用户为中心的虚拟小区相对应,但也面对一些技术挑战,比如高质量、实时前端回传(Front-haul)网络支持。

(3) 接入网计算的分离设计——接入网虚拟化技术

接入网的处理逻辑与具体计算

资源的分离,比如云接入网(C-RAN)中的虚拟化技术^[10]使得接入网处理可以平滑分布在通用处理器和硬件加速器卡上,某一虚拟小区的处理不再绑定某一特定硬件,而是可以平滑在计算资源间迁移,最终形成开放、实时无线云计算平台。

清华大学最近提出的5G超蜂窝网络架构,基于上述3种技术,将其概括为移动通信网络3个域的“重构”,形成统一的5G网络架构中的3个基础技术。

1.1 空口的覆盖重构

覆盖又可分为资源的覆盖和流程的覆盖:

(1) 下行资源的定义包括不同的频带(Band)、不同的RAT、不同的空间资源(大尺度蜂窝复用与准静态小尺度空分复用),从而形成一个可被管理的多维资源体系。

(2) 上行由网络对用户资源及其覆盖进行感知和接收,形成以用户为中心的资源复用体系。

(3) 流程的覆盖有如下几个例子,一是将一些控制和信令用鲁棒性控制进行全局覆盖,一是载波侦听多址接入/碰撞检测(CSMA/CD)与随机接入信道(RACH)流程结合的以用户为中心的接入感知,以及用资源分配的变化代替切换的非显式切换流程等等。

由于上述控制的全局覆盖对上下行资源的覆盖的集中控制,再加上大规模矩阵处理大幅减少干扰,从而改变了无线组网的干扰模型。上述控制与业务的分离覆盖,符合接入网的软件定义网络(SDN)趋势,使得以用户需求与特征为中心动态调整资源及其覆盖成为可能。超蜂窝网络架构——空口覆盖重构如图1所示。

1.2 接入网的处理重构

接入网处理以用户为中心,而不是以覆盖为组织方式。SDN化处理框架也使得接入网处理,与核心网转

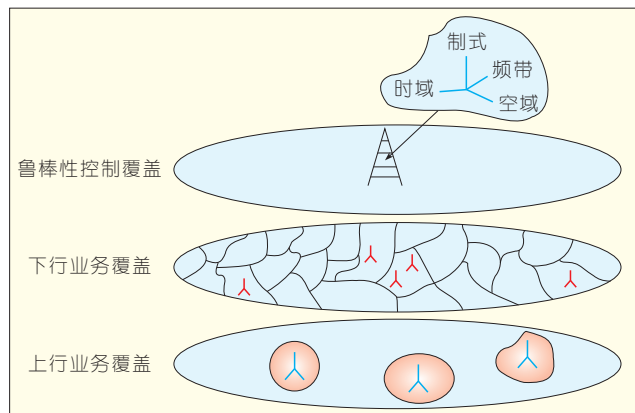


图1
超蜂窝网络架构
——空口覆盖重构

发与移动性管理(Forwarding/Mobility)处理^[11]统一起来。超蜂窝网络架构——接入网处理重构如图2所示。图2将接入网分为两个部分:

(1)泛化射频前端(RRU),负责资源及其覆盖的形成和用户向资源的投射。

(2)泛化基带处理单元(BBU),负责用户相关处理,用户面/控制面/管理面不同的处理过程与架构定义,例如,用户面可集中计算,但是每用户单独处理,管理面集中处理,控制面/管理面与SDN结合。即可解决IP Forwarding/Mobility的问题,而不用定义新的网元。全局化管理面负责全局数据和全局编程,控制面不对用户面进行编程,而只是配置其参数(这里编程定义为处理逻辑的改变)。

1.3 接入网的计算重构

借鉴IT领域的云计算理念^[12],这部分(如图3所示)也有3个层面。

(1)虚拟化

类似云计算的基础设施即服务(IaaS),隔离上层用户面/控制面/管理面(U/C/M)处理与底层的计算、存储和传输资源。

(2)平台化

类似云计算的平台即服务(PaaS),包括中央统一数据库、数据挖掘引擎等基础服务,支持接入网处理的可重构、可编程等特性。

(3)服务化

类似云计算的软件即服务

(SaaS),这里提出网络即服务(NaaS),编排器(Orchestra)按需串接或编程资源,动态构建服务。

SDN技术在平台层有很明显的体现,比如集中式管理面,数据集中的分布式控制面,以用户为组织方式的组织面,从而允许以用户为中心对资源进行动态调配以适应用户的需求和行为。

2 5G 超蜂窝网络架构

以上3种技术方向不是孤立的,而是相互关联互相影响的,我们将上述3个重要的技术演进方向勾勒为一个5G的超蜂窝网络架构全貌,如图4所示。

5G超蜂窝网络架构主要的技术特征有:面向运营、以用户为中心、多

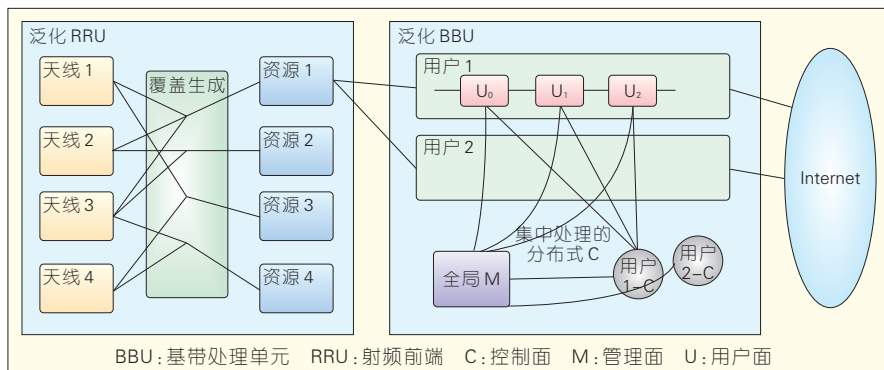


图2 超蜂窝网络架构——接入网处理重构

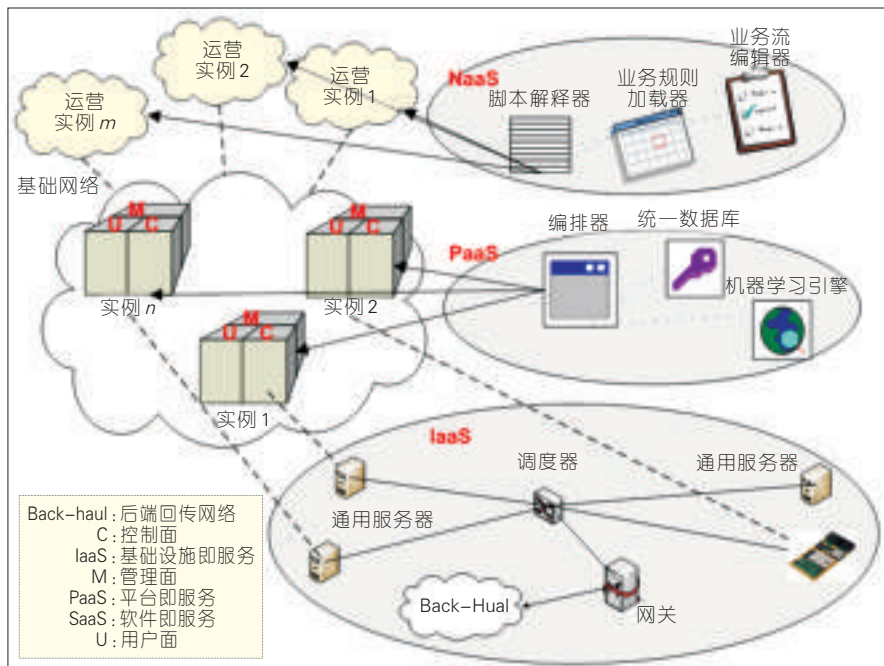
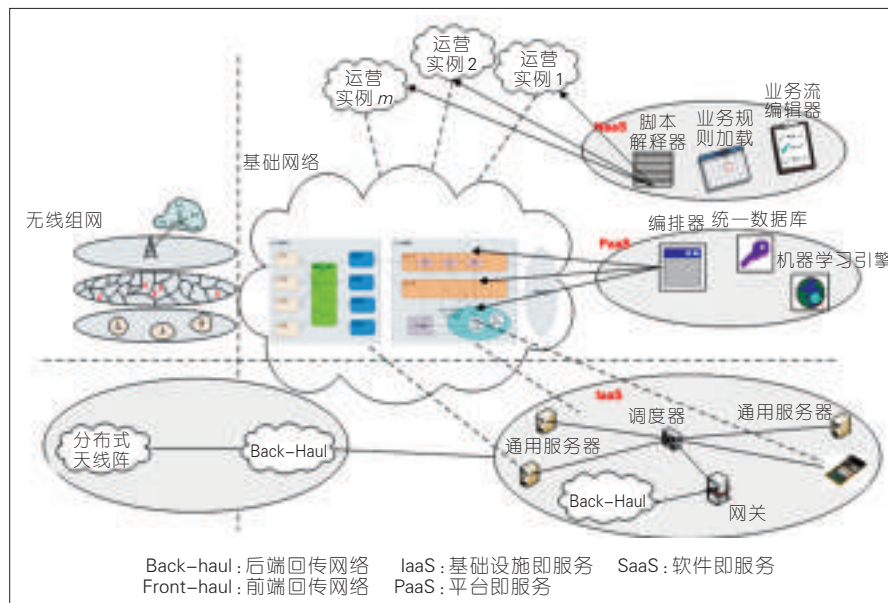


图3 超蜂窝网络架构——接入网计算重构



▲图4 5G超蜂窝网络架构全貌

域虚拟化、平台支撑的软件定义接入网处理和空口无线组网的高弹性覆盖设计。

2.1 5G超蜂窝网络架构关键问题

在上述3个研究方向下,衍生出如下5个关键技术点:

(1)超蜂窝无线组网方案之空口流程重定义,其关键技术是控制信息与业务数据的在异质覆盖下的流程重构。

(2)超蜂窝无线组网方案之空口资源重定义,其关键技术是以用户为中心的的空口信号设计。

(3)超蜂窝接入网处理之以用户为中心的虚拟小区,主要作用是管理面、控制面以及用户面处理的划分和互动。

(4)超蜂窝接入网处理之接入网与核心网的融合和统一设计,需要统一的SDN处理框架。

(5)超蜂窝接入网平台之虚拟化与平台化技术,重点研究以用户为中心的多域虚拟化技术,包括不同类型计算需求在不同类型计算资源上的调配技术,以及跟随业务或网络行为的智能迁移技术;研究端到端可重构技术、控制面与用户面处理分离的保

障技术以及管理面跨层多域协同的保障技术等。

2.2 5G超蜂窝网络架构关键问题的关联性和特点

几个技术点之间的相互联系可以用图5来说明。

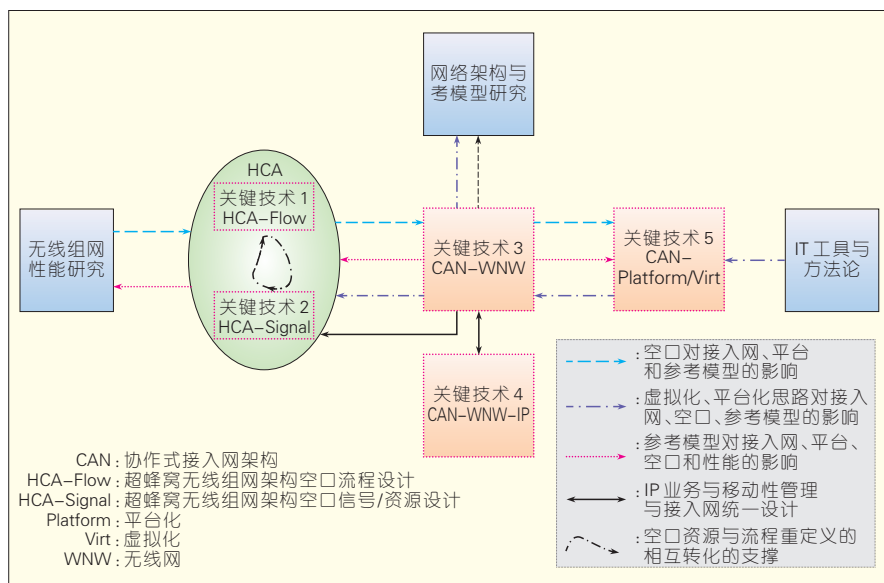
超蜂窝无线组网架构空口流程设计(HCA-Flow)和超蜂窝无线组网架构空口信号/资源设计(HCA-Signal)形成5G超蜂窝无线组网方

案,有不同的侧重,但又互相补充。比如空口流程的重定义离不开空口资源的灵活划分,空口资源的重定义同样离不开高弹性空口流程的组织 and 调度。

协作式接入网架构无线网(CAN-WNW)与HCA-Signal/Flow是映射关系,同样的数据面和控制面分离技术在两个关键技术中都有所研究,但是HCA-Signal/Flow侧重为了满足网络性能指标的逻辑定义,而CAN-WNW侧重为了构建高弹性可重构的接入网而对不同类型的处理进行解耦以及耦合。简单来说,HCA-Signal/Flow的空口逻辑定义向CAN-WNW的接入网处理提出需求,CAN-WNW将HCA-Signal/Flow实现在接入网中;CAN-WNW的接入网处理框架特性,对HCA-Signal/Flow的空口技术体制的定义所有约束和促进。

CAN-WNW-IP与CAN-WNW同属于5G接入网设计,一个侧重业务和移动性管理,一个侧重空口的处理。但同时,CAN-WNW-IP所研究的移动互联网业务和行为,对CAN-WNW或HCA-Signal/Flow也会有所影响,所谓跨层多域协同和以用户QoE为标的的网络资源调配和管理。

协作式接入网架构平台化/虚拟



▲图5 关键技术之间的相互联系

化(CAN-Platform/Virt)对CAN-WNW和CAN-WNW-IP有直接的支撑作用,CAN-WNW和CAN-WNW-IP的处理逻辑设计,提炼出公共的平台性需求形成CAN-Platform/Virt的研究范畴,同时CAN-Platform/Virt引入和借鉴IT领域的技术又可以对CAN-WNW和CAN-WNW-IP的技术体制的定义有所约束和支撑,进而影响到HCA-Signal/Flow技术体制的定义。

3 5G 超蜂窝网络架构与物理层新技术

3.1 一致设计

图2中已经将传统的BBU以及RRU的功能和定义做了扩展。其中,RRU中除了具有传统RRU的射频前端的能力外,还负责系统资源的映射,比如从用户数据向时间、频率和空间等资源的映射,其映射指令来自于BBU,但是RRU负责对系统资源进行维护。BBU负责对系统资源的管理和用户数据链的处理。这种划分方式可以简化BBU与RRU之间的数据传输压力,同时具有较好的可扩展性。按照上述的BBU和RRU定义,给出一种初步的组网方案,如图6所示。对应小基站(Small cell)组网^[13]、分布式天线或分布式大规模天线阵(Large Scale MIMO)^[14]。

其中,图6中的链路都是通用公共无线接口(CPRI)链路,具有数据传输能力,时钟和频率同步能力以及管理和运维(O&M)传输能力。BBU₀和BBU₁在空口划分大的控制域,控制域之间可以有重叠,用户从控制域之间通过L3信令进行切换。BBU控制域内存在大量的RRU,每个RRU有完整的时间和频率资源,空间资源需要一个或多个RRU之间协同定义。RRU具有级联和聚合能力,对于相同的用户流可以聚合,对于不同的用户流则需要额外的传输资源,由于每个RRU具有的级联传输能力是有限的,或者说RRU空口覆盖对应的

业务是动态变化的,则RRU需要具有2条向上的连接路径,比如一个末端RRU可以通过两个级联RRU最终接入BBU。

CPRI交换单元(SWITCH)具有交换能力但不具有覆盖能力的设备,SWITCH之间可以星形组网。从RRU级联以及SWITCH之间组网的交换逻辑由BBU通过SDN的方式或者静态方式进行设置。BBU中有集中控制单元,负责网络资源的控制和调度,也有分布式的以用户流为单位的处理单元。由于用户流中的数据流需要密集计算,所以完全分布式处理,而用户流中的对等控制流属于逻辑密集型,虽然是按照用户划分完全独立的,但是可以集中处理。

与上述接入网架构对应的空口覆盖图景如图1。基本可以认为用户流中的对等控制流需要一个全局覆盖,比如L2/L3的信令,L2/L3的信令传输独立于用户流中的业务流,在以往的系统中,包括LTE,通过某种时序关系,隐含了对等控制流与业务流之间的一一对应关系,这里为了灵活和可扩展性,假设对等控制流如果对用户流处理有所设置,总是需要指定具体的业务流的时序和标识。对等控制流总是有比业务流更高的优先级,其性能和时延优先,容量次之。而业务流则按照指定的优先级,一般来说容量/速率优先。

3.2 一致设计带来的新思路

这种架构设计,将大规模天线阵列(传统认为是空口物理层传输层面的设计)与接入网的SDN化以及空口网络架构的超蜂窝化(控制覆盖与业务覆盖的分离这种异构设计,空口的Small Cell化以及CoMP化趋势)相统一,从而使得上述3个研究领域可以在新的层面统一进行研究。

(1)信道状态信息(CSI) ▲图6 分布式RRU以及集中式BBU组网方案

构成的大规模多维稀疏矩阵^[15],用一个比较规整的数据模型将上述链路级和系统级问题统一起来,里面会蕴含大量的系统级问题,比如功率控制、自适应调度等等,不再是单纯的链路级求逆问题,而可以采用大量系统级算法,比如Genetic算法、Greedy算法、Heuristic算法等。

(2)SDN化的原则:特征数据集中化,比如CSI;用户流数据本地化,比如分布式预编码(Precoding)。

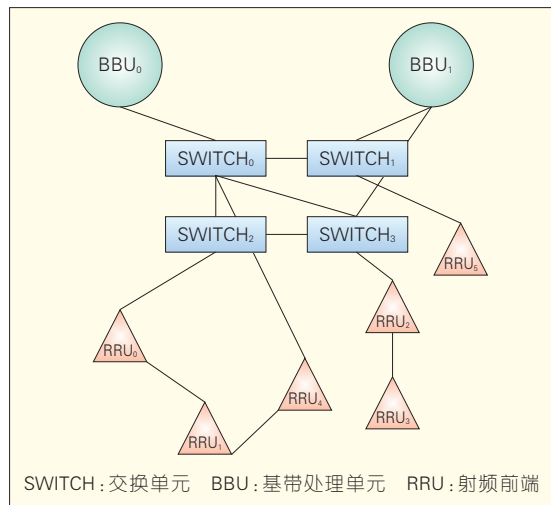
(3)如果稀疏矩阵的处理可以分解为迭代式的话,就完全可以在RRU中分布式处理,而不需要在BBU中集中处理。

(4)空口的异构设计中,大区覆盖主要针对L2/L3等用户控制数据的覆盖,切换只发生在大区之间,在RRU覆盖范围内不触及切换,只会引起RRU Precoding系数的平滑改变。

(5)上述网络设计有较好的可扩展性,BBU只有用户流的处理和对天线数据(CSI)的集中化处理;而天线的处理在RRU内部或通过RRU聚合消化掉。

4 结束语

类似10年前的Internet大发展,移动通信需求端正经历一场变革,并将改变移动通信行业的生态环境。在此移动数据业务大爆炸时代,运营



商所遭遇的困境在于:尽管移动数据业务总量经历着快速增长,营收增长却经历不匹配的低速增长。其可能的原因有:下滑的每用户平均收入(ARPU),移动用户增长的饱和等。由于OPEX跟随数据业务总量增长的速度,运营商的利润也就因此而反方向下降^[16]。

一些分析师按照运营经济学的方式仔细分析现状,并不约而同给出了非常相似的解决方案,其关键词就是:网络共享、外包、智能网管、移动虚拟运营商(MVNO)等。前3个主要是通过合作模式来压缩成本,第4种手段主要通过合作模式来发现新的服务类型。无论是提高运营效率还是采用智能网络管理,所有这些手段背后的思路都是通过运营的不同层面(例如,建设、运营、网络优化和业务推广)采用合作模式来寻求成本削减。这种倾向可以进一步拓展为一种变革性运营模式,正如移动互联网和智能手机行业所采用的那样,合作与竞争并重。相比传统模式(封闭与集中化),这将是一种健康的发展模式(开放与多元化)。进而,这种变迁的模式迫切需要一种变革性网络架构,来支持和帮助移动通信行业向健康发展模式的迁移。这种网络架构解决方案的核心就是虚拟化、平台化和面向服务化,正如Internet领域发展出的云计算技术一样。总之,电信行业需要具有竞争合作模式的变革性网络架构,来解决需求端革命与运营利润现状之间的深刻矛盾,其基本思路就是采用IT界的方法论,采用具有虚拟化、平台化以及面向服务化特质的解决方案。

从这个意义上,5G超蜂窝网络架构及其技术路线会深刻的影响具体网络技术,进而影响网络的建设和运营模式等。从标准化角度,网络架构参考模型为网络技术确定标准文本的组织方式;从系统研发角度,网络架构参考模型决定系统计划分原则,以及从标准向实现的迁移方式,

比如,标准中ASN.1^[17]的采用使得协议层编解码器的自动化成为可能,IEEE 802.11所定义层间原语极大的影响了Wi-Fi领域存在的大量技术创新;从网络建设角度,网络架构参考模型^[18]决定了某种具体网络的工程建设模式(全局集中建设还是分担式共建);从网络运营角度,网络架构参考模型决定了成本与收益模式;从产业格局角度,网络架构参考模型影响了行业的组织方式。

所以,5G超蜂窝网络架构及其关键技术的研究,不仅能从技术层面满足业务层面对5G移动通信系统的需求,更能从经济和社会层面解决运营经济学中所面临的困境,进而促进移动通信行业的发展。

参考文献

- [1] ITU-R. M.2072-0. World mobile telecommunication market forecast [S]. ITU, 2006.
- [2] ITU-R. M.2243-0. Assessment of the global mobile broadband deployments and forecasts for International Mobile Telecommunications [S]. ITU, 2011.
- [3] 王映民, 孙韶辉. TD-LTE技术原理与系统设计 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [4] 李文宇, 顾昕钰. 基于多载频技术的TD-SCDMA标准演进 [J]. 世界电信, 2007, 20(4): 18-22.
- [5] 牛志升, 周盛, 周世东, 钟晓峰, 王京. 能效与资源优化的超蜂窝移动通信系统新架构及其技术挑战 [M]. 北京: 中国科学, 2012.
- [6] Developing & Integrating a High Performance HET-NET [EB/OL]. [2012-10]. <http://www.4gamericas.org/documents/4G%20Americas%20-%20Developing%20Integrating%20High%20Performance%20HET-NET%20October%202012.pdf>.
- [7] KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A, NAKAMURA T, et al. Future steps of LTE-A: evolution toward integration of local area and wide area [J]. IEEE Wireless Communications Journal, 2013, 20(1): 12-18.
- [8] SAWAHASHI M, KISHIYAMA Y, MORIMOTO A, et al. Coordinated multipoint transmission/reception techniques for LTE-advanced [Coordinated and Distributed MIMO] [J]. IEEE Wireless Communications Journal, 2010, 17(3): 26-34.
- [9] 王京, 姚彦, 赵明, 周世东, 王艺, 栗欣. 分布式无线通信系统的概念平台 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [10] China Mobile Research Institute. C-RAN The Road Towards Green RAN [R]. China Mobile Research Institute, 2011.
- [11] 3GPP. TS 23.002. Network architecture [S]. 3GPP, 2011.
- [12] RIMAL B P, CHOI E, LAMB I. A taxonomy and survey of cloud computing systems [C] //

Proceedings of the 5th Int. Joint Conf. INC IMS IDC, 2009, Seoul, Korea. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 1075-1080.

- [13] The 1000x Challenge, More small cells - taking hetnets to the next level [EB/OL]. [2013-11-20]. <http://www.qualcomm.com/media/documents/wireless-networks-1000x-more-small-cells>.
- [14] HOYDIS J, HOSSEINI K, TEN BRINK S, et al. Making Smart Use of Excess Antennas: Massive MIMO, Small Cells, and TDD [J]. Bell Labs Technical Journal, 2013, 18(2): 5-21.
- [15] NGO H Q, LARSSON E G, MARZETTA T L. Massive MU-MIMO Downlink TDD Systems with Linear Precoding and Downlink Pilots [C] // Proceedings of the Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, Oct. 2013, Illinois, USA. arXiv preprint arXiv: 1310.1510, 2013.
- [16] Mobile broadband-busting the myth of the scissor effect [EB/OL]. [2010-06-22]. http://www.ericsson.com/news/100622_ebr_strategy_mobile_broadband_244218601_c.
- [17] ITU-T. Recommendation X.680-X.695 (11/08). Information Technology - Abstract Syntax Notation One (ASN.1) & ASN.1 encoding rules [S]. ITU-T, 2011.
- [18] IEEE. IEEE 802.11-2012. IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks--Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications [S]. IEEE, 2011.

作者简介



赵明, 清华大学电子工程系博士毕业; 清华大学研究员; 从事无线与移动通信、卫星移动通信系统的研发, 包括移动通信中的信道编码、信道容量、信道估计、调制解调、资源管理、网络协议等; 已承担3项国家自然科学基金项目, 发表学术论文80余篇。



许希斌, 清华大学电子工程系硕士毕业; 清华大学无线与移动通信研究中心副主任、研究员; 从事无线通信系统及传输信号处理的研究; 已主持和参加3项国家自然科学基金项目, 发表学术论文80余篇, 其中SCI收录15篇, EI收录35篇。



牛志升, 日本丰桥技术科学大学博士毕业; 清华大学电子工程系教授、IEEE和IEICE Fellow; 从事通信话务理论、排队论、通信网络的流量控制与性能分析、无线网络的资源分配及跨层优化、通信与广播融合网络、绿色通信与网络等研究。

面向 5G 基于 C-RAN 宏微协作的 极简数据载波设计

Macro-Assisted Ultra-Lean Data Carrier and Architectural Design

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 02-0017-005

摘要: 提出了一种面向 5G 密集网络部署的极简数据载波设计。极简数据载波是在 C-RAN 架构下的一种微蜂窝数据载波, 主要用于数据承载, 支持无公共信道开销、极少或者没有控制信道开销, 能够有效降低密集数据载波之间信令的干扰, 较大幅度提高能效, 并由于设计简单有利于降低数据载波的成本。重新设计了传统数据载波的信令, 并重新设计宏基站和微基站的接口和交互流程。重点解决了 3 个问题: 微基站载波的发现和选择、用户同宏微载波的同步接入、宏微和微微载波间的测量切换。仿真结果表明, 在相对理想的回传支持下, 能较大幅度提升系统的切换性能、吞吐量和能效。

关键词: 信令数据分离; 极简数据载波; 宏微协作

Abstract: In this paper, we propose an ultra-lean data carrier design for dense small-cell deployment with macro coverage. An ultra-lean data carrier does not have common broadcast signaling overhead and has minimum control signaling. With such a carrier, energy consumption and interference in dense small cells can be reduced and throughput improved. Moreover, deployment cost can also be reduced. The traditional data carrier signaling is redesigned, and the interface and interaction processes of macro and micro based stations are also redesigned. Three problems have been solved in this paper: discovery and selection of micro base station carrier, synchronize access between user and macro-micro carrier, the measuring switch between macro carrier and micro carrier. Simulations show that signaling overhead, throughput, and energy efficiency significantly improve with ideal backhaul.

Key words: singling and data decoupling; ultra-lean data carrier; macro-small cell cooperation

为了应对移动互联网的流量爆发式增长(预计到 2020 年移动互联网的流量将增加 1 000 倍^[1]), 运营商除了引入频谱效率更高的 LTE 网络之外, 不得不部署更加密集的网络, 并同时寻求更多的频段资源(比

如 3 GHz 以上更高的频段)。我们预计在未来会出现密集部署的异构网络。相对低频的宏基站负责覆盖和对连续性要求较高的低速业务, 高频的微基站负责热点的高速数据接入。另外高频微基站的覆盖面较小(小于 50 m), 必然会对微基站的组网、移动性、能耗等方面带来极大的挑战^[2]。密集覆盖会导致干扰增大, 降低吞吐量。同时会使得用户频繁

切换, 导致用户切换失败率增加。宏微基站的重叠覆盖, 也会造成大量的能耗开销, 微基站数量较多(在不远的将来估计与宏基站的数目比可能大于 10 比 1), 公共广播信道的开销较大, 使得整体能耗较高。

云接入网(C-RAN)^[3]是中国移动研究院在 2009 年提出的未来无线接入网形态, 旨在设计低成本、高容量、高运营效率的无线接入网架构。在宏微密集组网下, C-RAN 通过微远端无线射频单元(RRU)拉远的方式, 将基带处理资源进行集中, 形成一个基带资源池并对其进行统一管理, 在提升资源利用率、降低能耗的同时, 还通过对协作化技术的有效降低干扰, 提升网络性能。

目前 3GPP 的设计思路是将用于宏基站的载波进行简化后应用于微基站载波, 微基站载波设计大多还保留了宏基站载波的设计, 在测量、同步、接入和切换等机制上基本与宏站类似^[4], 未充分挖掘基于宏微协作进行优化设计的可能性, 这样制约性能和能效优化空间。本文考虑微站载

陈亚迷/CHEN Yami

李刚/LI Gang

崔春风/CUI Chunfeng

(中国移动研究院 绿色通信研究中心, 北京 100053)

(China Mobile Research Institute, Green Communication Research Institute (GCRC), Beijing 100053, China)

收稿日期: 2014-01-06
网络出版时间: 2014-02-26
基金项目: 国家科技重大专项
(2012ZX03003007-002)

波的特性(用户量较少,覆盖范围较小,且用户的移动性较低,时间扩展性和频率选择性衰落较小)和 C-RAN 集中基带处理统一调度的优势,进一步简化微站载波设计,充分利用 C-RAN 基带集中调度降低微基站的广播信令开销和处理复杂程度,设计低复杂度、低成本和低开销的数据接入载波。

1 总体架构设计

极简数据载波是一种由微站承载的数据载波,支持无公共信道开销、极少或者没有控制信道开销的数据载波;用户(UE)没有办法通过传统的广播信号进行极简数据载波的发现、选择,同步和切换测量^[9]。本文重点解决如下问题:微基站载波的发现和选择,UE 同宏微载波的同步,宏微和微微载波间的测量切换。本文假设信令宏基站载波沿用传统的 LTE 基站设计。如图 1 所示,基于 C-RAN 架构的极简载波网络架构主要包括信令宏基站载波(MC)、数据微基站载波(SC)。通过拉远宏/微 RRU,基带处理集中的方式来部署。

MC 除了具有传统 LTE 载波的完整设计外,还具有如下功能:

- 协助 SC 完成初始接入
- 协助 MC 覆盖范围内所有 SC 的切换

• 控制 MC 覆盖范围内所有 SC 的调度

SC 则是一种只传数据的新型载波,并配合宏信令基站完成 UE 的接入、切换、调度到数据基站,进行上下行的数据传输。具体地,SC 的特征如下:

(1)简单、低开销,实现只传数据仅有上下行数据信道以及随路的参考信号;无额外的专属控制信道,比如 LTE 中的物理下行公共控制信道(PDCCH)、物理上行公共控制信道(PUCCH)以及物理随机接入信道(PRACH)。

(2)去除传统的广播信令信号

取消用于站点发现以及同步(时间粗同步、载波同步)的主同步/辅同步信号(PSS/SSS);取消用于时间精同步、支持小区移动性测量的小区专属参考符号(CRS);取消小区专属的广播信息,包含承载在物理广播信道(PBCH)上的主系统信息块(MIB)以及承载在物理数据共享信道(PDSCH)上的系统信息块(SIB)。

2 极简数据载波关键技术

极简数据载波设计面临的一个核心问题是 SC 的发现、同步和测量。该问题的实现直接影响了 SC 的决策、接入和切换性能。极简数据载波设计建议摒弃固定的广播信号开

销,突破性地改变传统“下行广播侦听”思想,由 UE 按需数据载波可侦听的需求信号,承载数据载波的 SC 进行上行侦听,并且在 MC 的协助下,快速完成同 UE 之间的同步和数据传输。因此,极简数据载波设计需要重点对 UE 发送的“上行侦听信号”以及“宏微协作”方案进行设计。

2.1 上行侦听信号设计

UE 上行侦听信号要完全取代既有的“下行广播信号”,要求能够有效地支持 SC 的识别(或者换个思路讲,如果 UE 不能够识别微基站,要求微基站主动地去识别 UE,服务 UE)、UE 同 SC 的上下行同步、SC 信号测量以及 UE 上行接入功率决策。建议可以基于已有的上行探测参考信号(SRS)设计上行侦听信号,其相比同样是基于 Zadoff-Chu(ZC)序列的上行随机接入前导(Preamble)和上行解调参考信号(DMRS)的优势是:Preamble 主要由随机接入 UE 发出,并不是随路的。而 DMRS 跟 UE 数据耦合过于紧密,不方便通过如功率增强的方法,支持有效的 SC 检测。进一步地,考虑到未来网络中的一个重要场景是 MC 和 SC 分别由不同频段的载波承载,其中 MC 倾向由低频段承载,而 SC 由高频段承载。兼容性考虑,极简载波设计希望上行侦听 SRS 优先由低频段的 MC 承载,并可被 SC 侦听。SC 基于侦听结果,完成同 UE 的同步和传输配置。下文将进一步验证 SRS 作为上行侦听信号的可行性。

考虑到未来网络中的一个重要场景是 MC 和 SC 分别由不同频段的载波承载,其中 MC 倾向由低频段承载,而 SC 由高频段承载。兼容性考虑,极简载波设计希望上行侦听 SRS 优先由低频段的 MC 承载,并可被 SC 侦听。SC 基于侦听结果,完成同 UE 的同步和传输配置。

(1)上行同步需求

关于 CP 和保护间隔^[6],借鉴传统

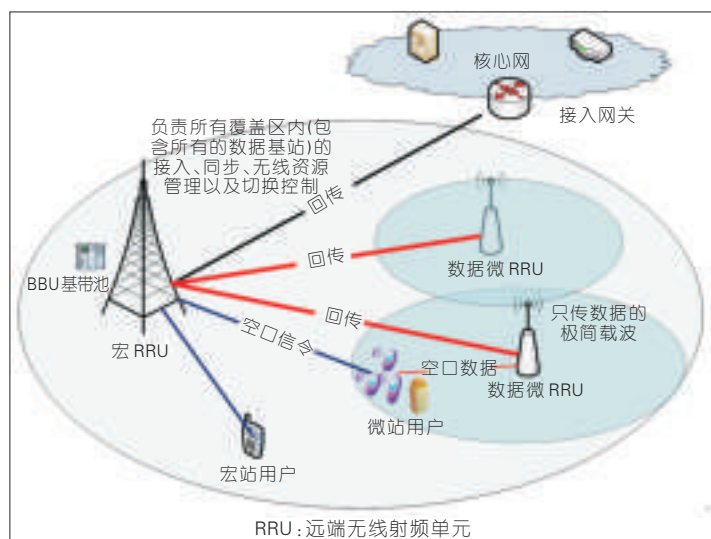


图1
基于极简数据
载波设计的架构

LTE 中的随机接入前导序列的知识,若 SC 要基于 MC 上传输的 SRS 来实现上行同步,要求 UE 对应 SC 的时间提前量(TA)小于宏小区上的承载 SRS 的符号的 CP。因为尽管 UE 对于 MC 是上行同步的,但是对于 SC 尚未完成上行同步。可以利用信令宏基站和数据微基站覆盖的差异性来解决这个问题:对于 100 m 半径的数据微基站,或者,假设最大半径为 500 m 的数据微基站,其最大传输时间是 $1.667 \mu\text{s}$,对应的 TA 应该是 $3.34 \mu\text{s}$,这个 TA 小于 SRS 信号的 CP(在 LTE 常规 CP 中(非扩展 CP),CP 的长度为 $4.69 \mu\text{s}$),所以这个 SRS 信号对于数据基站来就不需要保护时间间隔。

关于时间提前量,LTE 中,宏小区随机接入前导对应的 TA 为 11 比特(最大取值 1 282),允许的最大的时间提前量是 0.667 ms ,对应为 100 km 宏小区的最大的往返传输时间(RTD)。如果 SC 覆盖范围是 500 m,那么对应的 TA 应是 $3.34 \mu\text{s}$,对应需要 $\log_2(3.34 \mu\text{s}/16T_s)$, $T_s=1/30.72 \mu\text{s}$,约合 3 bit 信息。而 SRS 允许的最大 TA 调整量为 6 bit,是足够实现 SC 同步的。当然,实际测得的 TA 是 RTD 和传播时延扩展的和。考虑到传播时延扩展对于不同频段具有差异性,需要验证基于低频段 MC 上传输的 SRS 得到的 TA 用到高频段的可行性:参考 ITU 信道模型^[7],2 GHz 室外 NLOS 最大的时延扩展为 $0.36 \mu\text{s}$,而 2.5 GHz 室内 NLOS 最大的时延扩展为 $0.12 \mu\text{s}$,因此,如果考虑高低频段在时延扩展的差异性,潜在可能存在的最大时延扩展差异为 $0.36 \mu\text{s}$,小于一个 TA 调整步长 $16T_s(0.52 \mu\text{s})$ 。因此,通过低频段 SRS 上行侦听得到的 TA 可以很好地应用到高频段。

关于频偏估计,根据 ITU 信道模型,频偏主要跟中心频点、UE 移动速率、信号到达角以及 UE 移动方向相关。其中,最大频偏取决于中心频点和 UE 移动速率。如果考虑 SC 主要支持移动速率在 30 km/h 以及以下的

移动性,并且假设,MC 部署在 2 GHz 频段,而 SC 部署在 6 GHz 频段,那么两者的最大的频偏分别为:55.56 Hz 以及 166.67 Hz,两者的频偏差异最大为 222.23 Hz,具体的差异值跟信号到达角和 UE 移动性相关;考虑到该频偏差异值仅为 LTE 15 kHz 子载波宽度的 1.5%,UE 初始接入可以忽略频偏的影响。进一步地,考虑到 SC 在高频段工作有望采用更大的子载波宽度来实现更小的传输时间间隔(TTI),频偏的影响基本可以忽略。可以通过数据传输过程中符号的 CP 实现 SC 频率的微调。

(2) 上行测量需求

LTE 系统已经使用上行 SRS 信号的发送实现 UE 上行信道的测量,也就是 SRS 本来具有可测量性。并且这个对应具体 UE 的已知的 SRS 信号可以由 MC 传递给 SC。故 SRS 信号对于 SC 也是已知、可测量的。

(3) 下行同步和测量需求

在未来,越来越多的高频数据微载波(比如 3.5 GHz)会使用 TDD 机制,可以利用上下行信道的互易性获取 UE 同 SC 的下行的同步信息以及测量结果。但是,如上文所述,利用 SRS 获取同步和测量时存在偏移的。LTE 中载波聚合(CA)中不同的子载波(CC)之间最大下行接收容忍的时钟差为 $31.3 \mu\text{s}$ ^[8]。如果考虑传播时延扩展为 $16.7 \mu\text{s}$ 的话,那么对应的往返时延 $14.6 \mu\text{s}$ 支持最大约 1 km 的覆盖。所以可以认为,允许 SC 存在一定的下行时钟偏移。并在数据传输过程中,利用随路的导频信号进行精确调整,比如 DM-RS。

综上,SRS 用于上行侦听信号,支持 UE 同 SC 之间的同步、测量是完全可行的。

2.2 关键流程分析

基于“上行侦听信号”实现 SC 检测、测量、同步的方法,要求 MC 为 SC 提供更多的支持,因此面向这种新型的架构设计,需要新的接入和切换流

程进行支持。

2.2.1 极简载波接入

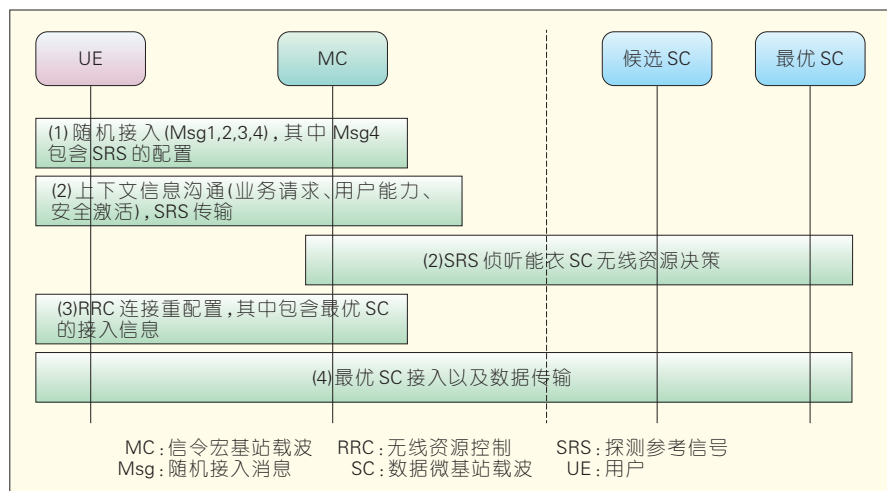
基于极简数据载波接入如图 2 所示。在宏微协作双连接接入过程中,MC 跟终端接口完成信令面的配置,与此同时,MC 控制 SC 完成上行侦听,决策选出数据面无线资源。该过程主要包含如下步骤:

(1) 随机接入以及 SRS 分配

UE 采用 LTE 4 步随机接入过程接入到 MC,其中 MC 在无线资源控制(RRC)^[9]建立随机接入消息(Msg4)中为用户配置 SRS 以及进行 SRS 无线资源分配。

(2) UE 上下文传递、SRS 侦听以及 SC 无线资源决策

UE 完成信令承载 1(SRB1)及其无线资源配置,并在 SRB1 同 MC 完成非接入层信令(NAS),包含业务请求、用户能力、安全激活的交互(该过程涉及无线信令 5 条,若不考虑核心网交互时延的话,时延 15 ms)。与此同时,MC 配置 SC 侦听对应 SRS 信号,基于 SRS 获取 UE 的 TA 估计、信号测量,并反馈给 MC,由 MC 基于反馈信息以及其他已知的上下文信息,选择出最优的 SC;进一步地,MC 联合最优 SC,决策最优 SC 上对应于 UE 的无线资源分配。“上行侦听以及决策”涉及到空口 SRS 侦听、SRS 侦听结果回传、SRS 侦听结果处理,并完成最优 SC 以及最优 SC 上的资源决策,对应时延为:SRS 侦听持续时间+SRS 侦听结果回传+SRS 侦听结果处理+最优 SRS 以及最优 SC 上的资源决策;如果 SRS 侦听持续时间为 10 ms(参考:LTE 中需要获取 8 个 PSS/SSS 样本,持续时间 40 ms,才能检测出信号最优的 3 个小区。这里假设 SRS 比 PSS/SSS 更加密集,或者检测性能更好。因为 SRS 相比 PSS/SSS 更容易实现干扰协调),那么在理想回传以及集中基带池环境下,5 ms 内实现 SRS 侦听结果回传、处理以及资源决策是可以实现的。因此,“结合上行侦听



▲图2 基于极简数据载波接入

的 SC 资源决策”可以不造成更大的接入时延。

(3) RRC 连接重配置

MC 同 UE 交互完成信令承载 2 (SRB2) 及数据承载 (DRB) 建立和无线资源分配。其中无线资源包含最优 SC 的接入信息, 包括异频数据载频频域同步偏置、TA、上行接入功率、资源分配。

(4) SC 接入以及数据传输

UE 完成 SRB2 以及 DRB 配置, 并且基于收到的 SC 的 TA、利用上下行信道互易性, 以及基于数据载频频域同步偏置, 完成同最优数据基站的上下行同步。然后, UE 可以在 SC 上对应无线资源进行数据传输; 传输过程中可以基于随路的 DMRS, 调整时间、频域同步以及信道估计。

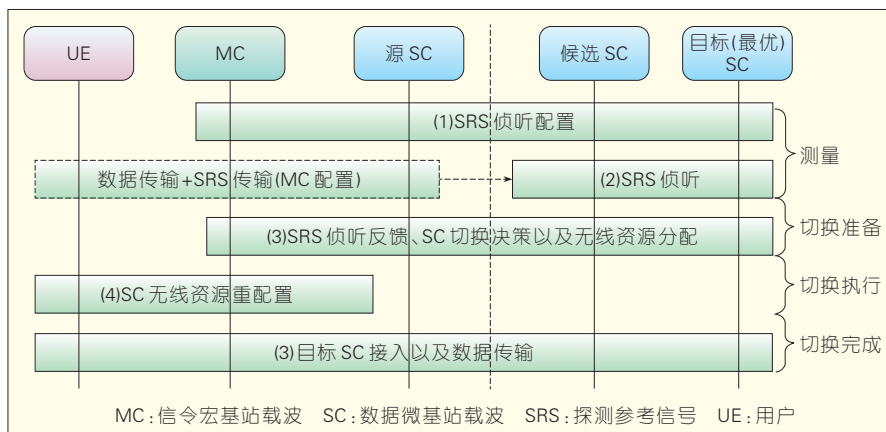
相比传统的单连接接入流程, 双连接接入的时延可能多在连接重配置的时候不仅要考虑承载的配置, 还需要考虑数据站点的上下行同步配置, 另一方面, 由于上行侦听方案可能实现不了非常精确的同步状态 (包括时频和信道估计), 需要在数据发送过程中进行调整。上行侦听方案对应的能效和性能增益或者损失需要具体的评估来验证。

2.2.2 极简载波切换

极简载波引入后, 主要新的切换

场景是宏微载波之间的切换 (如图 3 所示), 大致的思路类似于初始接入。不同的是触发 SC 侦听的时机不同, MC 可以根据正在服务的 SC 反馈上来的信号强度低于某一门限值, 则可以触发附近的 SC 进行 SRS 的侦听。同样的, MC 告知对应的 SC 关于 UE 的标识以及 UE 的 SRS 配置以及资源位置, 然后 SC 侦听对应 SRS 信号, 并将 SRS 侦听信号反馈给 MC, MC 基于 SRS 获取 UE 的 TA 估计和信号测量等。MC 根据反馈信息以及其他已知的上下文信息, 选择出最优的 SC; 进一步地, MC 联合最优 SC, 决定 UE 的无线资源分配。后续完成 SC 无线资源重配置和 SC 接入以及数据传输。

传统 LTE 切换流程要求在信令



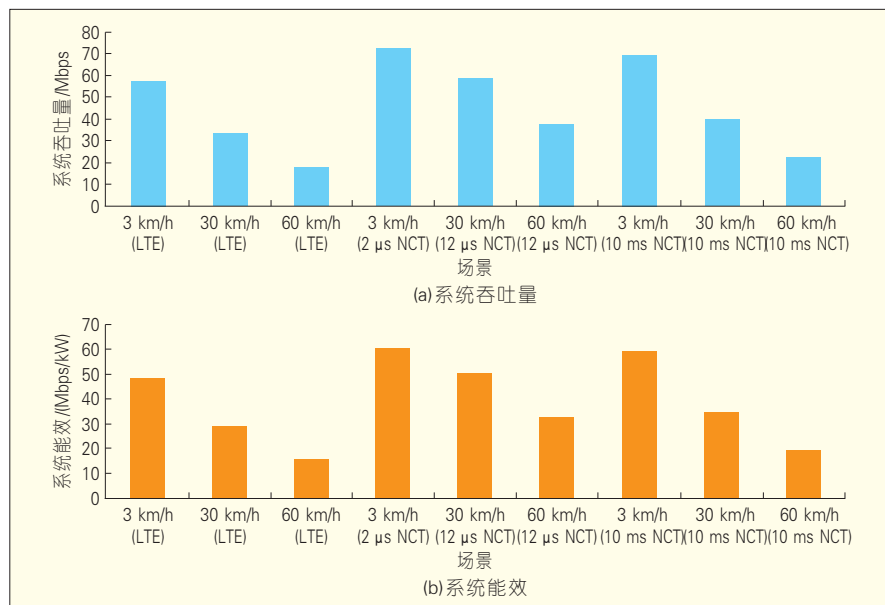
▲图3 基于极简数据载波切换

面上首先释放源站点的连接, 并在目标站点完成同步接入以及资源重配, 并且在数据面上要求完成源站点到目的站点的缓存数据的转移。相比之下, 本切换流程基于 C-RAN 集中基带池处理, 完全是基带池内部操作, 而且因为不涉及承载的重配置 (而是站点和物理资源的重配)、不需要额外的随机接入过程以及用户面的数据转移 (因为用户面统一由信令基站路由调度), 能够节约较多的空口信令, 以及时延开销。

3 仿真评估

本文以传统异构网络 (HetNet) 为基准^[10]、参照 EARTH^[11] 功耗模型, 对极简载波新型设计 (NCT) 进行了评估和比较。其中重点考虑了不同的移动等级, 包括: 3 km/h、30 km/h、60 km/h^[12], 以及不同的时延的回传, 如 2 μ s、10 ms, 分别对应理想回传以及不理想回传。

系统吞吐量和系统能效比较如图 4 示。图 4 中 LTE 为传统 LTE HetNet, NCT 为基于极简载波新载波类型, 2 μ s、10 ms 为不同时延的 C-RAN 回传。高速移动场景下, 由于 UE 的信号测量时延导致没法对变化的信号的环境进行准确判断, 并且由于切换时延导致切换的命令同新的网络环境不匹配, 导致切换的失败率增加, 导致系统吞吐量的降低、系统能效降低。相比传统的 LTE HetNet,



▲ 图 4 系统吞吐量和系统能效比较

极简载波 NCT 能够较好优化移动性能,即随着 UE 移动速度的增大,切换引发的性能下降会有所缓和。对于 LTE HetNet, 30 km/h 的移动速率就引发了 42% 的吞吐量以及能效的损失,相比之下,基于理想回传的极简载波 NCT 的吞吐量损失是 19%,而不理想回传对应的损失是 43% (尽管如此,由于 NCT 大幅节约了小蜂窝固定信令传输开销,高时延 NCT 仍有增益)。可见, NCT 架构对于切换性能的优化 (直接关系到系统吞吐量和能效的优化) 同 C-RAN 回传密切相关。在理想回传下, NCT 的系统吞吐量和能效较 LTE 网络有显著提升,在低速场景 (3 km/h) 增益为 26%,在中高速移动场景下 (30 km/h 和 60 km/h) 的增益尤为明显,分别为 76% 和 110%。这是因为在中高速场景下,基于 NCT 的网络同时从信令节约以及移动性提升两个方面带来增益。随着回传时延的增大,比如 10 ms,基于 NCT 的网络性能和能效增益将下降,特别是中高速移动场景下,由于回传的不及时,导致切换性能大幅下降,吞吐量和能效也大幅下降。结论:新型载波的设计依赖于较为理想的回传,基于理想回传的新型载波能

够显著提升网络的切换、吞吐量性能以及系统能效。

4 结束语

基于数据信令解耦的无线网络架构是解决密集高频段小蜂窝部署的重要手段,得到业界的广泛认同。那么如何实现有效的数据信令解耦方案,提升系统切换、吞吐量、能效等性能,需要更多的探索。本文从一种极简数据载波设计思想出发,探索了在 C-RAN 架构下基于宏站协作实现无公共信道开销的数据载波的可能性,并给出了架构和流程分析。该方案能够有效解决密集高频段小蜂窝的切换干扰、能耗较高等问题,并且不会带来更大的信令负荷以及时延。仿真结果显示,方案能够有效提升系统的能效、性能 (吞吐量、切换)。后续工作将进一步量化分析初始同步 (时间、频域) 偏差对系统性能的影响。并将融合面向高频段新型物理波形设计,验证所述新型网络架构的性能和能效,并进一步优化。

参考文献

- [1] 4G America. Meeting the 1000x challenge: the need for spectrum, technology and policy innovation [EB/OL]. (2013-12-12). http://www.4gamerica.org/documents/2013_4G%20Americas%20Meeting%20the%201000x%20Challenge%2010%204%2013_FINAL.pdf.

- [2] 3GPP. TR 36.842. Small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN – Higher layer aspects [S]. 3GPP, 2013.
- [3] C-RAN: The Road Towards Green Ran, China Mobile Research Institute White Paper [EB/OL]. (2013-12-12). http://labs.chinamobile.com/report/view_59826.
- [4] 3GPP. TR 36.872. Small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN – Physical layer aspects [S]. 3GPP, 2013.
- [5] 3GPP. TS 36.213. Physical layer procedures [S]. 3GPP, 2012.
- [6] 3GPP. TS 36.211. Physical Channels and Modulation [S]. 3GPP, 2012.
- [7] ITU-R. M.2135.1. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced [S]. ITU, 2009.
- [8] SESIA S, TOUFIK I, BAKER M. LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice [M]. John Wiley & Sons, Ltd. 2009: 454.
- [9] 3GPP. TS 36.331. Radio Resource Control (RRC) [S]. 3GPP, 2012.
- [10] 3GPP. TR 36.839. Mobility enhancements in heterogeneous networks [S]. 3GPP, 2012.
- [11] IMRAN M A, KATRANARAS E. Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown [EB/OL]. (2013-12-12). <http://www.ict-earth.eu>.
- [12] 3GPP. TR 36.932. Scenarios and requirements for small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN [S]. 3GPP, 2013.

作者简介



陈亚迷, 北京邮电大学硕士毕业; 中国移动通信研究院 5G 关键技术研究员; 研究领域为 5G 绿色无线通信架构演进、基于网络应用的控制信令优化。



李刚, 四川大学硕士毕业; 中国移动通信研究院绿色通信技术研究中心资深研究员; 研究领域为新型无线网络架构、业务感知的无线网络优化。



崔春风, 北京邮电大学博士毕业; 中国移动通信研究院绿色通信技术研究中心主任; 负责无线网络新技术研究及国际标准化工作, 主要研究领域为绿色无线通信新技术、无线网络功能虚拟化及 5G 关键技术研发。

采用网络编码的双向中继信道中软信息的传输方法

A Soft Information Delivery Scheme in Two-Way Relay Channels with Network Coding

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 02-0022-004

摘要: 采用格栅编码量化(TCQ)这一信源编码方法结合格栅编码调制(TCM)技术,解决了双向中继信道中软信息的传输问题。仿真表明,在衰落信道下,该方法性能上优于传统的译码转发和放大转发的网络编码方法。该方法应用于双向中继信道并在有限带宽的情况下可获得接近理想信道的链路性能。该方法为软信息网络编码走向实用提供了一种有效的思路。

关键词: 网络编码; 软信息传输; 双向中继; 协作通信

Abstract: In this paper, we describe a method of using trellis coded quantization (TCQ), which is regarded as a source coding technology, combined with trellis coded modulation (TCM), to solve the soft informing transmission problem in a two-way relay channel. Simulation shows that, in the fading channel, TCQ is superior to traditional decode-and-forward and amplify-and-forward coding. When TCQ is used in a two-way relay channel with limited bandwidth, link performance is close to that of an ideal channel. TCQ is an effective, practical method of soft information-forward network coding.

Keywords: network coding; soft-information transmission; two-way relay; cooperative communication

卢科学/LU Kexue

许进/XU Jin

张帅/ZHANG Shuai

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳

518057)

(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

网络编码是一种融合了路由和编码的信息交换技术,它的核心思想是网络中的各个节点对每条信道收到的信息进行线性或非线性处理,然后转发至下游节点,中间节点扮演着编码器或信号处理器的角色。根据图论中的最大流-最小割定理,数据发送方和接收方的通信最大速率不超过双方之间的最大流值。Ahlswede 等人以蝴蝶网络的研究为例,指出通过网络编码,可达多播路

由传输的最大流界^[1-5],提高了信息的传输效率,从而奠定了网络编码在现代网络通信研究领域的重要地位。

无线信道的广播特性和无线网络业务流的双向性非常适合使用网络编码。目前,网络编码的研究热点已由传统的有线网络场景下的网络编码技术转为无线网络场景下的网络编码技术,原来在网络层处理的网络编码技术下降到物理层跟物理层信号处理算法相结合,比如,物理层网络编码、基于网络编码的协作方案设计以及实际编码协议性能评估等。相比传统方案,网络编码方案在同等的频谱效率下可达到更高的分

集增益。

利用软比特信息进行网络编码是比较新颖的适合无线信道传输和处理的网络编码技术^[6-9]。双向中继场景是基于网络编码技术的一个典型应用场景。其中2个源节点利用一个中继节点互相传输信息。此技术克服了传统基于硬判决类网络编码协议及算法的重大缺点,即中继必须正确接收来自两源节点的信息才能进行网络编码。一类典型的基于软比特传输的中继策略称为估计转发(EF)策略,采用EF策略的中继能获得比传统的放大转发(AF)和译码转发(DF)中继更低的误比特率^[10-12]。

虽然基于软比特信息的网络编码有诸多的好处,但该方法应用于无线中继信道时面临着如何将中继处的软信息发送至接收节点的问题。文献[12]中,中继与源节点之间信道带宽为无穷大,因此中继可以直接将网络编码后的软信息发送至接收节点。然而实际中的无线信道却具有有限带宽特性,因此系统必须对软信息进行量化后再发送至源节点。

本文针对无线中继信道的特点,

收稿日期: 2013-11-26
网络出版时间: 2014-03-04
基金项目: 国家科技重大专项
(2010ZX03003-003-02)

提出了一种格栅编码量化(TCQ)结合格栅编码调制(TCM)的方法。该方法应用于双向中继场景并在有限带宽的情况下获得接近理想情况下的链路性能,为软信息网络编码走向实用提供了一种有效的思路^[13]。

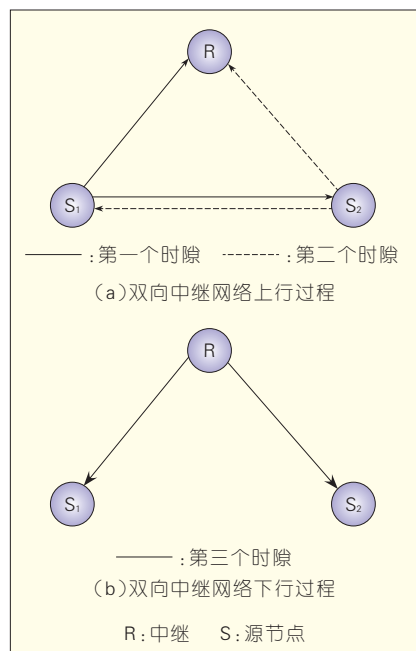
1 系统模型

双向中继网络上、下行过程如图1所示。源节点 S_1 和 S_2 在不同的时刻发送和接收信息,在第一个时刻, S_1 的信息发送到中继和 S_2 ;在第二个时刻, S_2 的信息发送到中继和 S_1 。中继和源节点的接收信号分别表示为:

$$\begin{aligned} r_{S_1R} &= \sqrt{E_s} h_{S_1R} x_{S_1} + n_{S_1R} \\ r_{S_2R} &= \sqrt{E_s} h_{S_2R} x_{S_2} + n_{S_2R} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, x_{S_i} , $i \in \{1, 2\}$ 表示源节点发送的信息, E_s 表示源节点的发射功率, $h_{S_iS_j}$ 表示源节点之间的信道系数, h_{S_iR} 表示源节点到中继之间的信道系数, n_{S_1R} 和 n_{S_2R} 分别表示中继和源节点处的高斯白噪声,噪声方差为 σ^2 。 r_{S_1R} 和 r_{S_2R} 分别表示中继和源节点处接收到的信号。

第三个时刻,中继对接收到的信号进行网络编码广播至两个源节点



▲图1 双向中继网络上、下行过程

S_1 和 S_2 。假设中继采用的是基于估计转发的软信息网络编码方法,需对网络编码后的软比特信息进行TCQ量化。软比特的网络编码信息定义为 $x_R = x_{S_1}, x_{S_2}$ 。其中 x_R 可以通过最小均方误差估计(MMSE)得到。 x_R 的MMSE估计表达式:

$$\begin{aligned} E(x_{S_1} x_{S_2} | r_{S_1R}, r_{S_2R}) &= E(x_{S_1} | r_{S_1R}) E(x_{S_2} | r_{S_2R}) \\ &= \tanh\left(\frac{LLR_{x_{S_1}R}}{2}\right) \tanh\left(\frac{LLR_{x_{S_2}R}}{2}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $LLR_{x_{S_i}R}$ 表示中继在上行链路上接收 S_i 或 S_2 信号的对数似然比信息。

$$\begin{aligned} LLR_{x_{S_i}R} &= \ln \frac{p(x_{S_i} = 1 | h_{S_iR}, r_{S_iR})}{p(x_{S_i} = -1 | h_{S_iR}, r_{S_iR})} \\ &= \frac{2\sqrt{E_s} h_{S_iR} r_{S_iR}}{\sigma^2} \end{aligned} \quad (3)$$

$f(r_{S_1R}, r_{S_2R})$ 表示中继进行功率归一化后转发至源节点 S_1 和 S_2 的网络编码信息:

$$f(r_{S_1R}, r_{S_2R}) = \frac{\tanh\left(\frac{LLR_{x_{S_1}R}}{2}\right) \tanh\left(\frac{LLR_{x_{S_2}R}}{2}\right)}{\sqrt{E\left[\left[\tanh\left(\frac{LLR_{x_{S_1}R}}{2}\right) \tanh\left(\frac{LLR_{x_{S_2}R}}{2}\right)\right]^2\right]}} \quad (4)$$

显然, $f(r_{S_1R}, r_{S_2R})$ 是一个未经硬判决的软比特信息。对 $f(r_{S_1R}, r_{S_2R})$ 采用TCQ量化后的信息为 $f^*(r_{S_1R}, r_{S_2R})$,则源节点处接收信息可表示为:

$$r_{RS_1} = f^*(r_{S_1R}, r_{S_2R}), \text{ 或 } r_{RS_2} = f(r_{S_1R}, r_{S_2R}) + n_{equiv_RS_1}.$$

其中 $f^*(r_{S_1R}, r_{S_2R})$ 表示接收到的量化信号, $n_{equiv_RS_1}$ 表示量化噪声。

图2所示为采用TCQ/TCM量化处理的流程。

采用TCQ量化后每个网络编码的软信息可以用 R 比特表示,则TCM的传输速率也必须为 R 比特/符号,且TCQ和TCM都采用相同的格栅图设计。设 x 为长度为 m 的输入序列, x^Λ 为相应的输出序列,则两序列间的欧式距离定义为:

$$d(x, x^\Lambda) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - x_i^\Lambda)^2} \quad (5)$$

在TCQ中采用维特比算法来寻找能最小化 $d(x, x^\Lambda)$ 的输出序列 x^Λ 。

通常,TCQ采用码率为 $R/(R+1)$ 的卷积码来定义格栅结构,并利用维特比算法来寻找最优路径,即寻找使路径量度 $d(x, x^\Lambda)$ 取值最小的路径。

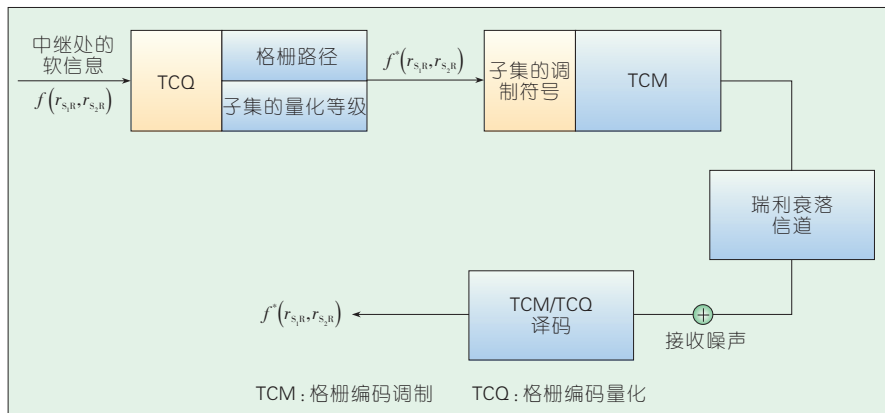
对量化后输出为 R 比特的软信息,TCQ使用了包含 2^{R+1} 个码字的码本进行重构,即每个软信息都被映射成码本中的一个码字,这 2^{R+1} 个码字对应TCM中 2^{R+1} 点的码字表^[14-15]。

在接收侧,源节点 S_1 或 S_2 同样采用维特比算法找到与接收信号具有最小均方误差的格栅路径,然后将所选路径映射成TCQ的量化码本,从而恢复出网络编码的软比特信息。

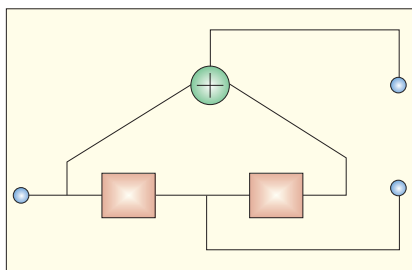
2 TCQ的码本设计

为了便于同硬判决的DF中继转发策略进行比较,考虑TCQ量化精度为每个网络编码的软信息采用 $R=1$ 比特进行量化,码本的大小为 2^{R+1} ,即重构等级为4,每个软信息可以用4个码字中的一个来表示。TCQ和TCM均采用图3所示的1/2码率的卷积码格栅结构,图4所示为该卷积码编码器的网格。

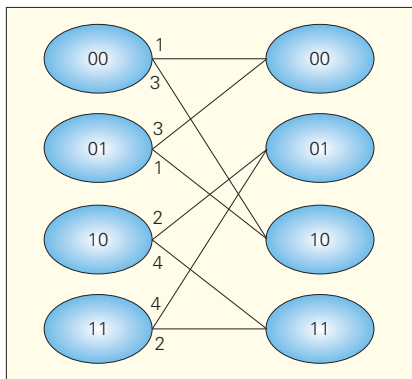
为了尽可能地减小量化噪声,我们采用Lloyd-Max最优量化器获取包含4个码字的码本。需要注意,在高信噪比条件下,公式(4)计算得到的软比特信息趋近于+1或者-1,此时采用Lloyd-Max量化器可能得到恶化的量化码本,例如 $[-1, -1, -1, 1]$ 这样的码本,该码本会导致软信息的输入为+1,但量化后却被映射为-1。为了避免此种情况,必须保证量化器工作在较低的信噪比区域,实际上当信源至中继上行链路的信噪比较高时,采用硬判决的网络编码也可获得较好的性能。



▲ 图2 TCQ/TCM 量化处理流程



▲ 图3 码率 1/2 卷积码格栅结构



▲ 图4 卷积码编码器网络

通过对两个信源 S_1 和 S_2 的信息进行估计。当上行链路的瞬时误码率 (BER) 高于预设的门限时, 中继采用软信息网络编码, 并对软信息进行 TCQ 量化。当 BER 低于此门限时, 则与传统 DF 的传输策略相同, 采用硬判决的网络编码。

针对信源 S_1 和 S_2 发送的数据块, 中继能够通过下式估计出上行链路的瞬时 BER:

$$P_{e-SR} = \frac{Q\left(\sqrt{E_s h_{s,R}^2 / \sigma^2 R}\right) + Q\left(\sqrt{E_s h_{s,R}^2 / \sigma^2 R}\right)}{2} \quad (6)$$

其中, Q 函数的自变量表示信源 S_1 或 S_2 至中继链路的瞬时信噪比。对于包含 m 个软比特信息的数据块, 设置估计 BER 的门限为 $1/m$, 当 BER 大于或等于 $1/m$ 时采用本文所述的 TCQ 量化结合 TCM 传输的方法, 当 BER 小于 $1/m$ 时采用硬判决的 DF 转发策略。

3 仿真结果

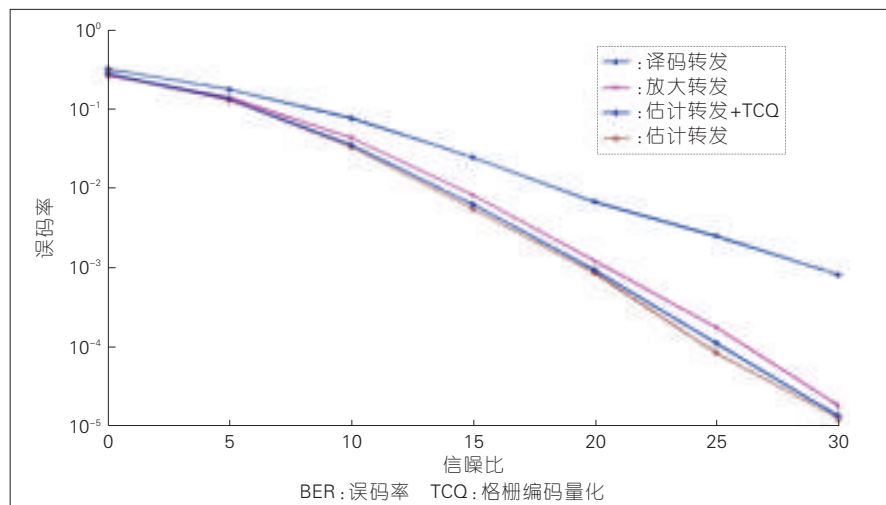
假设在瑞利衰落信道条件下, 源节点至中继链路的信道系数 $h_{s,R}$ 服从零均值单位方差的复高斯随机分布, 源节点间的信道系数服从零均值方差为 0.36 的复高斯随机分布。且假设各条链路上的噪声方差相同。每个数据块包含 $m=1000$ 个符号。中继侧如果接收到信源发来的数据

块的瞬时 BER 低于 $1/1000$ 则采用 DF 转发策略, 如果瞬时 BER 高于 $1/1000$ 则采用 TCQ 结合 TCM 的传输策略。

我们在接收侧即中继至两个源节点 S_1 和 S_2 的下行链路上仿真了 BER 的性能。如图 5 所示, 采用 TCQ 联合 TCM 的方案 (图 5 中的 EF+TCQ 曲线) 能够获得接近理想信道传输软比特信息 (图 5 中 EF 曲线) 的性能。双向中继信道中软比特网络编码能获得满分集增益, 因此本文所述的软信息传输方法也能获得满分集增益。本文提出的中继侧采用软信息传输方法相比传统的 AF 和 DF 传输机制, 在链路误比特率性能上有明显的提升。

4 结论

本文提出一种在双向中继信道下网络编码软比特信息的传输方法, 当信源至中继的上行链路信噪比较低时, 中继可以采用格栅编码量化结合格栅编码调制技术将网络编码后软比特信息发送至源节点, 当信源到中继的上行链路的信噪比较高时, 中继可以直接采用译码转发策略传输硬判决的网络编码信息。本文介绍了格栅编码量化结合格栅编码调制技术应用于网络编码软信息传输的方法并通过仿真证明, 在衰落信道下, 本文提出的网络编码软信息的传



▲ 图5 衰落信道下 BER 性能

输方法性能上优于传统的译码转发和放大转发的网络编码方法。

参考文献

- [1] AHLWEDE R, CAI N, LI S, et al. Network Information Flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000,46(4): 1204–1216.
- [2] SUNG L, KIM Y H, EL GAMAL A, et al. Noisy Network Coding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011,57(5): 3132–3152.
- [3] POPOVSKI P, YOMO H. Wireless network coding by amplify and forward bidirectional traffic flows [J]. IEEE Communication Letters, 2007,11(1): 16–18.
- [4] WOLDEGEBREAL D H, KARL H. Multiple Access Relay Channel with Network Coding and Non-Ideal Source-Relay Channels [C] // Proceedings of the 4th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), Oct 2007, 2007:732–736.
- [5] XIAO M, AULIN T. Optimal decoding and performance analysis of a noisy channel network with network coding [J]. IEEE Transactions on Communications, 2009,57(5): 1402–1412.
- [6] ZHANG S, ZHU Y, LIEW S C. Soft network coding in wireless two-way relay channels [J]. Communication and Networks, Special Issues on Network Coding, 2008,10(4): 331–336.
- [7] XIAO M, SKOGLUND M. Multiple-user cooperative communications based on linear network coding [J]. IEEE Transactions on Communications, 2010,58(12): 3345–3351.
- [8] YOMO H, POPOVSKI P. Opportunistic Scheduling for Wireless Network Coding [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Communication (ICC 2007), Glasgow, Scotland, June, 2007.
- [9] ZHANG S, LIEW S C. Channel Coding and Decoding in a Relay System Operated with Physical-Layer Network Coding [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009,27(5): 788–796.
- [10] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior [J]. Information Theory, IEEE Trans-actions on, 2004,50(12): 3062–3080.
- [11] DEQIANG C, LANEMAN J N. Modulation and demodulation for cooperative diversity in wireless systems [J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 2006,5(7): 1785–1794.
- [12] KRISHNA SRIKANTH G, SYED ALI J. Optimal relay functionality for snr maximization in memoryless relay networks [J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 2007,25(2): 390–401.
- [13] MARCELLIN M W, FISCHER T R. Trellis coded quantization of memoryless and gauss-mark sources [J]. IEEE Transactions on communications, 1990,38(1): 82–93.
- [14] ZIHUAI L, AULIN T. Joint source-channel coding using combined tcq/cpm: iterative decoding [J]. Communications, IEEE Transactions on, 2005,53(12): 1991–1995.
- [15] FISCHER T R, MARCELLIN M W. Joint trellis coded quantization modulation [J]. IEEE Transactions on communications, 1991,39(2): 172–176.
- on Selected Areas in Communication, 2011,29(1):197–206. doi:10.1109/JSAC.2011.110119.
- [9] LIN H J, TANG Y X, GUA N L, et al. Ordered Successive Interference Cancellation (OSIC) in V-BLAST Systems with Asynchronous Transmission Mode [J]. Wireless personal communications, 2011,60(2):263–275. doi: 10.1007/S11277.010.9942.6.
- [10] SUN S, GAO Q, PEN G Y, et al. Interference management through CoMP in 3GPP LTE-Advanced networks [J]. IEEE Wirelesscommunications,2013,20(1):59–66.
- [11] EL AYACH O, PETERS S W, HEATH R W, et al. The practical challenges of interference alignments [J].IEEE Wireless communications, 2013,20(1):35–42. doi: 10.1109/MWC.2013.6472197.
- [12] XU C, SONG L Y, HAN Z, et al. Interference-aware resource allocation for device-to-device communications as an underlay using sequential second price auction [C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), 10–15 June 2012, Ottawa, ON,2012:445–449. doi:10.1109/ICC.2012.6364509.
- [13] 王景景. 60GHz无线通信系统的信道容量与性能研究 [D]. 北京: 中国海洋大学, 2012.
- [14] 赵巍. 无线通信系统中的跨层优化技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [15] HUA Y, LIAN G P, MA Y, et al. A Method for Broad band Full-Duplex MIMO Radio [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012,19(12):793–796. doi:10.1109/LSP.2012.2221710.

作者简介



卢科学, 西安电子科技大学博士毕业; 历任中兴通讯股份有限公司 CDMA 研究所所长、无线研究院院长等职, 现任公司高级副总裁技术助理、高级工程师、资深架构师; 长期从事计算机和移动通信技术的研究和产品开发工作, 领导了中国第一套商用 3G 系统、首个具有自主知识产权的 Gota 集群通讯系统、WiMAX 系统、CMMB 手机电视系统、无线软基站平台、LTE 系统等产品的开发, 2009 年荣获国务院颁发的政府特殊津贴。



许进, 中兴通讯股份有限公司高级工程师、博士; 从事新型调制编码、网络编码等无线新技术的预研。



张帅, 中兴通讯股份有限公司工程师、硕士; 从事信道编解码和网络编码技术的预研。

← 上接第 4 页

- the Wireless World [R]. WWRF White Paper, October 2011.
- [2] 3GPP, ITU, WRC, APT, CJK, China IMT2020. Roadmap and workplan on future technologies(2020) [R]. 2013.
 - [3] 3GPP RWS-120021. Technologies for Rel-12 and Onwards [S]. 3GPP Workshop, Jun, 2012.
 - [4] Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2011–2016 [EB/OL]. (2013–12–10). http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html.
 - [5] TAMBURINI F, MARI E. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test [J]. New Journal of Physics, 2012,14(3):120–125. doi: 10.1088/1367-2630/14/3/033001.
 - [6] van de BEEK J, POPOVIC B M. Multiple Access with Low-Density Signatures [C] // Proceedings of the Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009. IEEE, Nov. 30 2009–Dec. 4 2009, Honolulu, HI, 2009:1–6. doi:10.1109/GLOCOM.2009.5425243.
 - [7] ROSA T. Multi-gigabit, MMW Point-to-point Radios: Propagation Considerations and Case Studies [J]. Microwave Journal, 2007,50(8):26–40.
 - [8] ZHANG H X, MA Y B, YUAN D F, et al. Quality-of-Service Driven Power, Bit and Subcarrier Allocation Policy for Vehicular Communication Networks [J]. IEEE Journal

作者简介



王志勤, 工业和信息化部电信研究院通信标准研究所所长、教授级高工, “新一代宽带无线移动通信网”国家重大专项专家组成员, IMT-2020(5G)推进组专家组组长, 中国通信标准化协会无线技术委员会主席, 中国通信学会无线与移动通信委员会副主任; 从事无线通信技术与标准研究。



罗振东, 工业和信息化部电信研究院通信标准所主任工程师、博士; 从事无线通信技术与标准研究; 已申请专利 10 余项, 发表学术论文 40 余篇。



魏克军, 工业和信息化部电信研究院高级工程师、博士; 从事无线通信技术与标准研究; 已发表学术论文 20 余篇。

大规模 MIMO 无线通信关键技术

Key Technologies in Massive MIMO Wireless Communication

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 02-0026-003

摘要: 基于大规模 MIMO 基本架构,探讨了信道建模和系统性能分析、信道状态信息获取技术、多用户上下行无线传输技术等大规模 MIMO 传输关键技术;认为利用大规模阵列天线的多用户多输入多输出(MIMO)传输,将显著提升无线通信系统的频谱效率及功率效率。

关键词: 大规模 MIMO; 宽带无线通信; 绿色无线通信

Abstract: This paper gives an overview of key techniques in massive MIMO wireless communication. We discuss channel modeling, transmission analysis, channel-state information acquisition, and multiuser uplink/downlink transmission. Multiuser MIMO transmission using a large-scale antenna array can significantly improve spectral efficiency and energy efficiency in a wireless communication system.

Keywords: massive MIMO; wideband wireless communication; green wireless communication

尤力/YOU Li
高西奇/GAO Xiqi(东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏
南京 210096)
(National Mobile Communications Research
Laboratory, Southeast University, Nanjing
210096, China)

现代信息社会的发展,使得宽带信息服务逐步延展到移动终端成为必然趋势,以提供语音业务为主的传统蜂窝移动通信系统,正逐步演变为向移动用户提供互联网接入以及视频和多媒体业务的宽带移动通信系统。

在过去的 20 年中,移动通信技术不断进步,技术标准不断演进,最新推出的第四代移动通信技术(4G),其数据业务传输速率达到每秒百兆甚至千兆比特,能够在较大程度上满足今后一段时期内宽带移动通信应用需求^[1]。然而,随着智能终端普及及应用及移动新业务需求持续增长,无线传输速率需求呈指数增长,至 2020 年,无线通信的传输速率需求将是目

前正在运营系统的千倍^[2],能够支撑高达每秒千兆比特传输速率的 4G 移动通信系统,将仍然难以满足未来移动通信的应用需求。另一方面,随着全球范围内移动用户数与高速数据业务应用的增长以及信息技术系统能源消耗所占比例的不断增加,降低移动通信网络系统的能源消耗已逐渐成为移动通信发展的重要需求^[3],以支持高速率传输为主要目标的 4G 移动通信技术,将难以满足未来移动通信对能耗效率的需求。因此,移动通信技术需要在 4G 基础上不断演进,满足超高传输速率无线通信的相关需求。

世界各国在推动 4G 产业化工作的同时,已开始着眼于新一代移动通信技术(5G)的研究,力求使无线移动通信系统性能和产业规模产生新的飞跃。4G 之后移动通信的发展,需要新的重大科学问题的解决和原

理性的突破,在无线频谱资源日趋紧张的情况下,如何在 4G 基础上,将无线移动通信的频谱效率和功率效率进一步提升一个量级以上,是 4G 之后移动通信技术的核心所在。4G 之后移动通信发展需要在网络系统结构、组网技术及无线传输技术等方面进行新的变革,从根本上解决移动通信的频谱有效性和功率有效性问题,实现更高频谱效率和绿色无线通信的双重目标。

面向 4G 之后移动通信的发展,为提高无线资源利用率、改善系统覆盖性能、显著降低单位比特能耗,异构分布式协作网络技术及智能自组织组网技术得到业界更加广泛的关注^[2-4]。

在分布式协作网络系统中,处于不同地理位置的节点(基站、远程天线阵列单元或无线中继站)在同一时频资源上协作完成与多个移动通信终端的通信,形成网络多输入多输出(MIMO)信道,可以克服传统蜂窝系统中 MIMO 技术应用的局限,在提高频谱效率和功率效率的同时,改善小区边缘的传输性能。然而,在目前典型的节点天线个数配置和小区设置的情况下,研究工作表明网络 MIMO 传输系统会出现频谱和功率效率提

收稿日期: 2014-01-03

网络出版时间: 2014-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(61222102、61201171); 国家高技术研究发展(“863”)计划(2012AA01A506)

升的“瓶颈”问题^[9]。为此,研究者们提出在各节点以大规模阵列天线替代目前采用的多天线^[6-7],由此形成大规模 MIMO 无线通信环境(如图 1 所示),以深度挖掘利用空间维度无线资源,解决未来移动通信的频谱效率及功率效率问题。

大规模 MIMO 无线通信的基本特征是:在基站覆盖区域内配置数十根甚至数百根以上天线,较 4G 系统中的 4(或 8)根天线数增加一个量级以上,这些天线以大规模阵列方式集中放置;分布在基站覆盖区内的多个用户,在同一时频资源上,利用基站大规模天线配置所提供的空间自由度,与基站同时进行通信,提升频谱资源在多个用户之间的复用能力、各个用户链路的频谱效率以及抵抗小区域干扰的能力,由此大幅提升频谱资源的整体利用率;与此同时,利用基站大规模天线配置所提供的分集增益和阵列增益,每个用户与基站之间通信的功率效率也可以得到进一步提升。

大规模 MIMO 无线通信通过显著增加基站侧配置天线的个数,以深度挖掘利用空间维度无线资源,提升系统频谱效率和功率效率,其所涉及的基本通信问题是:如何突破基站侧天线个数显著增加所引发的无线传输

技术“瓶颈”,探寻适于大规模 MIMO 通信场景的无线传输技术。

近两年来,大规模 MIMO 无线通信引起了研究者的广泛关注,文献上出现了一些初步的相关研究工作报道^[8-18],这些工作涉及传输性能分析、传输方案设计等多个方面。从已报道的工作可见:

(1)关于大规模 MIMO 信道的理论建模和实测建模的工作较少,还没有受到广泛认可的信道模型出现。

(2)所涉及的传输方案大都基于贝尔实验室提出的方案^[6],即在配备单天线的用户数目远小于基站天线个数的假设下,通过上行链路正交导频和时分双工(TDD)系统上下行信道互易性,基站侧获得多用户上下行信道参数估计值,并以此实施上行接收处理和下行预编码传输。

(3)传输方案性能分析往往假设大规模 MIMO 信道是理想的独立同分布(IID)信道,在此条件下,导频污染被认为是大规模 MIMO 系统中的“瓶颈”问题。

由此可知,大规模 MIMO 无线通信技术研究尚处在起步阶段,为充分挖掘其潜在的技术优势,需要探明符合典型实际应用场景的信道模型,并在实际信道模型、适度的导频开销及实现复杂性等约束条件下,分析其可达的频谱效率和功率效率,进而探寻信道信息获取技术及最优传输技术,解决大规模 MIMO 无线通信所涉及的导频开销及信道信息获取“瓶颈”问题、多用户共享空间无线资源问题、系统实现复杂性问题、对中高速移动通信场景及频分双工(FDD)系统的适用性问题等。

综上所述,4G 之后移动通信对频谱效率及功率效率提出了更高的要求,大规模 MIMO 无线通信能够深度挖掘空间维度无线资源,大幅提升无线通信频谱效率和功率效

率,是支撑未来新一代宽带绿色移动通信最具潜力的研究方向之一。

本文对大规模 MIMO 无线通信关键技术进行探讨,重点包括复杂无线环境中大规模 MIMO 信道模型和系统性能分析技术、信道状态信息获取技术及多用户上下行无线传输技术等方面。

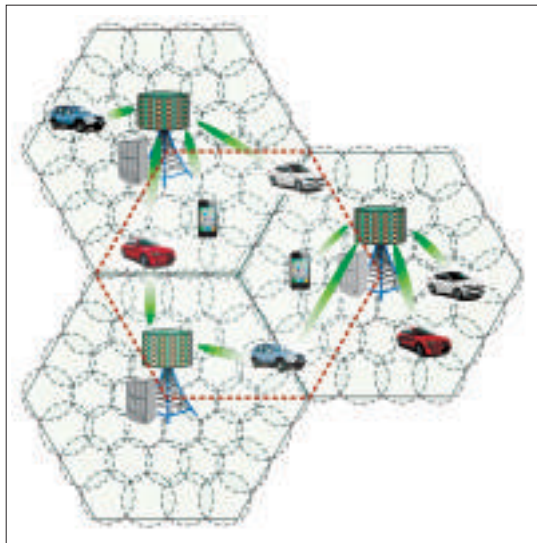
1 信道模型及系统性能分析技术

信道模型与系统性能分析是无线通信系统设计的基础。在大规模 MIMO 无线通信环境下,基站侧配置大规模阵列天线,MIMO 传输信道的空间分辨率得到显著增强,大规模 MIMO 无线传输信道存在着新的特性,需要深入系统地探讨。值得注意的是,尽管大规模 MIMO 已引起国际上的广泛关注,但有关大规模 MIMO 信道的理论建模和实测建模的工作较少。

已报道的文献中往往假设大规模 MIMO 信道是 IID 信道^[6,9,14,15]。然而部分实测结果表明,实际的大规模 MIMO 无线传输信道并不能满足 IID 假设,信道能量往往集中在有限的空间方向上^[13,17],这使得基于 IID 信道的相关分析结果存在着较大的局限性。各种应用场景下大规模 MIMO 无线信道的理论建模和实测建模的工作是有待进一步开展。

在给定的信道模型和发射功率约束下,精确地表征信道能够支持的最大传输速率,即信道容量,并由此揭示各种信道特性对信道容量的影响,可为传输系统优化设计、频谱以及功率效率等性能评估提供重要的依据。

在已报道的文献中,有关容量和传输方案性能分析大都假设信道满足 IID 条件,在此条件下,导频污染被认为是大规模 MIMO 系统中的“瓶颈”问题^[6,11],而最近的工作已表明,如果这一理想信道假设条件成立,通过在多个基站之间联合实施统计预



▲图 1 大规模 MIMO 无线通信环境

编码,理论上可以完全消除导频污染问题^[14]。

对于带空间相关性的大规模MIMO信道,利用各用户的统计信道信息,通过多个基站之间联合实施导频调度,也可以有效减轻导频污染^[12]。对于典型实际应用场景下无线信道特性对大规模MIMO传输性能影响的研究工作则有待进一步开展。

2 信道状态信息获取技术

信道估计是信号检测和自适应传输的基础,对于大规模MIMO无线传输性能起重要影响作用。在贝尔实验室提出的TDD大规模MIMO传输方案中^[6],小区中的各用户(通常假设配置单个天线)向基站发送相互正交的导频信号,基站利用接收到的导频信号,获得上行链路信道参数的估计值,再利用TDD系统上下行信道的互易性,获得下行链路信道参数的估计值,由此实施上行检测和下行预编码传输。随着用户数目的增加,用于信道参数估计的导频开销随之线性增加,特别地,在中高速移动通信场景,导频开销将会消耗掉大部分的时频资源,成为系统的“瓶颈”。开展导频受限条件下的TDD大规模MIMO信道信息获取技术研究具有重要的实际应用价值^[19]。

此外,贝尔实验室提出的传输方案需要利用TDD模式上下行信道互异性^[6],不适用于FDD模式。针对该问题,美国南加州大学提出了联合空分复用(JSDM)传输方案^[8]。其主要思想是,基站侧利用不同用户的信道二阶统计量进行用户分组及预波束赋形,由于预波束赋形之后的等效信道维度显著降低,在该等效信道上实施信道估计能够显著降低信道状态信息获取所需的开销,这使得FDD模式下大规模MIMO信道信息获取成为可能。

JSDM方案假设在同一组内的不同用户的信道协方差矩阵具有相同的特征向量,而组间用户的信道协方

差矩阵相互正交,该信道假设过于理想,在实际中通常难以满足。深入开展在实际信道条件下的导频受限FDD大规模MIMO传输技术研究具有重要性^[20]。

3 多用户传输技术

如何实现多用户空间无线资源共享及如何优化设计多用户上下行传输系统,涉及基站侧和用户端所能够获得的信道状态信息。在大规模MIMO无线通信系统中,基站侧与用户端均难以获取完整信道的瞬时状态信息,这意味着大规模MIMO传输技术将不同于现有的MIMO传输技术。在已报道的有关工作中,所涉及的基本传输方案大都是贝尔实验室提出的最初方案,利用上行链路正交导频和TDD系统上下行信道互易性,基站侧可获得多用户上下行信道参数估计值,基站侧假定所获取的信道参数估计值为真实值,并以此实施多用户联合上行接收处理和下行预编码传输^[6,10]。

该传输方案中,基站侧将信道估计值作为真实值来实施上下行传输,传输的鲁棒性无法保证;单个用户仅配置单根天线,当系统中用户数较少时,频谱效率仍然较低;上行链路的信号检测和下行链路的预编码传输涉及高维矩阵求逆运算,系统实现复杂度高;FDD系统中所有用户瞬时信道信息获取困难,存在着FDD系统的适用性问题。能否突破信道信息获取的“瓶颈”问题,在基站侧仅知部分信道信息时,实现多用户共享空间无线资源和高性能高鲁棒性低复杂度的大规模MIMO无线传输,是有待解决的重要问题。

4 结束语

小规模天线配置下的MIMO无线通信已趋于成熟并存在性能局限,大规模MIMO无线通信能够大幅度提升无线通信系统频谱利用率和功率利用率,目前已成为5G无线通信领域

最具潜力的研究方向之一。尽管大规模MIMO无线通信技术已引起国际上的广泛关注,但相关研究工作尚处在起步阶段。

基于大规模MIMO基本架构,本文讨论了信道建模和系统性能分析技术、信道状态信息获取技术及多用户上下行无线传输技术等大规模MIMO传输关键技术的研究进展。

参考文献

- [1] BAKER M. From LTE-Advanced to the future [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(2): 116-120. doi: 10.1109/MCOM.2012.6146490.
- [2] NAKAMURA T, NAGATA S, BENJEBBOU A, et al. Trends in small cell enhancements in LTE Advanced [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(2):98-105. doi: 10.1109/MCOM.2013.6461192.
- [3] HASAN Z, BOOSTANIMEHR H, BHARGAVA V K. Green cellular networks: A survey, some research issues and challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, 13(4):524-540. doi: 10.1109/SURV.2011.092311.00031.
- [4] ZHANG J, WEN C K, JIN S, et al. On capacity of large-scale MIMO multiple access channels with distributed sets of correlated antennas [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(2):133-148. doi: 10.1109/JSAC.2013.130203.
- [5] LOZANO A, HEATH R W, ANDREWS J G. Fundamental limits of cooperation [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59(9):5213-5226. doi: 10.1109/TIT.2013.2253153.
- [6] MARZETTA T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11):3590-3600. doi: 10.1109/TWC.2010.092810.091092.
- [7] RUSEK F, PERSSON D, LAU B K, et al. Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(1):40-60. doi: 10.1109/MSP.2011.2178495.
- [8] ADHIKARY A, NAM J, AHN J Y, et al. Joint spatial division and multiplexing—The large-scale array regime [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59(10):6441-6463. doi: 10.1109/TIT.2013.2269476.
- [9] NGO H Q, LARSSON E G, MARZETTA T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(4): 1436-1449. doi: 10.1109/TCOMM.2013.020413.110848.
- [10] HOYDIS J, TEN BRINK S, DEBBAH M. Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: How many antennas do we need? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in

►下转第40页

压缩感知技术在未来移动通信系统中的应用

Compressive Sensing in Future Mobile Communication Systems

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 02-0029-004

摘要: 探讨了一种压缩感知技术在未来大规模天线阵列系统导频设计中的应用方案, 结果表明, 基于压缩感知技术的导频设计方案可有效降低未来移动通信系统中的导频开销, 提升性能。进一步还可以考虑将压缩感知技术与未来移动通信系统中可能使用的认知无线电技术结合起来用于发现空闲频谱比较多的频段内的空闲资源, 有效降低系统硬件实现成本, 或者是将压缩感知技术与其他天线降维技术结合起来, 提升未来移动通信系统的用户体验。

关键词: 压缩感知; 信道估计; 大规模天线阵列系统

Abstract: This paper describes a pilot design for compressive sensing in a large-scale antenna array system. Our design can reduce system control overhead and improve spectral efficiency. In the future, compressive sensing could be used to find free spectrum in a cognitive radio system or to cooperate with other antenna-dimension-reduction techniques to improve QoS.

Key words: compressive sensing; channel estimation; large-scale antenna array system

王喜瑜/WANG Xiyu
鲁照华/LU Zhaohua
陈宪明/CHEN Xianming
(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

随着智能终端的兴起及无线数据应用业务的丰富, 无线通信系统中的数据用户数大幅增加, 数据内容也不再限于传统的文字或者图像, 未来用户对高清晰度视频、手机电视等多媒体业务的需求越来越多, 导致无线网络流量呈现出爆炸式增长的态势。根据市场机构预测, 未来10年, 无线数据业务将增长500~1 000倍, 平均每年增长1.6~2倍, 这对无线通信系统的网络容量提出了更高的要求。

提升无线通信系统网络容量的

方法有多种, 主要包括: 提升频谱效率、提高网络密度、增加系统带宽、智能业务分流等。近期研究中, 基于大规模天线阵列技术提升频谱效率的方法获得越来越多研究人员的关注, 是未来移动通信系统中的重要技术。

大规模天线阵列系统的基本特征就是通过在基站侧配置数量众多的天线阵列(从几十至几千), 获得比传统天线阵列系统(天线阵列数不超过8个)更为精确的波束控制能力, 然后通过空间复用技术, 在相同的时频资源上同时服务更多用户来提升无线通信系统的频谱效率, 从而满足未来B4G/5G无线通信系统中海量信息的传输需求。另外, 大规模天线阵列系统还可以很好地抑制无线通信

系统中的干扰, 带来巨大的小区内及小区间的干扰抑制增益, 使得整个无线通信系统的容量和覆盖范围得到进一步提高。

然而, 在上下行链路不存在互异性的无线信道环境下部署大规模天线阵列系统时, 遇到的最大问题是下行导频开销问题。

下行导频开销与天线数成正比, 而且终端需要向基站反馈下行信道状态信息, 也会带来比较大的反馈开销, 严重影响了大规模天线阵列系统的性能。

压缩感知^[1-5]是在采集信号的时候(模拟到数字), 同时完成对信号压缩之意。由于与压缩感知有关的严密的数学结果或理论刚刚出现, 因此压缩感知是一个相当新的领域, 也是近年来极为热门的研究前沿, 在若干应用领域中被广泛关注^[6-15]。

通过分析, 无线信道在时域是稀疏的, 体现为时延不同、功率不同的多径, 同样, 由于天线之间的信道相关性, 经过一定的变换后在变换域上也应该是稀疏的, 这就为使用压缩感知技术来降低导频开销提供了可能。

收稿日期: 2013-11-26
网络出版时间: 2014-03-02
基金项目: 国家科技重大专项
(2012ZX03001029)

本文主要介绍了压缩感知的技术原理,并分析了其在未来基于大规模天线阵列技术的无线通信系统中的应用。

1 技术原理

在数字信号处理中,一般都要经过由模拟信号到数字信号的转换过程,采样和量化是对信号处理的前提条件。

采样定理是1928年由美国电信工程师奈奎斯特首先提出来的,称为奈奎斯特采样定理,该定理指出:要从离散采样信号中无失真的恢复出原始信号,采样率要不低于原始信号带宽的两倍。该理论几乎支配着所有信号的获取、处理、存储、传输等系列活动过程。

D. Donoho、E. Candes 及华裔科学家 T. Tao 等人对信号稀疏和逼近理论进行了大量深入的研究,于2004年初步提出了一种新的信息获取指导理论:压缩感知理论。该压缩感知理论指出:对可压缩的(稀疏)信号可通过远低于奈奎斯特采样速率进行数据采样后,仍能够精确地恢复出原始信号。

压缩感知突破了奈奎斯特采样定理的限制,使得信息理论进入一个新的研究阶段,其基本思想是:只要信号是可压缩的或在某个变换域是稀疏的,那么就可以用一个与变换基不相关的观测矩阵将变换所得高维信号投影到一个低维空间上,然后通过求解一个最优化问题就可以从这些少量的投影(或称测量值)中以高概率重构出原信号。

在压缩感知理论的框架下,采样率不决定于原始信号的带宽,而取决于重要信息在信号中的结构和内容,测量值并非是信号的本身,而是从高维到低维的投影值,每个测量值都包含了所有样本信号的少量信息,恢复信号所需测量值的数目远少于采样定理要求的数目。

对于一个 $N \times 1$ 维信号 s , 其中 s

中包含 K 个非零元素,信号 s 经过公式(1)变换得到 $N \times 1$ 维变量 x , 再经过公式(2)得到 $M \times 1$ 维测量信号 y , 压缩感知的目的就是通过对测量信号 y 重构出信号 s 。

$$x = \Psi s \quad (1)$$

$$y = \Phi x = \Phi \Psi s = \Theta s \quad (2)$$

其中, Ψ 为 $N \times N$ 维稀疏变换矩阵, Φ 为 $M \times N$ 维测量矩阵(也称为投影矩阵或随机采样矩阵), Ψ 、 Φ 的设计会严重影响压缩感知技术的性能, $K < M \ll N$, M 的取值满足公式(3)。

$$M \geq C \mu^2(\Phi, \Psi) K \log(N) \quad (3)$$

其中, $\mu^2(\Phi, \Psi)$ 表示矩阵 Ψ 、 Φ 的相关性。

信号重构是压缩感知技术的核心,是一个在获得观测值 y 的条件下,寻求最稀疏解 s 的过程,这里需要引入矩阵理论中的范数概念来描述压缩感知理论中的信号重构问题。

定义向量 $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_N\}$ 的 p -范数为:

$$\|Z\|_p = \left(\sum_{i=1}^N |z_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (4)$$

当 $p=0$ 时得到向量 Z 的 0-范数,表示 Z 中非零元素的个数。

通常情况下,对于一个非稀疏的信号 x 在经过稀疏化变换得到 s 的情况下,压缩感知理论中信号恢复问题,转化为线性约束下的最小 0-范数的问题,可以用公式(5)表达:

$$\hat{s} = \arg \min \|s\|_0, \text{ s.t. } y = \Phi x = \Phi \Psi s = \Theta s \quad (5)$$

对上述 0-范数的优化问题,是一个非凸优化问题,也就是在多项式内无法求解,更不能验证解的有效性,因此需要转换成其他范数,比如 1-范数或 2-范数,研究证明对于公式(5)最小 0-范数问题可以通过求解一个更加简单的 1-范数最优化问题得到与 0-范数同等的解。因此,压缩感知理论通常用公式(6)描述:

$$\hat{s} = \arg \min \|s\|_1, \text{ s.t. } y = \Phi x = \Phi \Psi s = \Theta s \quad (6)$$

针对公式(6)的求解可以用线性

规划算法等最优化理论实现,实际实现时也可以使用其他快速优化算法。

2 应用分析

压缩感知应用特征包括:

(1) 观测信号不具有稀疏性,例如 OFDM 系统频域信道响应或线性阵列响应。

(2) 通过对观测信号的基坐标变换,在另外一组基底下,信号变得稀疏,例如频域信道响应通过 DFT 变换之后,在时域具有稀疏性。

(3) 稀疏性(稀疏位置)具有不可知与变化的特性,这是应用压缩感知的必要条件,如果稀疏位置具有可知性或恒定性。

外场测试表明,大部分无线信道在时域上一般都是多径稀疏的,根据压缩感知理论,这种稀疏性意味着可以大幅度地降低用户专有导频开销。

另外,随着基站侧天线数目增加,无线信道在空域上也同样体现出稀疏性,这意味着通过压缩感知技术可以有效减少小区公有导频的开销。

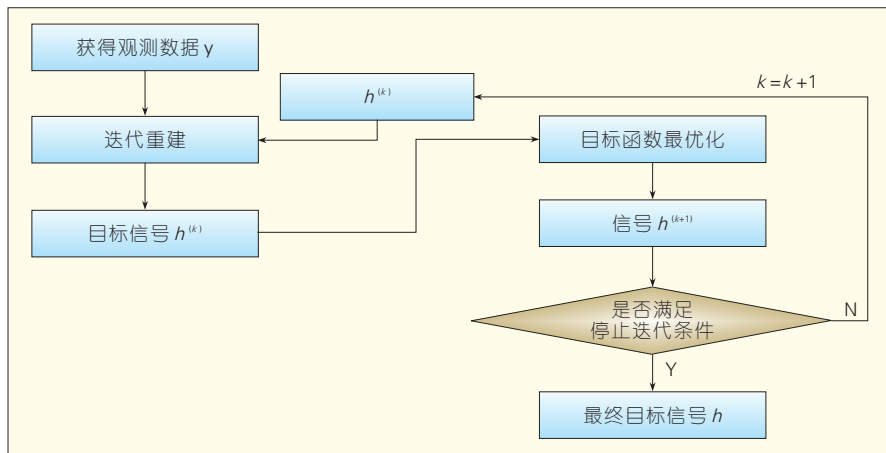
2.1 用户专有导频设计

根据压缩感知理论,再根据公式(6)可知,具有稀疏性的时域无线信道系数可以由在频域中少量分布的导频观测信号通过压缩感知技术恢复出来。

在未来移动通信系统的用户专有导频设计中,基于压缩感知技术,需要考虑的问题有:

(1) 导频数目:估计信道的稀疏度 K ,然后利用公式(3)大概算一下需要的导频符号的数目 m 。

(2) 导频位置:由测量矩阵决定,设计时一定要保证其随机性,可以根据小区标识、帧号、子帧号、资源位置作为随机矩阵生成因子,获取足够稀疏的导频位置,或者在标准化时预定义若干组随机导频位置,调度时根据系统参数确定使用哪一组随机导频位置,这与现有的 LTE 系统是明显不同的,现有系统中导频是均匀分布



▲ 图1 压缩感知技术的信号重构流程

的,其间隔主要考虑了相关带宽。

(3)变换矩阵:优先考虑离散傅里叶变换矩阵。

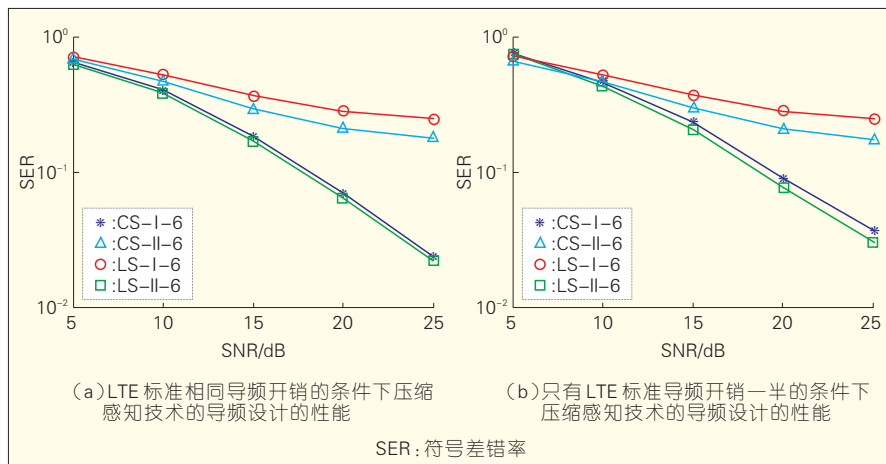
(4)信号重构:接收方按照图1所示的流程,利用少量的频域导频信道值 y ,恢复时域信道 h ,其中目标函数最优化可以使用实现复杂度较低的Stomp算法。

图2给出了基于压缩感知技术进行用户专有导频设计后与传统的LTE导频相比的性能,图2为在扩展城市环境信道模型(ETU)场景、10 MHz、16QAM下的符号差错率(SER)比较,其中LS-I-6代表LTE标准导频模式,时域不做基于CP的截断处理,子载波间隔为6的仿真参数设置下的仿真结果;LS-II-6代表LTE标准导频模式,时域做基于CP的截断处理,子载波间隔为6的仿真参数设置下的仿真结果;CS-I-6代表压缩感知导频模式,时域不做基于CP的截断处理,子载波开销与LTE导频开销相同的仿真参数设置下的仿真结果;CS-II-6代表压缩感知导频模式,时域做基于CP的截断处理,子载波开销与LTE导频开销相同的仿真参数设置下的仿真结果;CS-I-12代表压缩感知导频模式,时域不做基于CP的截断处理,子载波开销是LTE导频开销一半的仿真参数设置下的仿真结果;CS-II-12代表压缩感知导频模式,时域做基于CP的截断处理,

子载波开销是LTE导频开销一半的仿真参数设置下的仿真结果。图2(a)给出了在LTE标准相同导频开销的条件下压缩感知技术的导频设计的性能,图2(b)给出了在只有LTE标准导频开销一半的条件下压缩感知技术的导频设计的性能。从仿真结果可以看出,基于压缩感知技术设计的导频可以有效降低系统开销,并提升接收方的解码能力。

2.2 小区公有导频设计

在大规模天线阵列系统中,基站侧天线数目增加,带来了小区公有导频开销的增加,会严重影响未来移动通信系统的性能,因此寻求一种基于低导频密度的信道估计方法变得非常必要。



▲ 图2 基于压缩感知技术导频设计仿真性能

随着基站侧天线数目增加,信道在空域上是否存在稀疏性是需要首先验证的问题。

图3给出了对基站配置128根天线形成的瞬时信道进行离散傅立叶变换(DFT)后得到的角度域功率谱分布情况,可以看出,变换后得到的变量是具有稀疏性的,因此可以通过压缩感知技术设计未来移动通信系统中的小区公有导频。

小区间公有导频设计导频数目、导频位置、信号重构可参考用户专有导频设计的思路,变换矩阵设计有两种方式:

$$\text{方式1: } \Psi_{ij} = e^{j2\pi \frac{(i-1)(j-1)}{N}}$$

方式2:

$$\Psi = \Psi_e \otimes \Psi_{pol} \otimes \Psi_h, \Psi_{pol} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ j & -j \end{bmatrix}, \Psi_h$$

式中 Ψ 是DFT矩阵。

基于方式1和方式2进行小区间公有导频设计的仿真结果如图4所示。图4为累计分布函数,不考虑干扰/噪声。

可以看出,两种方式都可以比较好地通过压缩感知技术重建空域信道,当随机采样点数目比较多时,两种变换矩阵重建信道时性能差别不大,但是当随机采样点数目比较少时,方式2可以更好地重建信道,主要原因在于方式2提供的变换矩阵更好

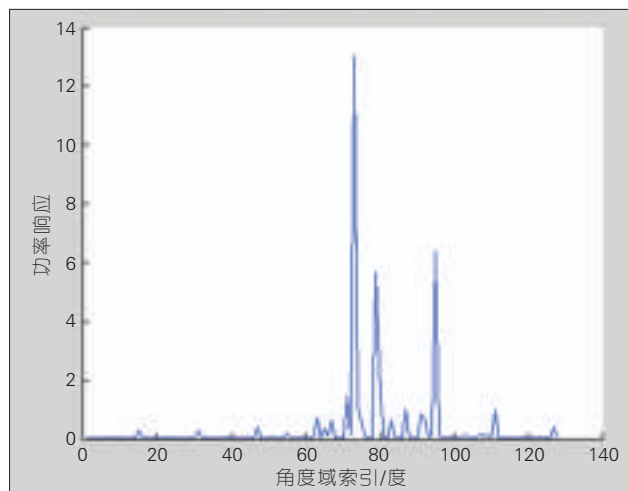


图3
128根天线信道的角度域功率谱分布

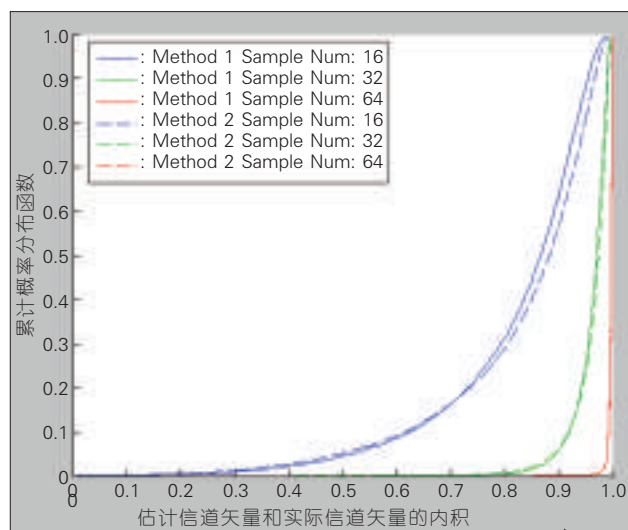


图4
不同变换矩阵空域压缩感知性能分析

地体现了天线之间的相关性。

3 结束语

通过理论分析及大量仿真,证明了压缩感知技术可以有效地降低系统导频开销,提升系统性能。

后续也可以考虑将压缩感知技术与未来移动通信系统中可能使用的认知无线电技术结合起来用于发现空闲频谱比较多的频段内的空闲资源,有效降低系统硬件实现成本,或者是将压缩感知技术与其他天线降维技术结合起来,提升未来移动通信系统的用户体验。

参考文献

- [1] CANDESE, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: Exact signal

- reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2011, 52(2):489–509.
[2] CANDESE, TAO T. Near optimal signal recovery from random projections: Universal encoding strategies [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2006, 52(12): 5406–5425.
[3] DONOHO D. Compressed sensing [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2006, 52(4):1289–1306.
[4] DONOHO D L, HUO X. Uncertainty principles and ideal atomic decomposition [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2001, 47(7):2845–2862.
[5] COIFMAN R, GESHWIND F, MEYER Y. Noiselets [J]. Appl. Comput. Harmon. Anal., 2001, 10(1): 27–44.
[6] GILBERT A C, MUTHUKRISHNAN S, STRAUSS M. Improved time bounds for near-optimal sparse Fourier representations [C] //Optics & Photonics 2005. International Society for Optics and Photonics, 2005: 59141A–59141A–15.
[7] DONOHO D L, STARK P B. Uncertainty principles and signal recovery [J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 1989, 49(3): 906–931.

- [8] CANDES E J, TAO T. Decoding by linear programming [J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2005, 51(12): 4203–4215.
[9] COHEN A, DAHMEN W, DEVORE R. Compressed sensing and best term approximation [J]. Journal of the American Mathematical Society, 2009, 22(1): 211–231.
[10] DUARTE M F, SARVOTHAM S, BARON D, et al. Distributed compressed sensing of jointly sparse signals [C] //Asilomar Conf. Signals, Sys., Comput. 2005: 1537–1541.
[11] BARANIUK R, DAVENPORT M, DEVORE R, et al. A simple proof of the restricted isometry property for random matrices [J]. Constructive Approximation, 2008, 28(3): 253–263.
[12] SESIA S, TOUFIK I, BAKER M. LTE: the UMTS long term evolution [M]. New York: John Wiley & Sons, 2009.
[13] COLERI S, ERGEN M, PURI A, et al. Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems [J]. Broadcasting, IEEE Transactions on, 2002, 48(3): 223–229.
[14] HOEHER P, KAISER S, ROBERTSON P. Two-dimensional pilot-symbol-aided channel estimation by Wiener filtering [C] //Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1997. ICASSP-97., 1997 IEEE International Conference on. IEEE, 1997, 3: 1845–1848.
[15] LI Y. Simplified channel estimation for OFDM systems with multiple transmit antennas [J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 2002, 1(1): 67–75.

作者简介



王喜瑜,中兴通讯股份有限公司无线研究院院长;从事通信产品的技术规划以及无线新技术研究。



鲁照华,中兴通讯股份有限公司高级工程师;从事无线网络物理层关键技术研究。



陈宪明,中兴通讯股份有限公司高级工程师;从事技术预研和LTE标准预研工作,主要负责5G关键技术和LTE覆盖增强技术研究。

第5代移动通信测试技术

Testing Technologies for 5th Generation Communication Systems

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 02-0033-003

摘要: 针对第五代移动通信(5G)技术发展的趋势,分析了5G的发展为测试系统带来的新需求和挑战。针对挑战,提出了可持续发展的测试生态系统的概念,从软件和硬件两个方面具体探讨了“以软件为核心”和“以大规模多输入多输出空口(MIMO OTA)为基础”两大特征。在以软件为核心测试方式部分详细探讨了基于现场可编程门阵列(FPGA)的知识产权部署到测试管脚(IP to the PIN)和支持并行测试和海量信号处理的异质计算两项技术。

关键词: 测试生态系统;异质计算架构;大规模多输入多输出空口测试

Abstract: In this paper, we analyze the new requirements and challenges in testing and measurement for 5G wireless communication systems. We propose a concept called “Ecological Test & Measurement System.” The main features of the concept are “Centre at The Software” and “Base on Massive Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) OTA.” Two technologies, including the “IP to the PIN based on Field Programmable Gate Array (FPGA)” and “The architecture of heterogeneous computing”, are also described in the “With the core of software” part.

Key words: test and measurement ecological system; heterogeneous computing architecture; massive MIMO OTA test

杨旸/YANG Yang
王浩文/WANG Haowen
许晖/XU Hui
(上海无线通信研究中心,上海 200335)
(Shanghai Research Center for Wireless
Communications, Shanghai 200335, China)

目前亟需研究适合5G总体目标的评估指标体系及评估方法;根据5G无线网络和传输关键技术的特征^[3],研究5G仿真方法;通过并行计算、图形处理器、现场可编程门阵列(FPGA)硬件板卡等加速方法和动态建模等手段,建设5G测试平台并进行5G候选关键技术评估;研究5G移动通信网络和传输技术的评估与测试方法,完成对5G移动通信关键技术评估与测试研究^[1-3]。

1 5G测试需求与挑战

(1) 大规模多输入多输出多通道

测试需求

中国5G技术定义未来5G基站侧协作天线数不少于128个。这种大规模多输入多输出(MIMO)技术对天线数量的要求大大超过传统技术对天线数目的要求,天线个数上升到百位级,无论是测试通道数,多通道间的同步、隔离,多通道数据的存储都对测试提出了严峻的挑战与考验。

(2) 高速、海量数据测试需求

中国5G技术定义未来5G频谱及功率效率较4G提升10倍。同时,5G时期移动视频、网页浏览以及P2P业务等将成为移动数据的主要部分,因此,终端设备相关数据急速增长。如何实时捕获、分析、存储和管理这些海量数据是对5G测试系统的考验。

(3) 多应用场景与多技术标准共

存测试需求

未来5G中不但包括现有3G、4G等无线接入技术,还可能将增添诸如设备间直接通信(D2D)、机器间通信(M2M)等物联网技术。5G的高融合性不但是多种接入技术的融合,也意味着应用场景也将丰富多样^[4]。同样测试系统所支持的技术标准和应用场景也将随之大幅增加。

(4) 高频段和绿色通信测试需求

目前,6 GHz以下低频段基本被分配完毕,三星公司率先在28 GHz高频段上进行了研究^[5]。同时未来无线通信中更加注重对能耗的分析^[6-7],国际上已经开展诸多绿色通信的前期研究^[8-11]。因此,5G技术不但对高频段技术测试,也对系统能耗测试提出了相应需求,所以,5G测试技术所支持的范围较前几代有了很大的扩展。

每一代移动通信的技术发展都有一个生命周期,在周期内发展和演进直至被新技术吸收或淘汰。同样测试技术也要支持通信技术的整个生命周期的测试需求。由于被测技术的飞速发展,测试技术或系统也不再是一个一成不变的系统,取而代之的是一个无论在硬件还是在软件方面都超前被测技术的可持续发展和

收稿日期: 2014-01-12

网络出版时间: 2014-03-02

基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2014AA01A707)

演进的集成测试平台。5G 集成测试平台是一个可持续发展的测试生态系统,它将继承可扩展性、灵活性、可自定义等的优点。

其中,“以软件为核心”和“支持大规模天线空口(OTA)”测试是这个生态系统的两大关键特征。

2 以软件为核心的测试生态系统

如何跟上多种通信技术和标准快速发展的步伐、如何提高高昂的测试预算性价比、如何灵活而可重定义测试需求或方法、如何有效利用多核技术、如何采用实时处理技术提高测试吞吐量等问题的参考答案都会聚焦到“以软件为核心”的解决方案上。

2.1 基于FPGA的IP to the PIN技术

几十年来,电子和通信行业一直追求:设计与测试齐头并进的理想状态。鉴于设计和测试领域的不同,这个目标一直难以达到。在设计阶段,最新的电子设计自动化(EDA)软件被应用于系统级的设计,而测试领域则略显独立和滞后。因此,当针对最新的以软件为中心的电子通信设备时,还需要重新寻找测试解决方案。

采用系统级的方法,设计和测试的概念融为一体,以及将软件架构向FPGA扩展是平衡两个领域发展,提高通信测试效能的有效手段之一。实现设计与测试集成的方法是将设计的知识产权(IP)内核同时部署到被测设备(DUT)与集成测试平台上,这种部署过程被称为知识产权部署到测试管脚(IP to the Pin),因为它使测试者自定义的软件IP能够尽可能地接近集成测试平台的硬件I/O引脚。这些软件IP可以包括:数据采集、信号生成、数字协议、数学运算、射频及实时信号处理等。

无论是单个设备的原始数据处理吞吐量还是功耗,FPGA均已胜过数字信号处理器、传统处理器甚至图

形处理器。

IP to the Pin技术的具体实现可用“V型图”来表示,如图1所示。设计的每个阶段都有相对应的验证或测试阶段。通过共享IP,设计和测试团队可以沿着V图两个边分别前进,从最顶层的建模、设计到底层的实现,在每个阶段进行对应的测试。

2.2 支持并行测试和海量信号处理的异质计算技术

异质计算架构是一个用于在不同的计算节点之间分配数据处理任务以及程序执行任务的系统,让每个节点来处理最恰当的测试和计算任务。这项技术用来应对5G移动通信与日俱增的复杂测试计算量;用于存储和处理MIMO以及大规模天线(Massive MIMO)在射频后端的海量数据;用于多节点同时频谱感知与探测,以及物理(PHY)层与媒体访问控制(MAC)层的协同测试。例如,采用异质计算架构的MIMO RF测试系统,可以使用一个中央处理器(CPU)来控制程序的执行,采用FPGA进行在线的解调,同时采用图形处理器(GPU)进行多天线测试参数的计算,最后将所有的处理结果存储在远程服务器上。一种可适用于5G通信测试的异质计算架构如图2所示。

伴随着5G移动通信的高带宽、高速率的飞速发展,异质计算架构和多核并行编程技术相结合将会是5G测试应对海量数据处理和提高测试并行化所不可或缺的主要技术。

3 大规模天线空口测试技术

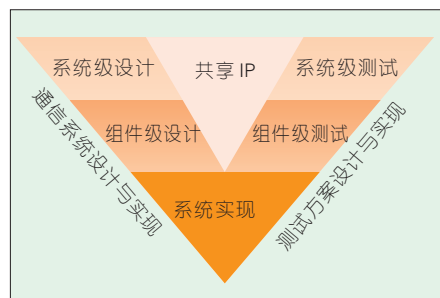
为了满足极高吞吐量的需求,第5代移动通信将采用大规模天线技术,天线特性成为影响无线系统性能的关键技术指标之一。目前,MIMO OTA测试技术已经开始在包括第3代移动通信合作计划(3GPP)组织、欧洲科学和技术合作(COST2100)组织和移动通信和因特网协会(CTIA)在内的多个标准化组织和机构中研究及讨论,其中,3GPP TR 37.976对各种MIMO OTA技术备选测试方案进行了总结。以下分别说明了3种不同的MIMO OTA测试方案^[12]:

(1) 基于吸波暗室的测试方案

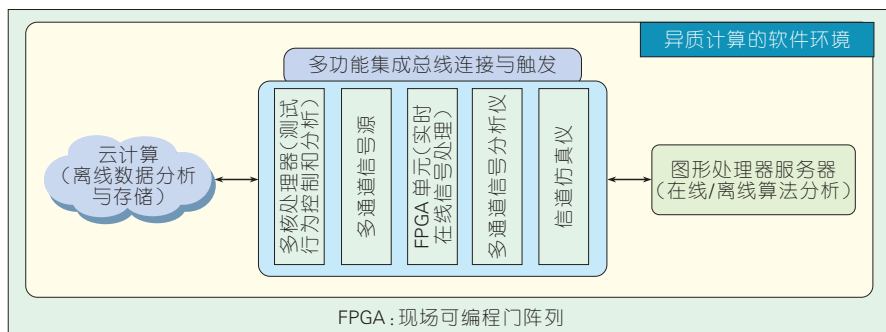
基于吸波暗室的测试方案或者称之为空间衰落模拟(SFE)的测试方案。该方案将射频信道模拟器连接到一个圆环探头阵列,即多探头测试,从而在被测物位置可重复地模拟产生复杂的多径衰落的无线环境。

(2) 混响室测试方案

混响室测试方案采用一个独立的混响室或者是一个连接信道模拟器的混响室。混响室的目的在于在



▲ 图1 实现“IP to the Pin”的V型图



▲ 图2 适用于复杂移动通信测试的异质计算架构

被测物(DUT)周围产生一个统计上的均匀功率分布,而天线和信道模拟器可用于生成所需的延迟特性。混响室测试方案受限于有限的不同衰落环境的模拟能力,所以只能对终端提供有限的性能评估。

(3)两阶段法

两步法测试流程如图3所示。两步法测试方案包含两个测试阶段。第一阶段,在各向同性的环境下,使用传统的吸波暗室为基础的测试系

收分集性能而非信道相关特性,获得的测试结果也基本一致^[13];其次,两步法可重复利用测试得到的天线方向图模拟二维或三维的信道模型,而不需要重复使用电波暗室测试,进而提高了测试的灵活性,另外,两步法可充分利用LTE阶段建设的测试平台资源迅速扩展实现MIMO OTA测试,是一种快速经济的测试解决方案。

4 结束语

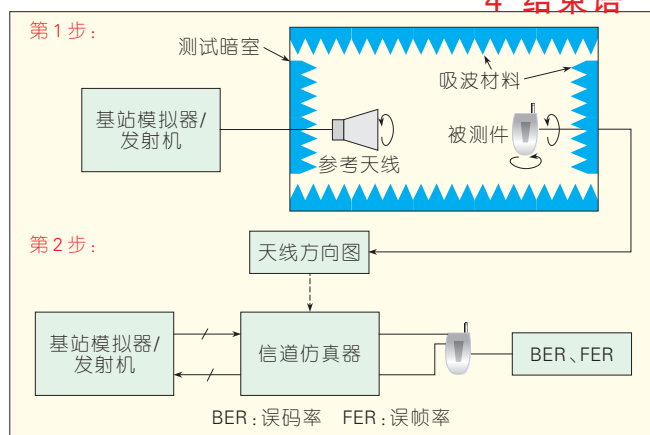


图3 两步法测试流程

统和一个综测仪测量复杂的有源天线阵列;第二阶段,通过下述两种手段把天线阵列的信息与信道模型结合起来:使用信道模拟器进行传导测试,或利用测试地得到的天线阵列信息通过理论计算得到一个理论上的信道容量性能。因此,在这一点上,两阶段方法只能获得有限的性能数据,还需要进行进一步的研究以得到准确的性能指标。

大规模天线OTA测试技术中关键的挑战是如何在电波暗室中产生一个最接近真实环境的空间、角度和极化行为的射频信道模型,这种复杂性使得MIMO OTA测试平台研发需要大量场地和设备资金的投入,这对于广大的终端设备厂商而言,成本过于昂贵。在讨论的3种MIMO OTA测试方案中,两步测试方案是一种快速、精确、经济又高效的MIMO OTA测试方法,研究表明,相对于传统的多探头测试方案,两步法仅简化了接

本文根据5G移动通信的技术特征,分别从软件和硬件两个方面分析了应对的测试解决方案和方法。这些方法主要集中在物理层和射频部分,未涉及协议的测试方法的讨论。

致谢:

本文的撰写得到了上海无线通信研究中心徐景研究员、西安交通大学通信工程学院教授和中国科学技术大学周武明教授的支持和帮助。

- [1] 新华网. 设立信发 2014 年 ICT 产业发展趋势展望报告 [EB/OL]. (2014-01-02). http://news.133069679_2.htm.
- [2] 科技部高新司. 国家“863”计划《第五代移动通信(5G)系统前期研究开发(一期)》备选项目征集指南[R]. 科技部高新司, 2013.
- [3] 东方早报. 中国布局 5G 研发: 6 年后商用 [EB/OL]. (2014-01-02). <http://www.dfdaily.com/html/113/2014/1/29/1112884.shtml>.
- [4] 凤凰网. 4G 未到 5G 已来: 网络全面融合或再无制式分别 [EB/OL]. (2014-01-02). http://tech.ifeng.com/telecom/detail_2013_05/22/25570093_0.shtml.
- [5] 中国无线电管理. 5G 研发 争分夺秒 [EB/OL]. (2014-01-02). <http://www.srrc.org.cn/NewsShow8947.aspx>.
- [6] CHEN Y, ZHANG S, XU S, et al. Fundamental trade-offs on green wireless networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(6): 30-37. doi: 10.1109/MCOM.2011.5783982.

- [7] CHEN H, JIANG Y, XU J, et al. Energy-Efficient Coordinated Scheduling Mechanism for Cellular Communication Systems with Multiple Component Carriers [J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal, 2013, 31(5): 959-968. doi: 10.1109/JSAC.2013.130514.
- [8] GRANT P. Green Radio C The Case for More Efficient Cellular Base Stations [D]. University of Edinburgh, 2009.
- [9] INFOS-ICT-247733 EARTH Deliverable D3.1, Earth, WP3-Green Networks. Most promising tracks of green network technologies [EB/OL]. (2014-01-02). https://bscw.ict-earth.eu/pub/bscw.cgi/d31509/EARTH_WP3_D3.1.pdf.
- [10] OPERA-Net. Optimising power efficiency in mobile radio networks project [EB/OL]. (2014-01-02). <http://opera-net.org/default.aspx>.
- [11] OPERA-Net PROJECT STANDS 42, 2010 NEM Summit Towards Future Media Internet. Optimising power efficiency in mobile radio networks [EB/OL]. (2014-01-02). http://opera-net.org/Documents/5026v1_Opera-Net_e-NEM%.
- [12] 3GPP TR 37.976. Measurement of radiated performance for Multiple Input Multiple Output (MIMO) and multi-antenna reception for High Speed Packet Access (HSPA) and LTE terminals [S]. 3GPP, 2012.
- [13] JING Y, WEN Z, KONG H, et al. Two-stage over the air (OTA) test method for MIMO device performance evaluation [C] // Proceedings of the Antennas and Propagation (APSURS), 2011 IEEE International Symposium, 3-8 July 2011, Spokane, WA, 2011: 71-74. doi: 10.1109/APS.2011.5996385.

作者简介



杨旻, 上海无线通信研究中心主任, 上海科技大学信息学院教授、博士; 研究领域包括新一代移动通信系统、无线传感器网络、无线新技术测试验证平台开发; 已申报专利 10 余项, 发表学术论文 100 余篇。



王浩文, 上海无线通信研究中心高级工程师; 研究领域包括通信技术测试验证开发、无线通信软硬件联合仿真系统、测试软件和虚拟仪器的开发以及测试数据后处理分析工作。



许晖, 上海无线通信研究中心高级工程师; 研究领域包括新一代无线移动通信系统原型验证、无线新技术测试验证平台开发、无线测试验证外场环境开发。

移动的代价:无线通信有线化

The Cost of Mobility: Wireless Communication Cabling

中国分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 02-0036-05

摘要: 采用无线覆盖的距离来定义用户的移动性,并以香农信息论为基础,提出了无线通信的移动性代价模型。移动性代价模型的主要意义在于:揭示了移动距离、通信容量和资源代价之间的转换关系。按照这个模型,可以得出3个主要结论:无线资源的消耗与距离有关,应当建立合理的通信计费机制;系统容量与覆盖距离可以相互转化,从而改变系统容量对频谱资源的依赖关系;以短覆盖距离为特征的无线通信有线化将成为提高系统容量的主要方向。

关键词: 移动性;频率资源;信道容量;代价函数

Abstract: A user's mobility depends on the wireless coverage distance. In this paper, we propose a mobility cost model based on Shannon Theory. With this model, we can determine the relationship between mobile distance, communication capacity, and resource cost. We conclude that wireless resource consumption is affected by distance, and a communication billing system should be established. We also conclude that system capacity can be transformed into coverage distance, and vice versa. This reduces the dependence of system capacity on spectrum resources. Short-distance wireless coverage can greatly increase system capacity.

Key words: mobility; frequency resource; channel capacity; cost function

卫国/WEI Guo

(中国科学技术大学,安徽 合肥,230027)
(University of Science and Technology of
China, Hefei 230027, China)

- 移动性及信道的差异,是无线通信与有线通信差异的根源
- 无线通信系统必须为移动性收益付出相应代价
- 移动通信系统的设计和使用应当考虑移动性代价
- 未来移动通信系统的发展,应改变依赖频谱资源的容量增长方式

目前,5G移动通信系统的研究已初见端倪,相应的频谱需求预测研究也同时展开。这一轮新的频谱诉求,主要是针对即将召开的世界无线电大会(WRC15)。设备制造商和系统运营商分别从各自不同的角度对未来频谱需求进行研究判断,希望能够在WRC15上为未来的5G系统争取更大的频谱空间。比较集中的看法是:到2020年左右,移动通信系统需要新增带宽1~2 GHz。

在19世纪末和20世纪初的马可尼时代,无线电成为可用的远距离通信技术,早期的频谱使用并不是问题。实际上,对于频谱资源的争夺是

近10多年来的事情,并且还伴随着移动通信系统的广泛使用而变得愈演愈烈。

作为移动通信系统的用户,真正需要的是终端和系统所传输的信息容量,而并不直接关心所占用的频谱带宽。所以,对用户和系统运营商而言,频谱需求是现象,容量需求才是本质。

电子器件和终端设备的技术进步、功能提升和价格下降,参与无线通信的人群持续增加、无线网络提供的业务更加丰富,都是频谱需求愈演愈烈的推动因素。到目前为止,摩尔定律一直有效,半导体工艺水平何时进入发展的平坦区尚不得而知。即便摩尔定律不再有效,器件和设备的

制造成本还会下降。所以,流量需求的持续增加应该是常态。

频率的自然属性,决定了适用于移动通信的频谱供应不可避免地将要进入平坦区。需求持续增长,供应却趋于饱和,其差距的增长就必然地不可避免。通过改进无线传输技术而提高频谱的使用效率,在一定程度上可以弥补这一差距,但按照香农信息理论能够提供的新增容量毕竟有限。所以,必须认识和揭示其中趋势性的基本规律,以求改变依赖频谱的容量增长方式。

无线通信与有线通信都是传输信息的有效方式。其最大的不同之处在于,用户使用无线通信系统的地点没有传输线缆的约束,而且可以移

收稿日期: 2014-01-12
网络出版时间: 2014-03-03

动,从而获得最大程度的灵活性。然而,用户在获取无线通信灵活性便利的同时,需要为此付出相应的代价。因此,文章从无线通信与有线通信的特征分析入手,提出移动性代价模型,从代价的角度分析移动性与传输容量之间的转换关系^[1]。

1 无线信道与有线信道

无线信道与有线信道的共同属性,都是提供信息的传输通道。信道特征的差异完全来自于传输介质。有线通信的传输介质是线缆,通常采用玻璃纤维、金属材料等材质制作而成。无线信道的传输介质是自由空间,在非真空的环境下会受到大气、水汽和尘埃等因素的影响。与传输距离相比,这些因素的影响比较微弱,在后续的讨论中予以忽略。

有线信道传输容量大,信道状态稳定,路径损耗低。无线信道传输相对容量较低,信道状态受环境的影响很大,路径损耗低大。所以,信道的差异是无线通信与有线通信差异的根源,见表1。

无线信道除了具有反射、散射、绕射、多经叠加和时变等特性外,与传输距离相关的路径损耗是影响信道容量的主要因素。在自由空间的大尺度衰落下,传播路径损耗为

$$L_s = 92.4 + 20 \lg f + 20 \lg r \quad (1)$$

(1)中 f 为频率, r 为传输距离。这就是无线通信为灵活性所付出代价的主要来源,无线通信的能耗、能效和功率都与此有关。

这里所说的能耗,主要是指在无线信道中传送信息所需要的能量,见图1。

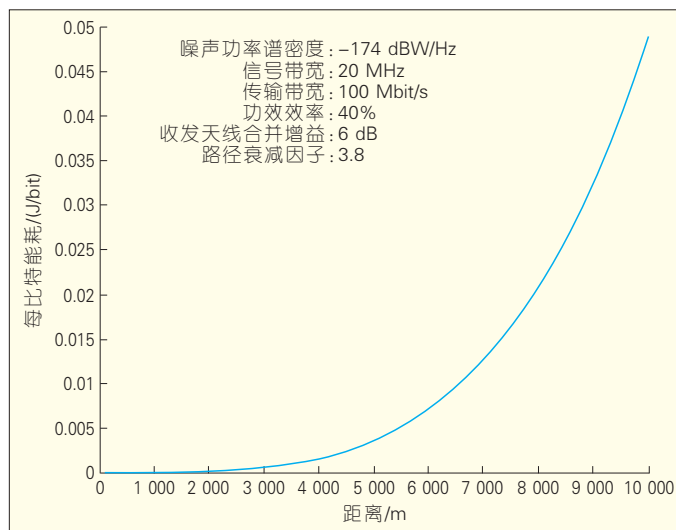
从图1中可以看出,无线传输所需能量随着传输距离呈指数增长。与之形成对照的是,光纤传输1 bit信息所需的能量则比无线传输大大减少,见图2。

从传输损耗的角度看,在光纤的传输损耗也与距离有关,但是要比无线传输损耗小得多。图3给出了无

▼表1 无线信道与有线信道的主要特征比较

	传输带宽	路径损耗	环境影响	广播特性	可移动性
有线信道	大	小	小	无	弱
无线信道	小	大	大	有	强

图1
无线传输能耗与
传输距离的关系



线传输与光纤传输的能耗对比。

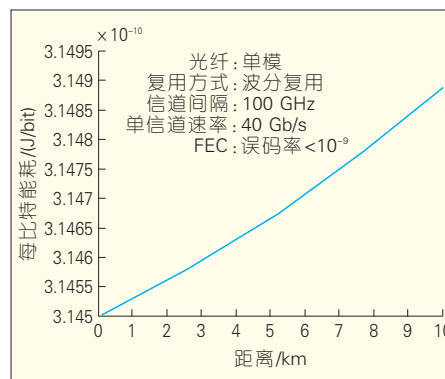
在100 m ~ 10 km的距离变化上,无线传输能耗增加近1亿倍。而相对于无线传输,光纤传输功耗几乎没有增加。

如果不作特别的波束赋形,无线电波通常是以球面波的方式扩散传播。这就意味着,无线传输从发送端到接收端的能量效率很低。图4给出了无线传输的能量效率与传输距离的关系。

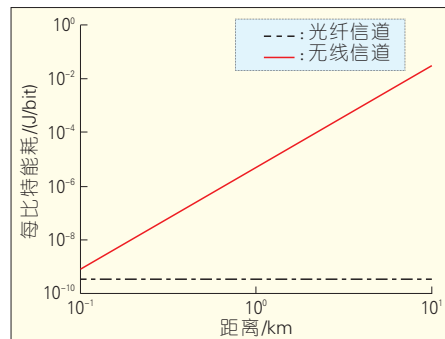
随着距离的增加,无线传输的能量效率呈指数下降。在10 ~ 1 000 m的距离变化上,能量效率降低约为1万倍。

无线传输受到距离影响的另一个因素是发送功率。一般来说,发送功率随着信道容量呈指数增长。不仅如此,传输距离越远,所需要的发送功率就越大,见图5。

从上述分析中我们看出,无线通信在提供灵活性的独特优点时,同时也要为此付出相应的代价。这些代价体现在传输能耗、传输能效和发送功率等因素中。仔细分析这些因素我们可以发现,这些因素都涉及到距

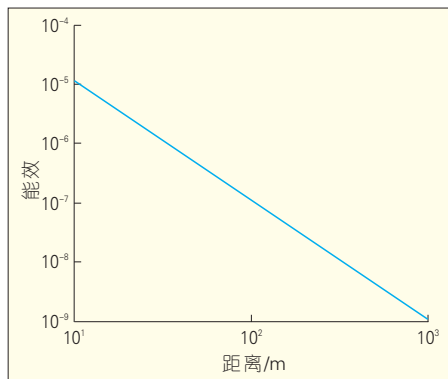


▲图2 光纤传输能耗与传输距离的关系

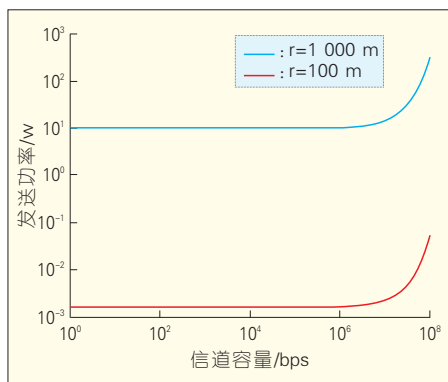


▲图3 无线信道与光纤信道的能耗比较

离。如果我们用距离表征无线通信的移动特性,则可以把能耗、能效和功率等因素都归结为移动性付出的



▲图4 无线传输路径衰减下的能量效率



▲图5 无线链路下信道容量与发送功率的关系

代价。这样,便引出了移动性代价的概念,从而可以研究这些代价与移动性之间的关系。

2 移动性代价模型

无线信道的核心价值在于提供通信的灵活性,以移动性表征。在获取灵活性的同时,需要付出相应的代价。合理使用与设计通信系统,移动性代价是一个应当考虑的重要因素。这些代价体现在信道带宽、通信容量、能量能耗、能量效率等一些因素中。

根据第1节中的分析,无线通信最基本的特点是其移动性以及为此必须付出的相应代价。香农第二定理给出了信道容量、信道带宽、发送功率和通信距离之间的关系。作为系统资源,信道带宽与发送功率终归是有限的,所以香农公式实际上已经给出了信道容量与通信距离之间的互换关系。

如果把频谱功率等系统资源概括抽象为代价,就得到了描述移动性、容量和代价三者之间的关系。这些分析就是移动性代价概念的来源和模型的基础^[2]。

如果把接收机信噪比用发送功率、传输距离等参数表示,香农第二定理可以表达为,

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P_t g_{out} \eta_{PA}}{W N_0 r^\alpha} \right) \quad (2)$$

式中 W 为信道带宽, P_t 为发送功率, g_{out} 为天线增益, η_{PA} 为功放效率, N_0 为噪声谱密度, r 为传输距离, α 为路径衰减因子。

将式(2)作级数展开并取一阶近似,得到

$$C \approx \frac{g_{out} \eta_{PA} P_t}{N_0 r^\alpha} = \beta \cdot \frac{P_t}{r^\alpha} \quad (3)$$

式中 β 为包含上述参数的综合常数。

据此,文章给出移动性代价函数的定义:

$$G = r^\alpha C \quad (4)$$

式中 G 为移动性代价, C 为信道容量, r 为传输距离,而 α 为路径衰减因子。

这里,用 G 表示移动性的代价,是带宽、能耗等资源因素的综合反映。 α 为路径衰减因子,反映了不同传输环境下的距离代价。当代价 G 一定时,代价函数表达了容量与距离的互换关系:

$$C = \frac{G}{r^\alpha} \quad (5)$$

或

$$r = \left(\frac{G}{C} \right)^{1/\alpha} \quad (6)$$

图6给出了式(5)在不同路径衰减下容量与距离之间的关系。

由图6可见,在一定的移动性代价下,信道容量随距离增加呈现出指数衰减的特征。

我们从无线传输机理出发,以信息论为基础定义移动性代价模型,定量描述了无线通信系统需要为移动性付出的代价。从式(4)可以看出,

如果用户保持一定的通信容量,则相应的系统代价随着移动距离的增加呈指数增加。这意味着,需要建立新的定价机制,以便约束无线资源的合理使用。

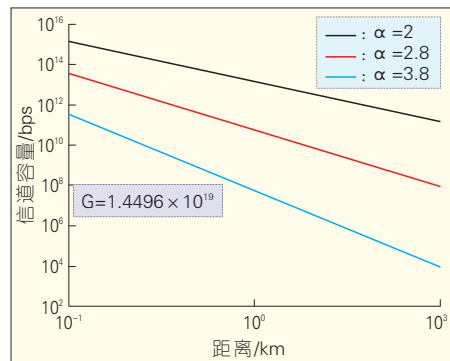
另一方面,从系统侧看,在一定的频谱资源条件下,信道容量可以通过缩短移动距离来提高,从而改变依赖频谱的系统容量增长方式。这又意味着,移动性代价模型有可能成为一个新的系统优化因素。下面分别对这两种可能变化的策略分别进行讨论。

3 无线资源的合理使用

移动通信运营商对移动用户的数据通信计费,目前通常采用基于通信流量的计费制度。从图3可以看出,流量计费制度对有线通信没有问题,因为有线通信对传输距离不是很敏感。但是,这种计费方法对无线通信则很不合适。按照代价模型,同样的传输速率下,不同传输距离下传输代价的差距非常大。

在移动通信广泛使用的早期,频谱资源供需矛盾还不是很突出的情况下,以流量为主导的计费方式因为简单易行尚可以接受。但是,参与通信的人群越多,通信流量越大,通信资源稀缺的矛盾就越突出。在这种情况下,单纯的流量计费机制就过于粗放。

因而,出于代价因素的频谱资源精细化使用就必将成为趋势。从移动距离的角度看,以公路铁路为代表



▲图6 不同路径衰减因子下的容量与距离关系

的交通运输系统按照运输距离收费,与无线通信的移动性代价是相同的原理。按通信的本来价值收费,更重要的意义在于引导正确消费,避免稀缺资源的滥用^[1]。

表2给出了在不同覆盖距离下,无线通信速率与发送功率之间的一些关系。

从表2中看出,大尺度覆盖环境,高速率使用需要付出巨大的功率代价。大尺度覆盖与小尺度覆盖合理分工,在速率使用上相互补充。据此,一个典型的覆盖原则是,在广域的蜂窝覆盖环境下主要应满足语音及低速数据应用需求;而2 Mbit/s以上的高速数据业务主要应通过热点覆盖和局域无线接入来实现。根据系统代价制订的计费机制,应当能够反映出来对用户使用无线资源的新导向。

4 无线通信有线化

无线流量需求将继续保持持续增长,这是因为随着器件和设备的进步、价格降低,参与通信活动的人群和通信量会持续增加。从系统侧看,适用于移动通信的频段是有限的,即便全部提供给运营商使用,频谱供应的持续增加也不可能维持下去。如果不改变频谱使用的思路,无线通信频谱供应与需求之间的缺口将愈来愈大,如图7所示。

受自然属性的约束,可用频段增量有限,频谱供应最终将趋于常数。因此,频谱带宽必将成为一个稳定的常数,移动性代价模型同样可以描述系统容量与频谱的关系,可以看成是模型中的代价。按照移动性代价模型,影响系统容量的可变因素就转化为通信距离。根据式(5),可以通过缩短通信距离来换取系统容量。

无线覆盖半径越小,移动用户就越接近有线网络。当可移动半径趋于零时,无线通信退化为有线通信。无线覆盖半径缩小的这样一种过程,我们称之为无线通信有线化,如图8

所示。

无线通信缩小覆盖半径 r 来提高系统容量,实际上是利用了空间正交性的频率复用概念。有线通信通过增加线缆数量来提高系统容量,也是利用线缆在空间上的正交性。两者异曲同工,都可抽象为从正交空间获取容量的倍增,如图9所示。

缩小无线覆盖半径来换取系统容量的增加,主要约束将不再是电波传播的自然属性,而是网络架构、干

扰控制等技术约束。从原则上讲,只要技术上能够做到,覆盖半径可以一直缩小下去,系统容量就可以一直提高。这就将自然属性的约束转换为技术约束了。技术进步是可以通过努力得到的,而自然属性是不可人为改变的。无线通信有线化的核心,是改变依赖频谱的容量增长方式。

5 结束语

无线信道特征决定了无线通信

▼表2 不同覆盖距离下速率与功率的关系

距离/m	速率(2 Mbit/s)/W	速率(10 Mbit/s)/W	速率(20 Mbit/s)/W	速率(100 Mbit/s)/W
10	4.5×10^{-8}	2.6×10^{-7}	6.3×10^{-7}	2.0×10^{-6}
100	3.0×10^{-4}	1.6×10^{-3}	4.0×10^{-3}	0.13
1 000	1.7	10	25	780

图7
频谱需求与频谱供应

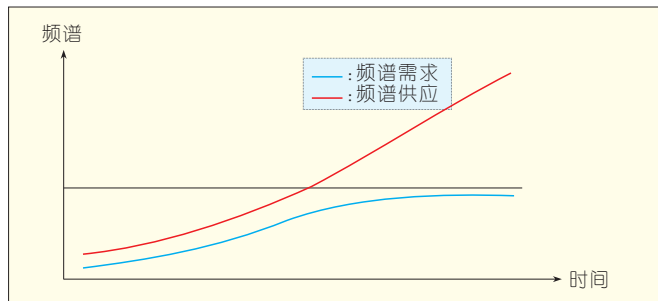


图8
无线通信有线化

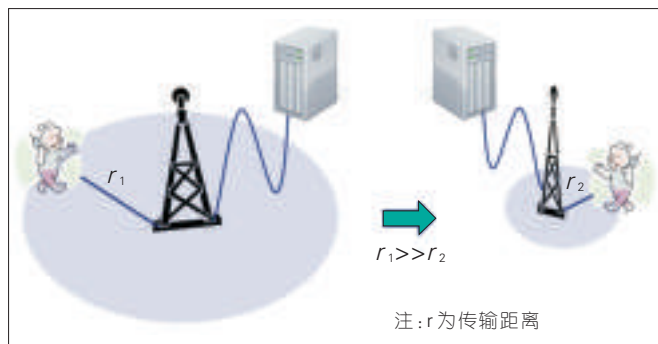
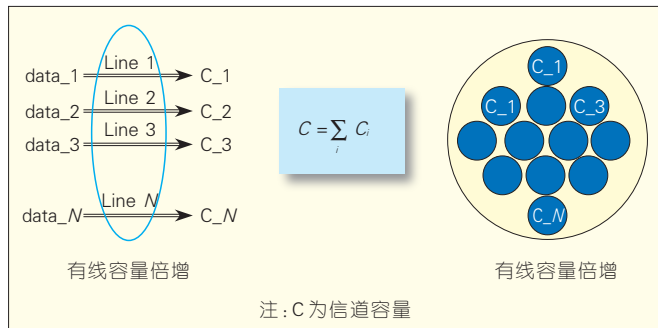


图9
有线与无线通信容量
倍增原理比较



过程的灵活属性,这是无线通信相对于有线通信的核心价值所在。但是,无线系统通信需求为其灵活性特征付出巨大的代价,主要来源于无线信道的衰减特性。在无线通信系统应用的早期,参与通信的人群和对通信容量的要求都十分有限,无线资源的矛盾不甚突出。但是,随着各方面的技术进步,参与通信的人群和通信容量需求急剧增加,无线资源的供需矛盾变得十分突出,而且愈演愈烈。在这种情况下,对无线资源的精细化管理与使用已成为通信业界必然的发展趋势。

文章采用无线覆盖的距离来定义用户的移动性,以香农信息论为基础,提出了无线通信的移动性代价模型。移动性代价模型的主要意义在于,揭示了移动距离、通信容量和资源代价之间的转换关系。按照这个模型,我们可以得出以下3个主要的结论:

(1) 无线资源的消耗与距离有关,应当建立合理的通信计费机制以遵循无线通信的自然规律以及价值规律。

(2) 系统容量与覆盖距离可以相

互转化,从而改变系统容量对频谱资源的依赖关系。

(3) 在新频谱资源增长进入平坦区的情况下,以短覆盖距离为特征的无线通信有线化将成为提高系统容量的主要方向。

对于移动通信系统而言,可用的频段有限,频谱资源的约束是一种无法逾越的自然约束。根据移动性代价模型提出的无线通信有线化方向,将移动性转换为系统容量,所面临的主要是技术约束。技术约束是通过技术进步而获得一些重大的突破,与频谱资源的自然约束有着根本的不同。

当前,长期演进(LTE)已经全面进入商用阶段,LTE-A以及未来的5G能够提供更强的无线传输能力。但是必须指出的是,系统能够提供的传输能力与能力的使用不应当划等号。合理分配使用无线资源重要程度仅与资源使用者的人群数量有关,使用的人越多,合理性的就越重要。因此,尽管LTE及未来传输技术有能力为用户在广域的移动范围提供更高的传输速率,但并不意味着在这样的环境下使用高速的无线资源就是

合理的。

所以,从无线通信技术的发展看,一方面可以继续沿着提高速率的方向增强传输能力,另一方面在系统的使用上应着力解决不同区域覆盖下的资源分配与网络融合,以适应不同用户的不同速率需求。

参考文献

- [1] Thomas M. Cover, Joy A. Thomas, Elements of Information Theory [M], Wiley-Interscience, July 2006.
- [2] Report ITU-R M.2243[R]. Assessment of the global mobile broadband deployments and forecasts for International Mobile Telecommunications, 2011.
- [3] 未来十年IMT业务市场预测[R]. 杭州:中国通信标准化协会, 2011年2月.

作者简介



卫国,中国科学技术大学电子工程与信息科学系教授、博士生导师;研究领域为无线通信技术、移动通信网络以及信号处理;曾任国家“863”计划通信技术主题专家组成员、中国第三代移动通信系统研究开发项目总体组成员、国家“863”计划B3G移动通信重大项目总体组成员、“新一代宽带无线移动通信网”国家科技重大专项总体专家组成员;获国家科技进步二等奖1项;在学术刊物和会议上发表论文100多篇,拥有10多项国家发明专利。

上接第28页

- Communications, 2013, 31(2):160–171. doi: 10.1109/JSAC.2013.130205.
- [11] JOSE J, ASHIKHMIN A, MARZETTA T L, et al. Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(8):2640–2651. doi: 10.1109/TWC.2011.060711.101155.
 - [12] YIN H, GESBERT D, FILIPPOU M, et al. A coordinated approach to channel estimation in large-scale multiple-antenna systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(2):264–273. doi: 10.1109/JSAC.2013.130214.
 - [13] ALRABADI O N, TSAKALAKI E, HUANG H, et al. Beamforming via large and dense antenna arrays above a clutter [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(2):314–325. doi: 10.1109/JSAC.2013.130218.
 - [14] ASHIKHMIN A, MARZETTA T. Pilot contamination precoding in multi-cell large scale antenna systems [C] // Proceedings of the Information Theory Proceedings (ISIT), 2012 IEEE International Symposium, 1–6 July 2012, Cambridge, MA: IEEE Information Theory Society, 2012: 1137–

1141. doi: 10.1109/ISIT.2012.6283031.
- [15] FERNANDES F, ASHIKHMIN A, MARZETTA T L. Inter-cell interference in noncooperative TDD large scale antenna systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(2):192–201. doi: 10.1109/JSAC.2013.130208.
 - [16] HUH H, CAIRE G, PAPADOPOULOS H C, et al. Achieving “Massive MIMO” spectral efficiency with a not-so-large number of antennas [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(9):3226–3239. doi: 10.1109/TWC.2012.070912.111383.
 - [17] GAO X, TUFVESSON F, EDFORS O, et al. Measured propagation characteristics for very-large MIMO at 2.6 GHz [C] // Proceedings of the Annual Asilomar Conference Signals, Systems, and Computers, 4–7 Nov. 2012, Pacific Grove, CA: IEEE Signal Processing Society, 2012: 295–299. doi: 10.1109/ACSSC.2012.6489010.
 - [18] YANG H, MARZETTA T L. Performance of Conjugate and Zero-Forcing Beamforming in Large-Scale Antenna Systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(2):172–179. doi: 10.1109/JSAC.2013.130206.
 - [19] 高西奇, 尤力, 仲文, 等. 基于导频复用的大规模

模MIMO通信方法: 中国, 201310563145.8 [P]. 2013–11–14.

- [20] 高西奇, 孙晨, 金石, 等. 利用大规模天线阵列的无线通信方法: 中国, 201210394910.3 [P]. 2012–10–17.

作者简介



尤力,东南大学移动通信国家重点实验室在读博士研究生;研究方向为宽带大规模MIMO无线通信。



高西奇,东南大学教授、博士生导师,移动通信国家重点实验室副主任;研究方向为移动通信理论与关键技术;已发表论文200余篇,获授权发明专利近50项。

LTE FDD 的覆盖增强技术

Coverage Enhancement Technology for LTE FDD

摘要:通过对 LTE FDD 覆盖增强关键技术的研究和实际外场试验测试,提出了 LTE FDD 多天线技术、上行 IRC 技术和上行功控技术在 LTE FDD 覆盖中的综合应用解决方案。认为通过上行 8 天线的方式,可以增加 6 dB 以上的覆盖增益;通过 IRC 等覆盖增强技术能有效地消除小区间的干扰。这些技术的综合运用,可以有效提高 LTE 网络的覆盖质量,提高用户体验。

关键词: LTE; 多天线; 覆盖增强; 上行 IRC; 上行 MRC

Abstract: This paper describes an LTE FDD coverage comprehensive application solution of LTE FDD multiantenna technology, uplink interference rejection combining (IRC) technology, and uplink power control technology. 6 dB coverage gains can be increased by LTE FDD uplink 8 antennas, and cell interference can be reduced by using IRC technology. The integrated use of these technologies can improve the quality of LTE network coverage and improve user experience.

Keywords: LTE; multi antenna; coverage enhancement; uplink IRC; uplink maximum ratio combining(MRC)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 02-0041-04

李强华/LI Qianghua

王彬/WANG Bin

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳, 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

LTE FDD 覆盖能力主要受限于频率和干扰两个方面。目前全球长期演进频分双工 (LTE FDD) 系统部署频率大部分位于 2 GHz 频段及以上。众所周知, 2G 以上的高频段相比于 1 GHz 低频段, 在覆盖上有着非常明显的差别, 尤其是针对那些直接从码分多址/全球移动通信系统 (CDMA/GSM) 网络升级到 LTE FDD 网络的运营商。

1 LTE 多天线技术需求

LTE FDD 是一个上行干扰受限的系统, LTE FDD 的小区覆盖半径主要受上行影响。在 2 GHz 频段附近, LTE FDD 采用 2 发 2 收天线时, 如单通道下行发射功率为 20 W, 覆盖半径一般在 400 m 左右, 以满足 LTE FDD 小区边缘用户下行 1 Mbit/s 和上

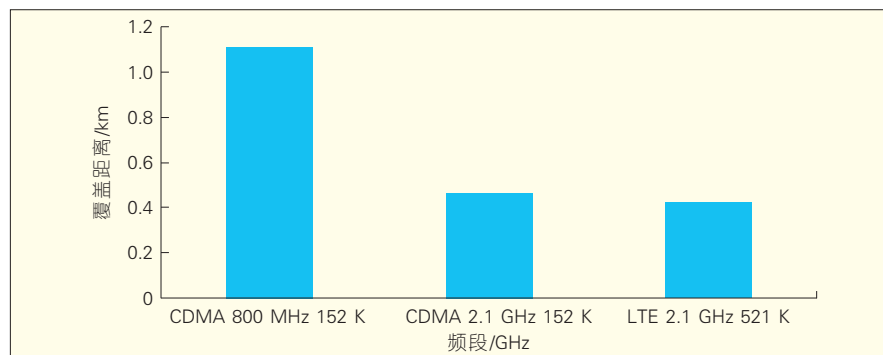
行 256 Kbit/s 的基本业务速率需求。由图 1 可以看出, LTE FDD 在 2.1 GHz 的覆盖半径在 400 m 左右, 和 2.1 GHz 的 3G 网络覆盖范围相当。而传统的 800 MHz CDMA 网络, 在相同条件下, 覆盖半径会在 1 km 以上^[1-3]。

覆盖半径的差异导致在 LTE FDD 实际网络建设中, LTE FDD 网络可以和相同频段的 2.1 GHz 无线网络 (如 3G 的 UMTS 2.1GHz) 共站, 而无法和

800 MHz CDMA 网络完全共站。对于那些目前仅有 800 MHz CDMA 网络的运营商, 需要对 LTE FDD 站址进行重新规划, 同时还需要寻找新的站址。在此情况下, LTE FDD 网络有可能做不到全网覆盖^[4]。

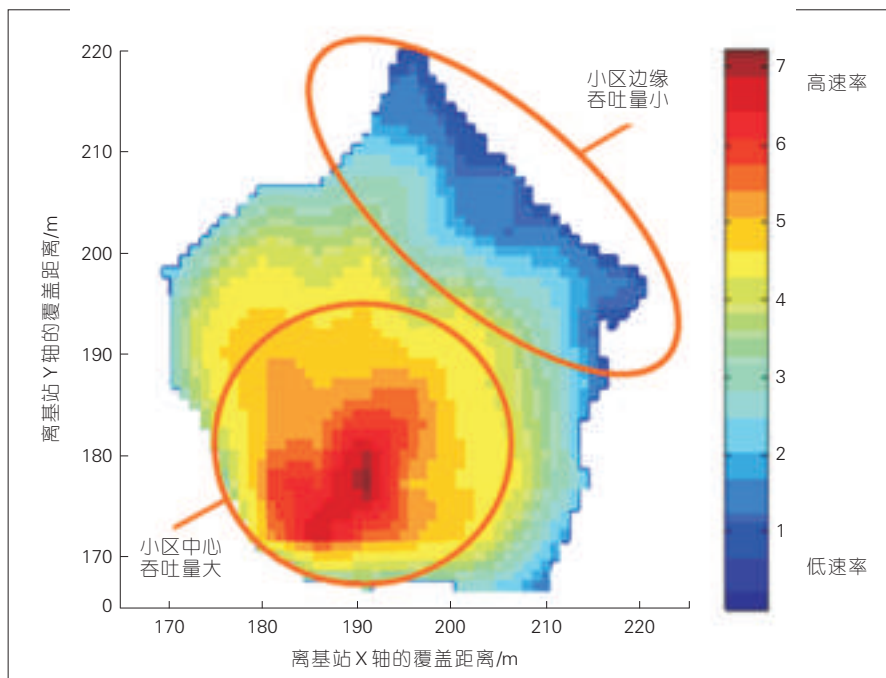
除了 LTE FDD 高频段带来的覆盖差异外, LTE FDD 的内部干扰也是影响 LTE FDD 覆盖的另一个重要因素^[5]。图 2 显示的是在一个 LTE FDD 多小区覆盖下, 小区间的覆盖距离为 500 m 左右时, 用户在干扰情况下的速率对比。

在小区中心 50 m 左右的区域, LTE FDD 网络的业务速率会一直保持在 7 Mbit/s 以上。当用户行进至小区边缘时, 业务速率会有一个明显的下降过程, 这时的业务速率会降低至 1 Mbit/s 以下。可见, LTE FDD 网络中, 小区间的干扰确实会影响小区边



▲ 图 1 LTE FDD 网络和 CDMA 网络覆盖半径对比

收稿日期: 2014-01-15
网络出版时间: 2014-03-03



▲图2 LTE FDD 多小区用户实际速率对比

缘用户的业务性能。小区间的干扰会在网络中,形成大量的数据空洞,导致用户的实际体验很差^[6-10]。

针对 LTE FDD 覆盖中出现的上述问题,全球标准组织和研究机构正在制订相应标准和技术,以解决 LTE FDD 系统在覆盖方面的问题。从目前的研究进展看,LTE FDD 多天线技术、上行干扰消除(IRC)技术和上行功控技术是在现阶段公认的、可用于 LTE FDD 覆盖增强的实用技术。

2 LTE 多天线技术研究和试验

多天线技术通过对发射和接收信号的空域和时域上的处理,提高系统的覆盖和容量。其中,多天线的接收分集、发射分集、下行波束赋形和多输入多输出(MIMO),即空分复用已经在 3G 和 LTE 网络中得到了很多广泛应用。

在 LTE 协议中,LTE 多天线下行规定了多种传输模式,并且支持最高 8 天线的码本设计。原则上,3GPP 对天线数目和传输模式没有特别的搭配要求。从目前 LTE 网络,特别是

LTE FDD 网络中,运营商一般会采用 2 天线或 4 天线解决方案。主要原因是:相比 8 天线设备成本,2 天线或 4 天线的设备成本会相对较低。同时,运营商采用 2 天线或 4 天线也可以和现有的宽带码分多址(WCDMA)等网络进行共天馈建设,以节省工程安装费用^[11]。

但对于传统的 CDMA 运营商,由于 CDMA 网络向 LTE 网络过渡时,频段上存在比较大的差异,2 天线或 4 天线的方案选择会带来 LTE 网络覆盖上的空洞。因此 8 天线技术,特别是上行 8 天线技术是传统 CDMA 运营商需要重点考虑的技术。

上行多天线技术,在接收端使用多根天线进行信号接收合并,即上行最大比合并(MRC)技术,是最常用并且研究最多的多天线配置技术^[12]。多天线接收将接收到的多径信号按一定规则合并起来,使接收到的有用信号能量最大,从而提高接收信号的信噪比,达到提高系统覆盖能力和系统容量的目的。

从大量的实验室测试数据来分析,8 天线上行接收技术相对于 2 天

线上行接收技术有 5~8 dB 的信号增益。并且,8 天线的信号增益和加载的信道仿真模型有一定的关联。当加载加性高斯白噪声(AWGN)信道模型时,8 天线的信号相比于 2 天线信号会有 5 dB 的增益;当加载扩展空间的信道模型(SCME)时,8 天线的信号相比于 2 天线的信号则会有 8 dB 以上的增益。

信号仿真模型和实际外场环境存在一定的对应关系。上面提到的 AWGN 信道模型基本上可以对应于一般郊区场景,存在直射径,但反射和折射较少。这种外场环境下,上行 8 天线接收相比于 2 天线的信号增益在 5 dB 左右;在密集城区,会存在比较多的反射径和折射径,这种外场环境下,上行 8 天线接收技术会有效抵抗多径带来的衰落,相比于 2 天线的信号增益在 8 dB 左右。

为了验证多天线技术对 LTE 覆盖性能的影响。中兴通讯于 2012 年在中国某城市进行了 LTE FDD 覆盖增强技术的外场试验。对 LTE FDD 多天线技术、上行 IRC 技术和上行功控技术对 LTE FDD 上行覆盖增强进行了综合试验测试。其中,重点对比了相同条件下,上行 8 天线接收相比 2 天线接收的信号处理增益。

2.1 测试总体方案说明

测试总共使用两个基站,一个小区配置一个基站。测试两个站点分别位于中国某城市的主要商业区,一个站点用于主测站点,另一个站点用于加扰。两个站点之间相距 300 m。

2 天线 UE 和 8 天线 UE 在相同条件下,采用上行天线进行大数据业务传输。

2.2 多天线性能测试对比

当在 UE 位于近点时,由于信道条件较好,基站能实现最大码率的解调。因此测试中 2 天线 UE 和 8 天线 UE 均能达到上行最大峰值速率,发射功率均小于最大发射功率。其发

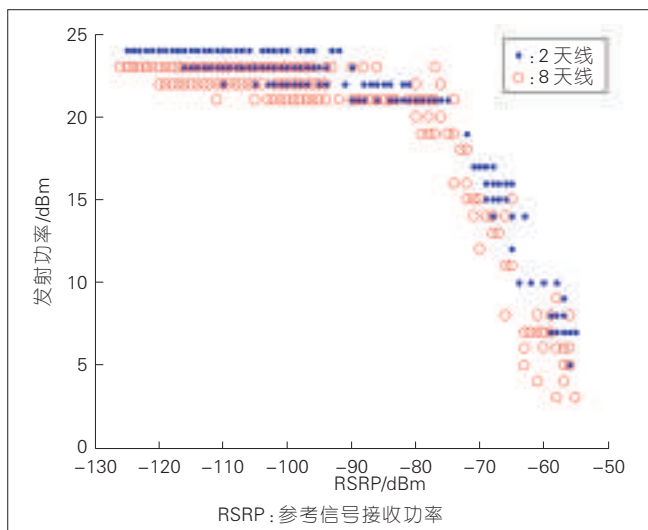


图3
2天线或8天线UE
发射功率散点

射功率散点图如图3所示。

当UE进入近点时(RSRP在 $-60 \sim -80$ dBm), 8天线UE发射功率相比2天线发射功率低10 dB左右, 随着距离增加, 发射功率差值在减小, 但平均能维持在5 ~ 6 dB左右。

当UE进入中、远点时(RSRP在 $890 \sim -120$ dBm时), 8天线UE和2天线UE发射功率一致, 均达到最大发射功率。此时, 8天线增益主要体现在容量变化上。

图4是2天线或8天线定点容量测试结果对比。

当UE进入中点位置时(RSRP在 $-60 \sim -100$ dBm), 8天线UE吞吐量相比2天线有将近1倍增长; 当UE进入了远点位置时(RSRP在 $-100 \sim -120$ dBm), 8天线UE吞吐量相比2天线有将近2倍增长。

3 上行IRC技术研究和试验

上行多天线接收技术主要使用MRC技术, 用于抗衰落和抗噪声。当系统中存在较大的干扰时, 对于干扰很大的分支, 上行MRC给的权值也很大^[13]。因此, 这些分支的干扰被放大, 致使性能恶化。

IRC是一种更高级的分集接收技术, 相较于传统的MRC算法, IRC考虑了空间特征, 抗干扰效果更加明显。图5是MRC和IRC的实验室/性

能仿真的对比。

LTE FDD 基站配置为2天线, 信道模型低相关, UE上行资源块(RB)个数为6, 系统带宽20 MHz, 信号源在相同位置上, 进行6个RB的干扰。

从以上仿真结果可看出, 当存在强干扰时, 即使SNR不断增加, MRC也无法达到误块率(BLER)的10%。而IRC却在一定的SNR下, 可以达到BLER的10%。

因此, 在外部强干扰情况下, IRC技术是一个有效的抗干扰的技术, 能保证小区边缘用户良好的覆盖和容量^[14-15]。当然, IRC技术要求干扰信号相对有用信号, 有一个比较强的方

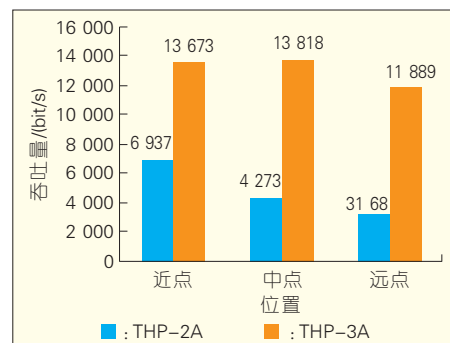


图4 2天线或8天线定点测试结果对比

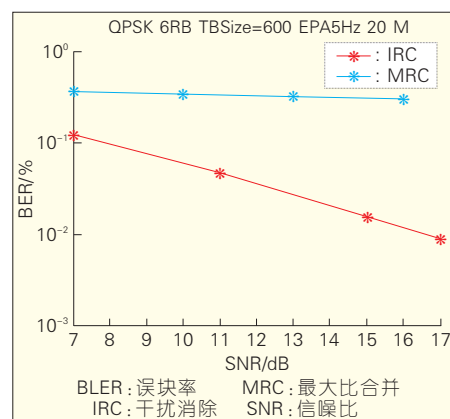


图5 IRC和MRC性能对比

向性。

图6是外场测试时, 开启IRC功能后, 2天线或8天线的性能对比图(限定上行速率为256 Kbit/s)。

此时邻区UE使用和主测小区相同的RB块进行加扰; 同时, 主测小区

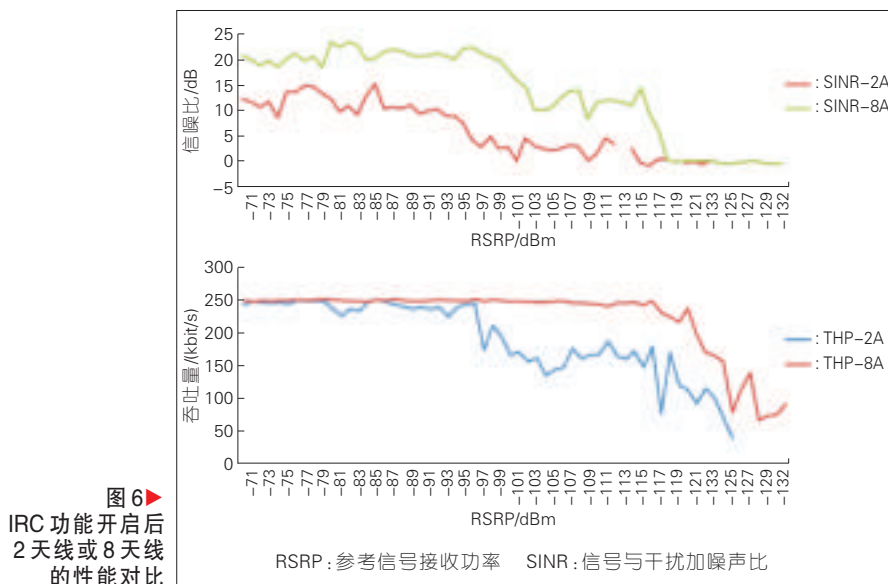


图6
IRC功能开启后
2天线或8天线
的性能对比

的2天线或8天线UE同时采用上行数据业务传输;上行并采用IRC功能进行测试,测试时限定上行固定为256 Kbit/s)。

通过这个测场景,我们可以发现:当UE位于近点或者中点(RSRP > -100 dBm)时,2天线或8天线均能达到上行256 Kbit/s上行限速能力,但8天线的信号与干扰加噪声比(SINR)明显高于2天线,表明此时8天线相比2天线有接收分集的增益。当UE位于远点位置时(RSRP < -100 dBm),2天线已不能达到256 Kbit/s,但8天线却可以达到。

因此,在上行加扰情况下,当采用IRC功能后,8天线相比2天线的性能提升更加明显。

从上面的技术研究和试验可得出:LTE FDD多天线技术、上行IRC技术,上行功控技术能有效解决目前LTE FDD上行覆盖不足的问题。

上述这些技术可以综合应用,以期达到最大限度提高覆盖,抗干扰和提高小区边缘用户的容量。

4 结束语

通过上述对LTE FDD覆盖增强关键技术的研究和实际外场试验测试,可以得知LTE FDD多天线技术、

上行IRC技术和上行功控技术能够提高LTE FDD覆盖能力,降低干扰,降低近点UE的发射功率并能大幅提高上行容量。

但LTE FDD多天线技术也会面临诸如工程安装相对困难,设备和配套成本较高,并且8天线本身的天线工艺制作水平也有待提高等一系列问题。目前试验的LTE FDD多天线技术主要着力解决上行覆盖问题,当上行覆盖问题得到缓解后,下行覆盖问题可能会显露出来。因此,LTE FDD覆盖增强技术下一步将继续解决下行覆盖的相关问题,以期做到上、下行链路完全平衡,以更好满足用户对LTE FDD网络高速业务的需求。

参考文献

- [1] 3GPP TS 36.213.Physical layer procedures (Release 10)[S].2012.
- [2] 3GPP TR 25.996.Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulation(Release 6)[S].2003.
- [3] NGMN TE WP1.Radio Performance Evaluation Phase 2 report V1.2[S].2009.
- [4] 3GPP TS 36.101.User Equipment (UE) radio transmission and reception(Release 8) [S].2009.
- [5] 3GPP TS 36.201.LTE physical layer;General description[S].2011.
- [6] 3GPP TS 36.211.Physical channels and modulation[S].2010.
- [7] 3GPP TS 36.212.Multiplexing and channel

coding(Release 9)[S].2010.

- [8] 3GPP TS 36.214.Physical layer; Measurements(Release 9)[S].2010.
- [9] 3GPP TS 36.216.Physical layer for relaying operation[S].2009.
- [10] 3GPP TS 36.104.Base Station (BS) radio transmission and reception[S].2011.
- [11] 3GPP TS 36.133.Requirements for support of radio resource management[S].2010.
- [12] 3GPP TS 36.141.Base Station (BS) conformance testing[S].2009.
- [13] 沈嘉,索士强,全海洋.3GPP长期演进技术原理与系统设计[M].北京:人民邮电出版社,2008.
- [14] Stefania Sesia,Issam Toufik, Matthew Baker.LTE-UMTS长期演进理论与实践[M].马霓,邬钢,张晓博等译.北京:人民邮电出版社,2009.
- [15] Erik Dahlman.3G演进:HSPA与LTE(第2版)[M].堵久辉,缪庆育,徐斌译.北京:人民邮电出版社,2010.

作者简介



李强华,北京航空航天大学毕业;现任中兴通讯股份有限公司二级主任高工;从事无线通信技术研发和产品规划,研究方向为CDMA和LTE FDD无线通信技术及网络优化;发表论文3篇。



王彬,华中理工大学毕业;现任中兴通讯方案经营部主任工程师;从事LTE无线性能研究,研究方向为LTE无线通信多天线技术及射频技术;发表相关专利10余篇,学术论文2篇。

综合信息

全球LTE用户数2019年将超过20亿

3月11日消息,来自ABI Research的最新研究报告显示,2013年全球LTE用户数已达到2.297亿,并且2013—2019年将以43.6%的年复合增长率继续增长,到2019年将超过20亿。截至2013年底,LTE-TDD用户数占据整体LTE市场的5%,LTE-FDD用户数则占据了94.2%。

“在LTE用户增长中,亚太地区贡献了49%的市场份额,是全球最大的LTE市场。其次为北美地区,市场份额为18%。”ABI Research助理研究员Marina Lu评论道。“亚洲庞大的人口基数,加上快速的LTE网络部署以及廉价智能手机的普及,加速了这一地区LTE用户数

的显著增长。”

所有的主要移动运营商们都已承诺部署LTE-Advanced载波聚合技术,该技术可以更大的带宽应对移动数据流量的爆炸式增长。ABI Research预测,LTE-Advanced用户数到2019年将增至7.5亿,占据全部LTE用户数的37.3%。北美将成为最积极的LTE-Advanced市场,其次是亚太和西欧地区。

ABI Research副总裁兼业务主管Jake Saunders表示:“值得注意的是,韩国运营商SK电讯和LG U+已经在2013年6月正式商用了LTE-Advanced网络。截至2013年底,SK电讯已收获超过100万LTE-Advanced用户,占据其全部LTE用户数的10%。”(转载自《中国通信网》)

移动智能终端操作系统技术发展

Development of Mobile Intelligent-Terminal Operating System

王跃/WANG Yue, 许志远/XU Zhiyuan, 严珏玮/YAN Juwei

(工业和信息化部电信研究院 规划设计所, 北京, 100037)
(Department of Planning and Design, China Academy of Telecommunication Research of MIIT, Beijing 100037, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 02-0045-04

摘要: 探讨移动智能终端操作系统技术的整体发展, 从技术范畴、技术架构、技术属性、技术发展、技术趋势等维度全面透视移动智能终端操作系统技术的整体演进变革。指出继移动智能终端浪潮颠覆微软垄断之后, 正在形成中的、面向泛终端的统一操作系统的竞争可能孕育出新一轮操作系统格局变革。中国在移动操作系统技术领域已全面深度布局, 从技术现实看基于 Android 优化路线的操作系统技术发展已处于全球先进行列, 但自研系统技术性能仍有待进一步完善。

关键词: 移动智能终端; 操作系统; 技术发展

Abstract: This paper discusses the development of mobile intelligent-terminal operating system technology in terms of concept, architecture, attributes, and trends. Mobile intelligent-terminal operating systems have broken the Microsoft Windows monopoly, and the unified operating systems being created may lead to a new era. Chinese industry has gone to great effort to research and develop mobile operating system technology. From a technical perspective, Android-based optimized operating systems are mature and more advanced than other countries. However, technical performance of self-developed systems still needs to be improved.

Key words: mobile intelligent terminal; operating system; technology development

1 移动智能终端操作系统的概念

从技术范畴看, 移动智能终端操作系统已成为面向应用服务甚至包括部分基础应用服务的、构建于硬件之上的完整平台体系^[1]。传统狭义的操作系统主要由内核层及简单

的操作界面两部分构成, 这种操作系统只具有最初级的服务能力。传统狭义的操作系统面向上层应用软件提供最简单的支撑服务, 大量重要的基础功能须由应用开发者自行完成, 开发难度高、工作量大。随着 Unix 操作系统 (特别是基于其衍生的开源 Linux 操作系统) 技术的快速发展, 狭义操作系统技术基本成熟, 主流移动操作系统中除微软 Windows Phone 系列外, 内核/系统库高度雷同, 技术方

案均为在 Unix/Linux 基础上进行二次开发。由于传统系统无法适应互联网时代灵活、快速、自由、创新的需求, 操作系统自身的概念范畴开始演变, 技术外延开始拓展, 操作系统从最初聚焦于对硬件资源的管理调度扩展到面向应用服务的延伸与整合, 架构在内核系统上的中间件、应用平台等也成为操作系统的有机组成部分, 从而形成了一个面向应用的操作系统平台体系。移动互联网时代, 这一态势更为显著。

2 移动智能终端操作系统发展特征与趋势

2.1 开源化运作不断扩大

从技术属性看, 当前开源技术已取代闭源成为移动智能终端操作系统的主流。除狭义操作系统之外, 随着开源技术应用范围的不断扩大, 业界在中间件层乃至应用平台层已逐步形成了一系列性能良好的开源功能组件, 谷歌更第一次成功地将开源模式带入到移动智能终端操作系统领域。Android 本身即是开源技术发展的产物, 它广泛采用 Linux、WebKit 等业界既有开源功能组件, 在此基础上, 谷歌通过全面整合优化将 Android 构建为一个具有强大竞争力的一站式开源解决方案, 为业界提供了从优化的内核层到整合的中间件层再到成熟的应用平台层的完整操作系统技术实现模板, 极大降低了操作系统的技术门槛, 打破了长期以来以 iOS、Symbian 为代表的闭源操作系统的技术垄断。全球业界进而掀起进军移动智能终端操作系统领域的浪潮, 2011 年中国计划进入移动操作系统研发领域的企业超过 10 家, 遍布整个产业链领域。而开源技术的快速发展导致技术的扩散势必影响行业主导者的利益。

2.2 技术架构趋于稳定

从技术框架看, 从 Symbian、

收稿日期: 2014-01-10

网络出版时间: 2014-02-26

基金项目: 国家科技重大专项

(2012ZX03002018、2013ZX03002010)

Palm、Windows Mobile 再到 iOS、Android, 移动操作系统技术框架不断演进, 并逐渐形成高度灵活的 4 层组织架构: 操作系统内核层、中间件层、应用平台层、应用软件层。其中, 中间件层又可划分为封装内核功能并向上提供接口的系统库组件和支撑上层应用的基础功能库(如数据库), 应用平台层可划分为运行平台层(如 Java 虚拟机)和构建于其之上的应用框架和应用引擎及接口层(如用户界面框架), 这 4 层架构高效协同, 并可以全面封装底层硬件能力、完善构建多媒体等基础服务能力、为应用服务提供直接支撑能力、并面向用户提供最终应用服务能力。移动智能操作系统技术框架如图 1 所示。

2.3 面向 Web 化演进加速

以 HTML5^[2] 技术为代表的下一代 Web 运行环境将是今后一段时期内移动智能终端操作系统技术演进的重要方向, HTML5 技术将推动移动操作系统技术发生一系列深刻变革, 技术框架、技术组件、技术模式都将全面重新演绎。目前移动智能终端操作系统软件平台, 面向 HTML5 技术共衍生出 3 种架构, 如图 2 所示。但从目前来看, 以 HTML5 技术为代表的下一代 Web 运行环境在短期内难以对原生移动智能终端操作系统地位构成挑战, 原因主要有 4 点。

(1) HTML5 技术本身远未成熟。HTML5 仍处在标准完善发展阶段, 运行效率、设备能力调用、安全性等方面远不如原生应用, 同时其标准组织(W3C 与 WHATWG)又发生分裂, 统一 Web 运行环境构建遥遥无期, 严重削弱其核心竞争力。

(2) 运行支撑能力仍待升级。移动智能终端的基础硬件性能仍落后于 PC, 而 Web 技术固有的低效导致移动端应用体验进一步下降, 电源功耗的制约也对其用户体验构成严峻挑战, 同时 HTML5 技术对实时在线和实时交互的需求更为突出, 在当前

图 1
移动智能终端
操作系统技术架构

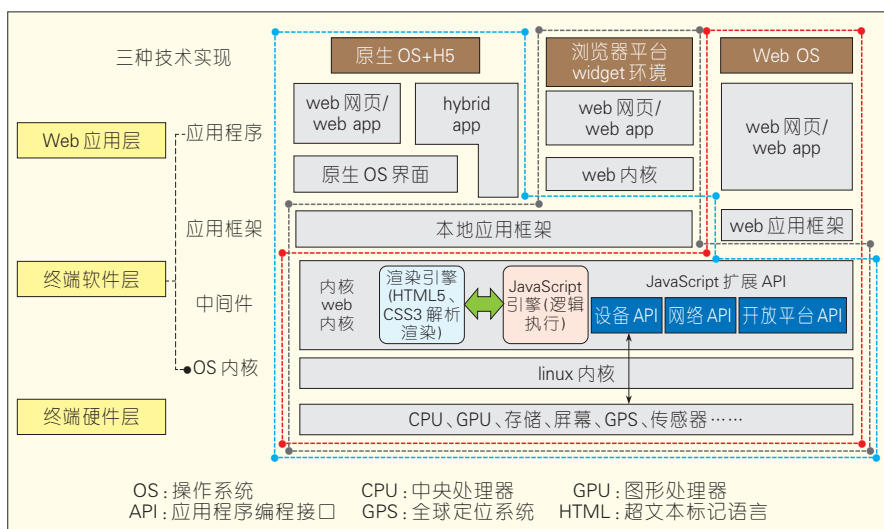
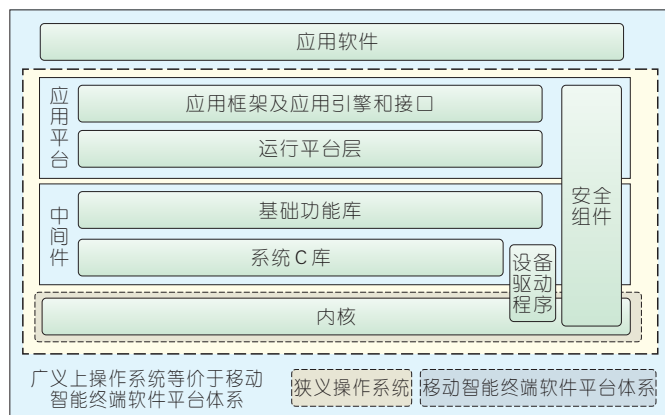


图 2 面向 HTML5 的移动智能终端系统软件平台 3 种架构

产业发展已对移动通信网络造成巨大冲击的基础上, 其又对网络支撑能力提出新的重大挑战。

(3) 产业生态力量弱且分散。HTML5 背后的拥趸主要为互联网公司、浏览器厂商、电信运营商等, 与原生应用主导者苹果、谷歌相比其实力仍相对弱小, 产业界缺少能协调各方利益的主导企业, 出于对第一入口的争抢, 各方技术方向虽统一, 但实现方式差异颇大, 生态体系零散且规模较小, 短期内难以形成合力共同构建统一的移动 Web 产业生态。

(4) 商业模式仍未成型。商业模式是整个 Web 产业生态能否成功运行的关键, 而传统的广告模式在移动互联网时代已遭遇危机, 限于移动终端屏幕、投放能力等制约, 移动广告

价值与变现能力远未达到桌面互联网广告水平, 基于下一代 Web 运行环境的整个产业生态如何赢利运转仍待产业界进一步探索。

2.4 “接口友好”成为竞争关键

从技术发展看, “接口友好”成为全球移动智能终端操作系统技术竞争核心。操作系统的“接口”涉及“人机接口”与“产业生态接口”两大类。

在“人机接口”方面, 用户决定着移动智能终端操作系统的最终成败, 围绕“用户体验”增强的相关技术大量融合进入移动智能终端操作系统技术领域并成为产业界重要竞争焦点, 多点触摸、智能语音等先进交互技术, 增强现实、裸眼 3D 等显示技术, 并行计算、新型传感器支持、软硬

协同优化等全面释放硬件能力的适配/优化技术持续全面进入移动智能终端操作系统的核心技术范畴。在“产业生态接口方面”,操作系统的价值与其用户规模呈高度正相关,在移动互联网的特定背景下移动智能终端操作系统成功与否的主要判定标准集中体现在其支持的应用生态规模及硬件产业生态规模上。“产业生态接口友好”成为了移动智能操作系统技术竞争的关键,而降低生态进入门槛、提升支撑效率则是构建友好型生态接口的主要出发点,谷歌 Android 平台最重要的原始创新即“产业生态接口友好”创新:一是构建应用生态友好接口,打造高性能 Java 虚拟机,以适度牺牲运行效率为代价大幅提升开发者的开发效率。Android 操作系统采用 Java 作为开发语言,应用开发效率高,同时谷歌为 Java 创新研发了不同于传统 J2ME 的寄存器式虚拟机,显著地提升了 Java 运行效率^[3]。随着硬件能力的快速提升,特别是在当前主频普遍均超过了 1 GHz 的硬件有力支持下,Java 应用生态接口事实上取得了开发与运行性能的近乎完美平衡。二是构建硬件生态友好接口,在硬件驱动层面创新“用户空间驱动”实践以规避知识产权限制^[4],并且能够最大化保护硬件企业利益。

Android 操作系统在传统 Linux 内核基础上打造硬件抽象层和内核层双架构,传统只运行在内核中的驱动随之一分为二:核心业务逻辑部分作为用户空间驱动运行于硬件抽象层,其完全不受内核 GNU 通用公共许可证 (GPL) 开源协议制约而可采用闭源方式提供,内核层中的驱动则是将传统完整驱动的核心业务逻辑部分去除,仅作为“影子”驱动传送控制命令和数据,实现驱动与内核的彻底分离,保证硬件企业知识产权的安全。

2.5 泛终端竞争新时代正在来临

操作系统竞争空间不断延展,产

业格局有望重塑。移动智能终端的爆发增长深刻重构了整个操作系统产业格局。桌面领域的长期主导者微软 Windows 系统在由智能手机、平板电脑、个人 PC 构成的规模更大的全新市场空间中,全面落败于新一代移动操作系统霸主谷歌 Android,同时移动操作系统正深度融合物联网技术,快速向可穿戴设备、智能家居、车联网等泛终端垂直领域掀起连续跨平台发展浪潮,加速推动空前规模的泛终端统一竞争空间形成。在这新的产业变革中,操作系统整体格局有望发生新一轮变化。

移动智能终端操作系统着力于跨平台演进以延续优势,但新阶段谁是赢家仍远未确定。全球主要移动智能终端操作系统加速跨平台归一化演进,着力打造统一平台体验与兼容应用运行环境,以期降低不同终端形态间的进入壁垒,延续移动智能终端市场竞争优势,并在新的产业竞争空间中占得先机。全球三大移动智能终端操作系统在硬件适配、应用程序编程接口 (API) 统一、用户界面 (UI) 操作、界面适配优化四大领域积极行动:苹果借力其垂直一体化模式以 iOS 为基础领先实现了智能手机与平板电脑的统一;微软借力 Windows 8 系列的发布更一举实现了 PC、平板电脑、手机三大移动智能终端平台体验/生态的高度一致;Android 系统则快速演进,继在 4.0 版本中成功消除手机与平板电脑边界后,不断统一 UI 界面、扩充兼容性测试套件 (CTS) 测试集,试图逐步构建跨最广泛终端形态的统一平台体验与兼容应用生态。然而,面向泛终端领域的智能操作系统相较移动智能终端操作系统在系统安全/稳定性需求、新型硬件形态适配、差异化硬件性能及功耗匹配、人机及环境交互等一系列关键技术领域中存在着巨大差异,以 Android 为代表的原始定位于移动智能终端领域的操作系统在泛终端产业竞争时代,是否将在新的更为广阔

的博弈空间中延续领先仍远未确定。

3 中国移动智能终端产业发展状况

3.1 技术路线全面布局

中国产业界也已在移动操作系统领域深度布局,且各企业均深刻立足自身优势:软件企业方面,采取 Android 兼容“右向”路线的播思通讯对 Android 进行多层次优化,在安全、软/硬件匹配等方面甚至超越原生 Android 的水准,其在英特尔芯片上的软/硬匹配解决方案已面向全球进行推广;采取基于开源 Linux “左向”路线的全智达在独立自主演进、借力 Android 应用生态方面也已取得显著进步。互联网企业方面,深感移动搜索市场格局变化的百度立足“当前”,基于 Android 深度优化应用平台等上层软件架构,集成自有业务积极争夺全球移动互联网服务市场;阿里巴巴则在对 Android 关键创新—Java 虚拟机进行自主重研的基础上着眼“未来”Web 化发展趋势,创新构建完整的 Web 框架体系。

3.2 技术研发有待推进

从技术现实看,全球现有的移动智能终端操作系统产品技术实现与优化各不相同,借助引入并整合业界公认的一系列知名 benchmark 工具,我们对移动智能终端操作系统整体及全部关键系统组件近四百个要素展开深度评测,结果表明:从整体上看,苹果 iOS 及三星优化后的原生 Android 性能占有明显优势,中国整体移动智能终端操作系统优化研发、软硬件结合技术能力与国际先进水平差距仍存,但距离正逐步缩短。在高端领域,中国移动智能终端操作系统发展主要立足企业自身优势、采用基于 Android 二次开发优化技术路线,2012 年下半年重点企业出产的主流高端产品中,中国领先终端企业 OS 优化及其软硬件结合技术实力已

可比肩三星。

与此同时,中国采用更多原创技术路线的移动操作系统技术产品仍待进一步成熟。中国原创性移动智能终端操作系统主要定位于中低端市场,以 WoPhone OS、阿里 OS 等为代表,在技术性能方面,对比相同硬件凭平台下(如表 1 所示)的类 Android 优化系统存在明显差距(如表 2 所示);阿里云操作系统基于 Android、Linux、WebKit^[5]等一系列业界知名开源技术组件进行研发,并在产业生态支持方面全面创新:一是对 Android 的核心原始创新—Java 虚拟机进行自主重研,搭载了阿里云公司自主设计、架构、研发的自主知识产权的系统核心虚拟机。二是着眼“未来”Web 化发展趋势,创新构建完整的 Web 框架体系,前瞻布局探索新型 Web 应用生态系统。但由于产品发展时间仍然较短,在对 2012 年实际产品测试中,我们发现阿里云 OS 在 Java 虚拟机性能、内存管理、CPU 管理、多任务管理、网络方面等自行改进的底层技术组件方面仍待完善;

WoPhoneOS 完全基于 Linux 内核的原生操作系统, WoPhone 较好地释放了 C 平台的性能优势,但在程序启动、多媒体、图形引擎等影响用户体验的关键技术组建方面亟待强化。

4 结束语

文章聚焦探讨移动智能终端操作系统技术的整体发展,从多个维度全面透视移动智能终端操作系统技术的整体演进变革:从技术范畴看,操作系统技术内涵不断向上延伸,与应用服务之间的关系越发紧密;从技术架构看,操作系统已基本发展为 4 层通用技术框架,但随 Web 技术发展将可能进一步演进;从技术属性看,开源技术重塑了移动操作系统技术本身的管理运作模式并有力推进了全球技术扩散进程;从技术发展看,全球移动操作系统技术竞争核心聚焦于“人机接口友好”与“产业生态接口友好”两大关键领域;从技术趋势角度,移动智能终端操作系统持续跨平台深度演进,面向泛终端的统一操作系统竞争空间正在形成,并可能孕

育出新一轮操作系统格局变化。面对这一新的机遇,中国业界在移动操作系统技术领域积极投入并已全面深度布局,但从技术现实看中国操作系统技术研发仍有待加速,基于 Android 优化路线操作系统已进入全球领先行列,而主要依赖自主研发的系统仍不成熟,技术性能仍有待进一步完善。

参考文献

- [1] 许志远, 李婷, 王跃. 移动互联网白皮书[R]. 北京:工业和信息化部电信研究院, 2013.
- [2] W3School. HTML5 教程[EB/OL]. (2010-10-28). <http://www.w3school.com.cn/html5/>.
- [3] Sohail Khan, Shahryar Khan. Analysis of Dalvik Virtual Machine and Class Path Library [R]. Peshawar: Security Engineering Research Group, Institute of Management Sciences, 2009.
- [4] Android 浅探 [EB/OL]. (2013-08-16). <http://mmdays.com/2008/09/29/android-%E6%B7%BA%E6%8E%A2%E4%B8%80/> 2008.9.
- [5] 张智江, 严斌峰. 移动互联网业务发展探讨[J]. 中兴通讯技术, 2009, 15(4): 5-7.

▼表 1 搭载中国原创移动操作系统测评终端硬件基础性能比较

操作系统	操作系统版本	手机型号	CPU	CPU 主频/ MHz	内存/ MB
联想 Android 优化 OS	4.0.3	Lenovo p700	ARM V7	1001.0	474 MB
阿里云 OS	1.7.0.0-RT-20120722	HW-W718	ARM V7	1 001.0	474 MB
OPhone Android 优化 OS	2.3.7	TD920	MARVELL 885V331X	806.0	184 MB
WoPhone OS	2	K-TOUCHU U2	ARM V6	600	330 MB

▼表 2 2012 年中国操作系统相关性能指标比较

操作系统	联想 Android 优化 OS	阿里云 OS	OPhone Android 优化 OS	WoPhone OS
多任务模块	1	86%	1	212%
CPU 模块	1	70%	1	167%
内存模块	1	61%	1	139%
程序模块	1	104%	1	27%
文件操作模块	1	90%	1	483%
HTML5 模块	1	100%	1	105%
javascript 模块	1	103%	1	215%
数据库模块	1	97%	1	143%
多媒体模块	1	100%	1	56%
图形引擎模块	1	97%	1	92%
JAVA 虚拟机模块	1	61%	1	203%
网络模块	1	86%	1	256%

作者简介



王跃, 北京邮电大学工学硕士; 现任工信部电信研究院广州分院移动互联网研究部主任; 曾任 2012 年手机(含平板电脑类移动智能终端)操作系统需求分析及总体框架研究国家科技重大专项、2013 年移动互联网技术与产业总体研究国家科技重大专项分课题负责人, 广州移动互联网产业规划、北京海淀移动互联网产业发展等研究项目总负责人; 主要研究领域为移动互联网、数据网络规划、网络流量分析等; 在移动互联网领域发表论文多篇。



许志远, 北京航空航天大学毕业; 工信部电信研究院规划设计所信息网络部主任, 兼中国互联网协会移动互联网工作委员会副秘书长; 任 2012 年<<手机(含平板电脑类移动智能终端)操作系统需求分析及总体框架研究>>国家科技重大专项、2013 年<<移动互联网技术与产业总体研究>>国家科技重大专项总负责人; 主要研究领域为移动互联网。



严玮珏, 英国纽卡斯尔大学硕士毕业; 工信部电信研究院规划设计所助理工程师; 主要研究领域为移动互联网。

遗传算法在用户感知评估建模中的应用

Genetic Algorithms Application in Customer Experience Evaluation Model

▶ 罗荣慧/LUO Ronghui, 马志斌/MA Zhibin

(中兴通讯股份有限公司, 上海 201213)
(ZTE Corporation, Shanghai 201213, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 02-0049-04

摘要: 在建立用户感知评估变量结构模型的基础上, 利用遗传算法对 KQI-QoE 关系进行动态自适应建模, 并与线性回归方程、指数回归方程、抛物线回归方程以及对数回归方程等传统的拟合方法进行了对比。实际用户感知和评估体系的拟合结果表明, 遗传算法在用户感知建模方面具备良好的自适应搜索最优解的能力。这为进一步研究和完善用户感知评估体系提供了新的方法和途径。

关键词: 移动; 数据业务; 用户感知; 评估建模; 遗传算法

Abstract: In this paper, we use a variable structure model for evaluating customer experience and a genetic algorithm for dynamic adaptive modeling of KQI-QoE relations. We compare the genetic algorithm with traditional fitting methods, such as the linear regression equation, exponential regression equation, parabola regression equation, and logarithm regression equation. Actual customer experience and comparisons show that the genetic algorithm is good for searching for optimal solutions in terms of customer experience modeling. This is a new approach to improving the customer experience evaluation system.

Key words: mobile; data service; customer experience; evaluation model; genetic algorithm

随着通信技术的发展, 移动通信网络可以为用户提供越来越丰富的移动业务和应用, 如彩信、网页浏览、WAP、流媒体、网络游戏等, 这些业务为移动运营商提供了持续增长的收入来源。因此, 如何评估和提升移动通信业务的用户体验质量(即

用户感知), 成为全球各大运营商关注和研究的重点, 同时也是运营商在激烈的市场竞争中吸引用户、保持和扩大盈利的关键。

目前, 评估用户感知通常有两种方法: 一种是通过用户调查获取用户的实际体验质量; 另一种则是通过测量用户所应用业务的性能, 即关键业务质量指标(KQI), 推算出用户的实际体验质量。两种方法各有利弊。通过用户调查获取用户感知, 优点是

可以得到实际的用户感知; 缺点是无法实现实时监控, 滞后性较大, 并且每次用户调查都将耗费较大的人力、物力和时间。通过 KQI 推算用户感知, 只需在建模期间提供用户调查得到的实际用户感知数据, 然后利用该数据和相应的 KQI 指标建立 KQI-QoE 数量关系模型, 即可形成一套稳定的实时监测系统。建成之后, 无须再进行用户调查, 操作维护简单, 效费比高; 其缺点是 KQI-QoE 模型的不合理性将对推算出的用户感知造成误差。如果能够构建出合理的 KQI-QoE 数量关系模型, 显然采用第 2 种方法更具吸引力。因此, 文章重点研究了 KQI-QoE 数量关系模型的构建方法。

常用的回归分析模型包括: 线性回归方程、指数回归方程、抛物线回归方程以及对数回归方程。当待拟合数据具备其中某一种模型的特性关系时, 采用相应的模型方程进行曲线拟合, 则可以得到良好的趋势曲线, 误差也较小。但是, 对于 KQI-QoE 这类未知特性的数据, 如果利用以上固定的模型方程进行曲线拟合, 则很可能无法得到准确的趋势曲线, 而且误差可能也较大^[1-3]。

遗传算法是模仿生物遗传学和自然选择机理, 在一定的解空间中搜索最优结果的算法, 是对生物进化过程进行的一种数学仿真, 也是进化计算的一种最重要的形式。若采用遗传算法, 则无需给出特定回归模型方程, 可进行自适应拟合, 因而适用于对未知关系特性的数据模型拟合。

1 用户感知评估相关的基本概念

在移动通信业务应用领域, 用户感知评估就是获得用户对某种业务的应用感受情况, 它涉及两个基本概念: 一个是用户感知, 另一个是 KQI。

一般情况下, 我们所说的“用户感知”指的是用户或客户的体验质量(QoE), 也就是用户实际感受到的服

收稿日期: 2014-01-22
网络出版时间: 2014-03-06
基金项目: 国家科技重大专项
(2012ZX03001034)

务网络和业务的服务质量(QoS)。例如,用户感受到的语音或图像的清晰程度、文件收发的快慢等。

而用户对某一特定业务的质量的感受又是多方面或多个类别的,例如,对于语音电话业务,用户的感受主要有4个方面:

- 电话是否能接通,即拨号后是否能听到回铃声。
- 电话接通所需要等待的时间长短。
- 电话接通后是否会异常断线,也就是掉话。
- 打电话期间的语音质量如何,如语音是否清晰、是否会断断续续、是否存在较大的通话时延等。

因此,QoE指标分为子项感知度和整体感知度,子项感知度与用户对业务某一方面的应用感受相一致;整体感知度是用户对某一业务应用的综合体验质量,是该业务对应的所有子项感知度的综合反映。

KQI就是服务提供商实际提供的QoS,可通过测量或统计得到,它反映了业务或应用的端到端性能。一个或一组KQI指标能够直接地表征业务某一方面的性能,如时延特性、网页浏览流畅度等^[4]。

2 用户感知评估变量结构模型

用户感知评估变量结构模型定义了用户感知评估涉及哪些结构变量,以及这些变量之间的逻辑关系。这是构建数学描述模型的基础。

用户感知的评估是针对某一种业务进行的。由第1节中所举语音电话例子,可以看出,对于任一种业务,均可根据用户的感受,划分为多个类别的性能。一个类别的性能既对应了一个子项感知度指标,又对应了一个或一组KQI指标。业务的端到端性能指标将影响相应类别的用户感知(即子项感知度),而用户对该业务的整体感知则受各种类别的用户感知综合影响。

基于上述分析,我们建立了如图1所示的用户感知评估变量结构模型,变量的影响关系是自下而上的,具体表现为:

- 一个类别的端到端业务性能对应了一个子项感知度指标和一组KQI指标。
- KQI指标的好坏直接影响了相应子项感知度的好坏。
- 子项感知度的好坏直接影响了整体感知度的好坏。

因此,从用户感知评估的角度,模型的输入变量是待评估业务的KQI指标,输出变量是该业务的子项感知度和整体感知度。

下面我们将根据这个结构模型,运用遗传算法建立确定性的KQI-QoE数量关系模型。

3 遗传算法应用设计

采用遗传算法进行自适应曲线拟合,是从问题的解空间中一个随机产生的种群开始进化的。这个种群则由一定数目的函数表达式组成,每一个函数表达式则代表着一个个体,同时也有可能是我们所想得到的具体数学模型^[5]。

个体也就是染色体,它由一定数目的基因组成,基因的不同和组合方式的不同则决定了个体的特性。因此,使用遗传算法,首先需要实现将函数表达式从表现型到基因型的映

射,也就是编码。

3.1 编码方式

常用的编码方式有二进制编码、二叉树编码、实数编码等,对于函数拟合问题,最常用的编码方式是二叉树编码,即把组成群体的所有个体采用一种动态的树状结构来表示。图2是一个二叉树的示例,它表示了函数 $f(x, y, z) = (y \wedge 6) * \ln(x) + \exp(z)$ 。

这棵树的结点由根节点、中间节点和终结点组成,每个节点就是一个基因。

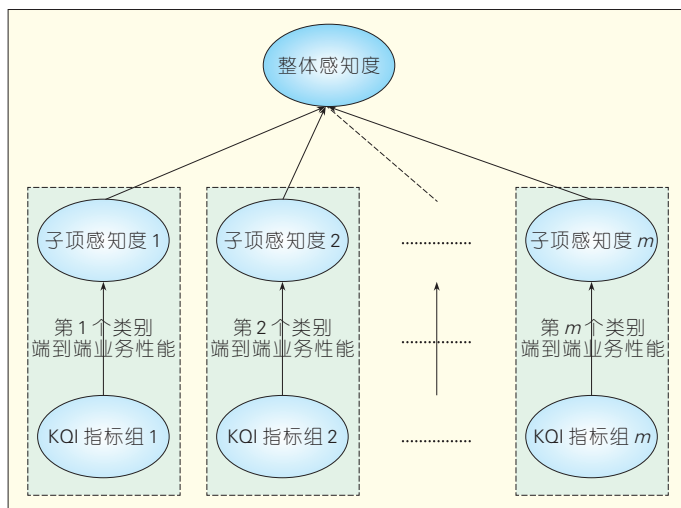
根结点和中间结点统称为内部结点,通常是运算符;终结点则为自变量和函数常数项。树结构表达的函数则是待求函数形式的一个可能的解^[6]。

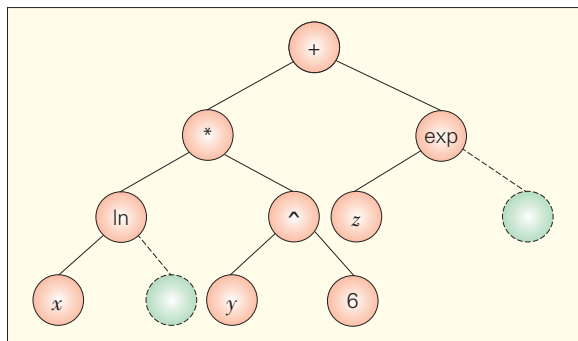
3.2 算法流程

遗传算法的实现流程如图3所示,包含以下几个步骤:

- (1)定义解空间,并进行种群初始化,产生由一定数量个体二叉树组成的种群。
- (2)对种群个体的相关适应度进行评估。
- (3)从当前群体中选择一定数量适应度高的个体。
- (4)对选取的二叉树个体进行杂交操作。
- (5)对种群中的个体进行相关变

图1
用户感知评估变量结构模型





▲图2 二叉树结构示例

异操作。

(6)种群更新,即将完成杂交和变异后的子代个体替代父代种群中适应度低的个体。

3.3 种群初始化

解空间由预测模型涉及的运算符集、自变量符号集和数据集的复合。其中,运算符集则包含了模型涉及的加、减、乘、除等各类函数运算符;自变量符号集则包含了模型可能涉及所有自变量;数据集则是模型涉及各类常数的最大取值范围,例如常数项、指数项、系数项等。

解空间定义之后,随机产生一定数量的二叉树个体,并且将会按如下原则对每个个体的二叉树节点进行填充:

- 对于内部节点,均随机由运算符集中选择一个函数符号填充。
- 对于终结点,则首先随机选择是自变量还是数据项,若是自变量,则随机从自变量符号集中随机选择一个自变量填充。
- 若是数据项,则在常数项取值范围内随机选择一个常数填充。

3.4 个体适应度评估

种群进化的目标是使得拟合曲线的误差尽量最小,因此我们采用最小二乘法的原则,选择残差平方和作为个体的适应度函数。对于某一个体,其计算公式如下:

$$\hat{f}_i = S_e = \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_1, \dots, x_m))^2 \quad (1)$$

其中, N 表示样本数;

y_i 表示因变量;

$f()$ 表示 y_i 由 x_1, \dots, x_m

表示的个体函数表达式;

x_1, \dots, x_m 表示 y_i 所对应的自变量。

同时,由于残差平方和总是非负的,因此选取个体适应度的倒数作为目标函数,即

$$J_i = \frac{1}{f_i} \quad (2)$$

3.5 选择算子

遗传算法中,选择算子最常用的是轮盘赌规则,也称比例选择方式。按照目标函数值,将种群个体从小到大排列,并按式(3)计算每个个体的选择概率:

$$p_i = \frac{J_i}{\sum_i J_i} \quad (3)$$

p_i 则为第 i 个个体的选择概率。每个个体均在相应的概率下进行相关选择。

显然,个体的目标函数值越大,也就是残差平方和越小,则被选择的概率越高。反之亦然。

为了使适应度最好个体的基因得到遗传,将群体中的最优个体直接选取。

3.6 杂交算子

对选择复制出来的个体进行杂交。杂交的规则如下:

- 对父代个体进行两两随机配对,形成杂交配对池;每一对父体均在一定概率条件下进行杂交。
- 对于杂交的两个父代个体,各自分别随机选择一棵子树,然后交换子树,得到相应的子代个体。
- 对于根深大于最大树根深度限值的子代,则把超过部分最大根深度限值的枝叶全部直接剪除;然后,将剪除后的最末一层的中间节点改为终结点,填充方式与种群初始化方式

相同。

3.7 变异算子

父代个体在一定概率条件下进行变异操作,具体规则如下:

- 对需要变异的个体,在所有节点中随机选择其中的一个作为变异分界节点,对该节点及其所有分支进行变异。
- 对于内部节点,则在运算符集中随机选择其他元素进行替换,替换值不同于原值。
- 对于终结点,则在自变量符号集或数据集中随机选择一个进行替换,替换值允许等同于原值。终结点的填充方法与种群初始化方式相同。

3.8 种群更新

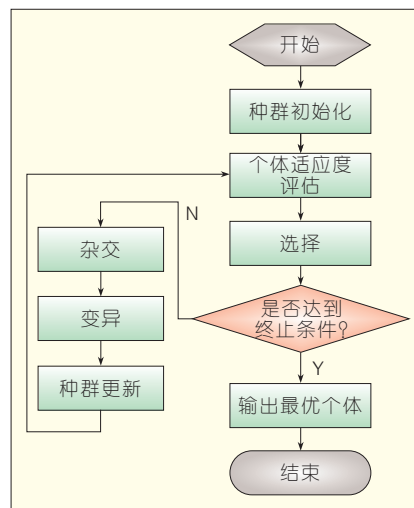
种群更新就是将父代个体中适应度最差的若干个体用变异后产生的子代个体进行替代。

为了保证每一代中的最好个体都能保留到下一代中,则直接将最好个体替代父代中的最差个体。

3.9 终止条件

终止条件可仅设定为以下3种中的任一种;或3种条件都设定,只要其中一项满足条件即终止:

- 达到繁殖最大次数。
- 达到算法程序运行的最大时长。



▲图3 遗传算法实现流程

2014年4月 第20卷第2期 Apr. 2014 Vol.20 No.2

分布式链路聚合技术及其应用

Distributed Link Aggregation and Its Applications

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 02-0052-05

摘要: 分布式链路聚合技术实现多个数据终端设备上任意链路之间的业务互为备份和负载分担, 同时实现节点保护功能。该技术是链路聚合技术发展的新阶段, 易于实现和升级, 极大提高了现有技术在链路备份、负载分担、节点保护、故障隔离、业务倒换方面的能力。

关键词: 分布式链路聚合; 节点保护; 链路备份; 业务保护

Abstract: Distributed link aggregation backs up services and balances load between arbitrarily links of multiple data terminal equipment (DTE). It also protects nodes. Distributed link aggregation is a new development in link aggregation technology. It can be easily implemented and upgraded. It greatly improves existing link backup, load sharing, node protection, fault isolation, and service protection technologies.

Key words: distributed link aggregation; node protection; link backup; service protection

魏月华/WEI Yuehua¹
杜玉强/DU Yuqiang²
黄璐/HUANG Lu³

(1. 中兴通讯股份有限公司, 江苏 南京 210012;

2. 三星电子(中国)研发中心, 江苏 南京 210019

3. 中国移动通信研究院, 北京 100053)

(1. ZTE Corporation, Nanjing 210012, China;

2. Samsung Electronics (China) R&D

Center, Nanjing 210019, China;

3. Research Institute of China Mobile,

Beijing 100053, China)

链路聚合技术已在 2000 年左右在 IEEE802.3ad 完成标准化, 后由 802.1AX 标准对该技术的模型、操作、控制协议以及管理进行全面规范。该技术可以将数据终端设备和数据终端设备之间的多条全双工点到点链路聚合起来形成一个链路聚合组 (LAG)。上层功能模块则可以将链路聚合组当成一条逻辑链路使用, 从而达到平滑扩展链路带宽的目的, 同时 LAG 组的物理链路之间互为备份提高了链路可靠性。

链路聚合技术采用链路聚合控制协议来管理链路配置并在链路间分布负载, 它在增加数据终端设备之间的连接带宽、实现传输链路的弹性和冗余方面起到了重要的作用。

随着网络的进一步发展, 传统的链路聚合技术由于 LAG 组成员无法

跨节点进行链路捆绑, 逐渐无法满足现网应用的需求, 因此需要一种分布式 LAG 技术 (如图 1 所示) 来实现跨节点的链路负载备份。

1 应用场景及需求分析

1.1 应用场景 1: 城域以太网

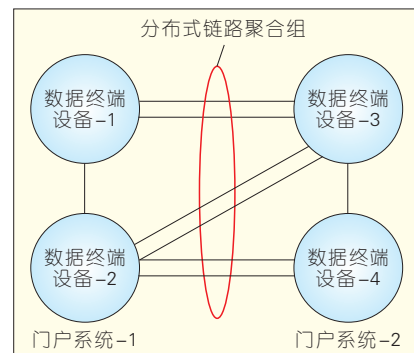
如图 2 所示, 在城域以太网通用架构规范 (MEF 4) 中, 两个城域以太网业务提供商的网络设备和以太网业务的分界点被定义为外部网络间接口 (ENNI)。ENNI 是连接两个网络管理域之间的参考点, 也是某管理域的边界点。对于某一个管理域来说, ENNI 是所连接的另一个管理域的唯一参考点。

ENNI 可以由一条或多条物理链路来实现, MEF 的规范中要求当 ENNI 由多条物理链路来实现时, 则采用 LAG 来进行链路的冗余保护。

当 ENNI 一端的城域网外部边界由两个或两个以上的节点组成时, ENNI 实际上是由一个互连区域来实现 (如图 3 所示)。采用互连区域实现 ENNI 除了可以应付链路失效的情况, 还可以提供节点失效保护, 更进一步提高了 ENNI 的可靠性, 如图 3 所示为一个经过冗余 ENNI 的 E-LINE 业务。已有的 LAG 技术无法满足该组网需求, 需采用分布式 LAG 技术实现^[1]。

1.2 应用场景 2: 移动回程网

如图 4 所示, 在长期演进 (LTE) 移动回程网中, 可以采用 eNodeB 连



▲ 图 1 分布式链路聚合组

收稿日期: 2013-12-13
网络出版时间: 2014-01-16

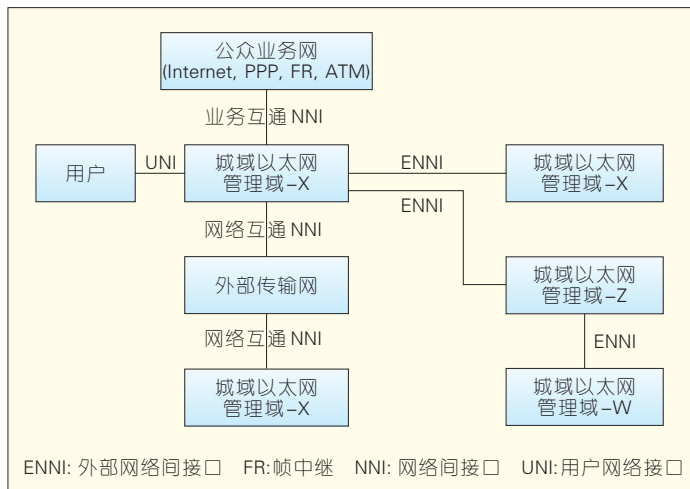
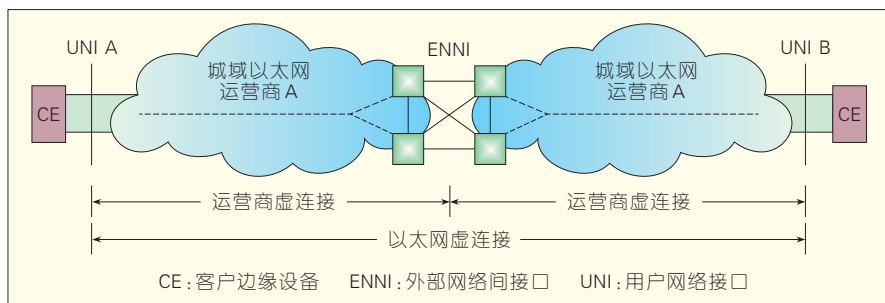
图2
外部网络接口

图3 采用互连区域实现 ENNI

接分组传送网（PTN）二层网络，再由 PTN 连到路由器，从而连接到服务网关（S-GW）和移动管理实体（MME）的方式组网，路由器作为 eNodeB、S-GW 和 MME 的三层网关。路由器和 PTN 之间通常采用双节点多链路互联来提高可靠性，若采用传统路由和以太网技术，需要设计十分复杂的故障检测、故障联动和倒换同步机制，对设备能力和网络维护都带来很大的压力。这种组网场景下，采用分布式的 LAG 技术可以很好地解决多节点多链路互备保护和同步的问题，并大大简化路由器和 PTN 之间的组网。图 4 所示的虚线方框为四节点的互连区域，对 PTN 下挂的 eNodeB 来说，两台路由器必须等同于同一个网关，而对于 S-GW 和 MME 来说，两台路由器还是各自独立的^[2]。

1.3 应用场景 3: 云计算数据中心

如图 5 所示，在云计算数据中心

网络内部通常采用大二层三级组网模式：接入层由架顶交换机组成，以连接数十台服务器或者内置 Blade Switch 的服务器网络出口，架顶交换机与汇聚层交换机通过双归方式进行互连；核心层是网络的 L2/L3 分割点，是服务器的三层网关，通过部署 MC-LAG、vPC、虚拟路由器冗余协议+多生成树协议（VRRP+MSTP）等提供网关备份和流量的负荷分担。这些技术的实现、网络规划和运营比较复杂。如果采用分布式 LAG 技术，可以在接入、汇聚、核心层交换机之间升级 LAG 技术，实现链路和网关节点保护和流量的负载分担，克服传统技术存在的扩展性差和带宽利用率低等问题^[1]。

2 LAG 技术原理及实现

分布式 LAG 技术，指 LAG 组的两端可以终结在一个或多个数据终端设备上，即增加了跨节点的能力，同

时兼容原有的链路聚合技术的所有功能和能力。

如图 1 所示，如果 LAG 的一端是由多个聚合系统组成，则这一端称为门户（Portal），即在分布式链路聚合模型中，LAG 一端的单个聚合系统被一个 Portal 取代了。

除了继承原链路聚合所能提供的能力外，分布式 LAG 还能提供：

- 兼容性。多系统门户可以连接单系统门户或者传统的聚合系统。
- 管理隔离。分布式 LAG 所连接的两个网络属于不同的管理域，运行不同的故障恢复协议。
- 管理独立。分布式链路聚合协议并不取代分布式 LAG 两端的两个网络内部的控制协议。
- 互连网络的故障隔离。一个网络内的链路或节点的故障或恢复，由本网络内的控制协议动作与通过分布式链路聚合组连接的另一网络内的控制协议相互隔离。

• 网络和分布式 LAG 互连区域的故障隔离。门户间的聚合链路故障、恢复对其连接的两个网络内部来说是透明的。

• 快速故障恢复。门户内的系统间通过内部通信协商快速响应故障或恢复。

• 分发独立。满足自身网络需求的帧分发算法和在聚合组内帧分

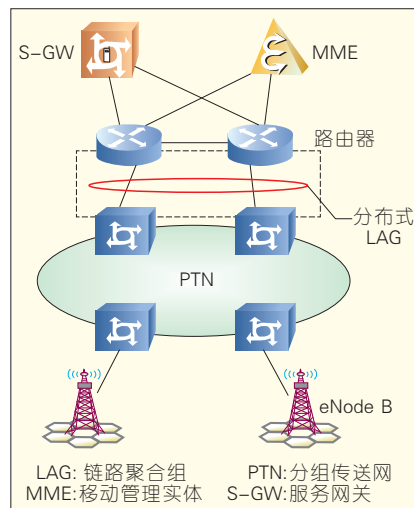
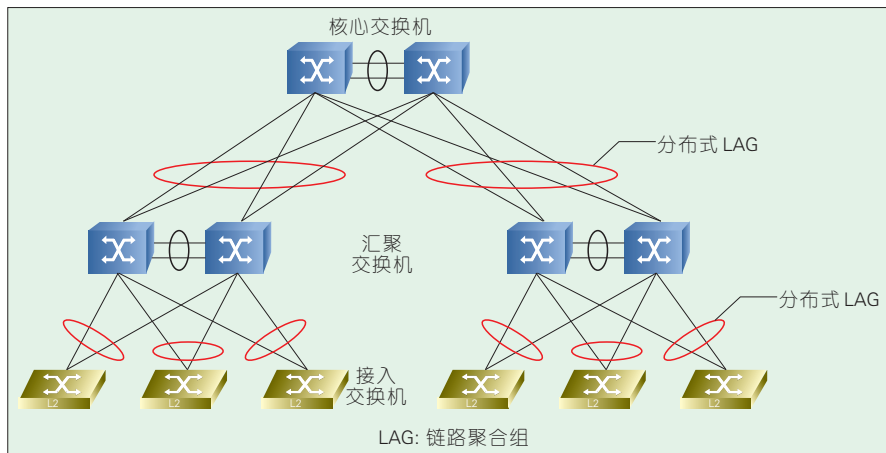


图4 采用分布式 LAG 的 PTN 网络



▲图5 采用分布式LAG的数据中心网络

发到各聚合链路的分发算法不同。

2.1 分布式链路聚合模型

为了能让两个或多个系统的链路加入到一个分布式LAG中,每个门户内的每个系统都需要通过分布式中继互连起来。门户内的每个系统(为了区分传统聚合组的系统,这里称为门户系统)运行链路聚合协议,每个门户系统对应一个聚合器。通过分布式中继连接多个聚合系统形成门户系统作为链路聚合组的一端。从链路聚合组的另一端来看,该链路聚合组终结在一个模拟系统端。原则上,分布式中继支持任意多的门户系统互连,但这需要引入一些协议处理。每一个链路聚合功能均包括一个或多个媒体接入控制(MAC)^[4]。

为了更好地描述分布式中继,这里用示例来说明。如图6所示,系统A和系统B都可以执行上层功能,这里的上层功能可以是某些帧的转发功能,如路由器或交换机。系统A和系统B都独自运行了链路聚合子层。假设现在我们需要将系统A和系统B上的链路聚合关联起来形成一个门户,系统A和系统B上的聚合链路形成一个聚合组。这时我们就需要用到分布式中继,如图7所示,通过分布式中继,使得系统A和系统B呈现出存在第3个模拟系统C。模

拟系统C和系统A或系统B之间是上层功能层和链路聚合层之间的虚拟链路连接起来,即本端的系统A和系统B模拟成为了一个模拟系统C。聚合组的另一端门户或系统是和系统C连接的,系统C是存在的。

分布式中继依据的原则有:

- 模拟系统C上的分布式中继是一个 $N+1$ 端口中继(N 为门户内的系统个数),即 N 个网关端口和一个模拟链路聚合子层。图7中包括了2个用于连接门户系统的网关端口以及1个模拟链路聚合子层。

- 聚合端口移到了模拟系统上,对于其他系统来说,这些聚合端口是对等的。

- 分布式中继网关是虚拟连接,它将分布式中继连接到系统上。

系统A和系统B的实际结构如图8所示,每个系统A和系统B都有自己的分布式中继功能模块,用于实现

分布式中继。分布式中继的原则是:

- 系统A和系统B中和系统C关联的端口均移到分布式中继功能的链路聚合子层下面。

- 分布式中继功能和上层功能层间有虚拟链路,称为网关链路。

- 每对分布式中继功能间由内连链路(IPL)连接,而IPL终结在分布式中继功能上的内连端口(IPP)上。

- 有一个网关算法用于决定帧从哪个网关链路进入/离开模拟分布式中继。

- 有一个端口算法用于决定从哪个门户系统中的聚合端口进入/离开模拟分布式中继。

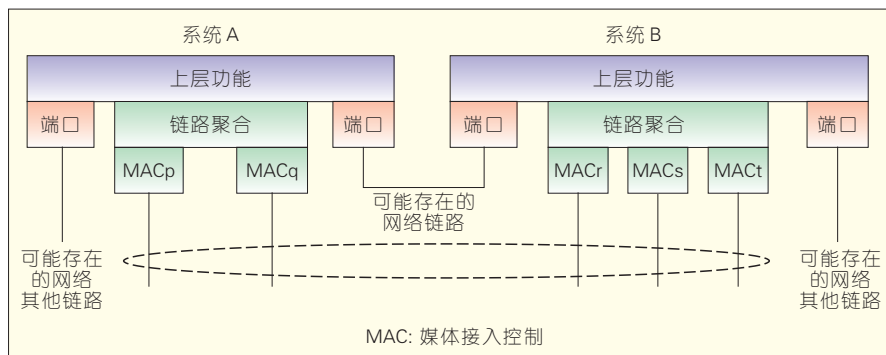
- 分布式中继功能用于在网关链路、IPL和链路聚合子层间传送帧。

2.2 会话感知的帧分发与收集

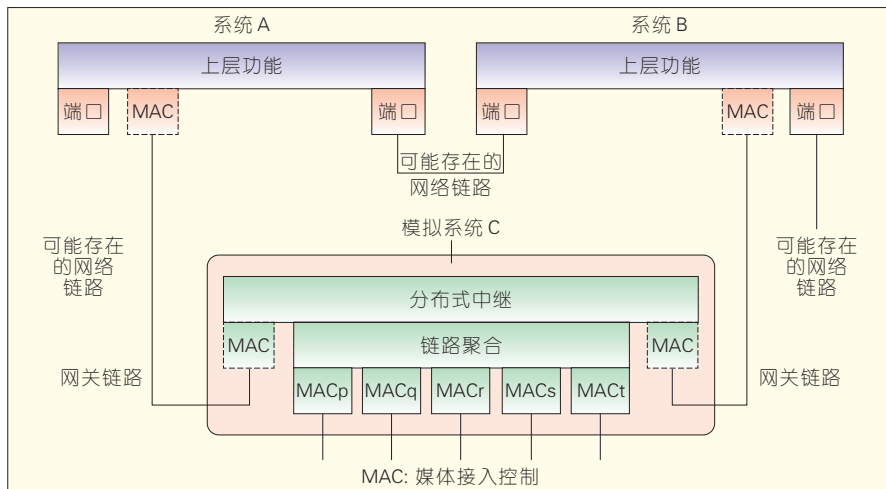
LAG聚合器的帧分发器负责根据帧分发算法将聚合器客户层所发送的帧发送到正确的聚合端口上,帧收集器则负责将从各个聚合端口上收到的帧发送给聚合器客户层。

LAG聚合器的帧分发器和帧接收器也可以按会话的方式实现帧的接收和分发。会话就是一组需要保持其序列的帧,在分布式链路聚合技术中,会话标志是一个12位的数值,代表一组帧,因此每一个帧都有一个对应的会话标志。会话标志可以依据帧携带的C-tag、S-tag、I-tag等标签的值或经过映射处理之后的值确定。

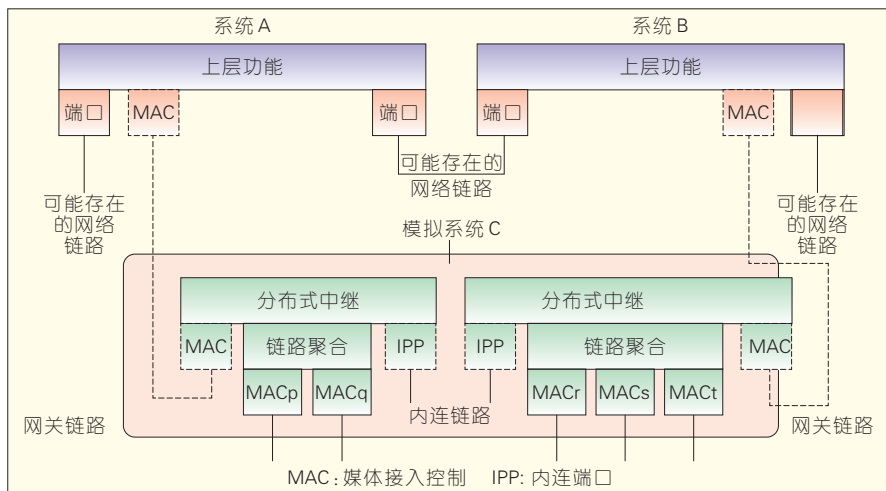
会话标志可以分为网关会话标志和端口会话标志,每个帧对应一个



▲图6 开始聚合示意



▲ 图7 从LAG另一端看到的分布式中继



▲ 图8 本端A、B看到的分布式中继

网关会话标志和端口会话标志。对于下行流量（从网关链路到聚合链路），则依据帧的端口会话标志来进行帧的分发；对于上行流量（从聚合链路到网关），则依据帧的网关会话标志来进行帧的分发。一般来说，网关会话标志和端口会话标志可以是一样的。因此有如下一些要求：

- 链路聚合协议数据单元（LACPDU）中需要携带能指明帧分发器所用的分发算法信息。
- 帧分发器给每个帧分配一个端口会话ID，并按照端口会话ID给每个帧分配一个聚合端口。
- 帧接收器和帧分发器执行一样的帧映射会话ID的算法。

- LACPDU中携带相应信息用于说明帧分发器会将哪些会话ID分发到哪些聚合端口上。

- 帧接收器将从聚合端口上接收到的帧按分发算法进行计算，将本不应通过该聚合端口的会话丢弃。

通过这种帧收集器仅能从某特定聚合端口上接收某特定会话的方式可以保证帧的不乱序。因此对于分布式链路聚合来说，一个门户内的多个系统上的接收器需要统一协商确定某会话仅能从某一个聚合端口上接收。

帧收集器根据分发算法获取帧的端口会话ID，并判断此会话是否应该从接收该帧的端口上收到，如果信

息吻合，则该会话则会被上送到客户侧端口。

实现会话感知的帧分发和收集需要扩展链路汇聚控制协议（LACP）协议，对每个聚合端口来说，LACP协议需要维护协商一致的配置信息、与对端系统交互配置信息来验证每端口会话ID配置选择的一致性、以及依据从对端系统链路聚合控制实体所获得的信息来使能或禁用基于端口会话ID的聚合器帧收集和帧分发。其中一种会话感知的流量分发算法为按帧所属业务来划分会话。按帧业务来确定会话ID来进行流量分发，可以实现：

- CFM一致性。连通性错误管理（CFM）的检测帧和数据平面一致。按业务帧分发方式可以保证CFM帧和数据帧走同一条物理链路。

- 双向同路。对于一个特定的业务流量，其在聚合组的两端向聚合链路上发的时候使用的是同一条物理链路，从而保证了在链路发生故障需要切换时，受影响的业务最少；也给那些需要在发送和接收路径严格对称的协议（如IEEE 1588协议）提供支持。

- 入口的可预测性。有时需要按业务对入口流量进行测量。将一个业务的流量限制在一条链路上，可以方便这一动作的执行。

按业务分发可以应用在分布式中继和/或聚合器上。在使能了这种分发方式后，帧按照其帧中的Tag来分发到不同的物理聚合链路上。Tag的格式包括了IEEE802.1Q-2011中定义的几种Tag：

- 用户VLAN Tag（C-TAG）。
- 业务VLAN Tag或者骨干VLAN Tag（S-TAG或者B-TAG）。
- 骨干业务实例Tag（I-SID）。

2.3 分布式中继转发原理

如果采用了会话感知的帧分发方式，帧分发器、帧接收器和分布式中继功能都会查看帧的Tag。如果是

封装了上述几种 Tag 类型,则会根据这些 Tag 来决定其对应的业务 ID。如果帧没有封装 Tag,则其对应的业务 ID 为 0。

门户系统中的分布式中继功能有 3 种类型的端口:

- IPP。IPP 指同一个门户内的门户系统间 IPL 两端的端口。

- 虚拟网关端口。虚拟网关端口通过一条虚拟链路连接到分布式中继功能所在的门户系统。

- 聚合器端口。聚合器下面有多个聚合端口。

分布式中继用于将从聚合端口上收到的帧(上行帧)发送到一个网关,或者丢弃;同时,将从一个网关收到的帧(下行帧)发送到一个聚合端口,或者丢弃。为了转发到正确的聚合端口或网关,分布式中继功能可能需要从 IPL 上发送帧。当分布式中继功能模块在进行帧转发时,需要为帧分配网关会话 ID 和端口会话 ID,并为相应的会话 ID 配置相应的网关、聚合端口和 IPL。通过网关收发双向帧都需要应用网关算法。对于上行帧,分布式中继功能网关算法决定该帧是否应从本门户系统的网关链路转发,还是通过其他邻接门户系统的网关链路发送。如果该帧的网关会话 ID 属于本门户系统,则发送该帧到本门户系统的网关链路;如果该帧的网关会话 ID 属于其他邻接门户系统,则发送该帧到和该邻接门户系统相连的内连链路。对于下行帧,分布式中继功能的端口算法决定是否从本门户系统的聚合端口发送,还是从其他邻接门户系统的聚合链路发送。如果该帧的端口会话 ID 属于本门户系统,则发送该帧到本门户系统的聚合端口;如果该帧的端口会话 ID 属于其他的邻接系统,则发送该帧到和该邻接门户系统相连接的内连链路上^[5]。

网关算法包含两个功能:一是为帧分配网关会话 ID,二是将网关会话 ID 配置到网关上。端口算法的功能

也是相似的,即为帧分配端口会话 ID 和将端口会话 ID 配置到聚合端口。

在任意时刻,需要保证任意给定网关会话 ID 分配到最多一个网关,任意给定端口会话 ID 配置到最多一个聚合端口。

可以给某帧配置相同的网关会话 ID 和端口会话 ID(非强制)。当一个帧从网关进入分布式中继功能时,由端口算法决定向聚合端口或特定的 IPP 端口转发该帧。当一个帧从聚合端口收上来进入分布式中继功能时,则由网关算法决定向网关或特定的 IPP 端口转发。当一个帧从 IPL 上收到时,分布式中继功能需要同时应用网关算法和端口算法。

2.4 分布式中继控制协议

分布式链路聚合技术中本端与对端进行链路聚合协商时,两端都需要分别使用统一的聚合参数进行协商,才能聚合成功。本端可以是多个系统,但对于对端来说,本端应该是一个系统,即本端聚合为一个模拟系统。这样才符合链路聚合条件。

因此利用分布式中继控制协议(DRCP),可以通过 IPL 建立门户系统之间的通信,确保门户系统上的配置(如端口算法、网关算法、门户内各系统的标志等)的一致性,并确定门户模拟系统的标志。DRCP 在门户系统之间交互各自的状态以及聚合端口信息(如业务的初始和备用网关、聚合端口列表),计算需要穿过 IPL 的帧并和邻接的门户系统交换信息以防止成环或重复发送。

此外,分布式中继需要对有些链路聚合中的变量进行特殊的设计,以将多个聚合系统创建成一个单独的模拟聚合系统。

- 分布式中继的每一个聚合端口的标志符由该聚合端口所在的系统的编号和聚合端口号组成。

- 分布式中继的每一个聚合端口的管理键值由聚合端口所在的系统的编号和聚合端口物理特征码所

组成。

3 结束语

文章主要研究了分布式链路聚合技术在承载网中的几种典型的应用场景和需求,介绍了分布式 LAG 的基本原理和功能。分布式 LAG 技术能够为两个独立网络之间的一组设备提供冗余连接,以提供网络互连区域的多链路、多节点的保护,实现两个网络的管理与控制协议的独立性,并保证同一业务流量走同一物理路径。分布式 LAG 对单节点 LAG 进行了重大改进,同时又具备后向兼容的特性。

参考文献

- [1] IEEE 802.1AX-2008[S]. IEEE, 2008.
- [2] IEEE 802.1Q-2011[S]. IEEE, 2011.
- [3] MEF26.1 External Network Network Interface (ENNI)-Phase 2[S]. MEF, 2012.
- [4] MEF 4 Metro Ethernet Network Architecture Framework Part 1: Generic Framework[S]. MEF, 2004.
- [5] Inter-Chassis Communication Protocol for L2VPN PE Redundancy[S]. IETF, 2013.

作者简介



魏月华, 华中科技大学硕士毕业;现就职于中兴通讯股份有限公司战略规划部,任主任工程师;有 10 年以上数据网络产品研发、设计及新技术预研经验,现从事电信级以太网、云计算数据中心网络、SDN 等技术和标准研究;已发表学术论文 3 篇,申请发明专利 40 件。



杜玉强, 华中科技大学硕士毕业;现就职于三星电子(中国)研发中心,任研究员;有 10 年研发经验,长期从事无线和有线网络协议研究;已发表学术论文 3 篇,申请发明专利 5 件。



黄璐, 清华大学硕士毕业;在数据通信领域有 10 年研究经验,现任中国移动通信研究院项目经理,主要负责中国移动 IP 网络技术研究及网络方案设计,对互联网和 IP 网络技术和组网有着深入了解。

智能无线电技术

2

宋腾辉/SONG Tenghui, 窦峥/DOU Zheng, 林云/LIN Yun

(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

[编者按]随着软件无线电技术的发展,智能无线电技术逐渐成为通信领域关注热点,并给无线通信带来新的发展空间。讲座将分为3期对智能无线电技术进行介绍:第1期讲述智能无线电技术的背景及发展现状;第2期对智能无线电技术中的关键技术——软件无线电的架构做了详细介绍,并从其应用及通用平台设计角度分析各类平台的优缺点;第3期介绍了软件无线应用中的多种开发工具。

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2014) 02-0058-05

2 软件无线电架构

软件无线电(SDR)最初的概念是一种通信技术或者体系结构,而现在SDR,确切地说是软件定义无线电,更接近一种设计方法或者设计理念。软件无线电在理论上有着良好的应用前景,实际应用中却受到软、硬件工艺或者处理能力的限制,但是基于软件无线电概念基础上的软件定义无线电技术却越来越受到人们的重视。在2001年10月份举行的ITU-8F会议上,软件定义无线电被推荐为未来无线通信极有可能的发展方向。

软件定义无线电的功能需求包括重新编程及重新设定的能力、提供并改变业务的能力、支持多标准的能力以及智能化频谱利用的能力等。可见,SDR是可为所有技术使用的公共平台,例如认知无线电。下面我们将从一个相对完整的SDR平台角度来阐述SDR平台的架构,主要包括以软件为中心的SDR架构和SDR硬件

结构两个方面。

2.1 以软件为中心 SDR 架构

软件无线电,其重点在于基于一款通用平台来进行功能的软件化处理。在SDR探讨中,开发人员往往注重平台的硬件开发,偏重于搭建平台时使用器件的处理性能,以使得通用平台尽可能的接近理想软件无线电的设计要求。这使得一部分人忽略了SDR中软件平台的设计。这里提出的SDR软件平台,是指在利用通用硬件平台实现SDR功能时的一种用户算法处理框架(或简单认为信号处理框架),甚至是一种操作环境(如满足软件通信体系架构规范用户接口环境)。SDR软件平台(也称作SDR架构)负责的功能一般包括:

- 提供用户接口,用户通过该接口添加、删除功能模块。
- 算法封装,将算法包装与外界隔离,算法包括通信算法、信号处理算法、C/C++等其他算法。
- 互联接口,以完成模块间互联。
- 中间信号的测试调试接口。
- 调度器或者适配器,用来管理模块。

SDR架构中,最受欢迎的两类开源平台分别是开源软件定义无线电(GNU Radio)和开源软件通信体系框架嵌入式解决方案(OSSIE)。二者都是着手于标准化和可移植化的代码开发,GNU Radio的出发点是提供一种信号处理框架,而OSSIE的目标是提供一种软件通信体系架构(SCA)操作环境^[1]。

2.1.1 GNU Radio 平台

GNU Radio是一种设计SDRs的开源架构,其主要组件包括6个部分:通用框架、调度器、C++和Python工具、数字信号处理(DSP)模块、用户接口界面、硬件前端的接口。这6个部分详细功能说明如下:

- 一个为信号处理模块准备的通用框架,并且其可以连接到一个或多个其他模块。
- 一个调度器,用于激活每个处理模块并且管理模块之间的相关数据传输。
- C++和Python工具,用于建立多个模块间的流图,并将该流图连接到调度器上。
- 一组足够多的用于滤波器、跟

收稿日期: 2014-01-18
网络出版时间: 2014-03-04

踪环等的常用 DSP 模块。

- 用户接口界面,允许用户拖拽模块、模块连线来实现 GNU Radio 的设计。

- 一个与商用硬件前端的接口。前端硬件包括数模/模数转换器 (DAC/ADC) 和上下变频器,来提供了通用处理器 (GPP) 和无线物理环境的接口。

GNU Radio 运行在 Linux 系统上。图 7 给出了 GNU Radio 图形用户接口界面,每一个小模块封装了不同的信号处理功能,而且这些算法功能都是开源的。大部分算法或者信号处理模块是基于 C++ 语言开发的,可读性强,同时也便于用户开发。模块间的通信是利用数据通道完成的,信息采用的是消息队列形式。GNU Radio 结合通用软件无线电外设 (USRP) 开发板,可以认为是一种 SDR 平台,相关人员可以利用这种平台进行一些算法的快速开发和 SDR 研究。

2.1.2 OSSIE 平台

OSSIE 是一种开发 SCA 兼容无线电的开源平台,提供了一种 SCA 操作环境。OSSIE 分配包括以下部分:

- 用来选择模块和互联模块的用户接口。

- 定义新模块的用户接口,可以创建 C++ 程序框架,用户根据应用需要可以增减框架内所需要的信号处理代码。

- 用来检查和调试波形的用户接口,该接口允许开发人员监视中间模块中的信号。监控器可以在运行中添加,便于观察中间波形,进行模块调试。

- 基于开源对象请求代理 (ORB) 的 SCA 兼容公共对象请求代理体系结构 (CORBA)。

- 一系列学习指南和实验课程。Windows 用户可以直接下载相关组件并运行,不需要安装 Linux,相对 GNU Radio 上手容易。

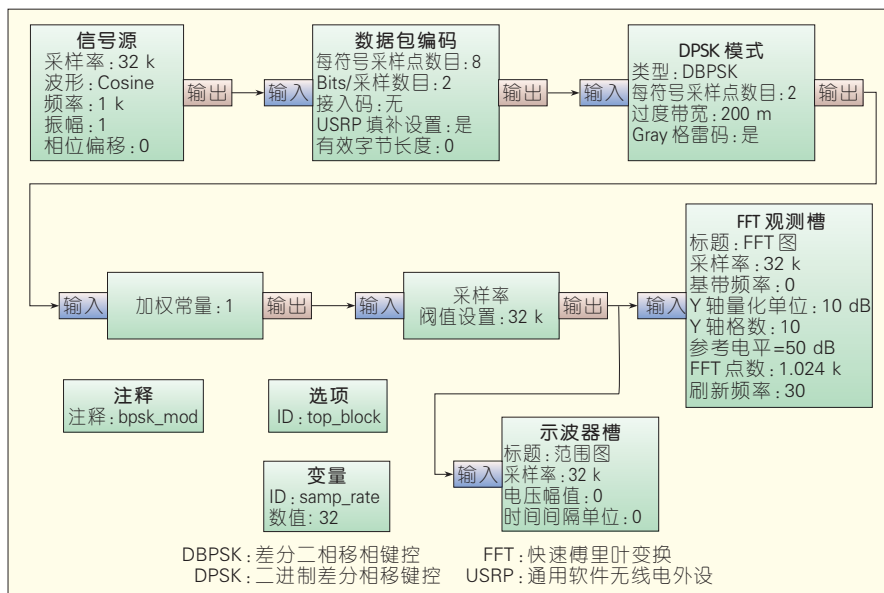
从图 8 和图 9 以及 OSSIE 分配上看出,用户接口软件 OSSIE 提供了 SDR 架构设计、信号处理代码封装、接口调试、中间模块波形调试等功能,在 OSSIE 上开发完整的无线电是相当可行的。基于 OSSIE 架构,Prismtech 公司的著名 Spectra 系统提供了一个完整的用来开发 SCA 兼容波形的操作环境。

2.1.3 不同开源 SDR 平台间对比

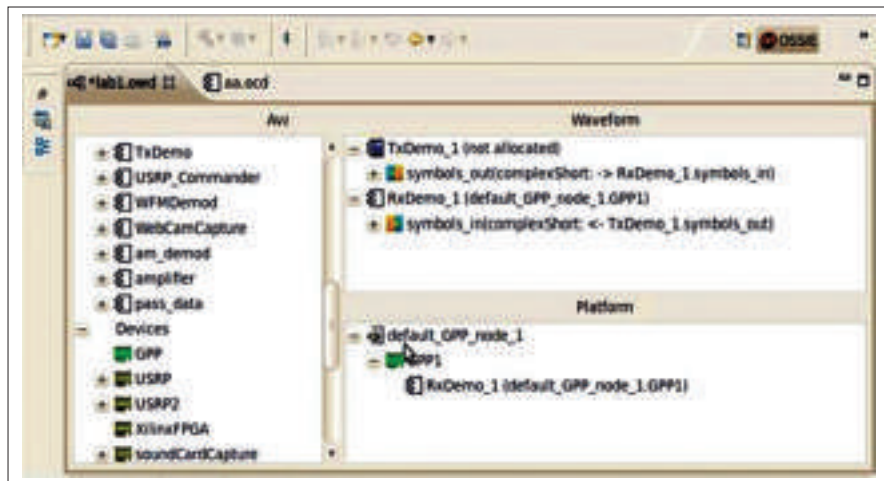
GNU Radio 由专门的业余爱好者创立,以节省开支和临时应急验证为目的的一种快速开发工具;而 OSSIE

符合军方开发标准。二者都是着手于标准化和可移植化的代码开发。

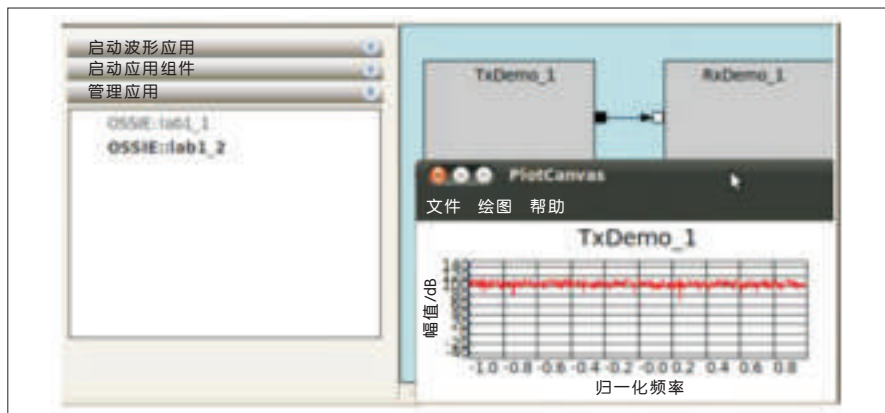
GNU Radio 的出发点是提供一种信号处理框架,与之不同的是 OSSIE 的目标是提供一种 SCA 操作环境。GNU Radio 运行在 Linux 平台上,且直接访问文件系统和硬件;SCA 波形运行在 OSSIE 提供的一个良好的操作环境下,应用程序界面抽象描述了文件系统和硬件。在 GNU Radio 上的模块之间通过 Python 或者 C++ 指令来互相连接,采样数据是通过用户自定义的循环缓冲来传输。OSSIE 采用可扩展标记语言 (XML) 文件定义模块连



▲ 图 7 GNU Radio 图形用户接口界面



▲ 图 8 OSSIE 用来定义波形的用户接口界面



▲图9 OSSIE 用来测试和调试用户接口界面

接,而实际是通过 CORBA 服务完成了连接。最重要的是 OSSIE 基于 ORB 结构,采用了传输控制协议/互联网络协议(TCP/IP)传输采样数据。特别说明,ORB 允许不同的模块运行在不同的机器上,而 GNU Radio 平台上的流图只能在同一台机器上运行。通过比较发现,GNU Radio 更像是 OSSIE 中一种功能组件,完成的是 OSSIE 的信号处理功能。

基于 GNU Radio 和 OSSIE 两类平台出现一系列 SDR 软件架构,例如 PrismTech 公司的 Spectra CX 环境。这些 SDR 架构与专用处理器(现场可编程门阵列/DSP)相连接或者将专用处理器抽象成封装组件,将无线电波形集中管理,根据需要进行装配组件形成波形应用,灵活调用。这样就完成了软件无线电平台开发雏形。

2.2 用于 SDR 信号处理的硬件结构

SDR 要求硬件系统具有功能可重构、较高的实时处理能力,要求适应性广、升级换代简便。在一般情况下要求 SDR 硬件系统具备如下特点:支持多处理器系统,具有宽带高速数据传输 I/O 接口,结构模块化、标准化、规范化等。常见的 SDR 平台就是 CPU+DSP+FPGA 这种形式。即便我们不具备全部硬件,但仍然可以进行 SDR 开发,因为 SDR 更像是一种设计理念,重在软件和算法处理,其组件(不管是硬件平台,还是软件算法)满

足同一种规范,则具备 SDR 可重构的灵活性。目前,存在 3 种主流 SDR 硬件平台结构:基于 GPP 的 SDR 结构、基于现场可编程门阵列(FPGA)的 SDR (Non-GPP) 结构、基于 GPP + FPGA/SDP 的混合 SDR 结构。

2.2.1 基于 GPP 的 SDR 结构

基于 GPP 的 SDR 结构提供了最大的灵活性和最简单的开发。GPPs 最适合用于实验室环境的研究和开发,研究者能够快速尝试一系列算法和波形。一款高配 PC 在运行相当复杂的波形情况下,数据率 ≥ 1 Mbit/s,并且通过以太网、USB、PCI 等标准接口可以直接处理数字基带或者低中频采样数据。并且可以通过多核处理来提高数据的吞吐量。但是,对于这种结构来说更适合处理数据块,并不擅长处理实时采样数据,数据延时和抖动是其面临的主要问题。操作系统会引进延时和抖动,Windows 系统抖动可能超过 10 ms,而像 VxWorks 这种实时操作系统抖动可以限制在 1 ms 内。

基于 GPP 的 SDR 结构比较简单,其结构一般如图 10 所示,只包括天线、ADC/DAC、数据缓冲模块(FIFO)和 GPP。这种架构对于开发人员来说,相当方便和灵活,直接接入个人 PC 就可以进行算法开发和测试,但它也存在缺点,如上述所述,延时和数据处理的方式等。

2.2.2 基于 FPGA 的 SDR (Non-GPP)

结构

基于 FPGA 的 SDR 结构的实现比较困难。FPGA 适合于高数据速率和宽带宽信号波形应用,并且可以用于灵活实现无线电和多种多样的波形设计,但是在结构上与 GPP 存在本质区别。GPP 在内存中执行指令且很容易从一个指令功能转换到另一种功能,而 FPGA 上的功能直接映射成了硬件电路,一个新功能需要更多的 FPGA 资源。同时,FPGA 的高度并行结构十分适合数据流处理,但是不适合密集型控制处理。另一方面,FPGA 的配置文件高达 40 MB,配置时间长达 100 ms,而且重新配置是容易丢失芯片中的数据。这些问题直接造成了多波形设计中重新加载的时间太长的时间。虽然一部分 FPGA 支持局部重配置的功能,但是这项技术相当困难并且严重受到开发工具的限制。让人兴奋的是,FPGA 实现了 2011 年提出的 3 项建议^[11]:

- 专用 GPP 与 FPGA 一同使用。
- 通过使用可用的逻辑资源在 FPGA 上嵌入一个全功能的单片机。
- 将 FPGA 和 GPP 结合制作成单一器件(如 Xilinx ZYNQ 系列)。

将 FPGA 和 GPP 结合制作成单一

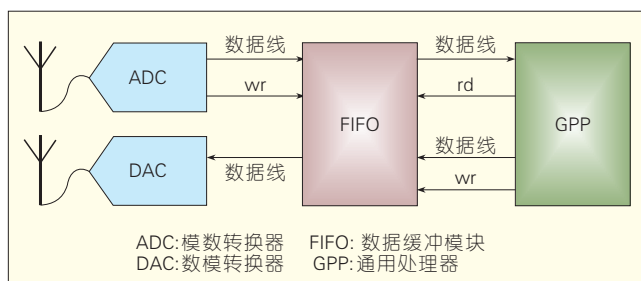


图 10
基于 GPP 的 SDR

器件,并不是像嵌入了单片机模块,这种片上单片机上电可用,并且不需要FPGA就可以进行编程设计。由此可知,基于FPGA的SDR架构时代已经到来,新一代SDR将在新技术下越来越有意义。

2.2.3 基于GPP+FPGA/DSP的混合SDR结构

基于GPP+FPGA/DSP的混合SDR结构,分为GPP+FPGA、GPP+DSP+FPGA两种主要架构形式。这种组合结构融合不同器件的优点,取长补短,在功耗要求比较宽松的实验室环境下,能够给开发人员提供一种快速验证各类算法高性能平台。

图11给出了这种结构的互联示意图。这种结构一般对异构器件间的数据交换的性能要求较高,不同器件间通信一般会采用PCIe^[12]接口方式(1.25 Gb/s/1x)和串行高速输入输出(SRIO)^[13]接口方式(1.5 Gb/s/1x)。PCI Express主要用于计算机中芯片间、板卡间的数据传输,也有部分嵌入式市场;RapidIO主要用于嵌入式系统内芯片间、板间数据传输,其目标就是嵌入式系统内的高性能互联。这种混合SDR结构,性能上可以充分地利用各种器件的优势,但同时也存在着接口设计复杂和能耗大的问题。

2.2.4 多通道SDR结构

除了上述讨论的SDR基本结构,也存在多通道SDR,如图12所示。多通道SDR旨在多并发用户共享相同的带宽,例如在一种互不兼容无线电模式下的无线电转换,允许不同模式下用户间对话。这种架构最简单的结构就是整合一组独立的SDRs,每一个SDR支持一个或多个信道,一般的这些SDRs分别是具有低速率、中速率、高速率处理能力。这种结构除了对多种用户接口、复杂的算法设计、系统设计提出高要求,也对信号处理器(GPP/FPGA/DSP)和射频模块

(ADC/DAC/放大器)的性能提出了较高的要求。

2.3 实验室自研平台

目前,业界也出现了一系列支持SDR/CR的高性能开发平台,均是基于以上讨论的架构。例如National Instruments公司的USRP、BeeCube公司的BEE3、基于Xilinx ZYNQ系列的ZingBoard/ ZedBoard开发板等。这些现有的具有SDR开发能力的开发板,大多属于商业产品,并不是专业应用于SDR开发的产品,辅以个人PC(GPP)设备才能进行一定意义上的SDR设计。下面介绍一种自研平台,该平台可专门用于软件无线电和认知无线电的相关研发,特别适合实验室环境下,开发人员对新算法的快速实现。

2.3.1 自研平台硬件结构

该平台主要包含了GPP、专用处理器(FPGA/DSP)、射频前端、天线等主要部件,如图13所示。

如图13所示,这种SDR实现结构利用紧凑型外围组件接口(CPCI)总线将FPGA、DSP、GPP连接在一起,充分利用了FPGA高速并行数据流处理能力、DSP高效算法处理能力、上位机灵活的界面操作能力以及现场可编程能力。更有意义的是平台支持GNU Radio/OSSIE架构,实验室团队在平台上实现了基于Spectra CX操作环境的SCA设计,可以认为它是一套具有SDR电台研发能力的通用设备。平台主要参数如表1所示。

2.3.2 单元互联

该平台主要目的是用于SDR的应用研究,必然面临多用户、多波形、宽带宽等问题,此时FPGA、DSP、GPP这些异构器件间的通信能力直接决

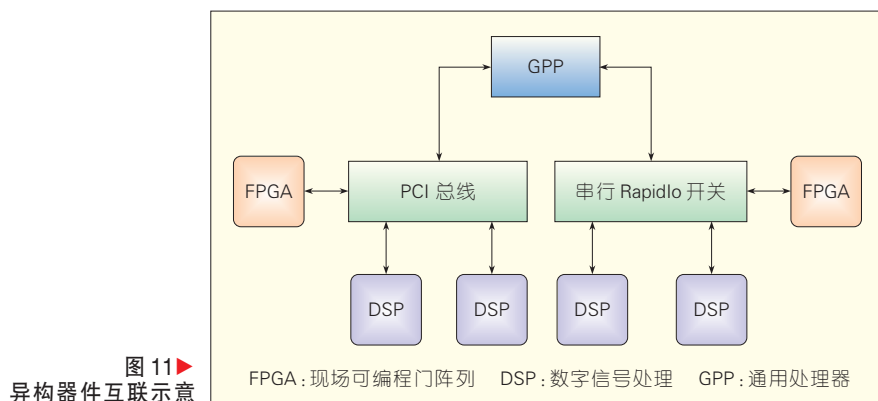


图11 异构器件互联示意

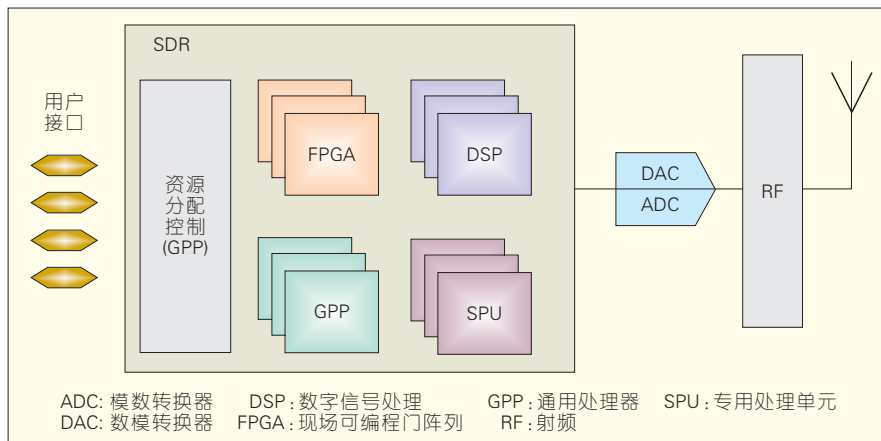
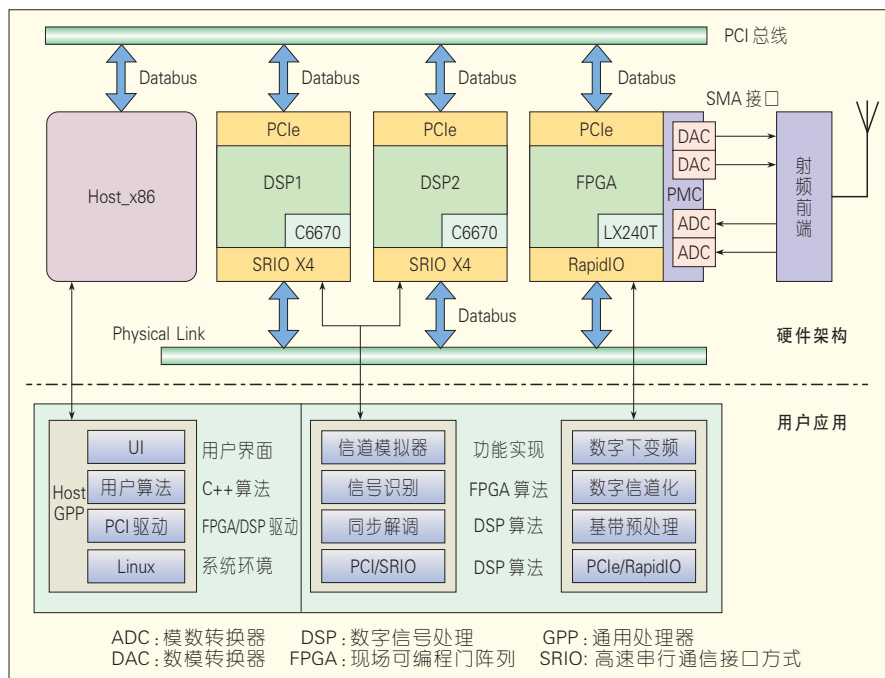


图12 多通道SDR



▲ 图13 平台架构及应用

▼ 表1 自研平台部分参数

参数名	参数值及说明
x86 处理器	Inter(R)Pentium(R)M processor
内存/硬盘	2.00 GHz 2.0 GHz/120 G
操作环境	Ubuntu8.04/Kernel Linux 2.6.24-25-generic
专用处理器	FPGA: LX240TFF1759 DSP: TMS320C6670 × 2
模数转换	ADC: 250MSPS (MAX)/12 bits DAC: 120 MSPS~1.0 GSPS/16 bits
工作参数	频率范围: 2 MHz~18 GHz
双工方式	TDD/FDD 双工
接收/发送通道数	1
IF 频率	70 MHz
IF 带宽	550 KHz/5 MHz/30 MHz
发射功率	10 dBm (MAX)
频率精确度	≤0.1 PPM
相位噪声	-85 dBc/Hz/@10 KHz
接收灵敏度	-98 dBm (260 KHz 带宽)
ADC: 模数转换器 DAC: 数模转换器	DSP: 数字信号处理 FDD: 频分双工 FPGA: 现场可编程门阵列 TDD: 时分双工

定了系统的整体性能,即涉及不同单元间互联方式的选择。为了能过获得最大数据吞吐能力,专用器件与GPP间的通信采用了PCIe接口方式,

FPGA与DSP之间的通信则采用SRIO,通过提高接口的数据交换速度来保证大数据吞吐能力,进而充分发挥各处理器强大的数据处理能力。

第2讲对软件无线电的架构做了详细介绍,包括SDR的软件操作环境(或用户接口)和硬件平台,并从其应用及通用平台设计角度分析各类平台的优缺点。当然,软件无线电并不只限于上述讨论内容,上述讨论只限于应用于SDR算法开发范畴,SDR还包括软件可调模拟无线通信组件(如软件可调滤波器、软件可调上下变频器、软件可调功率放大器等)、天线系统(如多输入多输出系统、智能天线与波束成形)、以及一系列软件无线电理论(带通采样、多速率信号处理、高效数字滤波)等。(未完待续)

参考文献

- [11] Eugene Grayver. Implementing Software Defined Radio[M]. New York:Springer-Verlag New York Inc., 2012:74,130-141.
- [12] 李木国,黄影,刘于之.基于FPGA的PCIe总线接口的DMA传输设计[J].计算机测量与控制,2013,21(1):233-235,249.
- [13] 俞健,周维超,刘坤. DSP与FPGA的SRIO互连设计[J]. 半导体光电,2012,33(6):902-905.

作者简介



宋腾辉,哈尔滨工程大学信息与通信工程学院电子与通信工程专业在读硕士研究生;研究方向为宽带通信系统设计与信息处理。



窦峥,哈尔滨工程大学信息与通信工程学院副教授、博士生导师,工学博士后;研究方向为宽带通信系统,高速数字信号处理,基于软件无线电的智能通信系统及一体化平台设计、超宽带通信信号处理等;目前主要承担国家自然科学基金、国防基础研究重点项目等8个项目工作;发表学术论文30余篇,其中SCI、EI检索共20篇。



林云,哈尔滨工程大学信息与通信工程学院讲师,工学博士;研究领域为宽带信号处理;已参与完成基金项目12项,获得国防科技进步三等奖1项;已发表学术论文38篇,其中SCI检索1篇,EI检索15篇。

《中兴通讯技术》杂志(双月刊)投稿须知

一、杂志定位

《中兴通讯技术》杂志为通信技术类学术期刊,通过介绍、探讨通信热点技术,展现通信技术最新发展动态,并促进产学研合作,发掘和培养优秀人才,为振兴民族通信产业做贡献。

二、稿件基本要求

1. 投稿约定

- (1) 作者需登陆《中兴通讯技术》投稿平台: www.zte.com.cn/paper, 并上传稿件。第一次投稿需完成新用户注册。
- (2) 编辑部将按照审稿流程聘请专家审稿,并根据审稿意见,公平、公正地录用稿件。审稿过程需要1个月左右的时间。

2. 内容和格式要求

- (1) 稿件须具有创新性、学术性、规范性和可读性。
- (2) 稿件需采用WORD文档格式。
- (3) 稿件篇幅一般不超过6000字(包括文、图),内容包括:题名、作者姓名、作者单位、中文摘要、关键词(4~8个)、英文摘要、正文、参考文献、作者简介。
- (4) 中文题名一般不超过20个汉字,中、英文题名含义应一致。
- (5) 摘要尽量写成报道性摘要,包括研究的目的、方法、结果/结论,150~200字为宜。摘要应具有独立性和自明性,采用第三人称的写法。中英文摘要应一致。
- (6) 文稿中的量和单位应符合国家和国际标准。外文字母的正斜体、大小写等须写清楚,上下角的字母、数据和符号的位置皆应明显区别。
- (7) 图、表力求少而精(以8幅为上限),应随文出现,切忌与文字重复。图、表应保持自明性,图中缩略词和英文均要在图中加中文解释。表应采用三线表,表中缩略词和英文均要在表内加中文解释。
- (8) 参考文献以20条左右为宜,未公开发表的资料不宜列入。所有文献必须在正文中引用,文献序号按其在文中出现的先后次序编排。主要种类参考文献的书写格式为:
 - 期刊[序号]作者. 题名[J]. 刊名, 出版年, 卷号(期号): 起止页码.
 - 书籍[序号]作者. 书名[M]. 出版地: 出版者, 出版年: 起止页码.
 - 论文集中析出文献[序号]作者. 题名[C]//论文集编者. 论文集名(会议名). 出版地: 出版者, 出版年(开会年): 起止页码.
 - 学位论文[序号]作者. 题名[D]. 保存地点: 保存单位, 授予年.
 - 专利[序号]专利所有者. 专利题名. 国别: 专利号[P]. 出版日期.
 - 国际、国家标准[序号]标准编号, 标准名称[S].
- (9) 作者原则上不超过3人,超过3人时,可以感谢形式在文中提及。作者简介包括:姓名、工作单位、职务或职称、学历、毕业于何校、现从事的工作、专业特长、科研成果、已发表的论文数量等。
- (10) 提供2寸正面、免冠、彩色标准照片一张,最好采用JPG格式(文件大小超过100 kB)。
- (11) 尽可能标注出研究课题的资助基金或资助项目名称。
- (12) 作者姓名中含有多音字时,应标注作者姓名的汉语拼音。
- (13) 提供联系方式,如:通信地址、电话(含手机)、Email等。

3. 其他事项

- (1) 请勿一稿多投。凡在2个月(自来稿之日算起)以内未接到录用通知者,可致电编辑部询问。
- (2) 为了促进信息传播,加强学术交流,在论文发表后,本刊享有文章的版权(包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版)。作者获得的稿费包括版权酬金。如对此持有不同意见,请在投稿时说明。

编辑部地址:安徽省合肥市金寨路329号国轩凯旋大厦1201室, 邮政编码:230061

联系电话:0551-65533356, 联系邮箱: magazine@zte.com.cn

本刊只接受在线投稿,欢迎访问本刊投稿平台: www.zte.com.cn/paper

中兴通讯技术

ZHONGXING TONGXUN JISHU

双月刊 1995 年创刊 总第 117 期
2014 年 8 月 第 20 卷第 4 期

主管:安徽省科学技术厅
主办:安徽省科学技术情报研究所
中兴通讯股份有限公司
编辑:《中兴通讯技术》编辑部

总编:孙枕戈
副总编:赵今明
常务副总编:黄新明
责任编辑:杨勤义
编辑:徐烨, 卢丹, 朱莉, Paul Sleswick
排版制作:余刚
发行:王萍萍
编务:王坤

ZHONGXING TONGXUN JISHU

《中兴通讯技术》编辑部
地址:合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 12 楼
邮编:230061
网址: www.zte.com.cn/magazine
投稿平台: www.zte.com.cn/paper
电子信箱: magazine@zte.com.cn
电话: (0551)65533356
传真: (0551)65850139

出版、发行:中兴通讯技术杂志社
发行范围:全球发行
印刷:合肥中建彩色印刷厂
出版日期:2014 年 8 月 10 日
刊号: ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN
广告经营许可证:皖合工商广字 0058
定价:每册 20.00 元, 全年 120.00 元