



信息通信领域产学研合作特色期刊

第三届国家期刊奖百种重点期刊 | 中国科技核心期刊

ISSN 1009-6868

CN 34-1228/TN

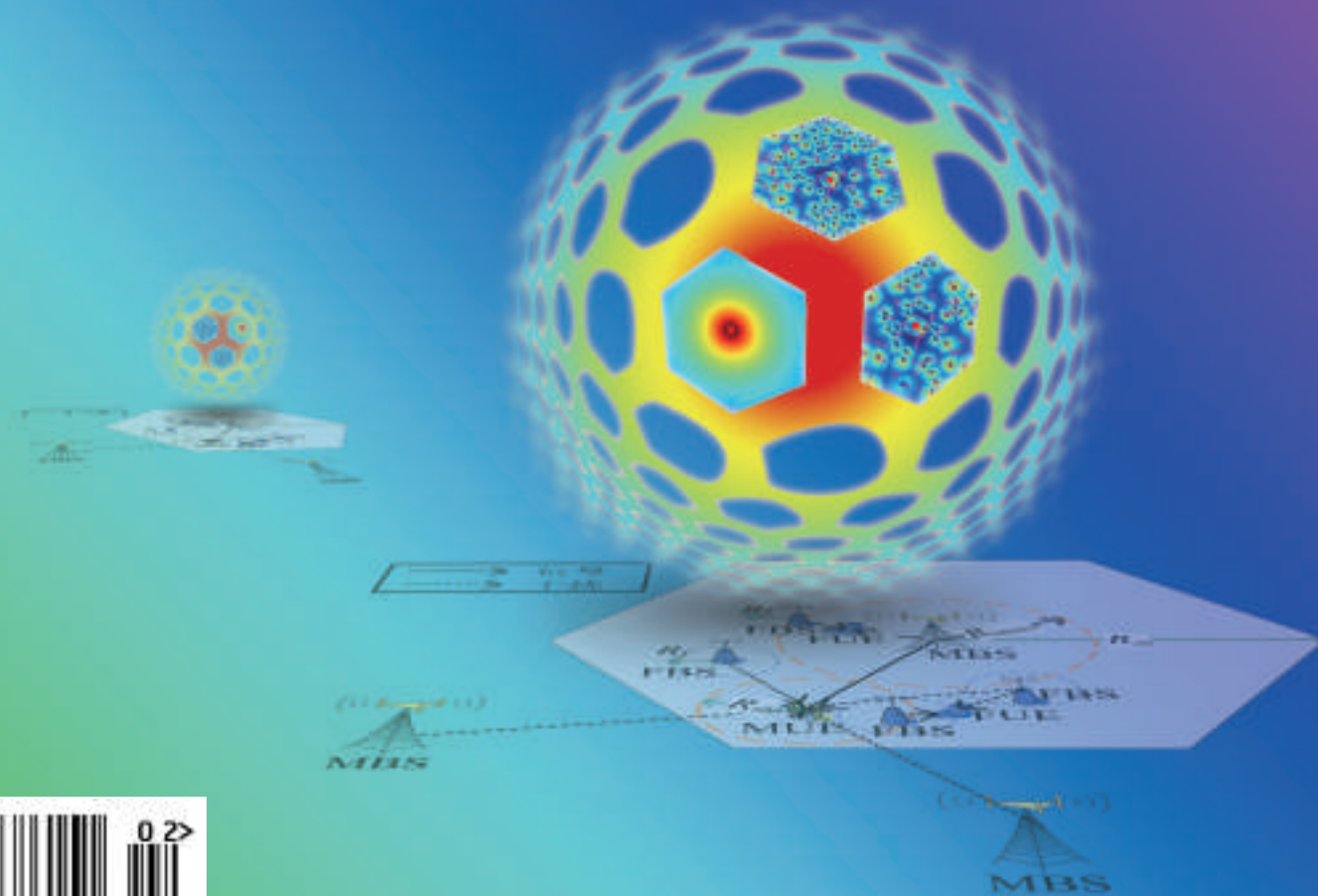
中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

www.zte.com.cn/magazine

2015年2月 • 第1期

专题：自组织异构小基站网络



《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 | 孙知信 南京邮电大学物联网学院院长、教授 |
| 曹淑敏 中国信息通信研究院院长、教授级高工 | 谈振辉 北京交通大学电子信息工程学院教授 |
| 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 | 唐雄燕 中国联通网络技术研究院首席专家、教授级高工 |
| 陈 杰 中兴通讯股份有限公司高级副总裁 | 田文果 中兴通讯股份有限公司执行副总裁 |
| 陈前斌 重庆邮电大学通信与信息工程学院执行院长、教授 | 童晓渝 中电科软件信息服务有限公司董事、副总经理 |
| 陈锡生 南京邮电大学通信与信息工程学院教授 | 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 |
| 程时端 北京邮电大学网络技术研究院教授 | 王文东 北京邮电大学软件学院党委书记兼副院长、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 | 王晓明 中兴通讯微电子研究院院长 |
| 葛建华 西安电子科技大学通信工程学院副院长、教授 | 王育民 西安电子科技大学通信工程学院教授 |
| 顾晓仪 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院教授 | 韦乐平 中国电信集团公司科技委主任、教授级高工 |
| 郭云飞 解放军信息工程大学副校长、教授 | 卫 国 中国科学技术大学信息科学技术学院教授 |
| 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 | 邬贺铨 中国工程院原副院长、院士 |
| 侯为贵 中兴通讯股份有限公司董事长 | 吴克利 香港中文大学电子工程系教授 |
| 何士友 中兴通讯股份有限公司执行副总裁 | 徐安士 北京大学信息科学技术学院教授 |
| 洪 波 中兴发展股份有限公司总裁 | 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 |
| 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 | 续合元 中国信息通信研究院通信标准研究所总工、教授级高工 |
| 江 华 中兴通讯股份有限公司副总裁 | 薛一波 清华大学CPU&SOC中心副主任, 信息技术研究院研究员 |
| 蒋林涛 中国信息通信研究院科技委主任、教授级高工 | 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 |
| 雷震洲 中国信息通信研究院科技委副主任、教授级高工 | 杨 震 南京邮电大学校长、教授 |
| 李红滨 北京大学科研部副部长, 信息科学技术学院教授 | 尤肖虎 东南大学信息科学与工程学院院长、教授 |
| 李建东 西安电子科技大学副校长、教授 | 乐光新 北京邮电大学信息与通信工程学院教授 |
| 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 | 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 |
| 李融林 华南理工大学电子与信息学院教授 | 张 平 北京邮电大学网络技术研究院执行院长、教授 |
| 李少谦 电子科技大学通信与信息工程学院院长、教授 | 张同须 中国移动通信集团设计院副院长兼总工 |
| 李 星 清华大学电子工程系教授, CERNET 网络中心副主任 | 赵厚麟 国际电信联盟 (ITU) 副秘书长、俄罗斯电信科学院院士 |
| 马建国 天津大学电子信息工程学院院长、教授 | 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 |
| 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 | 赵先明 中兴通讯股份有限公司执行副总裁 |
| 糜正琨 南京邮电大学通信与信息工程学院教授 | 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 |
| 庞胜清 中兴通讯股份有限公司高级副总裁 | 钟义信 北京邮电大学计算机学院教授 |
| 史立荣 中兴通讯股份有限公司总裁 | 朱近康 中国科技大学信息科学技术学院教授 |
| 孙枕戈 中兴通讯股份有限公司副总裁 | |



第三届国家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
1995年创刊

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 目次

中兴通讯技术 总第120期 第21卷 第1期 2015年2月

卷首特稿

02 对5G移动通信发展的思考.....尤肖虎

专题:自组织异构小基站网络

- 04 用户行为驱动的自组织网络资源配置研究.....刘自强,任晨珊,田辉
13 密集小基站网络中的下行乒乓中继传输机制.....张昱,张朝阳
18 高密度小基站网络中混频自部署技术与网络容量分析.....张奇勋,冯志勇,杨拓
24 面向MTC应用的计算资源柔性分配.....侯延昭,曹世伟,陶小峰
29 高密度异构小基站立体网络的多向中继技术.....杨延平,陈巍,李鹏
34 基于D2D中继的异构网络负载均衡策略.....陈卓,曹洋,江涛
39 基于有限回传链路的小基站网络重叠协作方法研究.....张增峰,王天宇,宋令阳
43 LTE和Wi-Fi系统间灵活频谱使用关键技术.....徐景,杜金玲,杨旸

专家论坛

- 47 车联网何去何从.....陈前斌,柴蓉,岑明
52 中国发展可见光通信技术与产业的思考.....徐正元

技术广角

- 55 基于优化的分布式深度覆盖研究.....邓巍

企业视界

- 59 跨界的力量.....袁飞,孙枕戈

综合信息

激光通信取得巨大突破(03) 中兴通讯技术杂志社北京迎春联谊会隆重召开(42) 文件传输新技术问世(58)

期刊基本参数:CN 34-1228/TN*1995*b*16*64*zh*P*¥ 20.00*15000*13*2015-02

Contents 目次

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol. 21 No. 1 Feb. 2015

Guest Paper

02 Reflections on The Development of 5G Mobile Communication YOU Xiaohu

Special Topic: Self-Organizing Heterogeneous Small-Cell Networks

04 User-Behavior-Driven Resource Configuration
in Self-Organizing Networks LIU Ziqiang, REN Chenshan, TIAN Hui

13 Downlink Successive Relaying Transmission Scheme
for Dense Small-Cell Networks ZHANG Yu, ZHANG Zhaoyang

18 Hybrid Frequency Allocation Scheme and Capacity Analysis
in Densely-Deployed Small Cells ZHANG Qixun, FENG Zhiyong, YANG Tuo

24 MTC Application-Oriented Computing
Resource Allocation HOU Yanzhao, CAO Shiwei, TAO Xiaofeng

29 Multi-Way Relaying Techniques for Very Dense Heterogeneous
3D Small Cell RAN YANG Yanping, CHEN Wei, LI Ou

34 Load Balancing Algorithm Based on Relay-aided D2D Communications
in Self-Organized Heterogeneous Network CHEN Zhuo, CAO Yang, JIANG Tao

39 An Overlapping Collaboration Approach for Small Cells
with Backhaul Constraints ZHANG Zengfeng, WANG Tianyu, SONG Lingyang

43 Key Technologies for Flexible Spectrum Usage Between LTE
and Wi-Fi XU Jing, DU Jinling, YANG Yang

Expert Forum

47 Future Direction of Internet of Vehicles CHEN Qianbin, CHAI Rong, CEN Ming

52 Development of Visible Light Communication Technologies in China XU Zhengyuan

Technology Perspective

55 Deep Coverage Based on Distributed Optimization DENG Wei

Enterprise View

59 Strength of Crossover YUAN Fei, SUN Zheng

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。



张平

北京邮电大学教授、博士生导师，国家自然科学基金委信息学部第三、第五届咨询委员，中国《科学通报》编委会执行副主编，国家“863”计划“网络与通信技术”主题专家，国家科技重大专项3总体组专家，北京邮电大学网络技术研究院执行院长、网络与交换技术国家重点实验室主任；长期从事移动通信网络的研究开发，目前的研究方向是宽带移动通信新技术。

专题导读

纵观技术的更迭和发展我们不难发现，随着用户需求的不断增长，技术发展日新月异，移动通信网络能够支持的业务种类也变得越来越多样，业务峰值速率不断攀升，网络管控也变得更高效率，用户体验不断被更新。然而，伴随新技术的发展和应用的极大丰富，未来移动通信网络却面临诸多挑战。首先，移动用户数量激增且呈现时空大动态变化，业务分布极不均衡，如何通过网络结构变革和新型组网技术来容纳更多用户从而提升网络容量是面临的新挑战之一。与此同时，考虑到运营商网络投入成本和收益等因素，在未来几年甚至十几年多代多制式移动通信网络将并存，2G、3G、4G以及无线局域网(WLAN)等多种不同覆盖能力的异构网络将重叠部署，在为用户提供多种网络选择和差异化服务的同时也带来了诸如问题，如何实现异构网络的协同与自组织优化从而降低网络管控的开销和成本、提高用户业务体验是面临的难题。进一步，如果能够通过分析和挖掘获取大量用户终端的业务行为规律，便可以将有限的通信网络资源与用户需求相匹配，因此针对用户行为分析的网络资源配置与优化也是未来研究的热点。此外，终端直连(D2D)、机器通信(MTC)、中继传输等新技术的引入，将对未来移动通信网络的架构、管控技术和资源利用方法带来新挑战，也将是未来移动通信网络技术探索的新领域。因此，未来移动通信网络将通过大量部署密集小基站提供更高的网络容量，并采用自组织技术实现密集部署小基站网络中的接入控制、干扰协调、资源分配与管理，降低网络管控开销、提高网络容量、提高用户业务体验。

为此，本专题围绕自组织异构小基站网络领域研究的最新进展，选取了异构网络中用户行为分析、接入控制、中继传输技术、网络容量、网络协作、负载均衡、资源管理、灵活频谱使用技术等方面的高水平论文汇集于本刊发表。希望通过本专题，与广大读者一起探讨面向5G的自组织异构小基站网络的新理论、新方法和新技术等问题。这些论文凝聚了作者多年的研究成果和工作经验，希望能给读者有益的启示与参考。在此，对各位作者的积极支持和辛勤工作表示衷心的感谢！

张平

2015年1月8日

2015年第1—6期专题计划

1

自组织异构小基站网络

张平 北京邮电大学网络技术研究院 执行院长

2

移动云计算和云服务

唐雄燕 中国联通网络技术研究院 首席专家

3

移动互联网安全技术

刘建伟 北京航空航天大学电子信息工程学院 教授

4

软件定义光网络

迟楠 复旦大学信息科学与工程学院 教授

5

虚拟运营业务和网络

续合元 中国信息通信研究院通信标准研究所 总工

6

移动群智感知和协同计算

王文东 北京邮电大学软件学院 教授

[编者按] 未来5到10年,移动通信业务数据量将有数千倍的增加。目前,移动通信的主要需求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被引入到移动通信网络中,移动通信终端的数量将远远超过人口数量,数据业务将成为绝对的主流。新年来临之际,本刊特别邀请中国著名移动通信专家、东南大学移动通信国家重点实验室主任尤肖虎教授展望5G移动通信的发展趋势。

对 5G 移动通信发展的思考

尤肖虎/YOU Xiaohu



尤肖虎,东南大学移动通信国家重点实验室主任,长江学者计划特聘教授,IEEE Fellow,未来移动通信论坛副主席、秘书长,国家“863”计划国家宽带网科技重点专项召集人、5G移动通信重大项目专家组组长及首席专家;主要研究方向为移动通信、信号处理及应用;已在IEEE Transaction等国际著名杂志发表学术论文60余篇。

过去的2014年是5G移动通信技术探索性研究极为活跃的一年。在这一年中,5G关键技术指标需求正逐步趋于明确,基本支撑技术的探索进一步深化,5G系统概念研究开始受到业界的关注。

就2014年移动通信的发展态势而言,以正交频分复用(OFDM)和多输入多输出(MIMO)技术为基本特征的第4代移动通信已在世界范围内大规模商用部署,并成为无线移动通信的基础技术,被逐步扩展到物联网、车联网等更为广泛的应用领域。第5代移动通信(5G)已经成为世界范围内信息技术领域的研究热点。

2013年以来,欧盟、中国、韩国等国家与地区相继启动了相关重大研究计划,力求在这一未来新的战略制高点形成先发竞争优势。按照目前的研究状况分析,2014年5G发展尚处于基本概念与技术的探索时期,2015年之后将转入标准化先期研究阶段,2017年之后进入标准化征集阶段,至2020年5G将具备规模商用技术条件。

相对于已有的移动通信技术,5G移动通信更加注重用户的需求,并力求为用户带来全新的体验。2014年得到广泛讨论的5G关键技术指标包

含了用户体验平均速率、端到端传输时延等与用户体验密切相关的核心指标;移动交互式游戏、3D、虚拟现实及全息图像等新型移动业务应用也将被纳入5G系统的技术要求;此外,业界还试图将5G的应用范围从目前的人与人通信拓展至人机物协同通信、超密集连接物联网、车联网以及新型工业信息化等更为广泛的领域。可以预见,5G移动通信系统的未来业务应用将迈上新的台阶,从而更为深刻地改变人类社会的行为方式。

1 支撑技术面临突破

5G系统基本概念和支撑技术目前尚处于探索性研究阶段,预计今后1~2年将在世界范围逐步达成共识。近期受到重点关注的5G热点技术包括大规模天线(Massive MIMO)技术、超密集组网(UDN)技术、软件定义网络(SDN)和网络功能虚拟化(NFV)技术等。另外,移动通信新型频谱开发与利用,包括毫米波新型资源开发、已有频谱资源的动态共享利用等,成为业界普遍重视的未来5G研究方向。在点到点无线传输与多址技术方面,更为高效的新型波形设计也成为业界技术研究的重点。但

应当看到,移动通信的升级换代历程无不伴随着无线资源复用效率的有效提升;尽管各种新概念、新技术令人眼花缭乱,但未来 5G 移动通信技

5G 移动通信关键技术 孕育全新突破,体系构 架面临着潜在的革命 性变革

术性能的大幅度提升还主要依赖于空间资源的深度复用和网络功能的深度智能化;从现有信息理论综合来看,进一步挖掘移动通信空间资源复用效率,将系统性能在 4G 的基础上进一步提升 1 至 2 个量级是可行的,也可能是唯一的技术途径。而大规模天线技术与超密集组网技术正是迈向这一途径的可能解决方案,从而有望在 5G 候选技术中脱颖而出。

2 网络构架初现端倪

对于 5G 基本网络构架的演进与发展,尽管其走向目前尚不明确,但其网络构架进一步“互联网化和 IT 化”的基本发展特征已初现端倪。传统移动通信核心网的概念将进一步弱化,更多的网络功能(包括媒体分

发、控制信令等)将可能“下沉”至基站分系统,在简化整个 5G 网络系统设计的同时,进一步降低数据平面和控制平面的传输延时,并通过数据平台与控制平面的分离,实现数据平面的灵活管控以及网络资源的高效调配和绿色节能。另一方面,通用计算与存储平台的能力飞速发展,加之云计算技术日益普及,将整个 5G 网络构建在通用服务器、快速以太交换和云计算平台上,并通过计算资源的隔离、动态调配与迁移实现 5G 网络的软件定义化和虚拟化正越来越多地受到业界重视。

3 发展方式面临抉择

5G 移动通信系统是以演进方式发展还是以革命性方式的发展,也是业界普遍重视的问题。鉴于 4G/LTE 技术已成为移动通信发展的主流技术,如何在 4G/LTE 技术基础上发展后相兼容的 5G 移动通信系统,是业界关注的首要发展方式。另一方面,5G 移动通信将出现大规模天线、超密集网络等全新技术,其网络组网方式(如 SDN/NFV 等)与频谱利用方式也将产生潜在的革命性变化,因此不能排除 5G 移动通信系统采用革命性发展方式的可能性。此外,新一代 Wi-Fi 技术(如 IEEE 802.11ax/aj)也在

快速发展之中,其应用场景与目前的 UDN 移动通信组网技术正趋于高度一致;可以预计 Wi-Fi 技术发展将进一步与蜂窝移动通信系统趋于融合,除两种系统的频谱利用方式有根本性的差别外,其基本支撑技术也有可能趋于统一。

4 未来展望

纵观 ICT 技术发展,有理由认为目前移动通信发展正处于新一轮技术与产业变革的初期。这具体表现在:一方面,传统的以电信运营商为核心的移动通信应用模式正在发生深刻的变化,OTT 模式和虚拟运营正逐渐成为产业发展的主要驱动力之一;此外,电信设备的硬件平台通用化、分布化、虚拟化正逐渐成为主要潮流,ICT 深度融合的时代即将到来,传统的电信技术产业链将面临巨大的冲击,整个行业正处于技术链和产业链重塑的重要转折期;第三,5G 移动通信关键技术孕育全新的突破,而体系构架则面临着潜在的革命性变革。上述发展趋势无一不预示着未来 5~10 年的移动通信技术发展将进入一个更为难以预计的变革性发展时期。

值此 2015 年新年来临之际,谨以此文献给本刊读者,希望能够对读者在更深层次思考 5G 未来移动通信发展所有裨益。

综合信息

激光通信取得巨大突破

麻省理工学院林肯实验室的科学家表示他们研发出了一种快速传送大量数据、使其轻松穿越辽阔太空的方法。这可能为月球上的宇航员提供一个“宽带网络”。

这个科研组的月球激光通信(LLCD)演示了在月球和地球间以 622 Mb/s 的下载速度传输数据超过 23.9 万英里(约合 38.5 万千米)。这个传输速度超过任何无线

电频率系统。

通过激光束以高数据速率把数据从地球传送到月球一直是个技术挑战,因为传播光束所需距离高达 40 万千米。光束穿越大气时,难度加倍,因为湍流可能使接收器的信号快速衰落或中途丧失。通过专业激光通信设备,麻省理工学院林肯实验室目前已实现把数据从地球传送到月球的测试。这个记录比以前的传输速度高出 4 800 倍。
(转载自《中国信息产业网》)

用户行为驱动的组织网络资源配置研究

User-Behavior-Driven Resource Configuration in Self-Organizing Networks

刘自强/LIU Ziqiang
任晨珊/REN Chenshan
田辉/TIAN Hui

(北京邮电大学, 北京 100876)
(Beijing University of Posts and
Telecommunications, Beijing 100876,
China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868(2015) 01-0004-008

摘要: 提出了通过将用户行为作为自组织网络资源管理考虑的因素来弥补当前网络不足的方法。对动态和静态用户行为特征的提取进行了分析,选取了典型的自组织网络资源分配场景,给出了这些场景下利用用户群体行为特征和个性行为特征进行网络资源优化配置的方法。指出在利用用户行为特征进行网络资源配置时需要根据具体的场景,选取合适的用户行为分析模型,提取相应的关键参数,从而实现网络资源的高效配置。论证了用户行为驱动的自组织网络资源分配的可行性。

关键词: 第5代移动通信; 用户行为; 自组织网络; 资源配置

Abstract: We propose a method for self-organizing network resource management. In this method, user behavior is considered a factor. Dynamic and static user behaviors are analyzed, and typical self-organizing network resource allocation scenarios are selected. Utilization of user behavior in self-organizing networks is studied. We propose methods for optimizing network resource allocation under these scenarios. When user behavior is included as a factor in configuring network resources, the appropriate user behavior analysis model is selected according to the scenario, and appropriate key parameters are extracted. This ensures efficient allocation of network resources. The feasibility of user behavior driven resource configuration in self-organizing network is demonstrated.

Keywords: 5G; user behavior; self-organizing network; resource configuration

1 5G 与用户行为

当前无线通信的业务量正在飙升。根据思科的预测,未来移动通信数据业务在2011年至2016年的年复合增长率将达到78%^[1]。移动通信产业面临巨大的挑战:在未来10年中移动数据业务将有1 000倍的增长^[2]。同时,随着智能终端的普及,海量设备连接和各类新业务、应用场景也不断涌现。下一代移动通信系统——5G需要满足这些需求和挑战。标准化组织IMT-2020起草了5G愿景白皮书^[3],其中归纳了5G中的典型场景和关键参数指标以及可能采用的相应关键技术。白皮书中归纳的5G主要关键参数指标包括:更高传输速率(10 Gb/s)、更高频谱效率(5~15倍)、更高连接数密度(100万/km²)、更低时延(毫秒级)。

收稿日期: 2014-11-07

网络出版时间: 2015-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(61471060、61421061), 国家高技术研究发展(“863”)计划(2014AA01A706)

然而,现有的网络构架和资源分配方式并不能很好的应对这些挑战和实现白皮书中5G愿景。这些不足主要体现在以下两个方面。第一,现有异构无线资源管理对用户业务在时空范围动态分布的自适应能力不足。随着数据流量的增加,业务的潮汐效应变得更加明显^[4-5]。一方面,由于特定原因造成的人群集中化导致区域化网络负荷过重、资源紧缺;另一方面,由于空闲的空载或零星负载的基站处理能力无法转移而形成资源浪费。第二,可管控的资源形态可

拓性不足。传统无线蜂窝系统从时域、频域、码域、空域对资源进行描述(如时隙、子载波、码道、空域子信道),日益面临着资源耗竭的危机。因此需要探寻新的资源相关维度,对资源形态进行进一步的拓展。此外,5G网络下要求速率、容量的提升,导致小区的密集化,从而使干扰及能效问题变得不容忽视^[6]。而根据当前网络状态被动式的资源管理方式和网络单元的密集化也使得信息共享代价变得高昂甚至难以承担。

如果将这些挑战聚焦在一起,我

们能够发现用户及其行为是这些挑战的一个关键成因。一方面,丰富的移动互联网业务在填补用户大量碎片化时间的同时增强了用户交互和关联,延展了用户的多重身份(视频观众、新闻读者、广播听众、网站访客以及社交平台信息发布者/传播者),激发了用户间空前高涨的协同意愿(协同度)。结合用户智能终端能力的提升,移动用户行为之间的关联关系对现有移动通信网络通信资源形态的拓展具有重要潜力。另一方面,用户业务需求的个性化以及行为的随机性和差异性日益凸显^[7-8],大量用户的行为也呈现出具有时空分布特性的群组特征。随着无线资源管理功能的增强,用户的行为特征为网络资源对用户需求的灵活适配以及网络资源利用效率的提升提供了指导性依据,可以作为网络资源配置中新的资源维度。因此,用户对网络的驱动作用不断提升。并且用户作为信息网络的核心组成部分,由其行为产生的需求是网络首先应当考虑满足的。如何利用用户行为对网络的驱动效应,使网络能够智能的调配资源以应对时空需求非均匀、周期性的用户业务需求,优化网络配置,是应对5G面临挑战可行方法之一。

本文从用户行为的角度出发,将用户行为作为网络自组织资源分配的考虑因素之一。第二部分从静态和动态两个方面介绍用户行为挖掘的方法。第三部分给出利用用户行为挖掘结果进行网络自组织资源分配的示例。最后在第四部分对全文进行总结。

2 用户行为挖掘

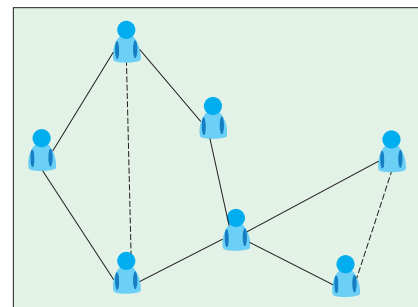
用户行为在一定程度上体现了用户的需求,基于对当前用户行为的分析与研究,可预测用户在未来一段时间内的行为,提前预知潜在的通信需求和规律,主动地完成无线资源配置。用户行为分为两种:一种是表示用户与用户之间关系的静态用户行

为,另一种是用户动态行为。静态用户行为挖掘,注重用户组织关系的预测,而动态用户行为挖掘则注重用户轨迹的分析。

2.1 静态用户关系预测

静态用户关系预测是指通过研究非直接关联的两个用户之间的相似性,估计这两个用户发生关联的可能性。目前基于复杂网络的链路预测模型可以有效地实现静态用户关系的预测。链路预测模型如图1所示,整个社交网络可映射为一个复杂网络 $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E})$,其中节点集 $\mathcal{V}=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 对应于社交网络中的用户集,节点之间的连边集 $\mathcal{E}=\{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 对应于用户之间的直接关系集。用户之间存在着串联的关系链,被称为复杂网络中的拓扑路径,用户之间发生联系的可能性取决于拓扑路径对用户之间相似性的传递能力。基于复杂网络的链路预测方法是通过研究用户端点之间拓扑路径对相似性传递的影响来实现预测模型的构建。

如果两个端点之间信息传递的能力越强,那么这两个端点越相似,未来两个端点发生直接关联的可能性就越大。为了数值化表示相似性,预测模型通过对拓扑路径的研究来估计端点之间的相似性 S , S 值越大两个端点发生连接的可能性越大。根据拓扑路径长度,链路预测算法可以分为:局部路径相似性算法,例如公共邻居算法(CN)、阿达米克阿达算法(AA)、资源分配算法(RA);全局路径相似性算法,如凯茨算法(Katz);半局部路径相似性算法,如本地路径(LP)、本地随机游走(LRW)、叠加随机游走(SRW)^[9]。各算法的预测准确性可用受试者工作特征曲线下面积(AUC)度量指标进行衡量。虽然基于全局路径相似性的算法具有较好的预测准确性,但是复杂度高,实用性差。因此本文将重点讨论局部路径相似性算法和半局部路径相似性算法。通过对网络模



▲ 图1 链路预测模型

型的研究,进一步提出优化算法,并在有代表性的几个实际网络上进行验证。代表性网络包括:美国航空网 USAir、美国国家电网 PG、蛋白质作用网 Yeast、网络科学家合作网络 NS、爵士乐手合作网 Jazz、新陈代谢网络 CE、脸书好友网络 Slavko、电子邮件网络 E-mail、传染病网络 Infec、欧洲合作网 ES、UC 大学社交网络 UcSocial、生物链网络 FW 和 Small & Griffith 以及 Descendants 引文网。

2.1.1 局部路径相似性算法

基于局部路径相似性算法仅研究长度为2的拓扑路径。研究两个端点公共邻居的属性,依据“朋友的朋友就是朋友”的原则,公共邻居越多则通过共同好友传递相似性的能力就越强,两个端点越相似。但是传统关系预测算法在不同用户关系网中缺乏适应性,尤其是对用户弱关系性能的差异呈现出较低的敏感性。因此本文在 AA 和 RA 算法的基础上,构建增强弱关系的预测模型,以实现更好的预测性能。

设局部拓扑路径的中间节点为 z ,其度值为 k_z 。 k_z 越大,节点 z 的信息传输能力越强,从而表现出强关系。否则 k_z 表现出弱关系。假设待预测端点为 x 和 y ,其中 x 和 y 的邻居集合分别为 $\Gamma(x)$ 和 $\Gamma(y)$ 。

为了突出不同网络中弱关系的差异性,本文在 AA 和 RA 的基础上,添加自适应惩罚因子 β 以惩罚强关系突出弱关系,从而得到优化 AA 算法(OAA)和优化 RA 算法(ORA)预测算

法^[10]:

$$S_{xy}^{OAA} = \sum_{z \in \Gamma(x) \cap \Gamma(y)} [\log(k_z)]^\beta \quad (1)$$

$$S_{xy}^{RA} = \sum_{z \in \Gamma(x) \cap \Gamma(y)} [k_z]^\beta \quad (2)$$

将 OAA 和 ORA 算法在 5 个代表性网络中进行 AUC 性能仿真验证,结果如图 2 和表 1 所示。从仿真结果可以看出并非所有网络都在 $\beta=-1$ 时取得最优。但通过调整 β ,可以准确地找到适合每个网络的最优 β 。在多数网络下 OAA 和 ORA 算法预测准确性优于传统的局部相似性算法 CN、AA 和 RA。

2.1.2 半局部路径相似性算法

传统的基于半局部路径相似性算法在降低算法复杂度的同时具有较高的预测准确性。然而,传统半局

部路径相似性算法忽略了不同路径组成节点的差异性,而且忽略了路径端点影响力中存在着冗余影响力的问题。

(1) 路径异构性问题的研究

在传统半局部路径相似算法中,路径被建成为一条路由线路,两个端点之间的相似性取决于它们之间的路径条数。实际上,路径是由不同属性的节点组成的,应该在路径建模时考虑路径中间节点的属性,给予信息传输能力强的路径更高的权重。据此本文提出了在不同网络中突出路径中小度节点作用,削弱大度节点作用的 Significant Path 算法(有意义路径算法,简称 SP 算法)^[11]。

设 q 表示任意一条连接节点 x 和 y 的路径, $M(q)$ 表示路径 q 去除端点之外所有中间节点组成的集合, v_i 表示路径 q 的任意一个中间节点, k_i 表

示节点 v_i 的度值, $P_2(v_x, v_y)$ 和 $P_3(v_x, v_y)$ 分别表示端点 x 和 y 之间长度是 2 和 3 的路径集, $\alpha \in [0, 1]$ 是路径长度的惩罚因子, β 是节点度惩罚因子。路径 q 的传输能力表示为:

$$\xi(q) = \sum_{v_i \in M(q)} k_i^\beta \quad (3)$$

由于长度大于 3 的路径在实际计算中复杂度大贡献小,因此模型仅考虑长度为 2 和 3 的路径。所以 x 和 y 之间异构路径相似性链路预测如下所示:

$$S_{xy}^{SP} = \sum_{q \in P_2(v_x, v_y)} \sum_{v_i \in M(q)} k_i^\beta + \alpha \sum_{q \in P_3(v_x, v_y)} \sum_{v_i \in M(q)} k_i^\beta \quad (4)$$

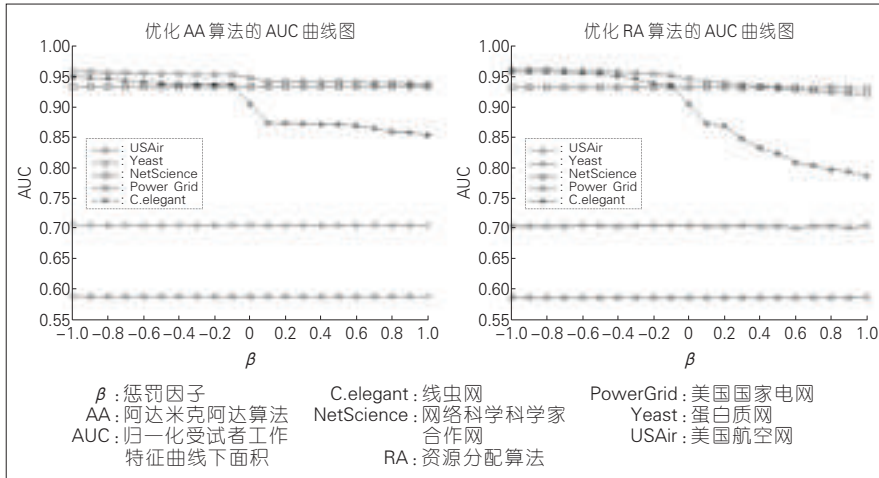
通过在 12 个网络中仿真计算算法的 AUC 性能,得到结果图 3 和与传统算法比较的结果如表 2 所示。可以看出,不论 α 取何值, AUC 均在 $\beta < 0$ 时达到最优,并且最优曲线对应的 α 远小于 1。SP 算法突出了较短路径和强信息传递能力的路径,并且相比于传统算法, SP 算法的预测准确性在大多数网络中都有明显的改进。

(2) 控制端点冗余影响力问题的研究

传统算法在研究端点影响力对端点相似性的作用时,忽略了端点影响力实际存在的冗余问题。冗余影响力不利于准确发现节点的相似性,因此需要研究如何控制端点冗余影响力。研究方法主要有两种:通过惩罚无贡献冗余影响力增强预测的准确性和通过抽取有效影响力建模端点之间相似性。

(a) 通过惩罚无贡献冗余影响力增强预测准确性

无贡献关系惩罚(NRP)算法^[12]是通过惩罚大冗余影响力突出小冗余影响力以增强预测准确性。首先建模单条路径连通性,设 v_i 表示路径中间节点, $|E|$ 表示网络连边集中的连边数, l 表示所研究的最长路径长度, $P(v_{i+1}|v_i)$ 表示从节点 v_i 到 v_{i+1} 的转移概率, $C(x, y)^{1/l}$ 表示长度为 l 的第 j 条路

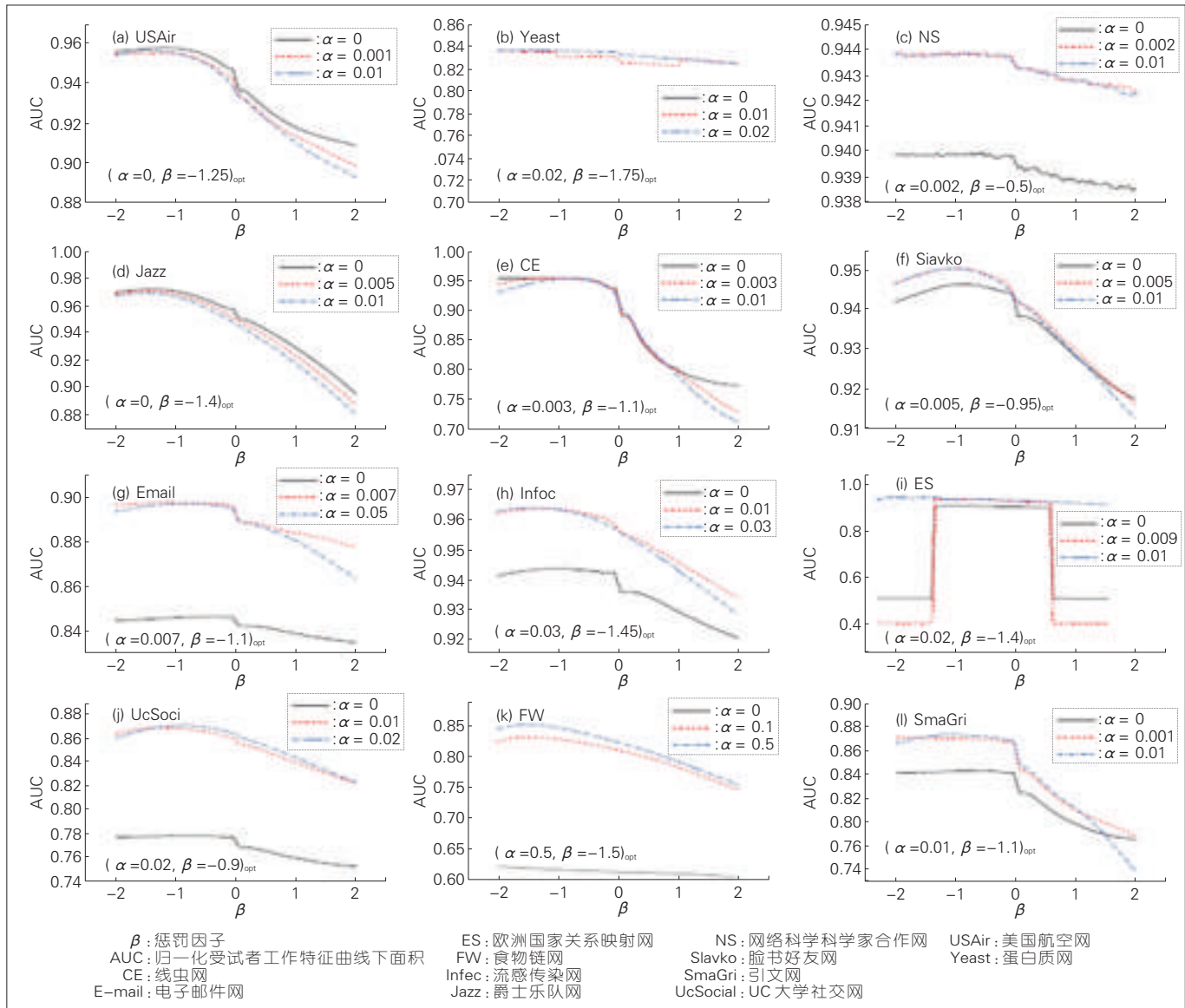


▲ 图 2 优化 AA 算法 OAA 和优化 RA 算法 ORA 在不同网络中的 AUC 性能

▼ 表 1 不同算法的 AUC 性能比较

Network	USAir	Yeast	NS	PG	CE
CN	0.94802	0.70490	0.93380	0.58750	0.90570
AA	0.95901	0.70484	0.93392	0.58765	0.95006
RA	0.96418	0.70459	0.93399	0.58747	0.95983
OAA	0.95926	0.70487	0.93415	0.58764	0.95526
ORA	0.96393	0.70537	0.93407	0.58772	0.95988

AA: 阿达米克阿达算法 NS: 网络科学家合作网 PG: 美国国家电网 USAir: 美国航空网
 CE: 新陈代谢网 OAA: 优化的 AA 算法 RA: 资源分配算法 Yeast: 蛋白质网
 CN: 公共邻居算法 ORA: 优化的 RA 算法



▲ 图3 SP算法在12个不同网络中准确性的AUC性能

▼ 表2 12个不同网络中的AUC性能比较

AUC	CN	AA	RA	LP	BLP	SP
USAir	0.938(0.0064)	0.950(0.0072)	0.956(0.0075)	0.938(0.0073)	0.931(0.0100)	0.960(0.0132)
Yeast	0.703(0.0053)	0.705(0.0051)	0.705(0.0052)	0.780(0.0068)	0.836(0.0089)	0.847(0.0086)
NS	0.940(0.0114)	0.940(0.0114)	0.940(0.0114)	0.940(0.0118)	0.943(0.0095)	0.944(0.0094)
Jazz	0.954(0.0054)	0.961(0.0047)	0.970(0.0046)	0.954(0.0053)	0.951(0.0056)	0.972(0.0044)
CE	0.914(0.0119)	0.948(0.0102)	0.954(0.0101)	0.914(0.0112)	0.911(0.0076)	0.957(0.0089)
Slavko	0.941(0.0098)	0.945(0.0099)	0.946(0.0100)	0.944(0.0101)	0.943(0.0104)	0.951(0.0096)
Email	0.844(0.0071)	0.846(0.0071)	0.846(0.0070)	0.893(0.0064)	0.902(0.0054)	0.899(0.0077)
Infec	0.939(0.0096)	0.943(0.0094)	0.944(0.0093)	0.954(0.0124)	0.958(0.0065)	0.964(0.0062)
ES	0.910(0.0059)	0.912(0.0061)	0.912(0.0061)	0.936(0.0073)	0.938(0.0051)	0.945(0.0056)
UcSoci	0.773(0.0066)	0.778(0.0068)	0.778(0.0068)	0.838(0.0051)	0.870(0.0059)	0.871(0.0073)
FW	0.612(0.0162)	0.615(0.0158)	0.620(0.0146)	0.800(0.0121)	0.641(0.0051)	0.873(0.0142)
SmaGri	0.833(0.0074)	0.843(0.0073)	0.843(0.0076)	0.857(0.0079)	0.875(0.0076)	0.874(0.0103)

AA: 阿达米克阿达算法
BLP: 有限本地路径算法
CE: 线虫网
CN: 公共邻居算法
E-mail: 电子邮件网
ES: 欧洲国家关系映射网
FW: 食物链网
LP: 本地路径算法
Infec: 流感传染网
Jazz: 爵士乐队网
NS: 网络科学科学家合作网
RA: 资源分配算法
Slavko: 脸书好友网
SmaGri: 引文网
SP: 有意义路径算法
UcSocial: UC 大学社交网
USAir: 美国航空网
Yeast: 蛋白质网

径中间节点总转移概率,则:

$$C(x, y)_l^j = \prod_{i=1}^{l-1} P(v_{i+1}|v_i) = \prod_{i=1}^{l-1} P(v_{i+1}|v_{i-1}) \quad (5)$$

设 $N(l)$ 表示长度为 l 的路径个数,相似性NRP算法的最终相似性模型为:

$$\begin{aligned} \text{sim}(x, y)_l &= \sum_{j=1}^{N(l)} \left[\left(\frac{k_x}{2|E|} \right)^\beta \frac{1}{k_x} C(x, y)_l^j + \left(\frac{k_y}{2|E|} \right)^\beta \frac{2}{k_y} C(x, y)_l^j \right] = \\ &= \sum_{j=1}^{N(l)} \left[\left(\frac{1}{2|E|} \right)^\beta C(x, y)_l^j [(k_x)^{\beta-1} + (k_y)^{\beta-1}] \right] \quad (6) \end{aligned}$$

进一步考虑所有长度的贡献,

NRP算法最终相似性模型为:

$$S_{xy}^{NRP} = \sum_{i=2}^l \text{sim}(x, y) |l_i| \quad (7)$$

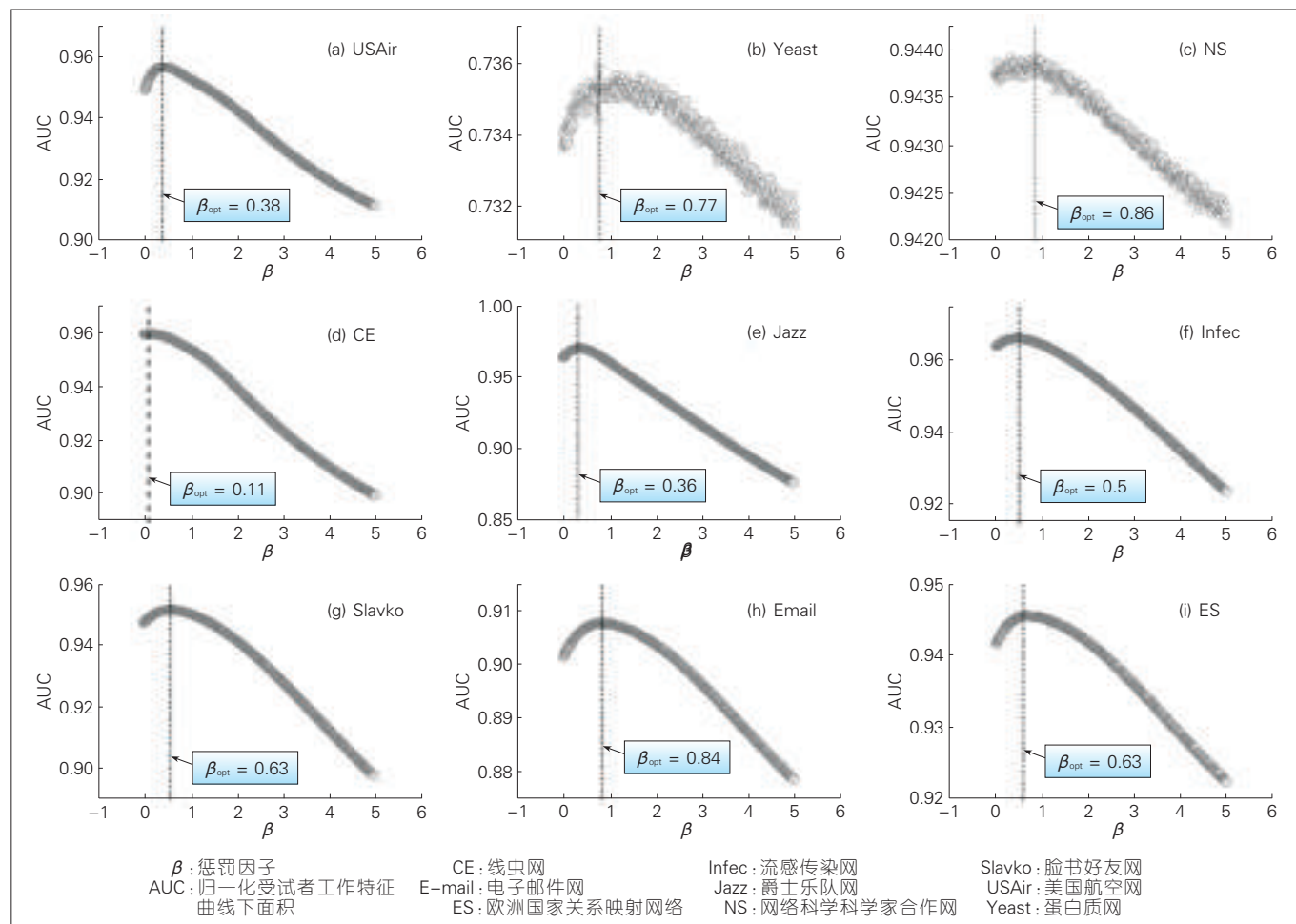
为了验证NRP算法的性能,本文在9个真实网络中进行了NRP的AUC性能实验以及与传统算法的比较实验,结果如图4和表3所示。可

以看出最优值出现在 $\beta < 1$,即 $\beta - 1 < 0$,说明对无贡献大度进行惩罚可以明显改善预测准确性;相反取值 $\beta > 0$ 时性能会急剧下降,表明突出无贡献关系会降低预测准确性,并且NRP算法明显优于传统算法。说明通过惩罚端点无贡献关系即冗余影响力,可以

极大改善链路预测的准确性。

(b)通过抽取有效影响力建模端点之间相似性

端点吸引节点与之发生关联主要依靠有效影响力。因此端点影响力建模可以采取直接抽取有效影响力的方式,如联合考虑有效影响力和



▲ 图4 NRP算法在9个不同网络中的AUC指标

▼ 表3 8种算法在9个不同网络中的AUC性能比较

AUC	CN	PA	AA	RA	LP	BLP	SRW	NRP
USAir	0.937(0.008)	0.885(0.017)	0.948(0.007)	0.954(0.007)	0.938(0.007)	0.931(0.010)	0.953(0.011)	0.957(0.011)
Yeast	0.723(0.005)	0.494(0.008)	0.724(0.005)	0.723(0.005)	0.732(0.005)	0.733(0.004)	0.735(0.005)	0.736(0.005)
NS	0.940(0.011)	0.679(0.012)	0.940(0.011)	0.940(0.011)	0.940(0.011)	0.943(0.009)	0.943(0.009)	0.944(0.009)
Jazz	0.953(0.005)	0.762(0.013)	0.961(0.004)	0.970(0.004)	0.954(0.005)	0.951(0.005)	0.960(0.004)	0.970(0.004)
CE	0.914(0.011)	0.808(0.021)	0.948(0.010)	0.954(0.010)	0.914(0.011)	0.911(0.007)	0.953(0.009)	0.960(0.009)
Slavko	0.941(0.009)	0.775(0.013)	0.945(0.009)	0.946(0.010)	0.944(0.010)	0.943(0.010)	0.949(0.009)	0.952(0.009)
Email	0.844(0.007)	0.782(0.007)	0.846(0.007)	0.846(0.007)	0.893(0.006)	0.902(0.005)	0.903(0.007)	0.908(0.006)
Infec	0.939(0.009)	0.703(0.013)	0.942(0.009)	0.943(0.009)	0.954(0.012)	0.958(0.006)	0.964(0.006)	0.966(0.006)
ES	0.910(0.005)	0.820(0.007)	0.912(0.006)	0.912(0.006)	0.936(0.007)	0.938(0.005)	0.945(0.005)	0.946(0.005)

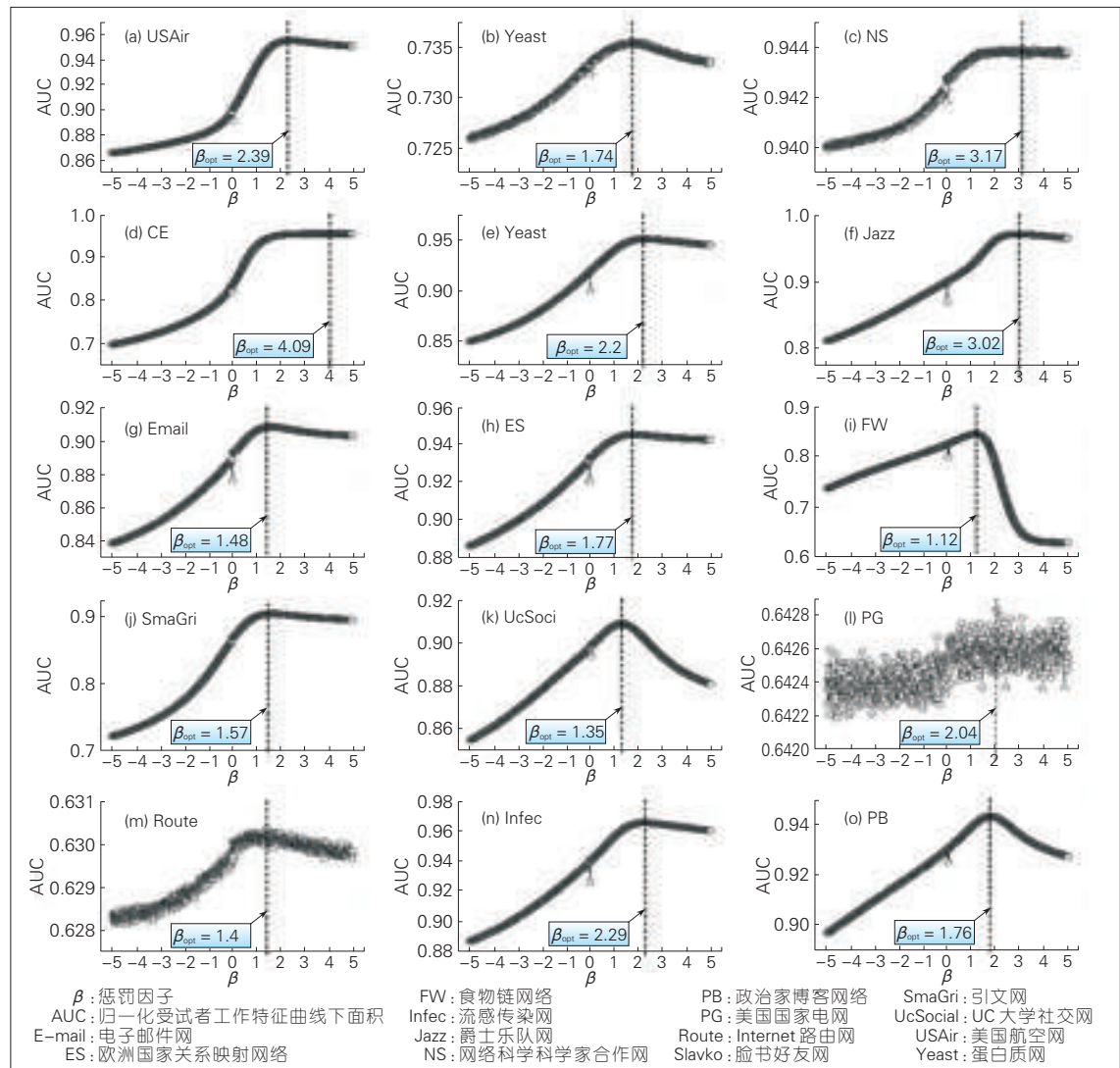
AA: 阿达米克阿达算法
 AUC: 受试者工作特征曲线下面积
 BLP: 有限本地路径算法
 CN: 公共邻居算法
 E-mail: 电子邮件网
 ES: 欧洲国家关系映射网络
 Infec: 流感传染网
 Jazz: 爵士乐队网
 LP: 本地路径算法
 NRP: 无贡献关系惩罚算法
 NS: 网络科学科学家合作网
 RA: 资源分配算法
 Slavko: 脸书好友网
 SRW: 叠加随机游走算法
 USAir: 美国航空网
 Yeast: 蛋白质网

强信息传播能力建模有效路径(EP)算法^[13]。

通过添加指数参数 β 控制不同网络下路径信息传输能力的差异性,使算法具有适应性并且突出强信息传播路径,即取最优值 $\beta > 1$ 。则长度为 l 的所有路径对于信息传播能力的影响为:

$$C(x, y) |l_i| = \sum_{j=1}^{N(l)} [C(x, y) |l_i|]^{\beta} \quad (8)$$

接着将可达对端的路径条数建



模为有效影响力。设 $|Paths_{xy}^l|$ 表示在端点 x 和 y 之间长度为 l 的路径个数,进一步结合长度为2到 l 的路径总信息传输能力,得到端点 x 和 y 之间总的相似性预测模型为:

$$S_{xy}^{EP}(t) = \sum_{l=2}^t |Paths_{xy}^l| C(x, y)_l \quad (9)$$

由于存在较长路径贡献小而代价大的问题,而对节点相似性贡献最多的路径长度是2和3,因此仅考虑长度为2和3的路径可以取得较好的预测效果。为了验证EP算法的预测准确性,本文利用15个网络仿真了不同 β 取值对预测准确性AUC的影响以及EP与传统算法性能的比较,如图5和表4所示。可以看出最优值

表4 7种算法在15个网络中的AUC性能比较

AUC	CN	AA	RA	LP	FL	SRW	EP
USAir	0.937(0.008)	0.948(0.008)	0.954(0.008)	0.937(0.008)	0.929(0.011)	0.952(0.011)	0.955(0.012)
Yeast	0.723(0.032)	0.724(0.005)	0.723(0.006)	0.733(0.005)	0.733(0.005)	0.735(0.010)	0.736(0.005)
NS	0.939(0.011)	0.939(0.011)	0.939(0.012)	0.943(0.009)	0.943(0.010)	0.943(0.009)	0.944(0.010)
CE	0.914(0.012)	0.948(0.010)	0.953(0.010)	0.913(0.012)	0.910(0.010)	0.953(0.010)	0.955(0.010)
Slavko	0.941(0.010)	0.945(0.010)	0.946(0.010)	0.942(0.010)	0.942(0.010)	0.950(0.010)	0.950(0.010)
Jazz	0.953(0.005)	0.960(0.005)	0.970(0.005)	0.953(0.005)	0.949(0.007)	0.960(0.005)	0.970(0.004)
Email	0.844(0.007)	0.846(0.007)	0.846(0.007)	0.901(0.006)	0.901(0.007)	0.907(0.007)	0.908(0.006)
ES	0.910(0.004)	0.912(0.004)	0.912(0.004)	0.938(0.005)	0.938(0.005)	0.945(0.006)	0.945(0.005)
FW	0.613(0.006)	0.615(0.006)	0.617(0.006)	0.711(0.004)	0.642(0.006)	0.766(0.004)	0.845(0.003)
SmaGri	0.832(0.007)	0.842(0.008)	0.842(0.008)	0.847(0.007)	0.847(0.008)	0.902(0.009)	0.904(0.009)
UcSoci	0.772(0.007)	0.777(0.007)	0.778(0.007)	0.886(0.006)	0.870(0.006)	0.900(0.005)	0.908(0.005)
PG	0.591(0.007)	0.591(0.007)	0.591(0.007)	0.642(0.007)	0.642(0.007)	0.642(0.007)	0.643(0.007)
Route	0.555(0.004)	0.555(0.004)	0.555(0.004)	0.629(0.005)	0.629(0.005)	0.630(0.005)	0.630(0.005)
Infec	0.939(0.010)	0.942(0.010)	0.943(0.009)	0.956(0.007)	0.956(0.007)	0.964(0.006)	0.965(0.006)
PB	0.915(0.003)	0.918(0.003)	0.919(0.003)	0.930(0.003)	0.927(0.003)	0.941(0.003)	0.944(0.003)
AA: 阿达米克阿达算法 AUC: 受试者工作特征曲线下面积 CN: 公共邻居算法 E-mail: 电子邮件网 EP: 有效路径算法 ES: 欧洲国家关系映射网络 FL: 朋友链路算法 FW: 食物链网络 Infec: 流感传染网 Jazz: 爵士乐队网 LP: 本地路径算法 NS: 网络科学科学家合作网 PB: 政治家博客网络 PG: 美国国家电网 RA: 资源分配算法 Route: Internet路由网 Slavko: 脸书好友网 SmaGri: 引文网 SRW: 叠加随机游走算法 UcSocial: UC大学社交网 USAir: 美国航空网 Yeast: 蛋白质网							

出现在 $\beta > 1$ 的位置,并且EP算法AUC准确性要明显高于其他算法。综上所述通过考虑有效影响力和强信息传输能力可以有效增强链路预测的准确性。

2.2 动态用户行为分析

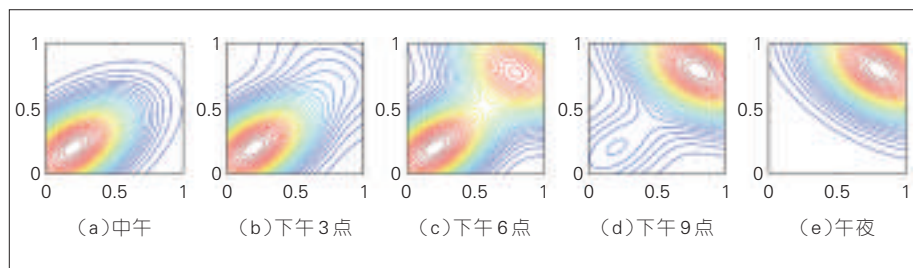
除了静态人类组织关系行为外,人类移动行为的研究和预测对无线资源调度和分配也非常重要。

目前对人类移动行为的研究和预测主要基于统计学和信息技术展开,分析结论表明^[14]:人类活动包含两类,其一是时间和空间上的周期性活动,其二是同社交关系相关的随机跳跃活动。近距离活动多体现出时间和空间的周期重复特性,同社交关系关联不大。远距离活动受社交关系影响比较明显。研究表明社交关系可以解释10%~30%的人类活动,而周期性模式可以解释50%~70%的人类活动。

依据从签到网站和移动终端获得的数据,研究者们绘制出了关于人群的行为模式。图6是在某城市中某一时刻人群在家中和工作单位的空间位置分布图以及一天中人们在家和工作单位的时间分布图,从图中可以看出明显的聚集性。图7显示的是在某城市中,从中午到午夜时刻,人群移动模式随时间变化的关系,可以看出具有明显的周期规律性,白天向工作地点聚集,夜晚向家的方向聚集。



▲图6 某一时刻人群在家和工作单位的位置分布和时间周期



▲图7 人们行为的移动模式和聚集趋势(图中的x和y轴数值是与最远距离的归一化相对值)

除了在地理和空间位置维度表现出周期性短距离的人群移动行为外,还有受社交关系影响的非周期性长距离行为。人们有时候会因为探亲访友产生出一些非规律性的行为,这些行为大多是由社交关系引起的。根据人们移动行为模式规律建立模型,预测未来人们发生行为的时间和空间位置是非常有意义以及可行的。

研究者们提出了许多方法,具有代表性的是根据人们行为的周期性进行预测的周期移动模型(PMM),PMM和进一步考虑了社交关系的社交周期移动模型(PSMM)^[14]。

利用对人类行为的预测来预测未来人群聚集发生的时间和空间位置,并引导无线通信资源的分配,能够极大地提升资源的利用率和用户满意度。

3 用户行为驱动的网络资源配置

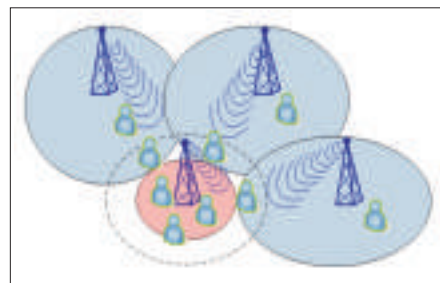
由用户构建的社交网络与实际通信设备部署网络之间并非一一对

应的关系,因此在获取和预测用户行为特征之后需要结合实际应用场景,选取合适的预测特征和数据来完成实际通信设备网络部署的资源优化配置。

3.1 基于小区负载的覆盖容量自优化

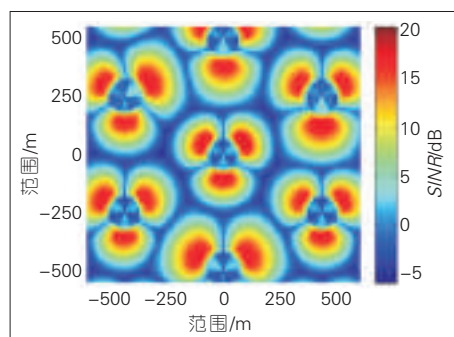
对所提取的用户行为特征加以利用将有助于提升网络整体的承载能力。因此,可利用对个体用户时间、空间行为的周期性、区域性特征的分析及预测,获取群体用户在一定时间、空间范围的聚集行为。而群体用户的空间聚集行为将直接决定各小区的负载情况,然后基站便可结合各小区负载的差异性进行覆盖与容量的自优化调整。如图8所示,基站可通过对天线配置、发射功率等射频参数进行联合调整的方式,将潜在的业务轻载小区的无线资源通过射频参数调整的方式投射到业务热点区域,使网络资源对用户周期性、区域性业务需求具有灵活的空间流性匹配能力,动态完成对不同区域、不同需求的用户的流性适配,达到提升网络覆盖容量综合性能的目的。

覆盖容量的优化过程需要考虑射频参数的调整对覆盖及容量性能

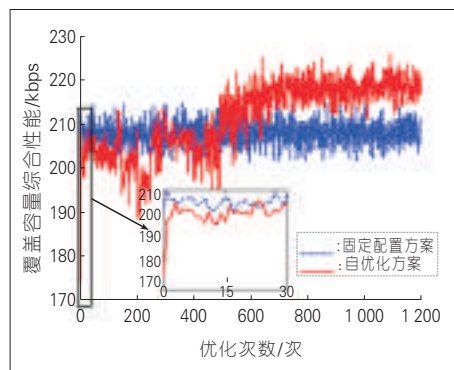


▲图8 覆盖容量优化示意

的诸多方面影响。比如较小的天线仰角会扩大本小区覆盖范围而提升边缘用户的性能,但同时也会对邻区用户带来更大的干扰并影响邻区容量。因此,对覆盖容量的联合优化需要兼顾覆盖性能与容量性能、本小区性能与邻区性能的折衷。考虑到射频参数的调整与所达到的覆盖容量联合性能没有直接的映射关系,因此覆盖容量的联合优化更倾向于采用机器学习等人工智能方式。根据邻区潜在负载差异及覆盖容量综合性能情况完成对射频参数的自优化调整,并通过对优化经验的归纳总结,提升基站的自主优化决策能力。所实现的网络 SINR 分布性能及覆盖容量综合性能优化效果如图 9、图 10 所示^[15]。经过自优化,各小区的射频参数会由于负载的差异而有所不同,重载小区的覆盖范围较小,其边缘用户将移至覆盖范围扩大的轻载小区接受服务。并且,基于小区负载的覆盖容量自优化方案性能相较于未考虑负载差异的优化方法得到了有效



▲ 图9 SINR分布优化效果



▲ 图10 覆盖容量综合性能

提升。

3.2 基于设备直通协作多播的数据分发策略

蜂窝网络所产生的大部分流量是流行内容的下载,例如视频、音频或移动应用程序。鉴于大多数用户行为具有这种共性下载的特点,如果基站把这种具有相同业务请求的用户数据卸载到设备直通(D2D)网络,那么就可以有效缓解蜂窝网络基础设施的负担,提高频谱效率以及用户满意度,并在一定程度上解决无线通信系统频谱资源匮乏的问题。由于大多数用户行为具有共性以及流动性,并且用户间的社交关系也体现出了用户间的协同意愿,那么把用户之间相同的数据请求通过基站多播方式实现数据分发,就可以极大的提高整个系统的资源利用率。

由于 D2D 协作多播系统是由独立的蜂窝用户组成,用户间的连接关系时断时续。而在现实生活中,人们的社交关系相对稳定,因此利用数据挖掘获得的用户社交关系可帮助蜂窝网络建立可靠的 D2D 传输链路,如图 11 所示。

根据用户节点 i 和 j 的历史关系信息,用 $\omega_{i,j} \in [0,1]$ 表示两节点间的紧密度。 $\omega_{i,j}$ 越大表示节点 i 和 j 间将在未来有更多的连接机会。该度量指标描述了邻居关系并作为数据分发中协作节点选择的依据。

构建社交网络邻居图 $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E})$, 其中 $\mathcal{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为社交网络中的节点,每一条边 $\langle i, j \rangle$ 的权重都由归一化的平均间隔时间 $C_{i,j}$ 和方差 $I_{i,j}$ 共同作用产生的紧密度系数 $\omega_{i,j}$ 度量。我们利用固定门限 I_T 滤除抖动较大的邻居节点,即当 $I_{i,j} > I_T$ 时,表示该邻居关系稳定性较差,舍弃此条邻居边。否则, $\omega_{i,j} = C_{i,j}$ 。由于该邻居图为无向图, $\omega_{i,j} = \omega_{j,i}$ 。 d_i 表示节点 i 度, $d_i = \sum_{j \in \mathcal{V}, j \neq i} \omega_{i,j}$ 。通过上述蜂窝网络邻居图的构建,用户可以向具有合适紧密度 ω_i 的用户发起数据请求。选取门限 ω_i 越大,可服务的用户越少,但通信的稳定性越强。

最终我们以网络吞吐量最大化为目标,优化问题可表示为:

$$X_{opt} = \arg \max_x \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} \min\{C_{i,1}, C_{i,2}, \dots, C_{i,N}\} \quad (10)$$

$$s.t. \quad x_{i,j} = \{0, 1\}, i \in M, j \in N \quad (11)$$

$$\sum_j x_{i,j} = 1, i \in M \quad (12)$$

$$l_{i,j} \leq R \quad (13)$$

$$\text{其中 } C_{i,j} = \log 2 \left(1 + \frac{P_D l_{i,j}^{-\alpha} g_{i,j}}{N_0} \right), P_D$$

表示簇头节点的发射功率; $l_{i,j}$ 表示多播传输距离($l_{i,j} \leq R$); $g_{i,j}$ 表示服从指数分布的路径损耗;(11)式表示若用户 j 属于簇 i ,则 $x_{i,j}=1$,否则 $x_{i,j}=0$;(12)式表示用户 j 只能同时属于一个簇;(13)式表示簇的最大半径为 R 。

D2D 协作多播网络容量增益如

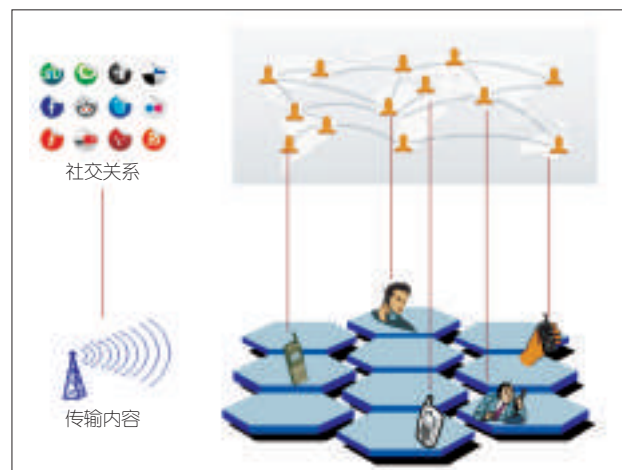


图 11
社交网络与物理网络
映射关系

图12所示。该图比较了传统蜂窝数据分发与不同多播半径情况下的平均网络容量累计分布函数(CDF)曲线。由图可知,D2D协作多播算法所达到的网络容量要优于传统蜂窝数据分发算法,并且随着多播半径 R 逐渐减小,D2D簇内多播速率增加。

3.3 个性用户业务服务资源配置

在通过预测获取用户个性化特征之后可以根据提取出的潜在业务发起位置及业务需求等个性化特征进行资源的提前预配置。

基于用户特征预测的资源分配如图13所示。用户(UE)经常由A出发到B,并在B点被动的接收一定量的数据(例如B为展览馆,UE为一个管理员,需要接收一定的解说信息,而解说信息会定期更新)。由于UE经常往返于A和B,在网络侧长期的历史信息搜集统计中,可以通过用户关系预测得出UE从A到B之间最常接入的基站集合。根据UE在这些基站中所上报的信道质量历史信道信

息,可以预测出UE在经过这些基站时的平均信息速率。同时根据UE的导航信息,可以获知UE在从A到B中所需的平均时间。由于B点接收信息较大,如果等用户A到达B点再更新信息的话,会带来较多的等待时延。为此,一种新的解决思路是利用上述预测信息,让UE在B点需要的数据,在预测的中途基站中进行预传输,从而达到提升用户体验质量的效果。具体分析如下。通过与UE的导航系统的信息交互,以及用户习惯的预测,可以预测用户的行进路线如图中的曲线表示。用户途径的基站集合表示为 $\mathcal{N}=\{1,2,\dots,k,\dots,N\}$ 。由于用户到达终点B时要下载总量为 D 比特的本地的业务,在预测到用户行进的轨迹和相关路径的基站分布之后,可以在UE的行进途中,提前将B点的业务分散在沿路路径中的每个基站来完成,以达到节省通信时延的目的。假设进入第 i ($i \in \mathcal{N}$) 基站服务范围内的UE历史平均速率为 \bar{c}_i b/s,单个UE在行进路径中进入到离

开第 i 个基站的历史平均耗时为 $\bar{\tau}_i$,那么第 i 个基站可承担的最大平均数据是 $\bar{C}_i = \bar{c}_i \bar{\tau}_i$ 比特。假定 D 分配到第 i 个基站上应承担的数据量为 x_i ,那么使得这 N 个基站组成的系统能效最大化问题可表述为:

$$P1: \max_x \frac{D}{\sum_{i=1}^N \frac{x_i p_i}{\bar{c}_i}} \quad (14)$$

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^N x_i \geq D \quad (15)$$

$$0 \leq x_i \leq \bar{C}_i, \forall i \in N$$

其中 $\mathbf{x}=[x_1, x_2, \dots, x_N] \in \mathbb{R}^{1 \times N}$ 为数据分配向量, p_i 为第 i 个基站的发射功率。 P_1 可用线性优化方案给出最优解。与传统的资源分配相比,基于预测的资源分配可以有效缓解B点处的通信业务压力。提前配置考虑了节能、基站负载等因素,极大的优化了网络的整体性能。同时这种预测提前通信也大大减少了用户等待时间,提升了用户体验质量。

4 结束语

本文从用户行为对网络的驱动特性出发,提出了通过将用户行为作为自组织网络资源管理考虑的因素来弥补当前网络不足的方法。文章对动态和静态用户行为特征的提取进行了分析,选取了典型的自组织网络资源分配场景,给出了这些场景下应用用户群体行为特征和个性行为特征进行网络资源优化配置的方法。然而由于用户行为的复杂特性,当前对用户行为的挖掘还比较粗糙。同时由于人类的社交网络与自组织网络的物理资源网络并非一一对应的关系,在利用用户行为特征进行网络资源配置时需要根据具体的场景,选取合适的用户行为分析模型,提取相应的关键参数,从而实现网络资源的高效配置。

参考文献

- [1] CISCO. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2011—2016 [EB/OL]. (2014-11-01). <http://>

下转第28页

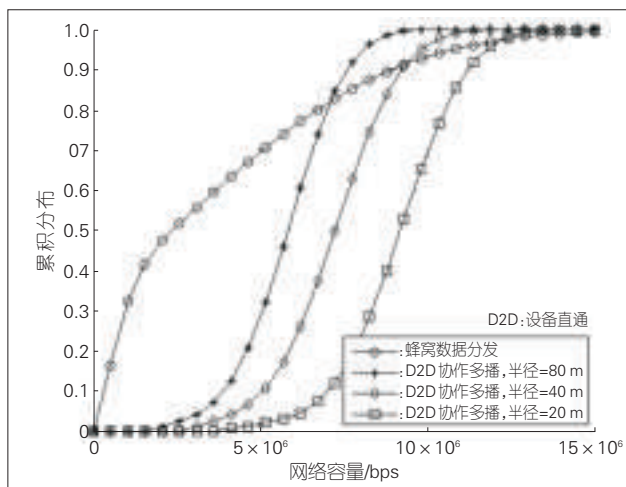


图12 D2D多播半径对网络容量的影响

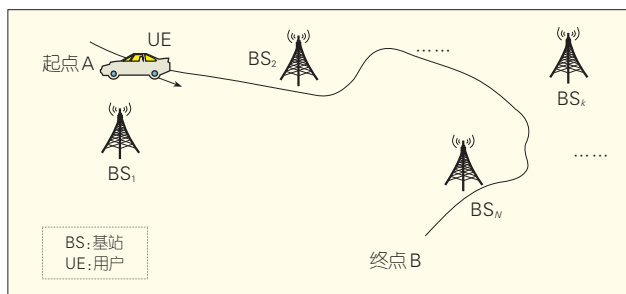


图13 基于用户特征预测的资源分配

密集小基站网络中的下行乒乓中继传输机制

Downlink Successive Relaying Transmission Scheme for Dense Small-Cell Networks

张昱/ZHANG Yu
张朝阳/ZHANG Zhaoyang

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江杭州 310027)
(Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 01-0013-005

摘要: 研究了密集小基站网络中的下行放大转发中继传输机制。由于半双工限制, 传统中继传输机制会带来一定的频谱效率损失, 同时在密集系统中获取全局信道状态信息也较为困难, 为此提出了一种分布式乒乓中继传输机制。该机制避免了传统机制的半双工损失, 同时也可以有效地解决中继间干扰问题。分析了传统传输机制以及乒乓中继传输机制的可达速率, 并且给出了两者在中继数很大时的渐进性能。分析与数值仿真表明该机制相较于传统中继机制可以带来较大性能增益。

关键词: 密集网络; 乒乓中继; 放大转发

Abstract: This paper investigates the downlink transmission through amplify-and-forward relaying in dense small-cell networks. In a conventional relay transmission scheme, spectral efficiency is decreased because of the half-duplex limit. It is difficult to acquire global channel state information for the transmitters and receivers in a dense network. In this paper, we propose a distributed successive relaying scheme that avoids the half-duplex loss and reduces inter-relay interference of the successive relaying. We analyze the achievable rates for both schemes and their asymptotic performances under a very large relay amounts. The experimental results show the comparative advantage of the proposed scheme.

Keywords: dense network; successive relaying; amplify-and-forward

伴随着无线通信技术的发展, 用户对无线通信业务特别是数据业务的需求量亦在高速增长。仅2013年一年, 全球移动数据流量增长了81%, 而预计到2018年, 全球移动数据流量将会增长11倍^[1]。高速增长的业务需求量以及接入设备数量给未来无线通信系统提出了严峻的挑战。

为了应对高速增长的通信需求, 通信系统密集化是下一代通信系统的趋势, 即在异构网络的架构下, 在宏小区中部署大量的小基站或是中继^[2-3]。密集化可以缩减接入点与用户之间的传输距离, 降低能量消耗, 同时使得网络干扰更为复杂。协作中继作为密集小区的一种典型形式, 其是扩大小区覆盖范围, 提高系统频谱效率的有效方法。3GPP早已将Type-1中继写入了LTE-Advanced标

准之中^[4]。然而, 由于小基站或是中继站一般工作在半双工模式, 即无法同时发送或者接收, 因此会带来频谱效率的损失。虽然最近全双工技术发展很快^[5], 但其距离实用还有很多待解决的问题。

在本文中, 我们针对未来的密集小基站网络, 研究一种下行乒乓放大转发中继传输机制。在我们考虑的系统, 基站(抽象成源节点)通过大量小基站或中继站(抽象成中继节点)的协助向单个用户发送信息(抽象成目的节点)。乒乓中继传输模式可以避免传统中继的半双工损失。

在乒乓中继传输模式中, 通过不同中继站轮流转发, 基站可以不断地向中继站发送新信息, 而用户也可以不断地从中继站得到新信息^[6]。然而, 相较于传统中继方式, 乒乓中继会带来一半的功率损失, 这是由于系统中永远只有一半的中继站在转发。更为严重的问题是额外的中继间干扰。具体来说, 一些中继站在接收基站信息的同时还会收到来自其他正在进行转发的中继站的信息, 这就会对基站的信息造成干扰。对于这个问题, 文献[7-8]给出了两中继系统已知所有信道状态信息情况下的干扰消除

收稿日期: 2014-11-05

网络出版时间: 2014-12-16

基金项目: 国家重点基础研究发展(“973”)计划(2012CB316104); 国家高技术研究发展(“863”)计划(2014AA01A702); 国家自然科学基金(61401391, 61371094)

方式。文献[9-11]给出了2中继或3中继系统中利用多天线消除中继间干扰的方法。

在我们研究的密集中继系统中,由于中继站较为密集,获得网络中所有实时信道状态信息代价过大,并且中继也无法采用干扰协调将所有干扰都旋转至同一子空间内。因此前述方法都无法用到我们研究的系统中。在本文中,我们提出了一种分布式地乒乓中继传输机制。利用大规模随机矩阵理论^[12],在中继数目很大时,通过我们提出的机制,中继间干扰将会在用户处相互抵消,从而自然地解决了干扰问题。因此我们所提出的方法可以获得比传统方法更高的传输速率。

1 下行中继系统模型以及传输机制

1.1 系统模型

我们考虑具有单个源节点, M 个中继节点以及单个目的节点的网络系统。考虑网络中具有密集小基站的场景,即 M 非常大。我们假设源节点与目的节点之间不存在直连链路。网络中所有节点都装备单根天线,并且工作在半双工模式。中继节点的转发方式为放大转发。其是指在中继节点传输时,其仅将上个时隙收到的信号在满足功率约束的前提下线性放大,然后再转发出去。

各节点之间的信道经历块衰落。信道增益在每个时隙发生改变,并且各时隙的信道增益满足独立同分布。我们假设源节点与目的节点都不知道各中继节点到其本身的信道状态信息,仅仅知道其统计学信息(即信道增益分布)。这是由于中继数目众多,要获取实时信道信息需要与中继数 M 成正比的训练符号发送时间,这会大大降低系统效率。另一方面,我们假设各个中继具有源节点以及目的节点到其本身的信道状态信息。这在实际中是很容易实现的,

只需要源节点以及目的节点轮流发送训练符号即可。

1.2 传统两时隙放大转发传输

首先我们考虑传统的两时隙放大转发传输机制,如图1所示。

该机制每轮传输分为2个时隙。在第一个时隙,源节点 S 在系统中广播。令源节点到各个中继站的信道增益为 h_m , $m=1, \dots, M$ 。其中 $h_m = \sqrt{\alpha_m} \tilde{h}_m$, α_m 代表大尺度衰落值, $\tilde{h}_m \sim CN(0, 1)$ 符合复标准的正态分布。此时 R_m 收到的信号可以表示如下:

$$y_{R,m}(1) = P_S h_m(1) x_S(1) + w_{R,m}(1) \quad (1)$$

其中括号内数字表示时隙号, x_S 表示源节点发送符号,各时隙的发送符号满足独立同分布的复标准正态分布 $x_S \sim CN(0, 1)$, $w_{R,m}$ 表示中继处的噪声,其也满足独立同分布的复标准正态分布, P_S 是源节点发送功率。

在时隙二,各个中继放大转发信号。我们采用文献[13]中的方法。中继 R_m 的发送信号如下:

$$r_m(2) = \gamma_m g_m^*(2) h_m^*(1) y_{R,m}(1) \quad (2)$$

其中, g_m 是中继到目的节点的信道增益, $g_m = \sqrt{\beta_m} \tilde{g}_m$, \tilde{g}_m 满足复标准正态分布, γ_m 表示中继的放大系数,其余时隙无关。放大系数使得中继满足平均功率限制。由式(2),

中继发送信号的功率为:

$$\text{var}(r_m) = \gamma_m^2 \beta_m \alpha_m (2\alpha_m P_S + 1) \quad (3)$$

令中继的平均发射功率为 P_R , 则放大系数为:

$$\gamma_m = \sqrt{\frac{P_R}{\beta_m \alpha_m (2\alpha_m P_S + 1)}} \quad (4)$$

目的节点的接收信号公式可以表示为:

$$\begin{aligned} y_D(2) &= \sum_{m=1}^M g_m(2) r_m(2) + w_D(2) \\ &= \underbrace{\sum_{m=1}^M \gamma_m |g_m(2)|^2 |h_m(2)|^2 x_S(1)}_{L_1^w} + \underbrace{\sum_{m=1}^M \gamma_m |g_m(2)|^2 h_m^*(2) w_{R,m}(1) + w_D(2)}_{L_2^w} \end{aligned} \quad (5)$$

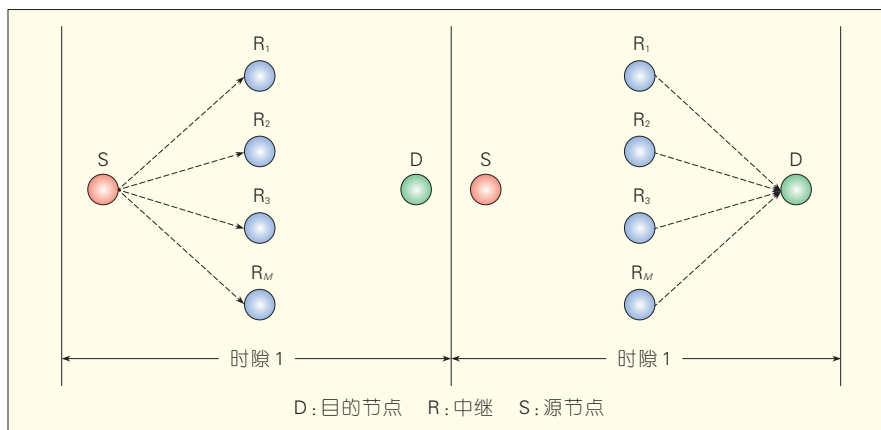
1.3 乒乓中继传输

我们提出如下的乒乓中继传输机制,其传输过程如图2所示。

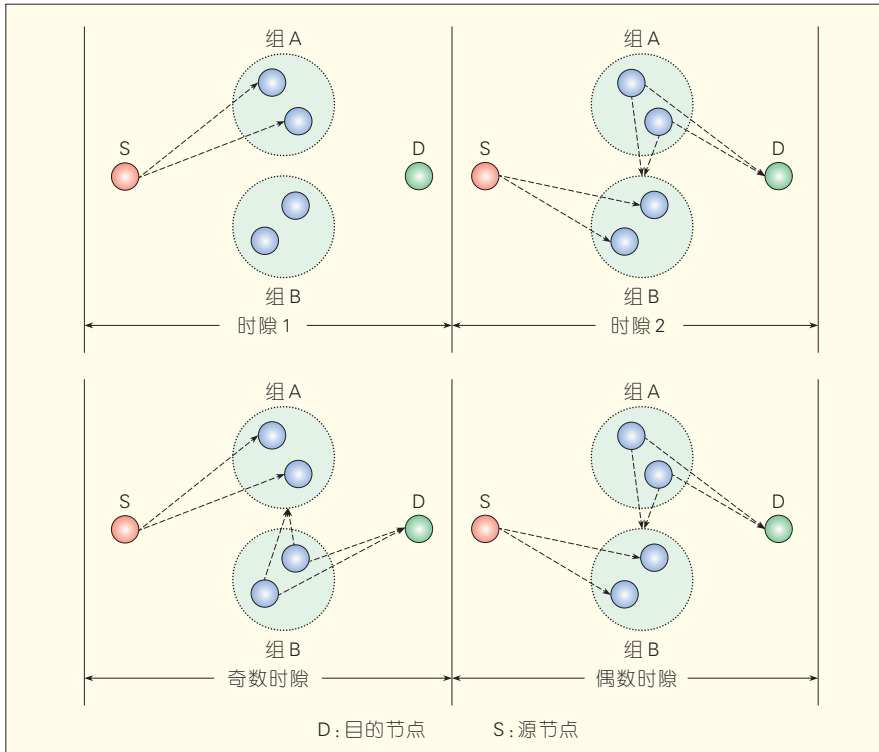
我们将中继分为2组,称之为中继组A和中继组B。组A和组B各包含 $\frac{M}{2}$ 个中继。为了简便,我们假设中继总数 M 为偶数。在第一个时隙,源节点 S 在系统中广播,中继组A接收到的信号为:

$$y_{A,m}(1) = \sqrt{P_S} h_{A,m}(1) x_S(1) + w_{A,m}(1) \quad (6)$$

其中 $h_{A,m}$ 是源节点到组A中的各中继的信道增益, $w_{A,m}$ 代表中继处的噪声。



▲ 图1 两时隙放大转发传输机制



▲图2 乒乓中继传输机制

在时隙2, 中继组A将上一时隙收到的信号线性放大再转发出去。我们采用公式(2)相同的转发方式:

$$r_{A,m}(2) = \gamma_{A,m} g_{A,m}^*(2) h_{A,m}^*(1) y_{A,m}(1) \quad (7)$$

其中, $g_{A,m}$ 是组A的中继到目的节点的信道增益, $\gamma_{A,m}$ 表示中继的放大系数。目的节点收到的信号为:

$$y_D(2) = \sum_{m=1}^{M/2} g_{A,m}(2) r_{A,m}(2) + w_D(2) = \sum_{m=1}^{M/2} \gamma_{A,m} |g_{A,m}(2)|^2 |h_{A,m}(2)|^2 x_S(1) + \sum_{m=1}^{M/2} \gamma_{A,m} |g_{A,m}(2)|^2 h_{A,m}^*(1) w_{A,m}(1) + w_D(2) \quad (8)$$

与此同时, 源节点也在系统中广播新信息。因此, 组B的中继会同时收到源节点的信息以及来自中继组A的干扰。中继组B收到的信号为:

$$y_{B,m}(2) = \sqrt{P_S} h_{B,m}(2) x_S(2) + \sum_{k=1}^{M/2} f_{k,m}(2) r_{A,k}(2) + w_{B,m}(2) \quad (9)$$

其中 $f_{k,m}$ 表示组A的中继节点 k 到组B的中继节点 m 之间的信道增

益, 在各时隙满足独立同分布的复高斯分布, 方差为 $\eta_{k,m}$ 。接收信号的功率为 (对所有信道增益、发送信号取平均):

$$\text{var}(y_{B,M}(2)) = \alpha_{B,M} P_S + \sum_{k=1}^{M/2} \eta_{k,M} P_R + 1 \quad (10)$$

在接下来的偶数时隙, 中继组B收到的信号强度都等于公式(10), 因此之后公式(10)中 $y_{B,m}$ 的时隙标号可以去掉。

在时隙3 (之后的奇数时隙和时隙3完全一样), 中继组B将上一时隙收到的信号线性放大再转发出去:

$$r_{B,m}(3) = \gamma_{B,m} g_{B,m}^*(3) h_{B,m}^*(2) y_{B,m}(2) = \sqrt{P_S} \gamma_{B,m} g_{B,m}^*(3) |h_{B,m}(2)|^2 x_S(2) + \gamma_{B,m} g_{B,m}^*(3) h_{B,m}^*(2) \left(\sum_{k=1}^{M/2} f_{k,m}(2) r_{A,k}(2) + w_{B,m}(2) \right) \quad (11)$$

中继发送信号的功率为:

$$\text{var}(r_{B,M}(3)) = \gamma_{B,M}^2 \beta_{B,M} \alpha_{B,M} (2\alpha_{B,M} P_S + \sum_{k=1}^{M/2} \eta_{k,M} P_R + 1) \quad (12)$$

之后中继组B的发射功率都能

由公式(12)表示, 因此下标可以去掉。由于中继的发射功率限制为 P_R , 则放大系数为:

$$\gamma_{B,m} = \sqrt{\frac{P_R}{\beta_{B,m} \alpha_{B,m} \left(2\alpha_{B,m} P_S + \sum_{k=1}^{M/2} \eta_{k,m} P_R + 1 \right)}} \quad (13)$$

目的端接收到的信号为:

$$y_D(3) = \sum_{m=1}^{M/2} g_{B,m}(3) r_{B,m}(3) + w_D(3) = \sum_{m=1}^{M/2} \underbrace{\gamma_{B,m} |g_{B,m}(3)|^2 |h_{B,m}(2)|^2}_{L_1^{TP}} x_S(2) + \sum_{m=1}^{M/2} \underbrace{\gamma_{B,m} |g_{B,m}(3)|^2 h_{B,m}^*(2) \sum_{k=1}^{M/2} f_{k,m}(2) r_{A,k}(2)}_{L_2^{TP}} + \sum_{m=1}^{M/2} \underbrace{\gamma_{B,m} |g_{B,m}(3)|^2 h_{B,m}^*(2) w_{B,m}(2) + w_D(3)}_{L_3^{TP}} \quad (14)$$

与此同时, 源节点S也同时在系统中广播信号 $x_S(3)$, 中继组A收到的信号为:

$$y_{A,m}(3) = \sqrt{P_S} h_{A,m}(3) x_S(3) + \sum_{k=1}^{M/2} \underbrace{f_{k,m}^*(3) r_{B,k}(3) + w_{A,m}(3)}_{L_4^{TP}} \quad (15)$$

在时隙4以及接下来的偶数时隙, 由中继组A向目的节点放大转发信息, 源节点继续在系统中广播新信息, 而中继组B接收来自源节点的信息以及中继组B的干扰, 各节点的发送接收信号类似于公式(11)到公式(15), 这里不再赘述。需要注意的是, 中继组A在偶数时隙发送信号平均功率与其在第二个时隙不同, 但在总时隙长度很大的情况下, 可以认为中继组A的平均发送功率即为之后偶数时隙的平均发送功率。因此中继组A的放大系数可以为:

$$\gamma_{A,m} = \sqrt{\frac{P_R}{\beta_{A,m} \alpha_{A,m} \left(2\alpha_{A,m} P_S + \sum_{k=1}^{M/2} \eta_{k,m} P_R + 1 \right)}} \quad (16)$$

在传输结束的最后一个时隙, 源节点停止发送新信息, 只由中继组A或者B将上个时隙的接收信号转发。这样, 如果要源节点发送 L 长的

信息,则需要 $L+1$ 个时隙。当 L 非常大时,一个时隙的损失可以忽略不计,即中继群可以“全双工”地转发源节点的信息。

2 性能分析

在这一节中我们分析两种方法的理论可达速率以及在中继非常密集即数量很大的情况下的极限性能。

2.1 传统两时隙放大转发传输

如第二节所述,由于中继数目很多,我们假设源节点和目的节点不知道信道状态信息,因此目的节点采用信道的统计信息进行相干解调,即以公式(5)中的 $E(L_1^{AF})$ 作为信道增益。由于实际的信道增益 L_1^{AF} 与目的节点解调使用的信道增益有差距,因此会带来额外的噪声。由文献[14]以及公式(5),在未知信道状态信息下,系统可达速率为:

$$R^{AF} = \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P_s |E(L_1^{AF})|^2}{P_s \text{var}(L_1^{AF}) + \text{var}(L_2^{AF}) + 1} \right) \quad (17)$$

上式中的各项可以计算如下:

$$E(L_1^{AF}) = E \left(\sum_{m=1}^M \gamma_m |g_m(2)|^2 |h_m(2)|^2 \right) = \sum_{m=1}^M \gamma_m \beta_m \alpha_m \quad (18)$$

$$\text{var}(L_1^{AF}) = E \left((L_1^{AF})^2 \right) - E(L_1^{AF})^2 = 3 \sum_{m=1}^M \gamma_m^2 \beta_m^2 \alpha_m^2 \quad (19)$$

$$\text{var}(L_2^{AF}) = E \left(\sum_{m=1}^M \gamma_m^2 |g_m|^4 |h_m|^2 |w_{R,M}|^2 \right) = 2 \sum_{m=1}^M \gamma_m^2 \beta_m^2 \alpha_m \quad (20)$$

另一方面,如果我们假设源节点和目的节点知道所有信道状态信息,此时目的节点就可以根据真实的信道状态信息来进行相干接收,对应的理想系统可达速率为:

$$R^{AF-Genie} = \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P_s |L_1^{AF}|^2}{\text{var}(L_2^{AF}) + 1} \right) \quad (21)$$

大尺度性能。我们研究当中继

数 M 非常大情况下的系统性能。我们令中继发射功率随中继数 M 线性下降,即 $P_R = \frac{E_R}{M}$, 其中 E_R 是与中继数 M 无关的常数。因此中继群的总功率保持不变。另一方面,源节点的发射功率也保持不变。同时为了方便分析,我们假设各节点之间的信道增益均值都相等,即 $\alpha_m = \beta_m = 1$ (对于 $m=1, \dots, M$)。该假定不影响分析结果。此时系统可达传输速率可以表示为:

$$R^{AF} = \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{MP_s E_R}{3P_s E_R + 2E_R + 2P_s + 1} \right) \quad (22)$$

可以看出当 $M \rightarrow \infty$ 时:

$$R^{AF} \approx \frac{1}{2} \log \left(\frac{MP_s E_R}{3P_s E_R + 2E_R + 2P_s + 1} \right) \rightarrow \infty \quad (23)$$

这个结果说明,在源节点以及中继节点总发射功率不变的情况下,随着中继数的增大,系统传输速率可以无限增大。公式(23)和已知所有信道状态信息下的 MIMO 中继网络的尺度率一致^[15]。

2.2 乒乓中继传输

在乒乓中继传输中, $L+1$ 个时隙被用来传输 L 个信息。由公式(8)所示,在第二个时隙目的节点处的信噪比与之后的偶数时隙不同。当 L 很大时,这种不同可以忽略,同时额外一个时隙的损耗也可以忽略。此时乒乓中继传输的系统可达速率可以表示为:

$$R^{TP} = \frac{1}{2} (R^{TP-Even} + R^{TP-Odd}) \quad (24)$$

其中 $R^{TP-Even}$ 和 R^{TP-Odd} 代表在偶数时隙以及奇数时隙的系统传输速率。由公式(14), R^{TP-Odd} 可表示如下:

$$R^{TP-Odd} = \log \left(1 + \frac{P_s |E(L_1^{TP})|^2}{P_s \text{var}(L_1^{TP}) + \text{var}(L_2^{TP}) + \text{var}(L_3^{TP}) + 1} \right) \quad (25)$$

其中各项计算如下:

$$E(L_1^{TP}) = \sum_{m=1}^{M/2} \gamma_m \beta_m \alpha_m \quad (26)$$

$$\text{var}(L_1^{TP}) = 3 \sum_{m=1}^{M/2} \gamma_m^2 \beta_m^2 \alpha_m^2 \quad (27)$$

$$\text{var}(L_2^{TP}) = 2P_R \sum_{m=1}^{M/2} \gamma_m^2 \beta_m^2 \alpha_m \sum_{k=1}^{M/2} \eta_{k,m} \quad (28)$$

$$\text{var}(L_3^{TP}) = 2 \sum_{m=1}^{M/2} \gamma_m^2 \beta_m^2 \alpha_m \quad (29)$$

偶数时隙的传输速率是类似的,这里不再赘述。与 2.1 节一样,如果我们假设源节点和目的节点都知道信道状态信息,则理想情况的系统传输速率为:

$$R^{TP-Genie} = \log \left(1 + \frac{P_s |L_1^{TP}|^2}{\text{var}(L_2^{TP}) + \text{var}(L_3^{TP}) + 1} \right) \quad (30)$$

大尺度性能。与 2.1.1 节一样,我们令 $P_R = \frac{E_R}{M}$, 同时 P_s 保持不变。同时我们假设除了源节点以及目的节点到中继节点的信道外,中继节点之间的信道增益均值也都为 1, 此时系统传输速率可以表示为:

$$R^{TP} = \log \left(1 + \frac{MP_s E_R}{6P_s E_R + 2E_R^2 + 6E_R + 2P_s + 1} \right) \quad (31)$$

同样我们可以看到,当 $M \rightarrow \infty$ 的时候:

$$R^{TP} \approx \log \left(\frac{MP_s E_R}{6P_s E_R + 2E_R^2 + 6E_R + 2P_s + 1} \right) \rightarrow \infty \quad (32)$$

2.3 传统方案与乒乓中继方案的比较

通过比较公式(23)和公式(32),当 M 非常大时:

$$\frac{R^{AF}}{R^{TP}} \approx \frac{\frac{1}{2} \log(MP_s E_R) - \log(3P_s E_R + 2E_R + 2P_s + 1)}{\frac{1}{2} \log(MP_s E_R) - \log(6P_s E_R + 2E_R^2 + 6E_R + 2P_s + 1)} \approx \frac{1}{2} \quad (33)$$

可见我们提出的乒乓中继方案可以达到传统方案 2 倍的系统传输速率。

3 数值仿真

在本节中我们仿真了两种传输方法在不同中继数目下的系统传输速率,同时对这两种方法在已知所有信道状态信息的理想传输速率也进行了仿真。在仿真中,我们取所有节点间的信道增益均值为 1, 中继和功

率以及源节点功率都定为 10。

传统放大转发传输与乒乓中继传输性能比较如图 3 所示。由图 3 可以看出,乒乓中继传输性能在中继数目并不大的情况下已经好于传统的放大转发传输性能。同时可以看出,两种方法在中继数目比较大时,与已知所有信道状态信息的理想情况相比,其差距都为定值。另外,乒乓中继的传输速率并没有达到传统放大转发传输性能的 2 倍。这是由于理论分析是基于中继数无穷大的假设,并且从图中可以看出,两者的差距确实是不断增大的。

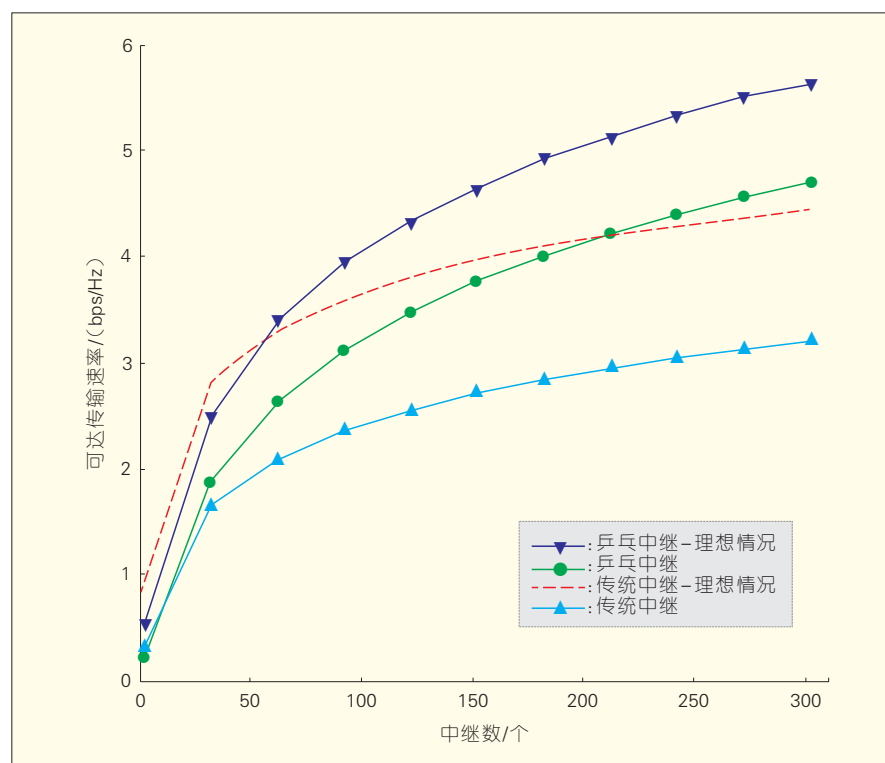
4 结束语

在本文中,我们针对密集小基站网络提出了一种分布式下行乒乓中继传输机制。我们分析了该机制与传统机制的可达速率以及在中继数量非常大情况下的渐进性能。相较于传统中继传输机制,我们提出的下行乒乓中继传输机制避免了中继的半双工损失,可以达到更高的传输速

率。本文提出的机制可以扩展到多用户的情况,此外中继群的分组问题亦会影响传输速率,这些是本文的下一步研究方向。

参考文献

- [1] CISCO. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2013—2018 [R]. Cisco white paper, 2014
- [2] QUALCOMM. The 1000x Data Challenge [R]. Qualcomm report, 2013
- [3] HOYDIS J, HOSSEINI K, BRINK S, DEBBAH M. Making Smart Use of Excess Antennas: Massive MIMO, Small Cells, and TDD [J]. Bell Labs Technical Journal, 2013, 18(2):5–21
- [4] 3GPP TR36.814. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects [S]. 2012
- [5] DAY B P, MARGETTS A R, BLISS D W, SCHNITER P. Full-Duplex MIMO Relaying: Achievable Rates Under Limited Dynamic Range [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(8):1541–1553
- [6] FAN Y J, WANG C, THOMPSON J, POOR H V. Recovering Multiplexing Loss through Successive Relaying Using Repetition Coding [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(12):4484–4493
- [7] LUO C, GONG Y, ZHENG F. Full Interference Cancellation for Two Path Relay Cooperative Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(1):343–347
- [8] RANKOV B, WITTNEBEN A N. Spectral Efficient Protocols for Half Duplex Fading Relay Channels [J]. IEEE Journal on Selected Areas on Communications, 2007, 25(2):379–389
- [9] PARK S H, KO Y C, PARK K H, ALOUINI M S. Alternate Transmission with Half-duplex Relaying in MIMO Interference Relay Networks [C]//Proceedings of the 2013 IEEE Global Telecommunications Conference, Dec. 2013, Atlanta, GA, USA, IEEE 2013: 3435–3440
- [10] PARK H, CHUN J. Inter-relay Interference Cancellation for AF MIMO Two-Path Relay Systems [C]//Proceedings of the 2012 IEEE Vehicular Technology Conference, Sept. 2012:1–5
- [11] PARK H, CHUN J. An Interference Estimation Algorithm Using Multielement Array Sensors [C]//Proceedings of the 2011 Asia-Pacific International Conference on Synthetic Aperture Radar, Sept. 2011, Seoul, Korea, IEEE 2011: 1–3
- [12] TULINO A M, VERDU S. Random Matrix Theory and Wireless Communications [J]. Foundation Trends on Communication and Information Theory, 2004,1(2):1–182
- [13] NGO H Q, LASSON E G. Large-Scale Multipair Two-way Relay Networks with Distributed AF Beamforming [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(12): 1–4
- [14] DANA A F, HASSIBI B. On the Power Efficiency of Sensory and Ad-hoc Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 60(3):2890–2914
- [15] VAZE R, HEATH R W. Capacity Scaling for MIMO Two-Way Relaying [C]//Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Information Theory, June 24–29, 2007, Nice, France, IEEE 2007: 1451–1455



▲ 图 3 传统放大转发传输与乒乓中继传输性能比较

作者简介



张昱,浙江大学信息与电子工程系信息与通信工程研究所博士后;主要研究领域为网络与信道编码、大规模天线,以及无线资源分配;先后参加基金项目6项;已发表学术论文20余篇,其中被SCI/EI检索10余篇。



张朝阳,浙江大学信息与电子工程系信息与通信工程研究所所长、教授, IEEE Transactions on Communications、IET Communications 等国际期刊编委, WCSP 2013 等多个国际会议 TPC Co-Chair, Globecom 2014 Wireless Communications Symposium Co-Chair 以及中国电子学会信息论分会副主任委员;主要研究方向为无线通信与无线网络、信息论与编码理论;承担并完成基金项目10余项;已发表学术论文150余篇,被引2 000余次。

高密度小基站网络中混频自部署技术与网络容量分析

Hybrid Frequency Allocation Scheme and Capacity Analysis in Densely-Deployed Small Cells

张奇勋/ZHANG Qixun
冯志勇/FENG Zhiyong
杨拓/YANG Tuo

(北京邮电大学, 北京 100876)
(Beijing University of Posts and
Telecommunications, Beijing 100876,
China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 01-0018-006

摘要: 基于在密集小基站层叠网络中小基站网络混频自部署方案及关键技术, 通过理论分析和数学推导相结合, 研究了影响密集小基站层叠网络下行容量的关键因素, 并探讨了混频部署方式对网络容量增益的影响。仿真结果和数据分析验证了所提出高密度小基站混频自部署技术对网络容量提升的有效性。

关键词: 密集小基站; 频率分配; 容量分析

Abstract: In this paper, a hybrid frequency allocation scheme for densely-deployed small cells is proposed to improve system capacity and minimize inter-cell interference between multi-tier heterogeneous networks. Closed-form solutions are achieved with theoretical results for proposed downlink capacity model, and key parameters are analyzed. Numerical results show that capacity can be improved by using hybrid frequency allocation schemes to appropriately deploy small cells.

Keywords: small cells; frequency allocation; capacity analysis

移动通信的快速发展, 带动了移动互联网和高带宽数据业务的爆炸式增长, 现有网络包括蜂窝网、无线局域网及宽带无线接入的移动网络难以应对高网络容量新需求。此外, 有研究表明未来将有近 50% 的话音业务和 70% 的数据业务发生在室内^[1], 而传统室内覆盖技术难以满足业务需求, 成为网络容量提升的瓶颈难题。通过密集部署小基站网络构建立体层叠网络进行深度覆盖已成为提升网络容量的关键技术手段之一。小基站 (Small Cell) 密集部署的解决方案和关键技术也已成为第五代移动通信 (5G) 的技术特点之一^[2], 成为工业界和学术界研究的热点, 通过在热点区域、家庭室内环境、办公环境等部署低功率的小基站 (包

括家庭基站、微基站、无线中继等), 可以有效提升层叠网络容量, 扩展网络覆盖范围, 使得运营商能够为用户提供更高数据速率业务, 同时降低网络运营和维护的成本。

因此, 在家庭室内以及办公环境等室内环境下, 采用小基站网络自部署技术来提高室内环境无线信号覆盖效果与业务质量已成为业界关注的重点。以家庭基站为代表的用户自部署的小型化基站, 通过由第三方提供的多种回程链路 (ADSL 或网络线缆) 与通信网络核心网相连接, 能够为室内用户提供语音、数据和高速多媒体等高质量业务, 有效的提升无线网络的室内覆盖效果, 并大大提升无线网络的系统容量^[3]。由于家庭基

站的室内部署有效的拉近了终端同基站之间的距离, 降低了无线信号传播损耗, 可以有效提升室内用户的无线信号质量。但是, 由于家庭基站网络的引入, 使得已有无线网络的层叠布局变得更加复杂, 因此也带来了许多新的挑战, 如: 密集小基站层叠网络中家庭基站对宏蜂窝网络用户的干扰问题、家庭基站的频谱分配方案选取问题、家庭基站网络的干扰抑制和干扰消除技术、家庭基站网络的覆盖优化问题等^[3-4]。

在家庭基站网络与宏蜂窝网络层叠部署下, 频率分配方案对网络容量提升影响的相关研究成果总结如下。针对家庭基站闭合接入方式和开放接入方式对层叠网络上行容量

收稿日期: 2014-11-04

网络出版时间: 2014-12-26

基金项目: 国家高技术研究发展 (“863”) 计划 (2014AA01A707); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (61201152)

的影响问题,文献[5]通过理论建模并定量分析了基于正交频分复用(OFDMA)或时分复用(TDMA)方式的宏蜂窝网络上行容量,确定影响家庭基站接入模式选择的关键参数是宏蜂窝网络用户的密度。进一步,文献[6]给出了针对正交频分技术(TDMA/OFDMA)或非正交频分技术(CDMA)的家庭基站网络开放式接入和闭合式接入方式最优选择策略和对层叠网络容量的影响因素在于宏蜂窝用户的密度。针对OFDMA方式下家庭基站和宏蜂窝网络共存下的干扰问题,文献[7]提出了一种采用实时多代理强化学习技术(分布式Q学习)的智能自组织家庭基站方案。针对家庭基站网络中干扰管理问题,文献[8]提出一种基于认知功能的家庭基站自动干扰签名识别技术,并基于机会式调度方案将正交化的信道分配给多个家庭基站网络使用,降低同频干扰和提高信道复用度,从而实现层叠网络的自动干扰管理。针对OFDMA方式下层叠网络频率分配问题,文献[9]采取一种基于分布式的异频部署频率分配方案,以降低层叠网络内的跨层同频干扰。针对OFDMA方式下CSG闭合接入方式的宏蜂窝网络与宏蜂窝网络共存的层叠网络中,文献[10]提出家庭基站通过认知无线电功能获取单小区网络内同频干扰信息的方式来避免小区内跨层网络干扰,通过提高频谱空间复用度来提升下行网络容量。针对层叠网络频率部署方式,文献[11]提出一种基于家庭基站与宏蜂窝基站相对位置和家庭基站覆盖范围的混合异频部署方案。针对OFDMA方式下的家庭基站网络与宏蜂窝网络共存的层叠网络场景,文献[12]和文献[13]研究基于同频部署方式(分布式和集中式)、异频部署方式下的层叠网络干扰问题,并提出基于自配置和自优化功能的层叠网络干扰消除方法。此外,文献[14]提出了通过认知射频信道技术可以进行异构网络信息的有

效传输,从而实现异构网络的自组织和资源优化利用。

但是,现有针对家庭基站网络频率分配和容量的研究中,大部分还是针对单小区内同频部署和异频部署方式下的网络容量分析,使用干扰抑制和干扰消除的方法来提升网络容量。考虑到小基站网络密集部署下层叠网络间干扰加剧,如何提高小基站自部署和自优化能力已成为本领域的研究热点。因此,具备自组织特性(自配置、自优化等)的密集小基站层叠网络的研究变得格外重要。本文以层叠网络下行容量最优化为目标,提出密集小基站混频自部署技术,分析多小区场景下混频部署方式对下行容量的影响,确定关键影响因素,进而提出密集小基站层叠网络的频率自部署优化方案,实现提高网络容量的目标。

1 高密度小基站网络混频部署场景

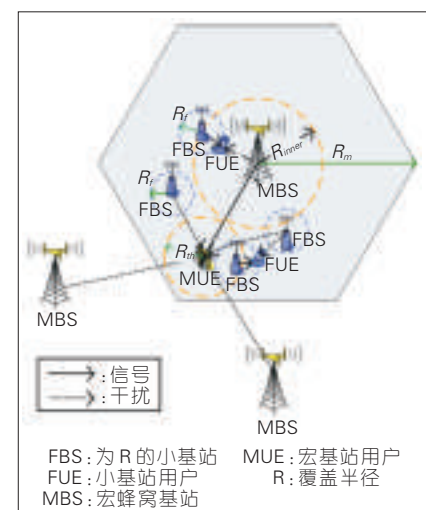
在高密度小基站与宏蜂窝基站网络共存的层叠网络场景中,针对小基站自部署和高密度的特点,结合异频部署和同频部署方式的优点,小基站可采取混频自部署方式。高密度小基站网络混频部署下行干扰场景如图1所示。假设每个正六边形宏蜂窝基站(MBS)的覆盖半径为 R_m ,在宏蜂窝基站覆盖范围内,部署多个具有圆形覆盖范围且半径为 R_f 的小基站(FBS)。

考虑到当小基站用户(FUE)邻近宏蜂窝基站时,会受到宏基站较强的下行同频干扰的影响,将宏基站覆盖范围划分为内环($d < R_{inner}$)和外环($R_{inner} < d < R_m$)两个区域。在宏基站内环区域内,小基站通过采用异频部署方式来抑制同频干扰来提升网络容量。在宏基站外环区域内,小基站通过采用受限的同频部署方式来提升网络容量,即设置异频保护半径 R_{th} ,距离宏基站用户(MUE) R_{th} 范围内的小基站采用异频部署方案,而距离宏

基站用户 R_{th} 范围之外的小基站可以采用同频部署方案。因此,通过采用受限的混频部署方案可以大大减弱原有密集小基站和宏基站同频部署下层叠网络的同频干扰,提高小基站的部署密度从而达到提升频谱复用效率和网络容量的目标。

2 混频部署中的内环区域容量分析

如图1所示,在高密度小基站网络混频部署下行干扰场景中,小基站用户受到的主要干扰源为本小区宏基站的同频干扰(忽略相邻小基站的干扰等因素),为简化分析,忽略信道增益与白噪声的影响。针对典型LTE系统分析,频谱资源RB数目为 N ,在宏基站内环区域的小基站采用异频部署方式,其RB资源数目为 $(1-\rho)N$ 。宏基站在每个RB上的发射功率为 P_m ,小基站在每个RB上的发射功率为 P_f 。当小基站用户位于小基站边缘且距离宏基站最近处时,其信噪比 $SINR_{f,inner}^{hybrid}$ 应满足公式(1),其中 d_m 表示小基站用户与宏基站之间的距离。通过计算宏基站内环与外环区域的划分半径 R_{inner} ,定量表示如公式(2),小基站可以依据自身所处位置与宏基站的相对关系,来采取合适的频率部署方式。在宏基站内环区域边界处($d_m=R_{inner}$)的宏基站用户,应



▲图1 高密度小基站网络混频部署场景

满足公式(3)的中断概率要求。在宏基站内环区域边界($d_m=R_{inner}$)的小基站用户,应满足公式(4)的中断概率要求,其中: $s=\Gamma_{target}/[P_f R_f^{-\alpha}(1-\rho)N]$ 。因此,在宏基站内环区域内部署小基站的密度 $\bar{\lambda}_{FBS}^{R_{inner}}$ 应满足公式(5)。混频部署中的内环区域的下行容量 C_{inner}^{hybrid} 如公式(6)所示。

$$SINR_{f,inner}^{hybrid}(R_f) = \frac{P_f R_f^{-\alpha}}{N_0 + P_m d_m^{-\alpha}} = \Gamma_{target} \quad (1)$$

$$R_{inner} = d_m + R_f + \left(\frac{\Gamma_{target} P_m}{P_f R_f^{-\alpha} - N_0 \Gamma_{target}} \right)^{1/\alpha} \quad (2)$$

$$P(SINR_m^{hybrid}(R_{inner}) = G_m P_m R_{inner}^{-\alpha} / N_0 \geq \Gamma_{target}) \geq 1 - \varepsilon \quad (3)$$

$$P(SINR_f^{hybrid}(R_f) \geq \Gamma_{target}) = \exp\left[-N_0 \Gamma_{target} / (P_f R_f^{-\alpha})\right] \exp\left[-\pi \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{inner}} \sqrt{s P_f} \tan^{-1}\left(4R_{inner}^2 / \sqrt{s P_f}\right)\right] = 1 - \varepsilon \quad (4)$$

$$\bar{\lambda}_{FBS}^{R_{inner}} = \frac{-\ln(1-\varepsilon) - N_0 \Gamma_{target} / (P_f R_f^{-\alpha})}{\pi \left[\Gamma_{target} R_f^2 / [(1-\rho)N] \tan^{-1}\left\{4R_{inner}^2 / \sqrt{\Gamma_{target} R_f^2 [(1-\rho)N]}\right\} \right]} \quad (5)$$

$$C_{inner}^{hybrid} = N \left[\rho + (1-\rho) \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{inner}} \pi R_{inner}^2 \right] \log_2(1 + \Gamma_{target}) \quad (6)$$

3 混频部署中的外环区域容量分析

在宏基站外环区域内的小基站可以通过采用受限的同频部署方式,降低多层网络间干扰,提高网络容量。通过对小基站添加无线网络环境认知功能,可以使得小基站获知附近宏基站用户的频谱资源RB使用情况。小基站通过主动的避让宏基站用户所占用的RB资源,达到减轻多层网络间的同频干扰,从而提升外环区域内小基站的部署密度,提高层叠网络容量。因此,在距离宏基站用户小于 R_{th} 范围内的小基站需要避让RB资源而采取异频部署方式,而距离大于 R_{th} 的小基站仍可以采用同频部署方案。通过合理的选取适当的异频部署保护距离 R_{th} 来降低邻近小基站对宏基站用户的同频干扰,通过提高小基站部署密度,提高网络容量。

针对外环区域内采用受限的同频部署方式,在小区边缘用户最大中

断概率 ε 条件下,宏基站用户将受到来自邻居宏基站的同频干扰和保护距离之外小基站的同频干扰。因此,宏蜂窝小区边缘的宏基站用户的信噪比 $SINR_m^{hybrid}(d_m)$ 应满足公式(7),其中: $I_{f,m}^{hybrid}$ 为宏蜂窝网络中距离宏用户大于 R_{th} 的小基站同频干扰, $I_{m,m}$ 表示邻居宏基站对中心宏基站用户的同频干扰。在小区边缘允许的最大中断率为 ε 的条件下,需要保障受干扰较大的宏基站小区边缘用户的通信质量,即宏蜂窝基站边缘用户接收到的信噪比应满足公式(8)。为简化分析,假设对MUE产生较强干扰的邻居宏基站仅有一个,如公式(9)

所示。 $\bar{\lambda}_{FBS,MUE}^{R_{th}}$ 表示在宏基站外环区域内采用受限同频部署方式下,所允许的小基站最大部署密度。考虑宏基站边缘宏用户的通信质量要求,外环区域小基站的

最大部署密度如公式(10)所示。在宏基站外环区域内的小基站采用受限同频部署方式下,层叠网络的外环下行容量如公式(11)所示,其中

$$|H_{outer}| = |H| - |H_{inner}| = 3\sqrt{3}R_m^2/2 - \pi R_{inner}^2 \quad (7)$$

$$SINR_m^{hybrid}(d_m) = \frac{G_m P_m d_m^{-\alpha}}{N_0 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^6 I_{m,m} + \frac{1}{N} I_{f,m}^{hybrid}} \quad (8)$$

$$P(SINR_m^{hybrid}(R_m) \geq \Gamma_{target}) \geq 1 - \varepsilon \quad (9)$$

$$P(SINR_m^{hybrid}(R_m) \geq \Gamma_{target}) = \exp\left(-\frac{\Gamma_{target} N_0}{P_m R_m^{-\alpha}}\right) \exp\left\{-\pi \bar{\lambda}_{FBS,MUE}^{R_{th}} R_m^2 \sqrt{\frac{P_f \Gamma_{target}}{NP_m}} \left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(R_{th}^2 R_m^{-2} \sqrt{\frac{P_f \Gamma_{target}}{NP_m}}\right)\right]\right\} \geq 1 - \varepsilon \quad (10)$$

$$\bar{\lambda}_{FBS,MUE}^{R_{th}} = \frac{-\ln[(1-\varepsilon)(1+\Gamma_{target}/N)] - \frac{\Gamma_{target} N_0}{P_m R_m^{-\alpha}}}{\pi R_m^2 \sqrt{\frac{P_f \Gamma_{target}}{NP_m}} \left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(R_{th}^2 R_m^{-2} \sqrt{\frac{P_f \Gamma_{target}}{NP_m}}\right)\right]} \quad (11)$$

$$C_{outer}^{hybrid} = N[1 + \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{th}} (-\pi R_{inner}^2) \log_2(1 + \Gamma_{target})] \quad (12)$$

$$C_{total}^{hybrid} = C_{inner}^{hybrid} + C_{outer}^{hybrid} = \left[\rho + (1-\rho) \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{inner}} (\pi R_{inner}^2) + 1 + \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{th}} (3\sqrt{3}R_m^2/2 - \pi R_{inner}^2) \right] N \log_2(1 + \Gamma_{target}) \quad (12)$$

$$C_{total}^{hybrid} = C_{inner}^{hybrid} + C_{outer}^{hybrid} = \left[\rho + (1-\rho) \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{inner}} (\pi R_{inner}^2) + 1 + \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{th}} (3\sqrt{3}R_m^2/2 - \pi R_{inner}^2) \right] N \log_2(1 + \Gamma_{target}) \quad (12)$$

$$C_{total}^{hybrid} = C_{inner}^{hybrid} + C_{outer}^{hybrid} = \left[\rho + (1-\rho) \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{inner}} (\pi R_{inner}^2) + 1 + \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{th}} (3\sqrt{3}R_m^2/2 - \pi R_{inner}^2) \right] N \log_2(1 + \Gamma_{target}) \quad (12)$$

$$C_{total}^{hybrid} = C_{inner}^{hybrid} + C_{outer}^{hybrid} = \left[\rho + (1-\rho) \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{inner}} (\pi R_{inner}^2) + 1 + \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{th}} (3\sqrt{3}R_m^2/2 - \pi R_{inner}^2) \right] N \log_2(1 + \Gamma_{target}) \quad (12)$$

$$C_{total}^{hybrid} = C_{inner}^{hybrid} + C_{outer}^{hybrid} = \left[\rho + (1-\rho) \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{inner}} (\pi R_{inner}^2) + 1 + \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{th}} (3\sqrt{3}R_m^2/2 - \pi R_{inner}^2) \right] N \log_2(1 + \Gamma_{target}) \quad (12)$$

$$C_{total}^{hybrid} = C_{inner}^{hybrid} + C_{outer}^{hybrid} = \left[\rho + (1-\rho) \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{inner}} (\pi R_{inner}^2) + 1 + \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{th}} (3\sqrt{3}R_m^2/2 - \pi R_{inner}^2) \right] N \log_2(1 + \Gamma_{target}) \quad (12)$$

$$C_{total}^{hybrid} = C_{inner}^{hybrid} + C_{outer}^{hybrid} = \left[\rho + (1-\rho) \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{inner}} (\pi R_{inner}^2) + 1 + \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{th}} (3\sqrt{3}R_m^2/2 - \pi R_{inner}^2) \right] N \log_2(1 + \Gamma_{target}) \quad (12)$$

$$C_{total}^{hybrid} = C_{inner}^{hybrid} + C_{outer}^{hybrid} = \left[\rho + (1-\rho) \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{inner}} (\pi R_{inner}^2) + 1 + \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{th}} (3\sqrt{3}R_m^2/2 - \pi R_{inner}^2) \right] N \log_2(1 + \Gamma_{target}) \quad (12)$$

$$C_{total}^{hybrid} = C_{inner}^{hybrid} + C_{outer}^{hybrid} = \left[\rho + (1-\rho) \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{inner}} (\pi R_{inner}^2) + 1 + \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{th}} (3\sqrt{3}R_m^2/2 - \pi R_{inner}^2) \right] N \log_2(1 + \Gamma_{target}) \quad (12)$$

$$C_{total}^{hybrid} = C_{inner}^{hybrid} + C_{outer}^{hybrid} = \left[\rho + (1-\rho) \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{inner}} (\pi R_{inner}^2) + 1 + \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{th}} (3\sqrt{3}R_m^2/2 - \pi R_{inner}^2) \right] N \log_2(1 + \Gamma_{target}) \quad (12)$$

$$C_{total}^{hybrid} = C_{inner}^{hybrid} + C_{outer}^{hybrid} = \left[\rho + (1-\rho) \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{inner}} (\pi R_{inner}^2) + 1 + \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{th}} (3\sqrt{3}R_m^2/2 - \pi R_{inner}^2) \right] N \log_2(1 + \Gamma_{target}) \quad (12)$$

$$C_{total}^{hybrid} = C_{inner}^{hybrid} + C_{outer}^{hybrid} = \left[\rho + (1-\rho) \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{inner}} (\pi R_{inner}^2) + 1 + \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{th}} (3\sqrt{3}R_m^2/2 - \pi R_{inner}^2) \right] N \log_2(1 + \Gamma_{target}) \quad (12)$$

$$C_{outer}^{hybrid} = N[1 + \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{th}} (-\pi R_{inner}^2) \log_2(1 + \Gamma_{target})] \quad (11)$$

综合以上对密集小基站网络混频部署方式,宏基站的内环区域和外环区域的下行总容量如公式(12)所示。

$$C_{total}^{hybrid} = C_{inner}^{hybrid} + C_{outer}^{hybrid} = \left[\rho + (1-\rho) \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{inner}} (\pi R_{inner}^2) + 1 + \bar{\lambda}_{FBS}^{R_{th}} (3\sqrt{3}R_m^2/2 - \pi R_{inner}^2) \right] N \log_2(1 + \Gamma_{target}) \quad (12)$$

与传统的同频部署方式相比,混频部署方式由于采用了内环区域异频部署和外环区域受限同频部署方式,有效降低了传统同频部署中层叠网络间的跨层干扰。因而,采用混频部署方式的下行容量较传统同频部署方式有明显提升。并得到制约网络容量的4个关键因素:

(1)宏蜂窝网络的内环和外环划分半径 R_{inner} , R_{inner} 与小基站的覆盖半径 R_f 直接相关,并随着 R_f 的增大而相应增大。

(2)宏用户异频部署保护距离 R_{th} 。网络系统容量随 R_{th} 的增大而相应增加。

(3)层叠网络频谱资源 N 。层叠网络总容量随频谱资源 N 的增大而增加。

(4)小基站部署密度 λ_{FBS} 。网络容量随 λ_{FBS} 的增大而增加。

考虑到混频部署方式是将异频和同频部署方式的有效结合的新方法,通过合理的系统参数设计(内环和外环划分半径 R_{inner} 和宏用户异频部署保护距离 R_{th}),可以大大降低传统同频部署的层叠网络间的同频干扰,通过提高小基站的部署密度,可以有效提高频谱复用率和网络容量。

4 仿真验证与分析

针对本文提出的密集小基站网络中混频自部署方案,在仿真设置中考虑7个宏蜂窝基站的典型部署场景。其中,中心基站内的用户将受到

来自于6个邻居宏基站下行信号的同频干扰,本文将中心位置的宏蜂窝基站作为网络容量仿真和分析的研究重点。仿真的具体参数如表1所示^[15]。

4.1 混频自部署方案下宏用户的信干噪比分析

在混频自部署方式中,宏基站用

▼表1 高密度小基站网络混频自部署仿真参数

P_n/W	20
P_f/W	0.1
系统带宽 BW/MHz	20
RB 资源数目 N	110
路损因子 α	4
目标信干噪比 SINR/dB	3
最大中断率 ε	0.1
MBS 覆盖半径 R_m/m	500
FBS 覆盖半径 R_f/m	10
每 RB 的背景噪声功率 N_0/W	10^{-12}
R_{inner}/m	59.5
R_{ex}/m	10, 20, 30, 40, 50
FBS: 小基站 MBS: 宏蜂窝基站	RB: 频谱资源

户分别位于宏基站内环和外环不同区域时会受到不同类型的同频干扰。位于宏基站内环区域的宏基站用户,将受到邻居宏基站较弱的同频干扰和外环区域小基站较强的同频干扰。

位于宏基站外环区域的宏基站用户,将受到邻居宏基站较强的同频干扰和与异频保护半径 R_{th} 之外的小基站较弱的同频干扰。

如图2所示,在不同小基站部署密度下,不同位置处宏基站用户的信干噪比 SINR 值。随着小基站部署密度的增加,位于宏基站内环区域用户的 SINR 变化很小,而位于宏基站外环区域的用户由于受到大量小基站的同频干扰, SINR 下降剧烈,需要通过设置异频保护半径,即对宏用户 R_{th} 半径内的小基站采用异频部署方式,保证此区域宏用户的通信质量。因

此,位于宏基站边缘 SINR 较差区域的用户可以通过调整自身异频保护半径 R_{th} 来减弱邻近小基站的同频干扰,提高 SINR 值。如图3所示,随着 R_{th} 的增加,宏用户的信号质量得到较

大改善。

4.2 混频自部署方案下小基站用户的信干噪比分析

如图4所示,在不同小基站部署

图2 混频部署中在不同小基站部署密度下宏用户信干噪比分布

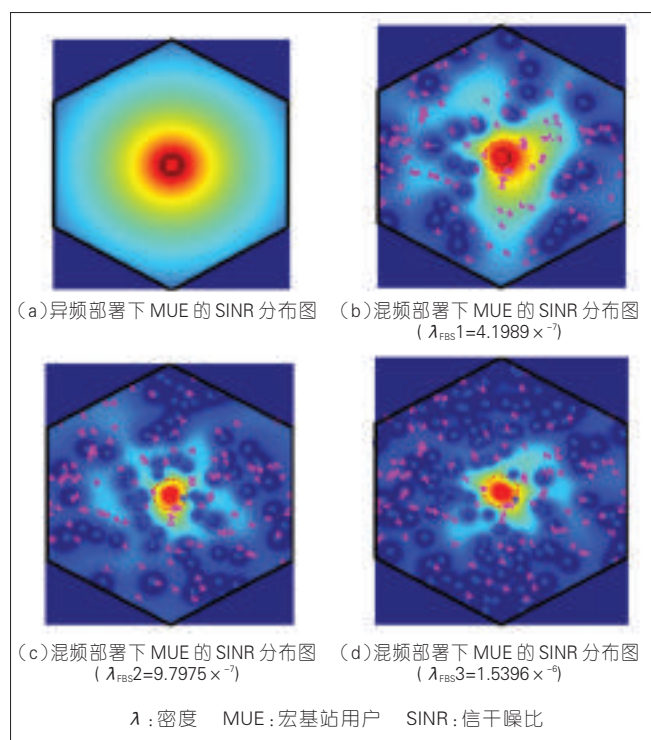
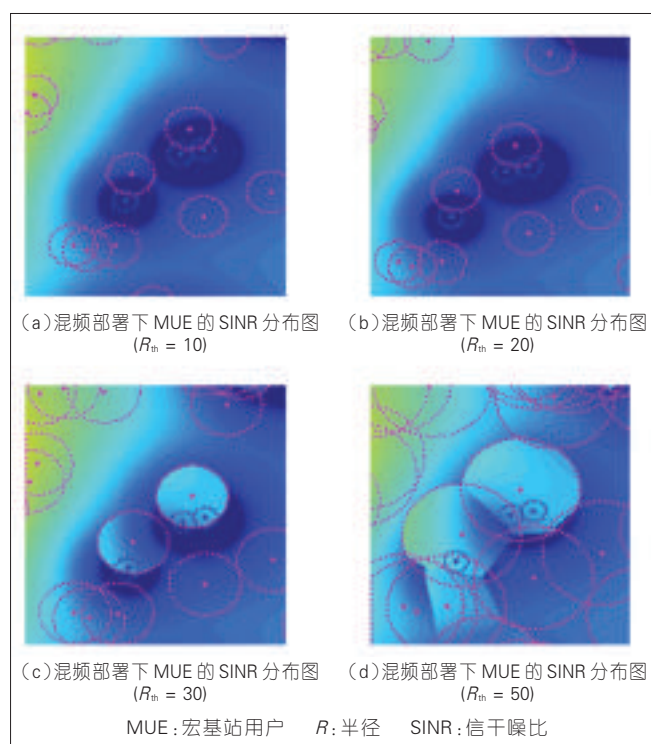


图3 随宏用户同频保护半径 R_{th} 的增加宏用户的信干噪比分布



密度下,不同区域位置下小基站用户信干噪比 SINR 分布图。随着小基站部署密度的增大,在小基站覆盖范围内的小基站用户信号质量得到提升。但随着小基站部署密度的急剧增高,小基站用户受到邻居小基站的同频干扰也将增大,导致自身 SINR 值下降。

通过合理的调整异频部署保护半径 R_{th} ,可以有效降低同频干扰并提高小基站用户的 SINR 值。如图 5 所示,随着 R_{th} 的增加,小基站用户的信号质量得到改善。通过对不同小基站部署密度下宏基站用户和小基站用户的 SINR 分布图的对比分析,得到如下结果:随着小基站部署密度的

增大,宏基站用户受到邻居小基站较大的同频干扰,尤其在小基站部署密度较大时宏用户 SINR 下降较为明显,而小基站用户的 SINR 随着小基站部署密度的增大逐步增大。因此,在层叠网络部署时,需要综合考虑小基站部署密度对提高小基站用户 SINR 有利影响,同时也需要考虑由于小基站密集部署的跨层干扰导致宏基站用户 SINR 降低的不利因素。

4.3 混频部署中网络总容量分析

针对密集小基站网络中混频自部署方案,随着小基站部署密度的增加,由于宏基站用户受到大量邻近小基站同频干扰,信干噪比 SINR 下降,导致宏基站网络容量呈现降低趋势。随着宏基站用户部署密度的增加,宏基站网络的容量呈现增长趋势,如图 6 所示。层叠网络的总容量随着小基站部署密度的增大呈现整体增加的趋势,主要因为小基站部署下室内容量的提升对层叠网络整体容量提升所带来的贡献。并且随着宏基站用户部署密度的增加,层叠网络的容量呈现增长趋势。

此外,处于宏基站外环区域的宏用户通过调整异频部署保护半径 R_{th} ,邻近小基站采用异频部署方案可以降低对宏用户的同频干扰,提升信干噪比 SINR 值,达到提高宏蜂窝基站网络和家庭基站网络下行总容量的目标,如图 7 所示。

总之,在混频部署中通过合理的控制小基站部署密度和宏用户的异频保护半径 R_{th} ,可以有效的降低宏基站用户和小基站用户之间的同频干扰,实现提高信干噪比 SINR 值、频率资源利用效率和网络容量的目标。

5 结束语

本文针对密集小基站层叠网络,提出了小基站网络混频自部署方案及关键技术。通过理论建模和数学分析相结合的方法,对采用混频部署方案的层叠网络下行容量关键影响

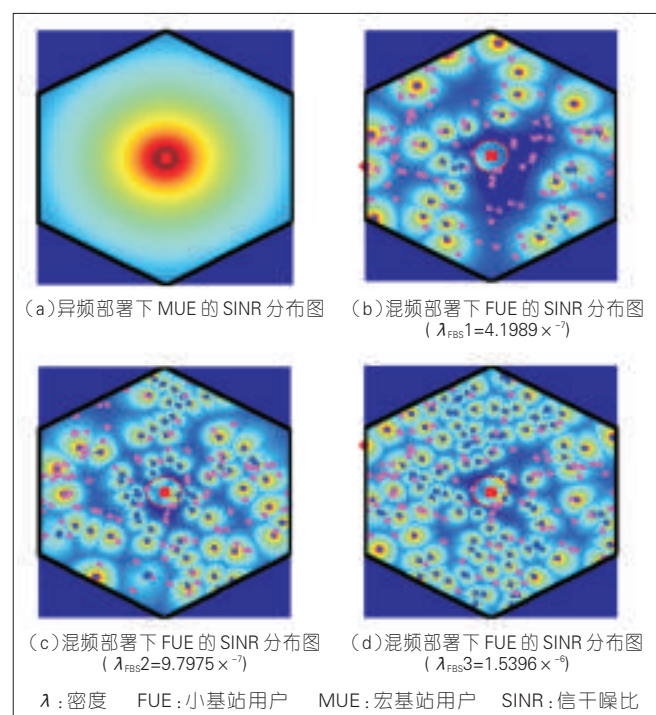


图4
不同小基站部署密度下小基站用户的信干噪比分布

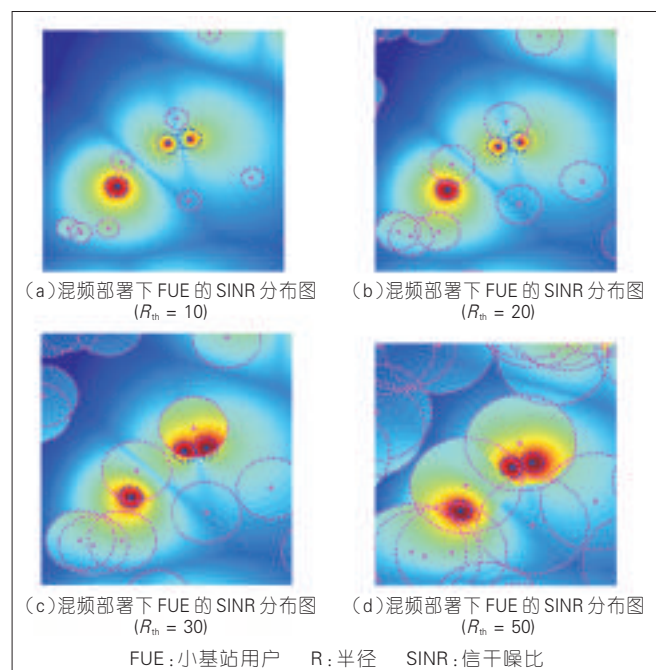
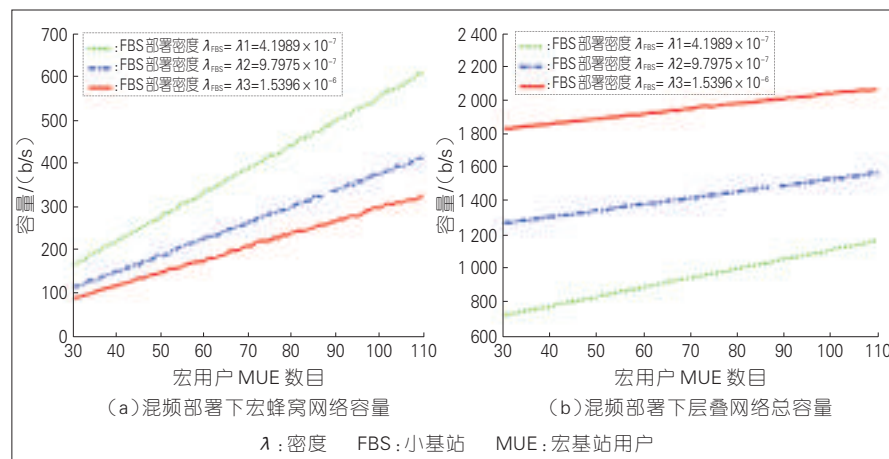
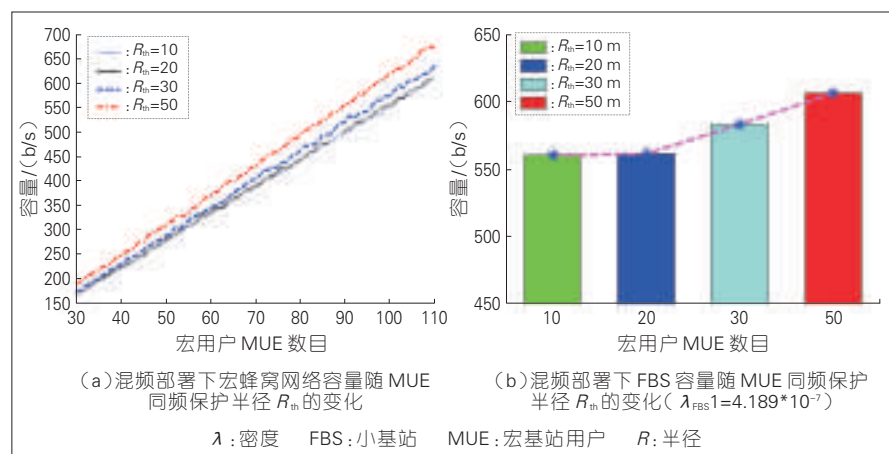


图5
随宏用户同频保护半径 R_{th} 的增加小基站用户的信干噪比分布



▲图6 宏基站网络容量和层叠网络总容量随小基站部署密度和宏用户部署密度的变化曲线



▲图7 宏基站网络容量和小基站网络容量随异频保护半径 R_m 增加的变化曲线

因素进行定量分析,并给出层叠网络下行容量的闭式表达式。设计了具有容量提升和干扰抑制特点的小基站混频自部署方案。并通过仿真和数据分析,获得了小基站部署密度、宏基站用户密度和层叠网络频率资源等参数变化情况下,层叠网络信噪比分布情况和网络下行容量的变化趋势,验证了本文所提出的密集小基站层叠网络中混频自部署方案对网络容量提升的有效性和正确性。本文的结果将对层叠网络中密集小基站的实际部署和频率分配策略的制订提供理论依据和设计指导。

参考文献

- [1] MANSFIELD G. Femtocells in the US Market—Business Drivers and Consumer Propositions [C]//Proceedings of the

Femtocells Europe, ATT, London, U.K., June 2008

- [2] BHUSHAN N, LI J Y, MALLADI D, GILMORE R. Network Densification: The Dominant Theme for Wireless Evolution into 5G [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 82–89
- [3] ZHANG J, de la ROCHE G. Femtocells: Technologies and Deployment [R]. John Wiley & Sons Ltd, 2010:1–13
- [4] CHANDRASEKHAR V, ANDREWS J G, GATHERER A. Femtocell Network: A Survey [J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 36(9):59–67
- [5] XIA P, CHANDRASEKHAR V, ANDREWS J G. Femtocell Access Control in the TDMA/OFDMA Uplink [C]//Proceedings of the IEEE Globecom, December 2010
- [6] XIA P, CHANDRASEKHAR V, ANDREWS J G. Open vs. Closed Access Femtocells in the Uplink [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(12):3798–3809
- [7] GALINDO-SERRANO A, GUIPPONI L, DOHLER M. Cognition and Decision in OFDMA-Based Femtocell Networks [C]//Proceedings of the IEEE Globecom, 2010
- [8] LI Y, MACUHLA M, SOUSA E S, et al.

Cognitive interference management in 3G femtocells [C]//Proceedings of the IEEE PIMRC, 2009

- [9] CHANDRASEKHAR V, ANDREWS J G. Spectrum Allocation in Tiered Cellular Networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(10):3059–3068
- [10] CHENG S M, AO W C, CHEN K C. Downlink Capacity of Two-tier Cognitive Femto Networks [C]//Proceedings of the IEEE PIMRC, 2010
- [11] GUVENC I, JEONG M R, WATANABE F, et al. A Hybrid Frequency Assignment for Femtocells and Coverage Area Analysis for Co-Channel Operation [J]. IEEE Commun. Letters, 2008, 12(12):880–882
- [12] LOPEZ-PEREZ D, VALCARCE A, de la ROCHE G, ZHANG J. OFDMA Femtocells: A Roadmap on Interference Avoidance [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(9):41–48
- [13] LOPEZ-PEREZ D, LADANYI A, JUTTNER A, et al. OFDMA femtocells: A self-organizing approach for frequency assignment [C]//Proceedings of the IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Symposium (PIMRC), Tokyo, Japan, Sept., 2009
- [14] FENG Z Y, LIANG L, TAN L, ZHANG P. Q-learning based heterogeneous network self-optimization for reconfigurable network with CPC assistance [J]. Science in China Series F: Information Science, 2009, 53(12):2360–2368
- [15] 3GPP TR 36.814 V9.0.0. 3GPP TSG RAN (E-UTRA): Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9) [S]. 3GPP, 2010

作者简介



张奇勋, 北京邮电大学信息与通信工程学院讲师; 主要研究方向为认知无线网络、异构网络融合、密集部署网络、无线网络虚拟化关键技术等; 已发表学术论文 40 余篇(其中 9 篇被 SCI 检索), 合作出版著作 2 部。



冯志勇, 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室主任、教授、博士生导师, 北斗系统频率组专家; 主要研究方向为认知无线网络、动态频谱、异构网络资源管理、异构网络融合及跨层设计、无线网络虚拟化架构与关键技术等; 已发表学术论文 100 余篇(其中 30 余篇被 SCI 检索), 出版著作 3 部。



杨拓, 北京邮电大学信息与通信工程学院在读硕士研究生; 主要研究方向为小型基站异构网络、认知中继网络等。

面向 MTC 应用的计算资源柔性分配

MTC Application-Oriented Computing Resource Allocation

侯延昭/HOU Yanzhao

曹世伟/CAO Shiwei

陶小峰/TAO Xiaofeng

(北京邮电大学, 北京 100876)

(Beijing University of Posts and

Telecommunications, Beijing 100876, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 01-0024-005

摘要: 基于机器类通信(MTC)业务的速率需求和计算需求,研究了对移动通信网络计算资源分配方法,给出了计算资源分配模型,提出了一种基于组合优化的计算资源分配算法来解决计算资源受限的问题。仿真结果表明提出的次优化算法与传统的轮询方式相比可以获得约 10% 的增益。

关键词: 机器类通信; 软基站; 计算资源分配; 组合优化

Abstract: A computing resource allocation scheme based on our proposed computing resource model meets the demands of wireless data rate and signal processing. In the proposed scheme, a combinatorial optimization method is used to improve the usage of computing resources. Simulation results show a gain of 10% using our proposed sub-optimal scheme compared to traditional Round-Robin scheduling.

Key words: MTC; soft base station; computing resource allocation; combinatorial optimization

机器类通信(MTC)是指利用自动控制及网络通信等技术,在没有人干预的情况下实现机器与机器之间自主数据通信与信息交互的一系列技术或技术组合的总称^[1]。它为不同类型的终端设备建立实时通信连接并进行数据传输提供了一种有效的途径。据预测,截至 2020 年, MTC 连接设备数将超过 50 亿个,且应用场景和业务类型更加多元化和差异化^[2]。这都给移动网络在计算和处理方面带来了较大的挑战。另一方面,未来 5G 网络将是一张多制式多场景共存的异构通信网络,基于高性能通用处理器的软基站(GPP-SBS)^[3]拥有更强的可编程性、更小巧、更廉价,成为一种典型的基站类型,将广泛部署于 5G 网络中。GPP-SBS 中所有的数字信号计算与处理均通过多核 CPU(GPP)来实现,但其处理能力是有限的,尤其在面向大量 MTC 广泛存在的移动网络中,计算逐渐成为制约移动网络性能的“瓶颈”。

收稿日期: 2014-11-06

网络出版时间: 2015-01-02

基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2014AA01A701); 国家自然科学基金杰出青年基金(61325006)

在传统的移动通信系统中,无线资源的管理主要指对时间、频率、功率等的分配和调度^[4-6],并将计算资源纳入资源管理的维度。因而通过对通信系统中的计算资源进行有效的分配和管理以降低计算资源对系统性能的约束变得愈发重要和迫切。目前,对于计算资源的管理在计算机网络领域已有大量的研究,例如文献[7-10]提出了虚拟资源在云计算中的分配。在文献[7]中用混合整数规划问题来描述最优云网络映射问题并采用一种启发式的方法来解决该问题。文献[8]中列出了云计算中的多种资源分配算法,例如优化资源调度算法、基于市场的资源分配策略(RAS-M)、控制拥塞的公平资源分配等等。但在无线通信中对于计算资源管理的研究目前却十分有限。文献[11-13]提出了软件定义无线电(SDR)平台中的计算资源管理方案:

文献[11]中提出了一种基于处理能力和设备间互通能力的资源模型,并给出了信号处理过程与处理设备间的映射算法;文献[12]中提出了一种根据成本函数和无线场景调整的动态映射算法。在文献[11-13]中,计算资源的管理与分配都是基于不同通信标准的信号处理功能模块进行的。然而随着现代通信的发展,用户业务种类越来越多,不同业务对于处理资源的需求也有很大的差别,面向业务导向的无线资源管理愈发重要。

本文提出了一种基于不同 MTC 业务特性的计算资源分配方案:通过对 GPP-SBS 中的计算资源与业务速率做出映射,并根据不同业务的速率对计算资源进行分配,以达到最大化计算资源利用率的目的。本文组织如下,第 1 部分给出了计算资源与数据速率的映射关系,建立了计算资源分配模型。第 2 部分给出了计算资

源分配的数学表达并给出了基于组合数学的具体算法。第3部分给出了该算法的性能仿真分析,最后进行了总结。

1 计算资源建模

在本文所述的软基站中,所有无线通信的数据处理均由高性能通用处理器(即多核 CPU)完成。要对高性能通用处理器的计算资源(处理能力)进行合理的分配,首先需要找到计算能力与传统通信的传输能力的映射关系。通常高性能通用处理器的计算资源或者计算能力用单位 MIPS 来衡量,而传统通信的传输能力由单位 Mb/s 来度量。在本节中给出 MIPS 和 Mb/s 的映射关系,以便于我们根据不同的业务速率需求来分配计算资源。

在 GPP-SBS 中,对于不同的处理器,不同的通信系统原型及不同的处理算法与代码,实际中 MIPS 与 Mb/s 的对应关系都是有所不同的。但是对于一个确定的软基站系统, MIPS 与 Mb/s 的映射是确定的。

MIPS 与 Mb/s 的映射模型如图 1 所示。假设软基站(SBS)在 t_1 时间内接收到 α 比特数据,并且完全处理这些数据用了 t_2 时间并花费了 β 条指令。

这里,我们给出该模型所示映射的数学表达式:

$$Mbps = \frac{\alpha/t_1}{\beta/t_2} \times MIPS \quad (1)$$

计算资源块(CRB)通过上式来定义。SBS 总的计算处理能力是 I MIPS,由式(1)可得总的计算资源时 C Mb/s。若在 SBS 中有 N 条可调度分配的线程,每条线程定义为一个计算资源块(CRB),则有 N 个 CRB 对应 N 条线程。

在本文中,计算资源的分配是基于不同业务的业务速率需求的。通过上文中的定义,GPP 基于 SBS 中的计算资源分配可以描述为将 N 个

CRB 分配给 M 个业务。计算资源分配模型如图 2 所示,其中, a_i (Mb/s) 是 CRB 的处理能力, R_k 业务 k 的数据速率要求。

2 计算资源分配算法

计算资源分配的目的是满足业务速率需求条件下最大化计算资源利用率。我们首先为单个业务分配计算资源的算法,进而给出了多业务的计算资源分配算法。

2.1 单业务的分配算法

首先,我们定义业务 k 的计算资源利用率为:

$$\eta_k = \frac{R_k}{\sum_{j=1}^{N_k} a_j} \quad (2)$$

其中:

$$a_j \in \Omega_k \quad (j=1,2,\dots,N_k)$$

$$\sum_{j=1}^{N_k} a_j \geq R_k$$

这里 R_k (Mb/s) 是业务 k 的数据速率, a_i (Mb/s) 是 CRB j 的处理能

力, Ω_k 是分配给业务 k 的 CRB 集合, N_k 是分配给业务 k 的 CRB 数目。

设 Ω 是所有可分配 CRB 的集合, Ω_k 是分配给业务 k 的 CRB 集合,使得 η_k 最大。为单个业务分配计算资源的问题可以用组合优化问题 Q 描述:

$$Q = \langle \mathbf{I}, \Omega_k, \mathbf{Y}, \mathbf{F}, opt \rangle \quad (3)$$

其中:

$$\mathbf{I} = \{a_1, a_2, \dots, a_N; R_k\}$$

$$\Omega_k = \{a_i | i=1, 2, \dots, N\}$$

$$\mathbf{Y} = \{y = a_j | j=1, 2, \dots, N_k; \sum_{j=1}^{N_k} a_j \geq R_k\}$$

$$\mathbf{F} = \eta_k$$

$$opt = \max$$

这里 \mathbf{I} 是问题 Q 的输入数据集; Ω_k 是可行解元素的集合; \mathbf{Y} 是可行解集合; \mathbf{F} 是所有可行解的目标函数;而 opt 表示问题 Q 是一个最大化问题。

上面的问题并不复杂,包含的离散数据并不多,通过组合优化中的全搜索方法可以获得最优解^[14-15]。算法描述如下:

图 1 ▶
MIPS 与 Mb/s 的映射模型

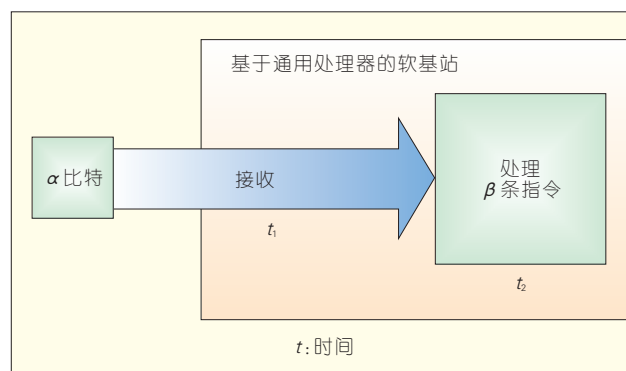
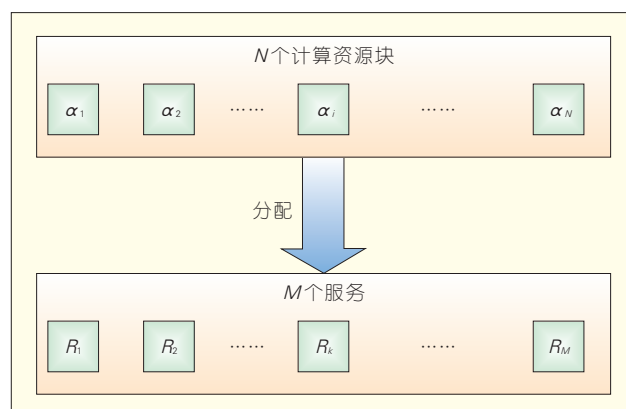


图 2 ▶
计算资源分配模型



算法一：为单个业务 k 分配 CRB

算法

算法一：

1. 初始化: $\eta_k = 0$, R_k , $\Omega_k = \{a_i | i = 1, 2, \dots, N\}$, $q = 0$, 解集合 $Ans = \{0\}$
2. $q = q + 1$: 任取 q 个元素相加构成新元素 A_i , 所有新元素升序排列组成集合:

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_{N_q}\}, \text{其中 } N_q = C_N^q$$

3. i 从 1 到 N_q 开始搜索, 如果找到满足: $\{A_i | A_{i-1} < R_k < A_i\}$ 则转至 4

若未找到且 $q < N$, 则转至 2; 未找到且 $q = N$, 则转至 5

4. 得到最优解 A_i , 即构成 A_i 的所有初始元素为最优解集:

$$Ans = \{a_i | j = 1, 2, \dots, N_k\}$$

由(1)得 $F = \eta_k$ 满足 $opt = \max$; 分配结束

5. 无可行解, 分配结束

2.2 多业务的次优化分配

上述算法描述了为单个业务分配计算资源。

当有 M 个业务同时到达时, 我们需要全面的考虑 M 个业务来分配计算资源。首先我们定义为 M 个业务分配 CRB 的计算资源利用率。为 M 个业务分配 CRB 的计算资源利用率如下:

$$\eta = \frac{\sum_{k=1}^K R_k}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N_i} a_i} \quad (4)$$

其中:

$$a_i \in \Omega_k \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

$$\sum_{i=1}^{N_i} a_i \geq R_k$$

这里 R_k , k 从 1 到 K , 是已获得计算资源分配的业务。其次优化算法是最优化的算法的一种情况。由于 CRB 间的处理能力差别不大, 所以次优解可以通过为 M 个业务的一种排列做分配来得到。与此同时, 考虑到 M 个业务的优先级, 我们只需要按照业务优先级的降序为业务分配 CRB 即可。

这里, 集合 $\mathbf{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_M\}$ 是 M 个业务按优先级排列的数据速率; Ans_k 是业务 k 的解集合。算法可描述如下:

算法二: M 个业务的次优化算法

算法二:

1. 初始化: $\mathbf{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_M\}$, $\Omega = \{a_i | i = 1, 2, \dots, N\}$; $Ans = \{Ans_1, Ans_2, \dots, Ans_M\}$

$$Ans_k = 0; k = 0.$$

2. $k = k + 1$; $q = 0$; 更新可用 CRB 集合 $\Omega = \Omega - Ans_k$

3. $q = q + 1$; Ω 中任取 q 个元素相加构成新元素 A_i , 所有新元素升序

$$\text{排列组成集合: } \mathbf{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_{N_q}\}, \text{其中 } N_q = C_N^q$$

4. i 从 1 到 N_q 开始搜索, 如果找到满足: $\{A_i | A_{i-1} < R_k < A_i\}$ 则转至 5

若未找到且 $q < N$, 则转至 3; 未找到且 $q = N$, 则转至 6

5. 构成 A_i 的所有初始元素为业务 k 的最优解集, 更新 $Ans_k = \{a_i | j = 1, 2, \dots, N_k\}$

更新 Ans , $\mathbf{R} = \mathbf{R} - \{R_k\}$, $\Omega = \Omega - Ans_k$; 如果 $\Omega = \emptyset$, 则转至 7; 否则,

如果 $k < M$ 则转至 2; 如果 $k = M$ 则转至 8

6. k 业务无可行解。如果 $\Omega = \emptyset$ 则转至 7; 否则如果 $k < M$ 则转至 3; $k = M$ 转至 8

7. 无可行 CRB, 未分配给业务集合为 \mathbf{R} , 解集合为 Ans , 结束

8. 解集合为 Ans , 结束

分配结束之后, 未分配业务进入排队序列并提升下一次分配的优先级。

2.3 多业务的最优化分配

由于次优化算法是最优化算法的一种情况, 所以我们可以上文的次优化算法的基础上用全搜索比较

容易的得到最优解。

为了得到最优解, 我们对 M 个业务做全搜索。 M 个业务的所有排列数是 $M!$ 。

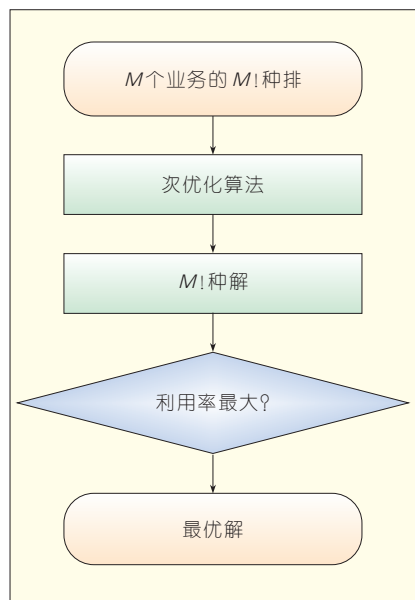
我们需要顺序的对 $M!$ 种排列做 $M!$ 次上文的次优化算法, 然后比较所得到的 $M!$ 个计算资源利用率, 最大的利用率就对应最优解, 其流程如图 3 所示:

但是最优化算法的复杂度较高。当对 M 个业务做分配时, 其算法复杂度是次优化算法的 $M!$ 倍。例如, 当仅对 10 个业务同时分配时, 最优化算法的复杂度就是次优化算法的 3 628 800 倍了。可以看到在分配多业务时最优化算法的复杂度是十分高的。而且从第 3 章节的仿真可以看出次优化算法和最优化算法的

性能差别并不大。

3 仿真结果

在本章节, 我们对上文提出的算法做了数值仿真分析, 重点是对次优化算法的仿真分析。接着我们通过仿真比较了次优化算法和无算法的 CRB 顺序分配之间的计算资源利用



▲ 图3 最优化算法流程

率。我们仿真了 M 个业务同时到达而 CRB 数目不同情况下的计算资源利用率。具体参数如表 1 所示：

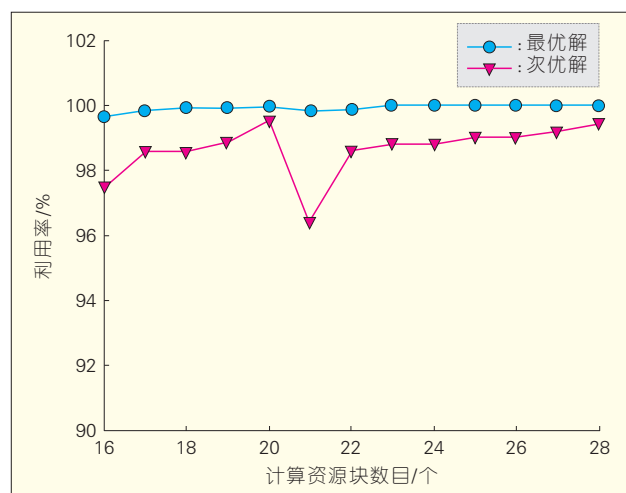
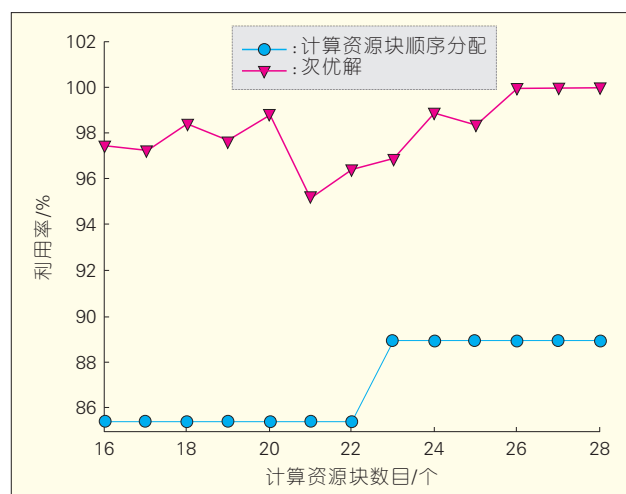
仿真结果如图 4 和图 5 所示。

图 4 所示为基于最优化算法和次优化算法的计算资源利用率。当可用 CRB 数目为 16 到 20 时，最优化算法和次优化算法均由一个业务无可行解。可以看到当计算资源不足时计算资源的利用率是不稳定的。当 CRB 数目超过 21 后，所有的业务均由可行解。这种情况下，次优化算法的利用率稳定增加且越来越接近最优化算法，而且在计算资源充足的情况下分配算法的计算资源利用率接近 100%。总的来说，最优化算法和次优化算法的计算资源利用率都达到比较高的值，并且二者之间的差别不大。

图 5 所示为基于次优化算法和 CRB 顺序分配的计算资源利用率比较。当 CRB 数目为 16 到 20 时次优化算法和 CRB 顺序分配均由一个业务无可行解，但是 CRB 数目为 21 到 22 时，CRB 顺序分配任然有一个业务无可行解。且 CRB 顺序分配的计算资源利用率在有新的业务被分配之前都是不变的。从图 5 我们可见次优

▼ 表 1 仿真参数

参数	设置
待分配业务集合 R	{100, 150, 200, 250, 300}
初始可用 CRB 集合 Ω	$\{a_i = \text{random}('Uniform', 35, 65) i = 1, 2, \dots, 16\}$

图 4 ▼
最优化和次优化算法的
计算资源利用率图 5 ▼
次优化算法与 CRB 顺序
分配的计算资源利用率

化算法对计算资源利用率的提升十分明显。

利用率。

4 结束语

本文提出了 GPP-SBS 下面向不同 MTC 业务需求的计算资源分配模型，给出了分配模型的数学表达式并提出了基于组合优化的计算资源分配算法，其中主要描述了具有较低复杂度的次优化算法。通过仿真和对比分析，次优化分配算法可以在较低的计算复杂度下达到高的计算资源

参考文献

- [1] 简鑫, 曾孝平, 贾云健, 等. 机器类通信流量建模与过载控制 [J]. 通信学报, 2013, 34(9):123-131
- [2] 石华宇, 唐伦, 陈前斌. 3GPP R12 MTC 终端功耗优化研究进展 [J]. 电讯技术, 2013, 53(12): 1659-1666
- [3] TAO X F, HOU Y H, HE H Y, WANG K D, XU Y Y. GPP-based soft base station designing and optimization (invited paper) [C]// Proceedings of the Communications and Networking in China (CHINACOM), 2012 7th International ICST Conference on, 8-10 Aug., 2012: 49-53
- [4] RHEE W, CIOFFI J M. Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic

- subchannel allocation [C]//Proceedings of the Vehicular Technology Conference Proceedings, 2000. VTC 2000—Spring Tokyo. 2000 IEEE 51st, 2000,2:1085–1089
- [5] SHEN Z K, ANDREWS J G., EVANS B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints [J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 2005,4(6): 2726–2737
- [6] GUAN N, ZHOU Y Q, TIAN L, SUN G, SHI J L. QoS guaranteed resource block allocation algorithm for LTE systems [C]//Proceedings of the Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2011 IEEE 7th International Conference on, 10–12 Oct., 2011:307–312
- [7] PAPAGIANNI C, LEIVADEAS A, PAPAVALASSIOU S, MAGLARIS V, CERVELLO-PASTOR C, MONJE A. On the optimal allocation of virtual resources in cloud computing networks [J]. Computers, IEEE Transactions on, 2013,62(6): 1060–1071
- [8] MOHAN N R.R, RAJ E B. Resource Allocation Techniques in Cloud Computing -- Research Challenges for Applications [C]//Proceedings of the Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), 2012 Fourth International Conference on, 3–5 Nov., 2012:556–560
- [9] WANG E D, WU N, LI X. QoS-Oriented Monitoring Model of Cloud Computing Resources Availability [C]//Proceedings of the

- Computational and Information Sciences (ICCIS), 2013 Fifth International Conference on, 21–23 June, 2013:1537–1540
- [10] HE B, HEINZELMAN W, JANSSEN C A, SHI J Y. Mobile computing – A green computing resource [C]//Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2013 IEEE, 7–10 April, 2013:4451–4456
- [11] MAROJEVIC V, REVES X, GELONCH A. Computing Resource Management for SDR Platforms [C]//Proceedings of the Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005. PIMRC 2005. IEEE 16th International Symposium on, 11–14 Sept., 2005:685–689
- [12] MAROJEVIC V, BALLESTE X R, GELONCH A. A Computing Resource Management Framework for Software-Defined Radios [J]. Computers, IEEE Transactions on, 2008, 57(10): 1399–1412
- [13] WANG L, CHEN S. System Resource Allocation of TD-SCDMA Terminal Based on SDR Platforms [C]//Proceedings of the Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2010 6th International Conference on, 23–25 Sept., 2010:1–4
- [14] DAVID P. Algorithm for Knapsack Problem [D]. Denmark: University of Copenhagen, 1995
- [15] DAVID P. A Fast Algorithm for Strongly Correlated Knapsack Problem [J]. Discrete applied mathematics, 1998,89(1):197–212

作者简介



侯延昭, 北京邮电大学信息与通信工程学院讲师; 从事软件无线电技术、无线资源管理等方面的研究; 已发表SCI论文3篇、EI论文3篇。



曹世伟, 北京邮电大学信息与通信工程学院在读硕士研究生; 研究方向集中于未来无线网络架构和资源管理技术。



陶小峰, 北京邮电大学教授, IET Fellow, 移动互联网安全国家工程实验室主任; 从事无线通信组网理论、协作通信及压缩感知技术等方面的研究; 已发表SCI论文38篇。

←上接第12页

- www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/whitepaper11-520862.html
- [2] HWANG I, SONG B Y, SOLIMAN S S. A Holistic View on Hyper-Dense Heterogeneous And Small Cell Networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2013,51(6): 20–27
- [3] IMT-2020. IMT-2020 (5G) PG-White Paper on 5g Vision And Requirements_V1.[R]. IMT-2020, 2013
- [4] SAKER L, ELAYOUBI S E, SCHECK H O. System Selection and Sleep Mode for Energy Saving in Cooperative 2G/3G Networks [C]//Proceedings of the Vehicular Technology Conference Fall(VTC 2009–Fall), 2009: 1–5
- [5] 张武雄, 胡宏林, 杨旸. 基于协同覆盖的绿色无线网络技术 [J]. 中兴通讯技术, 2010, 16(6): 4–7
- [6] JEFFREY G A, STEFANO B, WAN C, STEPHEN V H, ANGEL L, ANTHONY C K S, ZHANG J Z C. What Will 5G Be? [J]. IEEE J. Sel. Areas Commun., 2014,32(6):2301–2309
- [7] KELLEY H H. Personal relationships: Their structures and processes [M]. Psychology Press, 2013
- [8] PAN R, OCHI M, MATSUO Y. Discovering behavior patterns from social data for managing personal life [C]//Proceedings of the 2013 AAAI Spring Symposium Series, 2013
- [9] LU L, ZHOU T. Link prediction in complex networks: A survey [J]. Physica A: Statistical

mechanics and its applications, 2010,390(6): 1150–1170

- [10] ZHU X, TIAN H, HU Z, LIU H. Self-adaptive optimized link prediction based on weak ties theory in unweighted network [C]// Proceedings of the Social Computing (SocialCom), 2013 International Conference on, IEEE 2013:896–900.
- [11] ZHU X, TIAN H, CAI S, HUANG J, ZHOU T. Predicting missing links via significant paths [J]. EPL (Europhysics Letters), 2014,106(1): 18008
- [12] ZHU X, TIAN Y, TIAN H. Link Prediction in Complex Network via Penalizing Noncontribution Relations of Endpoints, Mathematical Problems in Engineering [J]. EPL (Europhysics Letters), 2014,106(8): 18568
- [13] ZHU X, TIAN H, CAI S. Predicting missing links via effective paths [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014,36(5):515
- [14] CHO E, MYERS S A, LESKOVEC J. Friendship and mobility: user movement in location-based social networks [C]// Proceedings of the 17th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. ACM, 2011: 1082–1090
- [15] FAN S S, TIAN H, SENGUL C. Self-optimization of coverage and capacity based on a fuzzy neural network with cooperative reinforcement learning [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014, 2014(1):1–14

作者简介



刘自强, 北京邮电大学在读硕士研究生; 主要研究领域包括无线自组网、M2M、MIMO信道建模等; 已发表SCI/EI检索学术论文5篇。



任晨珊, 北京邮电大学在读博士研究生; 主要从事无线异构网络密集小区的负载均衡技术及协作传输技术方面的研究。



田辉, 北京邮电大学教授、博士生导师, 网络与交换技术国家重点实验室网络信息处理研究中心主任, 无线通信测试技术北京市重点实验室学术委员会委员; 长期从事先进移动通信系统及无线网络技术研究与实践; 已主持和参加了基金项目20余项; 已发表SCI/EI检索学术论文90余篇, 出版著作9部。

高密度异构小基站立体网络的多向中继技术

Multi-Way Relaying Techniques for Very Dense Heterogeneous 3D Small Cell RAN

杨延平/YANG Yanping^{1,2}
陈巍/CHEN Wei¹
李鸥/LI Ou²

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100048;
2. 解放军信息工程大学信息工程学院, 河南 郑州 450002)

(1. Department of Electronic Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100048, China;
2. College of Information Engineering, PLA
of Information Engineering University,
Zhengzhou 450002, China)

移动通信飞速发展深刻地改变了人们的生活方式和工作方式,成为信息化网络中最为重要的纽带之一。然而,用户密集化、业务海量化的数据需求^[1]激增与移动通信日益稀缺的频谱资源之间的矛盾成为未来移动通信发展的机遇和挑战。密集立体覆盖^[2],作为适应于未来“立体化城市”、“海量信息”、“智能化认知”、“多层次协同”的无线网络演进新构架,有望利用“平面之外的第三个维度”实现全新的频谱复用方式,大幅度提升移动通信网络的频谱效率。本文依托城市密集立体化的发展趋势,着眼于典型的高层建筑内部高密度异构小基站通信,研究基于多向中继的自组织无线网络传输技术,系统模型如图1所示。

收稿日期: 2014-11-05

网络出版时间: 2014-12-16

基金项目: 国家重点基础研究发展
计划(“973”计划(2013CB336600、
2012CB316000); 国家自然科学基金
(61201380))

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868(2015) 01-0029-005

摘要: 研究了室内密集立体覆盖非对称、多向中继自组织网络中利用节点先验信息,在中继端联合信道编码、网络编码、自适应调制等技术进行干扰消除的传输方案。重点针对单中继两用户互传、单中继多对用户互传模型的下行信道,分别提出了自适应-网络编码调制、信道编码-网络编码2种联合设计方案。具体分别提出了变功率-速率自适应网络编码相移键控调制(NC-PSK)方案和联合网络-脏纸编码方案,并推导出2种方案下行广播信道可达速率的闭式解。仿真结果表明2种方案能够提高中继网络的频谱利用率,同时有效对抗信道衰落和干扰。

关键词: 密集立体覆盖; 多向中继技术; 网络编码调制; 自适应调制; 信道编码; 脏纸编码

Abstract: In this paper, we investigate interference elimination transmission schemes for asymmetric, multi-way relaying of the 3-dimensional dense coverage self-organized network, relying on the combination of channel coding, network coding, adaptive modulation techniques with a priori knowledge at the relay node. We propose two transmission designs for the downlink of two-user Two-way Relay Channel and Pairwise-users Multi-way Relay Channel, based on the combination of the Adaptive Modulation/Channel Coding and Network Coding Technique. We also proposed a variable-power and rate-adaptive NC-PSK scheme and Joint Network Coding-Dirty Paper Coding scheme. We further derive the closed-form solutions for the achievable rate of the two broadcast channels. Simulation results show that our proposed schemes increase spectral efficiency, effectively handle channel fading and interference.

Keywords: 3-dimensional dense coverage; multi-way relay techniques; network-coded modulation; adaptive modulation; channel coding; dirty-paper coding

基于高层建筑室内密集立体覆盖的高密度异构多向中继场景,其通信特点为:

(1) 室内通信业务呈现多样性,无线异构自组织网络面向不同应用场景和目标用户。

(2) 同一建筑内部用户的共性信息需求导致了大量数据的室内共享,用户拥有先验信息,但本地业务多样

的路由状态导致用户先验信息不对称,而传统对传场景不适用。

(3) 高层建筑室内通信各用户遮挡情况不同,导致各链路信噪比迥异,传统对称情景不适用。

(4) 需阐明非对称、单中继多向传输情况下基于节点先验信息的干扰消除方法。

根据高层室内的通信特点,研究

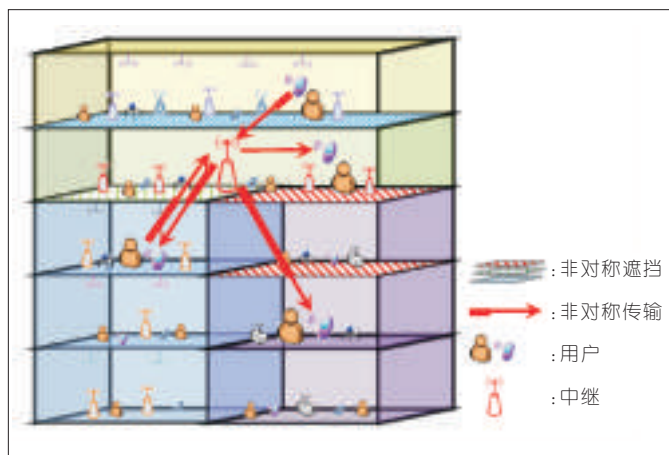


图1
高层建筑室内通信
高密度异构小基站
网络

异构小基站立体自组织网络下多向中继技术,实现干扰消除和提高频谱利用率,其核心难点在于:

(1)逼近非对称容量的传输策略如何实现。

(2)对多个时变信道如何最佳自适应耦合的功率和速率。

(3)成对、非成对先验信息下如何逼近容量域。

根据构建模型的通信特点及研究问题的核心难点,本文拟初步研究密集立体覆盖移动通信中,围绕高层建筑室内通信的静态信道建模和动态信道建模,研究高密度异构小基站立体自组织网络的多向中继技术。通过探索在中继小基站进行网络编码、信道编码、自适应调制以及多种技术的联合设计,实现立体交互的先验干扰消除,同时提高中继信道传输的频谱利用率。本文提出两点突破方向:

(1)联合设计网络编码和调制,以功率速率优化遍历容量加权和。

(2)针对成对用户互传先验信息已知场景的干扰消除,创新编译码构架以逼近信道容量。

综上所述,本文在引言部分阐明了多用户先验干扰消除技术的若干挑战及可能的应对方法。第1章节研究中继端网络编码、信道编码、自适应调制技术以及它们的联合设计等若干问题。第2章节将从两用户双向中继场景入手,重点研究自适应

调制和网络编码调制的联合设计,提出了变功率-速率自适应网络编码相移键控调制(NC-PSK)方案。第3章节进一步扩展两用户到多对用户信息交换场景,提出了联合网络-脏纸编码(JNDPC)技术,进一步提高下行信道容量。

1 室内密集覆盖网络多向中继通信传输技术

本章节分别研究无线多向中继的物理层网络编码技术、自适应调制技术和信道编码技术,以及这些技术的联合设计,是第2章、第3章节研究的理论依据。

1.1 物理层网络编码技术

无线中继网络的广播特性非常适合网络编码技术的应用。线性网络编码概念^[3-4]指出对组播网络中的某些节点附加编码处理能够使源与组播成员间达到最大流最小割的组播速率。网络编码的提出引发了一系列关于网络编码的研究^[5-11], Wu等最早研究将网络编码与物理层广播相结合^[5]; Wu和Xie等从信息论角度研究了非对称解码转发双向中继下行信道的容量^[5-6];从实际应用角度出发, Chen等研究了基于认知的网络编码^[7-8],阐明利用先验信息能够提高非对称中继的吞吐量; Chen等研究分区理论^[9]和解码转发双向中继(DF-TWR)编码方案^[11],提出了网络编码

调制(NCM)和基于网络编码的最大比合并方案^[9-10],在提高网络吞吐量的同时能够以低复杂度算法获得分集增益。此外, Chen等还提出了变功率恒定速率自适应网络编码调制方案^[9],这一方案启发我们进一步研究变功率变速率自适应-网络编码调制在衰落信道下传输方案的可行性和性能分析。

从集合分割思想出发,结合实际应用广泛的QAM和相移键控(PSK)调制, Chen等提出的NC-QAM/PSK能够最大化符号间的欧氏距离^[9],保证误码率的同时提高了网络吞吐量。解码-转发双向中继场景中, NC-QAM/PSK方案在发端对两路映射后的信号进行幅值(QAM调制取模1)或角度(PSK调制取模 2π)操作^[9],产生和信号经衰落信道广播至用户。在接收端,不同用户根据自身的先验信息旋转判决域(解模操作)解调出所需信息。网络编码调制及网络编码是第2章节和第3章节的理论基础。

1.2 自适应调制技术

自适应调制技术是一种典型的抗衰落技术^[12-17]。根据对信道预测的结果,在不牺牲误码率性能的前提下,根据无线通信环境和服务质量(QoS)要求,通过动态地改变发送端的发送功率、传输速率、编码方案等资源^[12-14],在较好的无线信道条件下分配较多的资源,而当无线信道质量下降时,相应地降低传输速率,最终达到提高系统资源利用率、获得较高的系统吞吐量的目的。

针对点对点单信道传输场景, A. Goldsmith在信息论意义上^[13]和误码率基础^[14]上,分别给出了连续速率连续功率方案可达速率的闭式解,并给出离散速率连续功率QAM方案的数值解。扩展至单中继多向传输场景,需要阐明如何调整功率速率来适应多链路信道衰落^[15-16]。研究以单基站多向中继通信的自适应调制需要考

虑以下几个问题:

(1)下行信道等效于用户(收端)已知先验信息情况的广播信道。

(2)发送端的发送功率需要适应多条信道的信道条件。

(3)多资源分配的自适应调制问题的复杂度随收端用户数的增加而急剧上升。

联合功率-速率自适应调制技术将作为第2章节的基础。

1.3 信道编码技术

信道编码技术是保证通信系统可靠性的有效方法。无线单中继协作通信系统中加入信道编码,虽然增加了中继节点的运算量,但可改善系统的纠错性能,从而有效抵抗无线信道时变性引起的信号衰落信道干扰的影响。

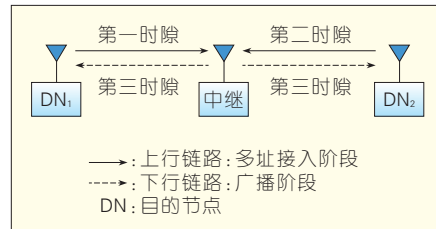
多向中继技术中信道编码方案选取灵活,系统的信道环境较好或者对系统实时性要求较高的情况下可以选用卷积码、TCM 等作编码方案;而信道环境较差时可以选择高性能信道编码技术如 Turbo、LDPC 等作为信道编码方案。

1.4 联合设计方案

单中继多向传输综合采用信道编码、网络编码、自适应调制技术的联合设计能够极大地提高网络性能。解码-转发中继协议由于在中继端先解码再编码转发,因此更适合单中继端联合多种技术进行设计。我们根据室内通信的两种具体场景将分别研究两种实际的多向中继协作通信方案:单中继双向信道联合功率速率自适应-网络编码调制、单中继多向成对用户信息互传联合网络-脏纸编码。

2 双向中继自适应网络编码调制技术

解码-转发双向中继系统模型如图2所示。假设中继端已正确接收并且解码上行信号,那么自适应-网



▲图2 解码-转发双向中继3时隙系统模型

络编码调制需研究下行广播信道的设计。

此系统模型中,两用户对传信息,第一、第二时隙(避免干扰)源节点分别将信号传至中继节点并解码;第三时隙中继节点完成信号处理,再编码后广播至目的节点(目的节点是第一、第二时隙的源节点)。目的节点接收到信号后通过自身已有的信息解调出需要信息^[9,17]。

2.1 联合自适应调制和网络编码调制

一种衰落信道联合功率-速率自适应网络编码调制的系统结构如图3所示。

图中, w_1, w_2 表示两路解码后待编码调制信息, $x[t]$ 表示调制待发送信号, t 是时刻参数, $\sqrt{g_1[t]}, \sqrt{g_2[t]}$ 表示功率增益, $n_1[t], n_2[t]$ 为高斯白噪声, \hat{w}_1, \hat{w}_2 表示用户端解调出的信号。

2.2 连续速率连续功率自适应

NC-PSK

基于误码率界,点对点变功率变

速率自适应 QAM^[14] 的频谱利用率有详细推导。同样基于误码率界和 PSK 实际调制技术,我们构建单中继双向通信下行信道,联合功率-速率自适应 NC-PSK 调制的优化问题表达如下:

$$\begin{aligned} \text{最大化: } \frac{R}{B} &= \int_0^{\infty} R[\gamma_1, \gamma_2, S(\gamma_1, \gamma_2)] p(\gamma_1) p(\gamma_2) d\gamma_1 d\gamma_2 \\ \text{约束: } \int_0^{\infty} S(\gamma_1, \gamma_2) p(\gamma_1) p(\gamma_2) d\gamma_1 d\gamma_2 &= \bar{S} \\ S(\gamma_1, \gamma_2) &\geq 0 \\ D &= \mathbb{R}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

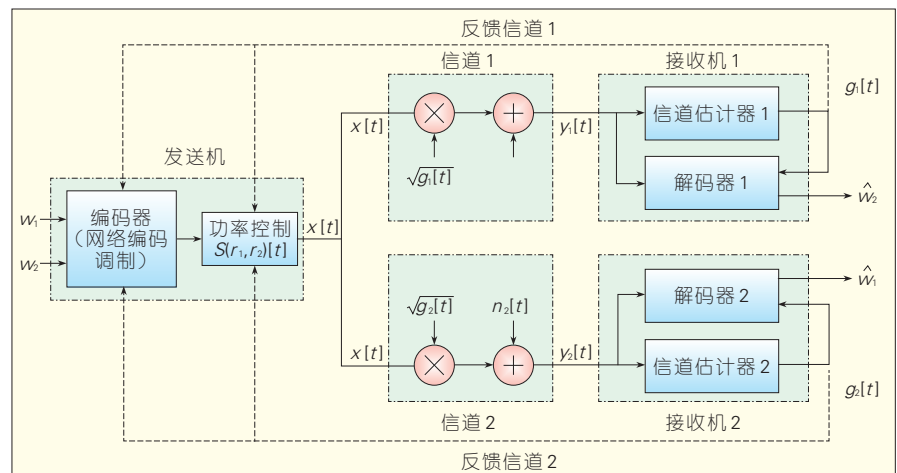
式中 $\gamma_i, i=1,2$ 为两信道信噪比, $p(\gamma_i)$ 表示衰落分布, $S(\gamma_1, \gamma_2)$ 表示发送端功率, R 表示数据总传输速率, B 表示传输带宽, \bar{S} 为平均功率约束。 $R[\gamma_1, \gamma_2, S(\gamma_1, \gamma_2)]$ 可以由公式(2)给出:

$$R[\gamma_1, \gamma_2, S(\gamma_1, \gamma_2)] = \sum_{i=1}^2 \frac{\omega_i}{c_i} \log_2 M_i(\gamma_i), i=1,2 \quad (2)$$

式中 ω_i 表示用户的权重系数, $M_i(\gamma_i)$ 表示星座调制阶数(速率)。此优化问题是凸优化问题,利用 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件求得连续功率连续速率自适应 NC-PSK 的功率分配策略闭式解^[17]为:

$$\frac{S(\gamma_1, \gamma_2)}{\bar{S}} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{c_4}{K_1 \gamma_1} + \frac{c_4}{K_2 \gamma_2} - \frac{1}{v' c_3 \ln 2} \right)^2 - \frac{4}{v' K_1 K_2 \gamma_1 \gamma_2} \left(v'^2 c_4^2 - \frac{\omega_1 c_1 K_1 \gamma_1 + \omega_2 c_2 K_2 \gamma_2}{c_3 \ln 2} \right) + \frac{1}{2v' c_3 \ln 2} - \frac{c_4}{2K_1 \gamma_1} - \frac{c_4}{2K_2 \gamma_2}, & v' < \frac{\omega_1 K_1 \gamma_1 + \omega_2 K_2 \gamma_2}{c_3 c_4 \ln 2} \\ 0, & v' \geq \frac{\omega_1 K_1 \gamma_1 + \omega_2 K_2 \gamma_2}{c_3 c_4 \ln 2} \end{cases} \quad (3)$$

式中 c_1, c_2, c_3, c_4 为 PSK 误码率界



▲图3 联合功率-速率自适应网络编码调制衰落信道模型

参数^[15], K_1, K_2 由误码率要求决定, v^* 为互补松弛条件。将公式(1)、(3) 带入公式(2)即得到连续速率-功率自适应 NC-PSK 方案的频谱利用率。

2.3 离散速率连续功率自适应

NC-PSK

考虑到上述方案应用于实际通信系统, 我们进一步提出连续速率离散化自适应 NC-PSK 方案。将 2.2 节连续星座阶数 $M_i(\gamma_i)$ 离散化得到 $M_i = \{2, 4, 8, 16, \dots\}$ 。在连续方案功率分配策略(2-3)基础上, 构建连续速率离散化方案步骤如下:

(1) 通过计算得到 2.2 节连续方案的 $M_i(\gamma_i)$, $S(\gamma_1, \gamma_2)$, v^* 等参数。

(2) 每对 γ_i 对应的发送功率 $S(\gamma_1, \gamma_2)$ 不变, 根据 γ_i 和 $M_i = \{2, 4, 8, 16, \dots\}$ 划分信噪比衰落区间, 将原先连续方案中的 $M_i(\gamma_i)$ 按此区间向下取整, 得到整数阶调制 M_i' 。

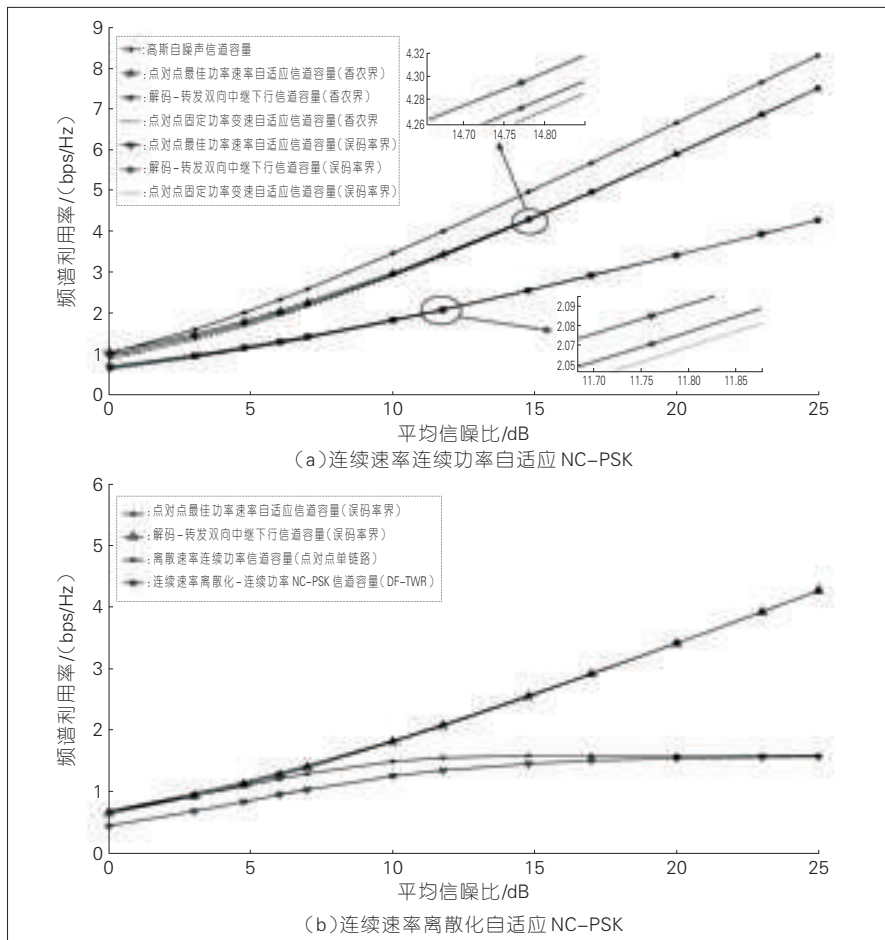
(3) 将 M_i' 替代 $M_i(\gamma_i)$ 重新带入公式(2-2), 计算此时的频谱利用率。

需要说明的是, 步骤(2)中向下取整意味着功率相比于此时的速率是过足的, 也即这种传输方案存在了功率损失, 或者等效于速率损失。在 \bar{S} 、 B 等参数归一化情况下, 最大速率损失小于 0.3 bps/Hz。

2.4 性能仿真及结论分析

本节仿真验证分析 2.2、2.3 节提出的联合功率自适应-网络编码调制方案的可行性和有效性。频谱利用率的数值结果如图 4 所示。连续速率连续功率自适应 NC-PSK、连续速率离散化 NC-PSK 的数值结果如图 4(a)、图 4(b) 所示。通过统一仿真参数^[17], 对比分析 A. Goldsmith 点对点单链路自适应方案^[13-14], 能够得到以下结论:

(1) 解码-转发双向中继采用联合功率速率自适应-网络编码方案比恒定功率方案的频谱利用率要高, 且高度逼近点对点单链路变功率变速



▲图4 频谱利用率结果

率曲线。

(2) 采用误码率界的方案相比香农界的结果之间的“空隙”由误码率要求所决定, 而误码率界方案更具有实际意义。

(3) 连续速率离散化自适应 NC-PSK 传输方案具有实际意义, 方案性能接近点对点单链路离散方案, 它们性能之间的差距随着信噪比的增大而减小。

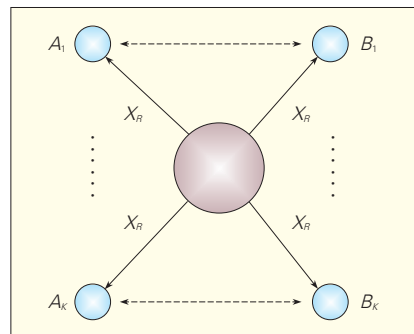
结论验证了联合自适应-网络编码调制方案能够在保证误码率一定的情况下, 进一步提高双向中继网络吞吐量, 有效对抗信道衰落, 这一技术在多向中继中会有进一步的发展。

3 多向中继联合网络-脏纸编码技术

在第2章双向中继传输模型基

础上, 我们进一步研究单中继-多对用户信息互传下行广播信道模型下(如图 5 所示), 联合信道编码-网络编码技术的多向中继传输方案。此外, Sima 等进一步对 3 用户间任意信息互传进行了研究^[18]。

中继节点接收到多对用户传至的信息, 并对信息再次进行信道编



▲图5 多向中继成对用户信息交换广播信道模型

码。方案中信道编码采用脏纸编码,作为一个干扰消除编码,被认为是消除认知无线网络用户之间干扰,达到认知无线信道容量的最有效方法。

3.1 成对信息交换的网络-脏纸编码技术

脏纸编码是在存在干扰的情况下,利用发射机已了解的信道基本情况,通过在发射端处理信号,使接收机在接受信号时可以认为传输不存在干扰,从而增加系统总容量。我们研究将网络编码嵌入到脏纸编码设计中,提出了联合网络-脏纸编码(JNDPC),并在此基础上创新提出了一种顺序网络编码^[19](SNC),其编解码流程如图6(a)所示。

根据图5所示的广播信道,SNC方案的可达容量域由以下公式给出:

$$C^{SNC} = \{(R_{A_1}, R_{B_1}, \dots, R_{A_K}, R_{B_K}) : \\ R_{A_i} \leq \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P_i}{\sigma_{B_i}^2 + \sum_{m=k+1}^K P_m} \right), \\ R_{B_i} \leq \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P_i}{\sigma_{A_i}^2 + \sum_{m=k+1}^K P_m} \right), \\ \sum_{m=1}^K P_m = P_R \}$$

3.2 性能仿真及结论分析

本节仿真设置等效噪声功率分别为 $\sigma_{A_1}^2 = 1, \sigma_{B_1}^2 = 10, \sigma_{A_2}^2 = 4, \sigma_{B_2}^2 = 8, \sigma_R^2 = 2$, 用户的等效功率等于中继功率 $P_{A_1} = P_{B_1} = P_{A_2} = P_{B_2} = P_R = P$, 得到功率 P 与合速率的仿真曲线如图6(b)所示。

所示。分析仿真结果我们得出结论:

(1) 解码-转发双向中继中采用联合信道编码-网络编码方案相比纯物理层网络编码^[20]要有更高的频谱利用率。

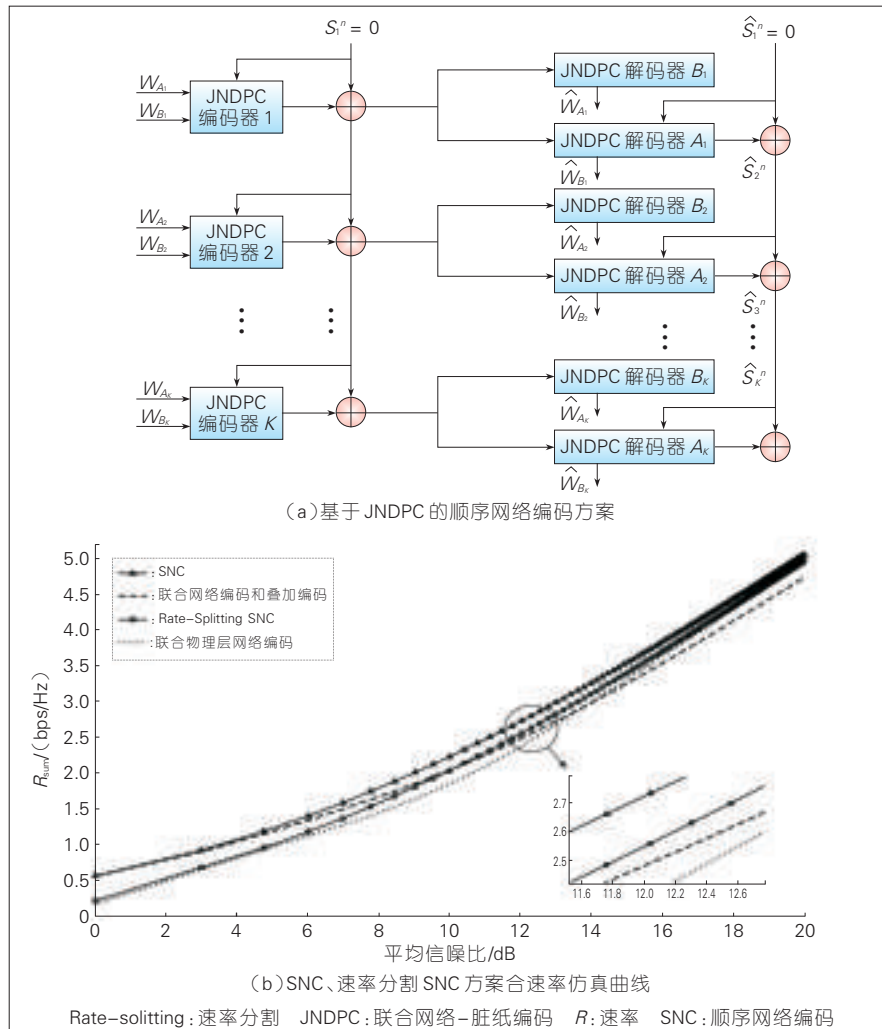
(2) 脏纸编码的对抗干扰特性能够进一步提高通信质量,脏纸编码研究的一大问题在于构造了实用化编码方案,基于联合网络-脏纸编码方案提出的SNC具有实际意义。

4 结束语

多向中继技术作为解决高密度异构立体覆盖网络通信问题的方案之一,其设计方案灵活多变,能够在基站端联合信道编码、网络编码、自适应调制等多种技术进行设计,达到提高频谱利用率和通信质量的目的。本文从室内密集立体覆盖特定模型出发,分析中继基站可采用的中继技术,并具体针对单中继双向通信和单中继多对用户信息交换通信两种场景分别构建了联合设计方案,通过仿真验证分析了方案的有效性,所提方案具有理论和实际双重意义。

参考文献

- [1] 陈巍. 非时齐多元协同通信: 虚拟现实服务理论及应用 [J]. 电信科学, 2014, 30(7): 43-52
- [2] 陈巍, 王东明, 王家恒, 等. 密集立体覆盖: 未来移动通信的机遇和挑战 [J]. 电信科学, 2013, 29(6): 2-9
- [3] AHLSSWEDE R, CAI N, LI S Y, YEUNG R W. Network information flow [J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2000, 46(4): 1204-1216
- [4] LI S Y, YEUNG R W, CAI N. Linear network coding [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2003, 49(2): 371-381
- [5] WU Y, CHOU P A, KUNG S Y, et al. Information exchange in wireless networks with network coding and physical-layer broadcast [R]. MSR-TR-2004, Tech. Rep., 2004
- [6] XIE L L. Network coding and random binning for multi-user channels [C]//Proceedings of the 10th Canadian Workshop on Information Theory, 2007: 85-88
- [7] CHEN W, BEN LETAIEF K, CAO Z. Opportunistic network coding for wireless networks [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications



▲ 图6 编解码流程

► 下转第58页

基于 D2D 中继的异构网络负载均衡策略

Load Balancing Algorithm Based on Relay-aided D2D Communications in Self-Organized Heterogeneous Network

陈卓/CHEN Zhuo
曹洋/CAO Yang
江涛/JIANG Tao

(华中科技大学电子信息与通信学院,
湖北 武汉 430074)
(School of Electronics Information and
Communications, Huazhong University of
Science and Technology, Wuhan 430074,
China)

随着智能设备逐步普及,用户发起的服务请求数量以及用户对服务质量(QoS)的需求呈爆炸式增长,如何在现有网络架构基础上提升网络整体服务性能,在满足用户服务质量的前提下尽可能接入更多用户,正成为无线网络目前面临的重大难题^[1]。因此,下一代移动通信网络(5G)需具备灵活的资源分配机制使得更多用户同时接入网络。

目前已有解决方案是跟据频谱复用原理提出的自组织异构网络^[2]以及认知无线电(CR)^[3-4]等方法。自组织异构网络是指在高性能基站(MBS)服务宏小区(Macrocell)的基础上,通过架设一定数量、覆盖范围有限、由低成本小基站(FBS)服务的自组织微小区(Femtocell)来复用宏小区频段。自组织即指各微小区通过自行决定服务范围内无线用户使用的频谱资源以及发射功率,将用户之

间的干扰控制在可接受范围内,以提高频谱利用率、复用率以及提升整个系统的容量。但是当MBS满载时,尽管有一部分空闲微小区可供服务,那些处于微小区通信范围之外的宏小区用户(MU)仍然无法接入网络。

设备间数据直传(D2D)为同一小区内近距离数据传输提供了新途径^[5-8]。在D2D模式中,数据在同一小区内的传输不通过基站进行中转,而是在基站参与监控下,直接由发送端向接收端进行传输,减少了网络中基站处数据流量以及服务负担。D2D通信的近距离直传特性,使得其通信性能具有以下特点^[9]:

(1) 低网络复杂度、低通信延

时。基于近距离的D2D模式使用单跳直传方式进行数据收发,相比传统模式,路由的简化极大降低了网络复杂度,通信延时得到控制。

(2) 高信道增益、低功率消耗。近距离通信带来的低链路损耗和高信道增益,使得用户可以使用更低的发射功率就可以保证数据在接收端达到和传统模式相同的信噪比。低功率消耗使得大多数电池驱动的移动设备使用寿命得到延长。

(3) 高传输速率、高系统容量。高信道增益特点使得D2D通信能以较高的通信速率进行数据传输,整个系统容量较传统模式得到提升。

(4) 高频谱效率、高频谱复用系

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868(2015) 01-0034-005

摘要: 提出了一种基于设备间数据直传(D2D)中继的异构网络负载均衡策略,通过设备之间的直接数据传输,将满载大基站的数据分流到其覆盖范围内的空闲小基站中。具体提出了频谱资源和发射功率的联合资源分配算法,深入研究了在异构网络中利用D2D通信进行数据中继的传输速率最大化问题。仿真结果显示,提出的方法在保证原有用户的通信性能的前提下,增加了系统的可接入用户数和总体吞吐量,从而提升了自组织异构网络的整体性能。

关键词: 自组织异构网络;设备间数据直传中继;负载均衡;资源分配

Abstract: We propose a new load-balancing strategy based on relay-aided Device-to-Device (D2D) communication. Data is sent by the nearby uncongested femtocell rather than the congested macrocell through relay-aided D2D communication. We propose an algorithm that takes into account resource and transmission power management. We study the maximum transmission rate attainable using D2D in a self-organized heterogeneous network. The simulation results show that, when D2D is used, the network can accommodate more users, throughput is higher, and existing users are not affected.

Keywords: self-organized heterogeneous network; relay-aided device-to-device communications; load balancing; resource management

收稿日期: 2014-11-05

网络出版时间: 2014-12-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”)计划(2013CB329006); 高等学校博士学科点专项科研基金与香港研究资助局合作基金项目(20130142140002)

数。通过调节D2D用户发射功率及使用频段,可有效地将D2D模式带来的干扰控制在一定范围内,为频谱资源的空间复用提供了可行的解决方案,有效提升了频谱利用率以及复用系数。

(5)提升网络边缘用户体验质量(QoE)。网络边缘用户通过D2D通信,将数据中继到距离基站更近的用户,通过该用户进行数据中继以提升自身QoE。

针对现有研究工作中普遍存在的宏小区和微小区负载不均衡问题,在文献[10]的基础上,本文提出了一种基于D2D中继的异构网络负载均衡策略,设计了相应的频谱资源调度以及用户发射功率控制的算法。通过联合资源分配,在满足宏小区以及微小区用户通信要求基础上,利用D2D通信,将满载MBS无法提供服务但处于微小区外侧MU的数据中继到其邻近的仍有空闲频谱资源的微小区中,使其以最大传输速率完成数据传输,提升系统容量。

1 基于D2D中继的异构网络结构

1.1 网络模型

本文提出的基于D2D中继的异构网络结构如图1所示。异构网络中宏小区通信、微小区通信、D2D通信3种通信模式共存,宏小区和微小区内用户均工作在正交频分多址接入(OFDMA)模式下。由于同一小区内用户使用正交信道,相互之间无干扰。在距离MBS等长的宏小区边缘均匀分布着 N 个通过复用宏小区部分频段进行通信的微小区。每个微小区可复用的频谱资源集合在系统最初配置完后保持不变。微小区定时向宏小区上传其当前频谱资源使用情况。MBS以列表形式将频谱使用信息进行保存,并根据微小区定时上传的内容对该列表进行更新。

由于MBS以及FBS抗干扰能力

优于移动设备,为减少D2D用户在通信过程中给整个系统带来的干扰,D2D通信使用上行链路进行数据传输^[11]。因此,只有工作在上行链路的接收方(即MBS和FBS)以及D2D对中信号接收方会受到相应干扰。

明显地,在图1的网络模型中,在任意频段上,共计有MU与宏基MBS之间的通信,微小区用户与FBS之间的通信,D2D对之间的通信,微小区当中的中继节点与FBS之间的通信4种通信方式,以及4种通信方式相互之间的干扰。

1.2 无线传播模型

本文考虑了包括路径损耗、穿透损耗、阴影衰落在内的3个方面的因素来综合计算数据在异构网络内传输过程中的传输损耗^[12]。

基于传输距离 d 的路径损耗,具体来说,包括以下几种情况:

对于宏小区和微小区,计算用户向与之对应的小区基站数据传输的性能时,其路径损耗表达式为:

$$L(d)(\text{dB}) = 127 + 30 \lg(d)$$

对于宏小区和微小区,考虑用户

和与之不对应的小区基站之间的干扰信号的传输性能时,其路径损耗表达式为:

$$L(d)(\text{dB}) = 128.1 + 37.6 \lg(d)$$

对于D2D用户,其路径损耗表达式为:

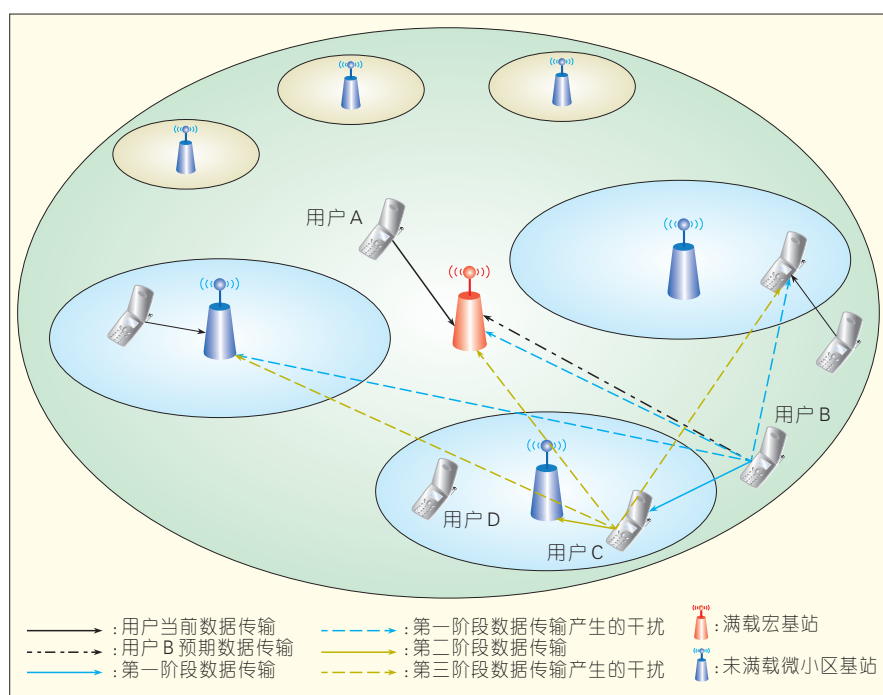
$$L(d)(\text{dB}) = 148 + 40 \lg(d)$$

穿透损耗:数据在传输过程中每穿过一层建筑,其穿透损耗为20 dB。本文假设MU与MBS之间无建筑阻隔,与FBS有一层建筑阻隔;微小区用户与对应FBS无建筑阻隔,与不对应FBS有两层建筑阻隔;D2D对之间无建筑阻隔。处于宏小区的D2D用户与FBS以及中继用户(不管是否服务于它)之间有1层建筑阻隔。

阴影衰落:阴影衰落模型本文采用常用的对数正态阴影衰落过程。取值为均值为0,方差为 $\sigma = 8 \text{ dB}$ 的随机变量。

2 联合资源分配

联合资源分配包括传输频段的分配以及发射功率的选择,目的是为了获得一组对应的传输频段以及发



▲图1 基于D2D中继的异构网络结构

射功率能够使宏用户 B 传输速率最大化^[13-16]。为方便说明问题,我们记:多个微小区与宏小区可同时使用某一频段进行数据传输。在宏小区当中,有 M 个可用频段,每个频段记为 $RB(r)(1 \leq r \leq M)$ 。MBS 满载时, M 个频段被 M 个 MU 占用,记为 $m(1 \leq m \leq M)$ 。 F_n 个微小区传统用户以及 N_r 对 D2D 通信用户同时工作在频段 $RB(r)$ 上,总数为 F_r 。任意微小区 f 含有 F_f 个可用频段,在其通信半径 R_f 内 L_f 个用户正处于通信状态,每个用户记为 $l(1 \leq l \leq L_f)$,未被使用频段集合记为 U_f 。在频谱 $RB(r)$ 上, MU 发射功率记为 P_m , F_r 个微小区用户对对应发射功率记为 P_f (涉及多个微小区和用户时使用 k, i 等来进行标记区分)。 N_0 表示在单个 $RB(r)$ 频带宽度下所对应的高斯白噪声强度。 $h_{i,j}^r$ 表示在用户 i 利用频谱 $RB(r)$ 向用户 j 进行数据传输时获得的总的信道增益。

优化目标:当宏用户 B 向系统发起用户服务请求时,求出其数据传输应使用的频段以及发射功率,使得宏用户 B 的传输速率最大,即:

$$\max R_{B_{\max}} = \frac{1}{2} \min(B_{RB} \log_2(1 + \gamma_C^{\max}) B_{RB} \log_2(1 + \gamma_{FBS}^{\max})) \quad (1)$$

式中: γ_C^{\max} 表示用户 C 接收信号信噪比的最大值, γ_{FBS}^{\max} 为对应频段下 FBS 接收信号信噪比的值。 B_{RB} 为每个 $RB(r)$ 所对应的频谱带宽。

当频段 $RB(r)$ 被一个 MU (图中用户 A) 和 F_r 个微小区共享时,即该频段上存在同时通信时,对应的 MBS、FBS 及 D2D 接收用户能在该频段上进行通信时需满足的约束条件如下:

(1) 任意频段 $RB(r)$ 上,接收用户的信噪比大于其门限值,即:

$$\gamma_{MBS,m}^r = \frac{P_m h_{m,MBS}^r}{N_0 + \sum_{f \in [1, F_r]} P_f h_{f,MBS}^r} \geq \gamma_{MBS}^{\text{th}} \quad (2a)$$

$$\gamma_{FBS,l}^r = \frac{P_l h_{l,FBS}^r}{N_0 + P_m h_{m,FBS}^r + \sum_{f \neq k, f \in [1, F_r]} P_f h_{f,FBS}^r} \geq \gamma_{FBS}^{\text{th}} \quad (2b)$$

$$\gamma_i^r = \frac{P_i h_{i,i}^r}{N_0 + P_m h_{m,i}^r + \sum_{f \neq i, f \in [1, F_r]} P_f h_{f,i}^r} \geq \gamma_i^{\text{th}} \quad (2c)$$

(2) 任意一个用户发射功率不大于其最大发射功率 P_0 , 即:

$$P_f \leq P_0 \quad (3)$$

当用户 B 向 MBS 发起包含位置信息的服务请求后, MBS 检查自身状态,当其处于满负荷状态或者提供的服务性能不能满足用户 B 的需求时, MBS 查找微小区频谱资源使用情况列表,按照下面的步骤建立 D2D 中继传输:

(1) 确定中继用户 C: MBS 找到与用户 B 距离最近且仍有空闲频段的微小区 f , 向该小区下传用户 B 当前信息。该微小区根据用户 B 的信息,得到其内部与用户 B 具有最大链路增益的中继用户 (图中用户 C, 简单取为距离用户 B 最近的空闲用户)。

(2) 确定用户 B 和用户 C 的最低发射功率: 微小区 f 在确定用户 C 之后,结合已获知的用户 B 的信息 (包括位置以及服务速率请求等信息),分别根据用户 C 以及对应的微小区 f 的服务性能,求得用户 B 以及用户 C 在集合 U_f 中对应各频谱资源上所需的最低发射功率。微小区 f 将求得的最低发射功率以及用户 C 的信息上传至宏小区。

(3) MBS 向目前正在使用集合 U_f 中各频段上进行通信的所有微小区下传用户 B 和用户 C 的信息。各微小区结合自身用户情况,在干扰可接受范围内,求出在集合 U_f 中各频段上所能允许用户 B 和用户 C 的最大发射功率,并上传至宏小区。

(4) 宏小区计算用户 B 和用户 C 的最终发射功率。在集合 U_f 中频段 $RB(r)$ 上, MBS 取步骤 (3) 中各微小区求取结果的最小值,若两者均大于步骤 (2) 中求取对应值,则将用户 B 的取值记为可用功率。宏小区求出各可用功率的最大值,作为用户 B 的最

终发射功率,得到对应频段,并求得用户 C 在该频段下的最终发射功率;否则,拒绝用户 B 的服务请求。

(5) MBS 将用户 B 的最终发射功率、使用频段连同中继用户 C 的信息,发送至用户 B;将用户 C 的最终发射功率和频段通过微小区 f 转发给用户 C。用户 B 与用户 C 在获取相关信息后建立起 D2D 通信,开始数据传输。

按照 D2D 通信模式建立过程,主要的功率计算分布到了各微小区中,并且所有微小区知晓其覆盖范围内所有处于 D2D 模式的用户对的信息。

2.1 计算宏用户 B 的最小发射功率

对于用户 C 与微小区 f 中的 $FBSf$, 当用户 B 未接入时,两者在 U_f 集合中频段 $RB(r)$ 上所收到的信号的强度 S_C^r 和 S_{FBSf}^r 分别表示为:

$$S_C^r = N_0 + P_m h_{m,C}^r + \sum_{f \in [1, F_r]} P_f h_{f,C}^r \quad (4a)$$

$$S_{FBSf}^r = N_0 + P_m h_{m,FBSf}^r + \sum_{f \in [1, F_r]} P_f h_{f,FBSf}^r \quad (4b)$$

当用户 B 以 D2D 模式接入微小区 f 时,用户 C 和对应的 $FBSf$ 分别收到用户 B 和用户 C 的信号的信噪比公式为:

$$\gamma_{C,B}^r = \frac{P_B h_{B,C}^r}{S_C^r} \geq \gamma_C^{\text{th}} \quad (5a)$$

$$\gamma_{FBSf,C}^r = \frac{P_C h_{C,FBSf}^r}{S_{FBSf}^r} \geq \gamma_{FBSf}^{\text{th}} \quad (5b)$$

式中: γ_C^{th} 和 $\gamma_{FBSf}^{\text{th}}$ 分别对应于对用户 C 以及 $FBSf$ 处对接收信号信噪比的最低要求。当公式 (5a) 和 (5b) 两边取等时,即可得到用户 B 和用户 C 所需的最小发射功率:

$$P_{B_{\min}}^r = \frac{\gamma_C^{\text{th}} S_C^r}{h_{B,C}^r} \quad (6a)$$

$$P_{C_{\min}}^r = \frac{\gamma_{FBSf}^{\text{th}} S_{FBSf}^r}{h_{C,FBSf}^r} \quad (6b)$$

2.2 计算宏用户 B 的最大发射功率

在用户 B 向宏小区申请接入、但

服务质量无法满足的情况下,其切换至D2D通信模式,将数据中继到邻近微小区 f 中进行通信。此时,原有的用户的信噪比由于中继的引入变成如下两个阶段。其中用户C选取为与用户B具有最大链路增益的中继用户(图中用户C,简单取为距离用户B最近的空闲用户)。

第一阶段,宏小区用户B向微小区用户C进行中继通信:

$$\gamma_{MBS,m,1}^r = \frac{P_m h_{m,MBS}^r}{N_0 + P_m h_{m,MBS}^r + \sum_{f \in [1, F_r]} P_f h_{f,MBS}^r} \geq \gamma_{MBS}^{\text{th}} \quad (8a)$$

$$\gamma_{FBSk,l,1}^r = \frac{P_l h_{l,FBSk}^r}{N_0 + P_m h_{m,FBSk}^r + P_B h_{B,FBSk}^r + \sum_{f \neq k, f \in [1, F_r]} P_f h_{f,FBSk}^r} \geq \gamma_{FBS}^{\text{th}} \quad (8b)$$

$$\gamma_{i,1}^r = \frac{P_i h_{i,i}^r}{N_0 + P_m h_{m,i}^r + P_B h_{B,i}^r + \sum_{f \neq i, f \in [1, F_r]} P_f h_{f,i}^r} \geq \gamma_i^{\text{th}} \quad (8c)$$

第二阶段,微小区用户C向FBS f 进行数据传输:

$$\gamma_{MBS,m,2}^r = \frac{P_m h_{m,MBS}^r}{N_0 + P_C h_{C,MBS}^r + \sum_{f \in [1, F_r]} P_f h_{f,MBS}^r} \geq \gamma_{MBS}^{\text{th}} \quad (9a)$$

$$\gamma_{FBSk,l,2}^r = \frac{P_l h_{l,FBSk}^r}{N_0 + P_m h_{m,FBSk}^r + P_C h_{C,FBSk}^r + \sum_{f \neq k, f \in [1, F_r]} P_f h_{f,FBSk}^r} \geq \gamma_{FBS}^{\text{th}} \quad (9b)$$

$$\gamma_{i,2}^r = \frac{P_i h_{i,i}^r}{N_0 + P_m h_{m,i}^r + P_C h_{C,i}^r + \sum_{f \neq i, f \in [1, F_r]} P_f h_{f,i}^r} \geq \gamma_i^{\text{th}} \quad (9c)$$

用户B在向MBS发送接入请求时,公式(2a)一公式(2c)式当中的 γ_{MBS}^r , γ_i^r , γ_{FBSk}^r 均为已知值,将其与公式(8a)一公式(9c)式结合,可得到用户B以及用户C在频段 $RB(r)$ 上的最大发射功率如下:

$$P_{B\max}^r = \min \left(P_0, \frac{P_m h_{m,MBS}^r}{h_{B,MBS}^r} \left(\frac{1}{\gamma_{MBS}^{\text{th}}} - \frac{1}{\gamma_{MBS}^r} \right), \frac{P_i h_{i,i}^r}{h_{B,i}^r} \left(\frac{1}{\gamma_i^{\text{th}}} - \frac{1}{\gamma_i^r} \right), \frac{P_l h_{l,FBSk}^r}{h_{B,FBSk}^r} \left(\frac{1}{\gamma_{FBS}^{\text{th}}} - \frac{1}{\gamma_{FBSk}^r} \right) \right) \quad i \in [1, N_r], k \in [i, F_n] \quad (10)$$

$$P_{C\max}^r = \min \left(P_0, \frac{P_m h_{m,MBS}^r}{h_{C,MBS}^r} \left(\frac{1}{\gamma_{MBS}^{\text{th}}} - \frac{1}{\gamma_{MBS}^r} \right), \frac{P_i h_{i,i}^r}{h_{C,i}^r} \left(\frac{1}{\gamma_i^{\text{th}}} - \frac{1}{\gamma_i^r} \right), \frac{P_l h_{l,FBSk}^r}{h_{C,FBSk}^r} \left(\frac{1}{\gamma_{FBS}^{\text{th}}} - \frac{1}{\gamma_{FBSk}^r} \right) \right) \quad i \in [1, N_r], k \in [i, F_n] \quad (11)$$

2.3 计算宏用户B的传输速率

对于频段 $RB(r)$,如果 $P_{B\max}^r \geq P_{B\min}^r$ 且 $P_{C\max}^r \geq P_{C\min}^r$,则该频段可用。本文中选取各可用频段下用户B的功率的最大值作为用户B最终最大发射功率,同时得到其对应频段 $RB(r)$,求得用户C在该频段下的最大发射功率,即:

$$P_{B\max} = \max(P_{B\max}^r) \quad r \in U_f \quad (12a)$$

$$R = \arg \max_r (P_{B\max}^r) \quad (12b)$$

$$P_{C\max} = P_{C\max}^R \quad (12c)$$

在求得 $P_{B\max}$ 、 R 、 $P_{C\max}$ 后,MBS将用户B的最终最大发射功率、使用频段连同中继用户C的信息,发送至用户B;将用户C的最终最大发射功率和频段通过微小区 f 转发给用户C。用户B与C在获取相关信息后建立D2D通信链接,开始数据传输。

最终用户B在整个阶段的传输速率为用户B和用户C对应传输速率较小值。

3 仿真结果及性能分析

本文通过仿真测试了在OFDMA通信模式下基于D2D中继的异构网络负载均衡策略。实验中,宏小区通信半径为250 m,MBS处于宏小区中心。在距离MBS 180 m处的宏小区边缘均匀分布着6个通信半径 R_f 为20 m的微小区,各微小区之间的距离为180 m,FBS处于微小区中心。仿真实验中,各微小区复用的宏小区内的频段相同,并且各微小区可用频段总数 F 取值为40,即最多能同时容纳40个用户进行通信。我们假设宏小区内均匀分布着600个用户,各微小区中均匀分布着40个用户。D2D通信半径最大为10 m。宏、微小区、

D2D用户额定功率为23 dBm。MBS、FBS处噪声强度为5 dB,D2D接收方处噪声强度为7 dB,信噪比门限值取为-2.5 dB^[16]。

为方便分析,本文取微小区中可用频段数占微小区总频段数的比例为微小区的忙闲比,各微小区具有相同的忙闲比。

仿真实验中,宏小区处于满载状态,微小区复用的40个频段均被MU占用。本文考察了不同忙闲比下对应的异构网络的总体性能,仿真结果为程序运行1 000次取的平均值。本文考虑了如下两个场景进行对比:场景(1):只含有宏小区与微小区两种通信模式的异构网络,简记为传统模式;场景(2):含有D2D中继的宏小区通信、微小区通信以及D2D通信的3种模式共存的异构网络,简记为D2D模式。

3.1 微小区忙闲比对系统可接入用户数量的影响

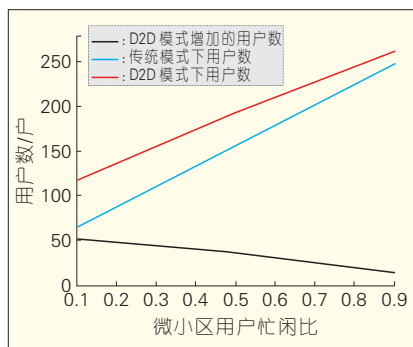
图2分别表示了D2D模式增加的用户数、传统模式下的用户数以及D2D模式下的用户数随微小区忙闲比从0.1到0.9的变化趋势。我们可以得出以下结论:

(1)相比于传统模式,D2D模式由于引入了中继,扩大了微小区的覆盖范围,使系统可接入更多的用户。

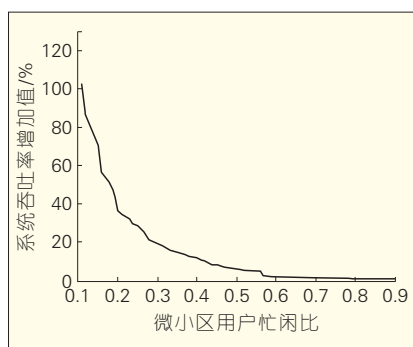
(2)D2D模式增加的用户数与微小区的忙闲比近似成反比,即MU在其D2D通信范围内是否存在未满载的及空闲的微小区用户是决定能否构成D2D中继传输的主要因素。

3.2 微小区忙闲比对系统总吞吐量影响

图3表示相比于传统模式,D2D



▲图2 系统可接入用户数随微小区用户忙闲比变化趋势



▲图3 D2D 模式系统总吞吐率增加百分比随微小区忙闲比变化趋势

模式系统总吞吐率增长的百分比随着微小区用户忙闲变化的趋势。我们可以得出以下结论：

(1) 相比于传统模式，D2D 模式在保证传统模式原有用户的通信需求基础上，允许更多 MU 接入的基础上，增加了系统的总体吞吐率，提升了系统的总体性能；

(2) 当微小区的忙闲比较低时，D2D 模式的引入可以较大地提升系统的总体吞吐率。当微小区用户忙闲比接近 0.1 时，D2D 模式可以增 105% 的系统吞吐率；

(3) 随着微小区忙闲比提高，更多的用户接入网络，相互干扰增加，导致 D2D 模式带来的吞吐率增长率下降较快。当微小区的忙闲比为 0.5 时，D2D 模式带来了 8% 的吞吐率的增长，0.7 时则降为 5%，之后趋于平缓。

4 结束语

本文提出了一种基于 D2D 中继

的异构网络均衡策略，设计了相应的频谱资源的调度以及用户发射功率的控制算法，通过联合资源分配，将因 MBS 满载而无法得到服务的 MU 数据中继到其邻近空闲微小区中以其最大速率传输，在保证原有用户通信性能的前提下，增加了系统能容纳的用户总量和系统的吞吐率，当系统忙闲比较低时系统总吞吐率的提升可达 105%。当各微小区之间使用的频谱资源不完全重复时，由于微小区之间的干扰得到进一步的缓解，系统的整体性能可得到更多提升。在本文提出的频谱资源和发射功率的联合资源分配算法中，关于微小区内中继用户的选择以及 MBS 对 FBS 的数据分流贡献，FBS 对中继用户转发贡献等方面的回馈的问题还有待进一步研究。

参考文献

- [1] CISCO. Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2009–2014 [EB/OL]. (2014–11–02). www.cisco.com
- [2] DAMNJANOVIC A, MONTOJO J, WEI Y B, et al. A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3): 10–21
- [3] KHOZEIMEH F, HAYKIN S. Self-organization dynamic spectrum management for cognitive radio networks [C]//Proceedings of the Communication Networks and Services Research Conference (CNSR), 2010: 1–7
- [4] SETOODEH P, HAYKIN S. Robust Transmit Power Control for Cognitive Radio [J]. IEEE Communications, 2009, 97(5): 915–939
- [5] TEHRANI M N, UYSAL M, YANIKOMEROGLU H. Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions, and Future Directions [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 86–92
- [6] LAYA A, WANG K, WIDAA A, et al. Device-to-Device Communications and Small Cells: Enabling Spectrum Reuse for Dense Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(4): 98–105
- [7] LIN X, ANDREWS J, GHOSH A, et al. An Overview on 3GPP Device-to-Device Proximity Services [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(4): 40–48
- [8] CAO Y, JIANG T, WANG C G, et al. CRAC: Cognitive Radio Assisted Cooperation for Downlink Transmissions in OFDMA-based Cellular Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(9): 1614–1622
- [9] ASADI A, WANG Q, MANCUSO V. A Survey on Device-to-Device Communication in Cellular Networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4): 1801–1819. doi:10.1109/comst.2014.2319555
- [10] LIU J J, KAWAMOTO Y, NISHIYAMA H. Device-to-device communications achieve efficient load balancing in LTE-advanced networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(2): 57–65
- [11] LEI L, ZHONG Z D, LIN C, et al. Operator controlled device-to-device communications in LTE-advanced networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(3): 96–104
- [12] 3GPP TR 36.814 V9.0.0. Further advancements for E-UTRA physical layer aspects [R]. 3GPP, Tech. Rep., 2010
- [13] HASAN M, HOSSAIN E, KIM D. Resource Allocation Under Channel Uncertainties for Relay-Aided Device-to-Device Communication Underlying LTE-A Cellular Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2014, 13(4): 2322–2338
- [14] YIN R, YU G D, ZHONG C J, et al. Distributed Resource Allocation for D2D Communication Underlying Cellular Networks [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), 2013: 138–143
- [15] LEE D H, CHOI K, JEON W. Two-Stage Semi-Distributed Resource Management for Device-to-Device Communication in Cellular Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2014, 13(4): 1908–1920
- [16] TSAI A H, WANG L C, HUANG J H. Intelligent Resource Management for Device-to-Device (D2D) Communications in Heterogeneous Networks [C]//Proceedings of the Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2012: 75–79

作者简介



陈卓，华中科技大学电子信息与通信学院在读硕士研究生；主要研究领域为设备数据直传(D2D)通信理论与方法。



曹洋，华中科技大学电子信息与通信学院讲师；主要研究领域为宽带多载波通信(D2D)通信理论与方法等；已主持基金项目1项；已发表学术论文20余篇。



江涛，华中科技大学电子信息与通信学院教授；主要研究领域为宽带多载波通信理论与方法等；已主持基金项目10余项；已发表学术论文200余篇，其中被SCI/EI检索100余篇。

基于有限回传链路的小基站网络重叠协作方法研究

An Overlapping Collaboration Approach for Small Cells with Backhaul Constraints

张增峰/ZHANG Zengfeng

王天宇/WANG Tianyu

宋令阳/SONG Lingyang

(北京大学, 北京 100871)

(Peking University, Beijing 100871, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 01-0039-004

摘要: 采用一种小区间重叠协作的方法, 解决了基于有限回传链路的小基站网络中的干扰管理问题。提出了一种新的基于下行协同波束赋形的小区间重叠协作算法, 用于消除小基站网络中不同小基站之间的下行干扰, 提高系统吞吐量。仿真结果显示, 提出的算法能够显著提升以吞吐量为指标的系统性能。

关键词: 小基站网络; 重叠协作; 干扰消除

Abstract: In this paper, we describe an inter-cell overlapping coordination approach to managing interference in a small-cell network with backhaul constraints. We propose a novel inter-cell overlapping coordination algorithm based on downlink coordinated beamforming to cancel downlink interference between different small-cell base stations and increase system throughput. Simulation results show that our proposed algorithm significantly improves throughput in the system.

Keywords: small cell network; overlapping collaboration; interference cancellation

小基站网络被看作是未来最有应用前景的一种提升无线网络容量和覆盖性能的解决方案。小基站网络的基本思路是部署即插即用的、低成本、低功率的小基站, 这些小基站由已有的回传链路技术(比如数字用户线路、电缆调制解调器、无线回传链路等等)相连接^[1]。文献[1]的作者研究了小基站网络的部署、物理层技术以及资源管理等方面。小基站的种类包括由运营商部署的微微基站和由终端用户在家庭场景或者办公室场景中部署的家庭基站。近年来, 小基站网络得到了包括 3GPP 在内的一系列国际标准化组织的重视^[1-3]。文献[2]的作者指出, 家庭基站在 2010 年底已经在数量上超过了传统基站, 他们探究了家庭基站的历史发展轨迹, 阐明了家庭基站的关键方面, 并且指出小基站技术会在未来有一个迅速的发展。文献[3]的作者研

究了在存在两种不同的接入控制方式, 即开放式接入控制和封闭式接入控制两种情况下两层小基站异构网络中的小区切换与小区选择问题。小基站的部署被期望能够提供高容量的无线接入, 并且能够在降低运营商的部署成本的同时为移动用户提供新服务。此外, 小基站网络是帮助宏基站网络分担数据流量的一种重要手段^[4]。文献[4]的作者研究了正交频分多址接入的家庭基站的部署对于现有的宏蜂窝网络的影响, 特别是对一个实际的正交频分多址接入的宏蜂窝和家庭基站两层网络场景的覆盖和干扰情况进行了分析。他们还研究了网络中的频谱分配和干扰减少问题, 以及自配置技术和自优化技术。

小基站网络的成功引入带来了许多关键技术挑战, 特别是干扰管理和干扰消除方面^[4-9]。文献[5]的作者提出了一种基于资源分块和感知的小基站网络干扰避免技术, 并且不需要使用 X2 接口或者空中信令。文献[6]的作者研究了在两层宏蜂窝和小基站异构网络中的小基站部署结构和宏蜂窝的数据卸载。文献[7]的作者研究了一种有着服务质量限制的物理资源块分配的自组织的策略, 用于避免同层和跨层干扰。他们指出这种自组织策略包括自配置和自优化两方面, 并追求物理资源块使用效率的最大化。文献[8]的作者研究了一种常见的基于效用最大化的小基站网络中的干扰协调和资源分配问题。他们采用了一种信念传播框架

收稿日期: 2014-11-14

网络出版时间: 2014-12-16

基金项目: 国家重点基础研究发展(“973”)计划(2013CB336700); 国家自然科学基金(61222104, U1301255)

来得到问题的近似解。文献[9]的作者研究了连续干扰消除技术在上行通信中的应用,并且定义了一种能够描述连续干扰消除技术的性能增益的分析框架。在小基站网络中,不同的小基站之间存在严重的下行同层干扰。这种下行干扰会严重损害系统性能,特别是当小基站的部署比较密集的时候,小基站用户受到的来自其他小区的小基站的下行同层干扰尤为显著,这大大降低了系统性能。现有的进行干扰消除的一种重要手段是协同多点技术^[10-14]。文献[10]的作者给出了关于多种协同多点技术的详细描述,介绍了协同多点技术的信息论概念背景和实际应用中的算法,并对协同多点技术进行了大量的仿真测试和实地测试。文献[11]的作者研究了协同多点技术在上行和下行链路中带来的显著增益,并分析了协同多点技术面临的技术挑战。他们还通过具体实验展示了协同多点技术的基本可行性。文献[12]的作者研究了多种协作通信技术,包括中继技术、分布式天线系统技术、多小区协同技术、组合小区技术和协同多点发射和接收技术,并且对这些技术的特点进行了分析和对比。文献[13]的作者研究了为了有效实现协同多点技术下行发射和上行接收的必要的标准支持,并且分析了具体设计的选择。他们同时研究了协同多点技术部署需要的具体场景。文献[14]的作者研究了异构回传链路(有线回传链路和空中回传链路的组合)对于小基站网络的影响。协同多点技术包括了协同调度和协同波束赋形、联合传输和传输点选择。其中主要的两种技术是协同波束赋形和联合传输。在联合传输中,多个传输点共享数据,而在协同波束赋形中,一个用户需要的数据只可以从一个传输点处获得,多个传输点只能共享信道状态信息。传统的小基站网络之中,小基站之间是非合作关系。

本文提出了一种基于下行波束

赋形的小区间重叠协作的算法,用于解决存在回传链路限制的小基站网络中的干扰问题。通过采用我们提出的小基站之间的重叠协作算法,存在回传链路限制的小基站网络中的下行同层干扰能够得到有效的消除,从而提高以系统吞吐量衡量的系统性能。

1 系统模型

小基站网络系统模型如图1所示。考虑一个下行多小区的小基站网络,网络中共有 M 个小区。每个小基站的编号依次为 $m=1, 2, \dots, M$ 。每个小基站拥有 N_t 根发射天线,每个小基站对应服务一个活跃用户,即小区 m 中的用户编号为 m ,每个用户装有1根接收天线。采用窄带平衰落模型,设用户 m 接收到的来自小基站 k 的接收功率为 $P_{m,k}$,小区 m 的用户和小基站 k 之间的信道为 $h_{m,k}$,小基站 m 处的波束赋形向量为 w_m 。 $h_{m,k}$ 是一个 N_t 行1列的列向量,每个元素都是独立同分布的随机变量,并服从 $CN(0,1)$ 分布。噪声为 σ^2 。因此,小区 m 内的用户的瞬时 $SINR$ 表示为:

$$SINR_m = \frac{P_{m,m} |h_{m,m}^H w_m|^2}{\sum_{k \neq m} P_{m,k} |h_{m,k}^H w_m|^2 + \sigma^2} \quad (1)$$

其中 $(*)^H$ 表示共轭转置。

计算服务小基站和干扰小基站的接收功率所使用的路径损耗模型公式为:

$$P_{m,k} = P_0 \left(\frac{d_{m,k}}{R} \right)^{-\alpha} \quad (2)$$

其中 R 为小区半径, P_0 是小区边缘的接收功率, α 是路径损耗因子, $d_{m,k}$ 是用户 m 和小基站 k 之间的距离。

由以上公式,可以计算出每个小区 m 的用户容量为:

$$R_m = E[\log_2(1 + SINR_m)] \quad (3)$$

接下来,我们可以计算出系统回报(以吞吐量衡量)为:

$$S = \sum_{m=1}^M R_m \quad (4)$$

在传统非合作场景中,每个小基站服务自己小区的用户,并且不会消除来自其他小区的干扰。这种情况下,小基站采用最大比合并波束赋形方法来计算波束赋形向量。预编码向量依据用户自身的信道方向而进行设计。对于小基站 m 而言,对应的归一化波束赋形向量为:

$$w_m = \frac{h_{m,m}}{\|h_{m,m}\|} \quad (5)$$

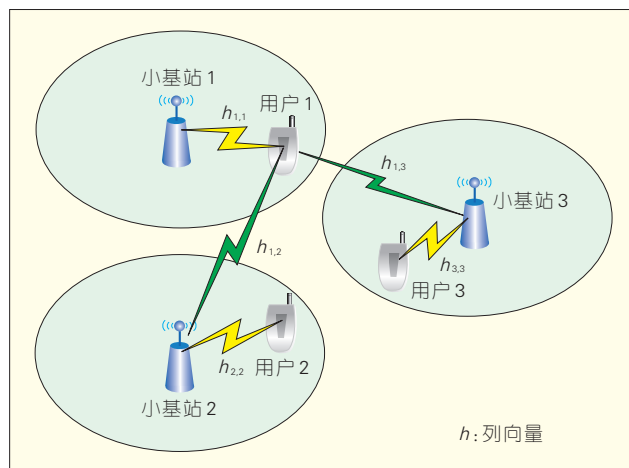
这样可以保证波束赋形向量与用户信道在同一方向上。

下面我们提出一种新的重叠协作算法,来解决存在回传链路限制的小基站网络中的干扰消除问题。

2 重叠协作算法设计

我们考虑基于下行协同波束赋形的重叠协作算法。协同波束赋形

图1 小基站网络系统模型



是指多个小基站通过回传链路共享信道状态信息,然后设计相应的波束赋形向量。我们采用部分迫零波束赋形方法,来求出波束赋形向量^[15]。文献[15]的作者研究了无线自组织网络中的多天线通信的好处。波束赋形向量的一些自由度被用于消除小区间干扰。由于环境限制,每个基站 m 最多可以帮距离它最近的 L_{lim} 个用户消除干扰。设基站 m 决定帮助消除干扰的用户集合为 $U_m = \{1, 2, \dots, K\}$,并满足 $|U_m| \leq L_{lim} \leq N_t$ 。那么,波束赋形向量 w_m 需要被选择在信道向量 $h_{m,m}$ 在矩阵 $H_m = [h_{1,m}, h_{2,m}, \dots, h_{K,m}]$ 的零空间上的投影方向上。因此,波束赋形向量的计算公式为:

$$\hat{w}_m = (I - P)h_{m,m} \quad (6)$$

其中, H_m 上的投影矩阵为 $P = H_m(H_m^* H_m)^{-1} H_m^*$,这里 $*$ 是共轭转置算符。

接下来,对波束赋形向量归一化,得到:

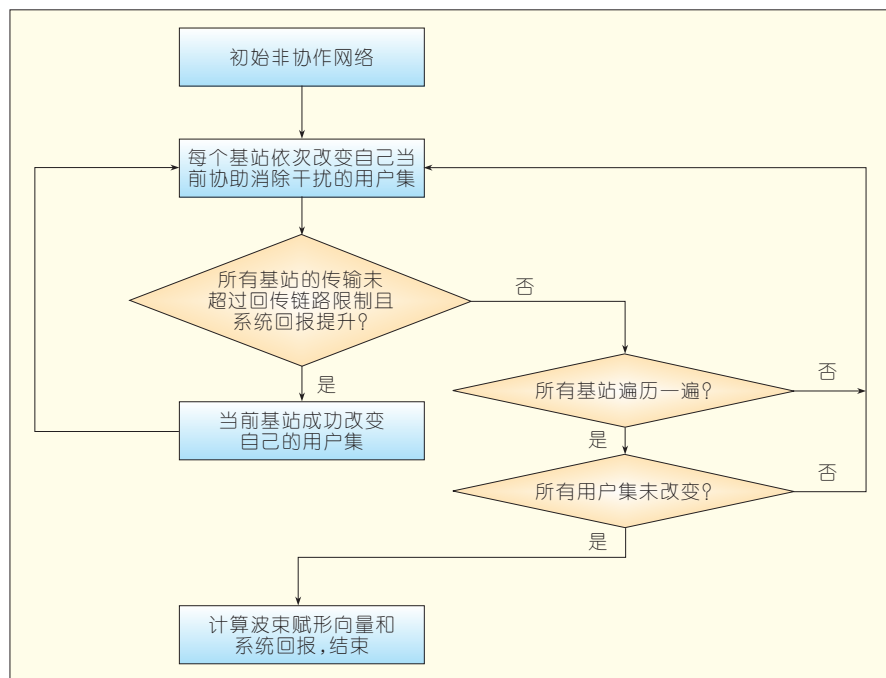
$$w_m = \frac{\hat{w}_m}{\|\hat{w}_m\|} \quad (7)$$

有了部分迫零波束赋形方法,我们可以把为用户 m 消除干扰的基站集 B_m 看做一个协作小组。消除干扰时用户需要把自己的信道信息反馈给自己的服务基站,再由服务基站通过回传链路传给目标基站。由于回传链路的限制,每个用户最多可以由 T_{lim} 个基站帮忙消除干扰,即 $|B_m| \leq T_{lim}$ 。由于一个基站可以为多个用户消除干扰,也即一个基站可以加入多个协作小组,因此我们的方法是重叠协作的。具体的小基站网络重叠协作算法如图2所示。

(1)在初始状态下,网络中的所有基站都是非合作关系,采用最大比合并波束赋形方法求解波束赋形向量,从而计算系统回报。

(2)每一轮重复进行如下操作:

对网络中的每一个基站,改变它当前的帮助消除干扰的用户集 U_m ,



▲图2 重叠协作算法流程

同时其他相应基站的用户集也随之改变,判断新加入消除干扰用户集的用户所对应的消除干扰的基站数量是否超出回传链路限制,并计算新的系统回报,判断系统回报是否提升。如果所有用户都未超出回传链路限制,系统回报又有提升,那么完成一次用户集改变。

(3)重复(2)中的操作,直到遍历一遍所有基站时,所有基站的消除干扰的用户集都没有改变。此时,算法收敛,达到稳定,确定每个基站帮助消除干扰的用户集 U_m 。

(4)依据每个基站帮助消除干扰的用户集 U_m ,采用重叠协作方法计算出每个基站的部分迫零波束赋形向量。

(5)依据每个基站的波束赋形向量计算出算法得到的最终系统回报。

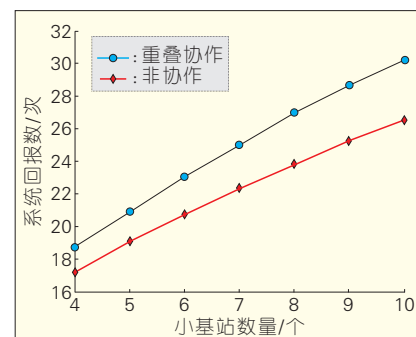
有了以上的重叠协作算法,能够有效消除存在回传链路限制的小基站网络中的干扰,提升系统性能。

3 仿真结果

本节给出主要的仿真结果。小基站随机均匀地分布在以宏基站为

圆心的一个圆形区域内。每个小基站的覆盖范围也为一个圆形区域。小基站的发射功率为23 dBm。图2中我们给出了网络中小基站数量不同的情况下的传统非协作场景和我们提出的重叠协作算法的系统性能对比。

不同小基站数量情况下的两种场景的系统回报对比如图3所示。由图3可以看出,当小基站数量较小时,由于小基站之间的干扰较小,我们提出的重叠协作算法相比于非协作算法对于系统回报有一定的提升。随着小基站数量的不断增长,其他小区小基站到本小区用户的下行



▲图3 不同小基站数量情况下的两种场景的系统回报对比

同层干扰越来越严重,因此我们的重叠协作算法相比于非协作场景对于系统性能的提升效果越来越显著。因此,对于存在回传链路限制的小基站网络,我们提出的基于下行协同波束赋形的重叠协作算法相比于非协作场景而言,能够大幅减少小区间的下行同层干扰,有效提升以系统吞吐量为指标的系统性能。

4 结束语

本文提出了一种在有限回传链路的小基站网络场景中应用的基于下行协同波束赋形的重叠协作算法,用于解决小基站网络中的下行同层干扰消除问题。本文提出的重叠协作算法采用了部分迫零波束赋形方式计算波束赋形向量,有效地降低了小基站网络中的下行同层干扰。仿真结果表明,相比于传统的非协作场景,本文提出的基于下行协同波束赋形的重叠协作算法能够显著降低有限回传链路中的小基站网络的下行同层干扰,并最终提升以系统吞吐量为指标的系统性能。

参考文献

- [1] QUEK T Q, de la ROCHE G, GUVENC I, KOUNTOURIS M. Small cell networks: Deployment, PHY techniques, and resource management [M]. Cambridge University Press, 2013
- [2] ANDREWS J G, CLAUSSEN H, DOHLER M, et al. Femtocells: Past, present, and future [J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 2012, 30(3): 497-508
- [3] FENG Z Q, SONG L Y, HAN Z, et al. Cell selection in two-tier femtocell networks with open/closed access using evolutionary game [C]//Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2013 IEEE. IEEE, 2013: 860-865
- [4] DAVID L P, VALCARCE A, de la ROCHE G, et al. OFDMA femtocells: a roadmap on interference avoidance [J]. Communications Magazine, IEEE, 2009, 47(9): 41-48
- [5] GUVENC I, JEONG M R, SAHIN M E, et al. Interference avoidance in 3GPP femtocell networks using resource partitioning and sensing [C]//Proceedings of the Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops (PIMRC Workshops), 2010 IEEE 21st International Symposium on. IEEE, 2010: 163-168
- [6] CALIN D, CLAUSSEN H, UZUNLIOGLU H. On femto deployment architectures and macrocell offloading benefits in joint macro-femto deployments [J]. Communications Magazine, IEEE, 2010, 48(1): 26-32
- [7] LIANG Y S, CHUNG W H, NI G K, et al. Resource allocation with interference avoidance in OFDMA femtocell networks [J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2012, 61(5): 2243-2255
- [8] RANGAN S, MADAN R. Belief propagation methods for intercell interference coordination in femtocell networks [J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 2012, 30(3): 631-640
- [9] WILDEMEERSCH M, QUEK T Q S, KOUNTOURIS M, et al. Successive interference cancellation in uplink cellular networks [C]//Proceedings of the Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2013 IEEE 14th Workshop on. IEEE, 2013: 310-314
- [10] MARSCH P, FETTWEIS G P. Coordinated Multi-Point in Mobile Communications: from theory to practice [M]. Cambridge University Press, 2011
- [11] IRMER R, DROSTE H, MARSCH P, et al. Coordinated multipoint: Concepts, performance, and field trial results [J]. Communications Magazine, IEEE, 2011, 49(2): 102-111
- [12] TAO X F, XU X D, CUI Q M. An overview of cooperative communications [J]. Communications Magazine, IEEE, 2012, 50(6): 65-71
- [13] JUHO L, YOUNSUN K, HYUJIN L, et al. Coordinated multipoint transmission and reception in LTE-advanced systems [J]. Communications Magazine, IEEE, 2012, 50(11): 44-50
- [14] PANTISANO F, BENNIS M, SAAD W, et al. On the impact of heterogeneous backhubs on coordinated multipoint transmission in femtocell networks [C]//Proceedings of the Communications (ICC), 2012 IEEE International Conference on. IEEE, 2012: 5064-5069
- [15] JINDAL N, ANDREWS J G, WEBER S. Rethinking MIMO for wireless networks: Linear throughput increases with multiple receive antennas [C]//Proceedings of the Communications, 2009. ICC'09. IEEE International Conference on. IEEE, 2009: 1-6

作者简介



张增峰, 北京大学信息科学技术学院在读硕士研究生; 主要研究方向为小基站网络、博弈论和协作通信; 已发表学术论文2篇。



王天宇, 北京大学信息科学技术学院在读博士研究生; 主要研究方向为车联网、认知无线网络、博弈论和优化论; 已发表学术论文20余篇。



宋令阳, 北京大学“百人计划”教授级研究员、博士生导师, IEEE 高级会员; 主要研究方向为认知和协作通信、物理层安全、智能电网和车联网; 已发表学术论文100余篇, 其中SCI检索50余篇。

综合信息

中兴通讯技术杂志社北京迎春联谊会隆重召开

【本刊讯】2015年1月23日,“中兴通讯技术杂志社2015北京迎春联谊会”在北京世纪金源大饭店隆重召开。刊物在京编委及来自通信运营商、高等院校、科研院所、期刊管理部门的60多位嘉宾共聚一堂,叙旧迎新,畅谈合作与发展。

中兴通讯股份有限公司副总裁、杂志总编孙枕戈发布了“中兴通讯2015年战略白皮书”,介绍了中兴通

讯2015年战略重心。黄新明常务副总编介绍了2014年刊物发展情况,以及产学研合作最新成果。

工程院高文院士到会并讲话。蒋林涛、赵慧玲、唐雄燕、孟洛明等编委充分肯定了刊物发展所取得的成绩,并对刊物未来值得关注的方向各抒己见。期刊界同行对杂志社办刊工作给予了高度肯定和诚挚祝福。

联谊会拉近了业界专家与刊物的距离,成为产学研合作及杂志社对外交流的重要平台。

LTE 和 Wi-Fi 系统间灵活频谱使用关键技术

Key Technologies for Flexible Spectrum Usage Between LTE and Wi-Fi

徐景/XU Jing¹
杜金玲/DU Jinling¹
杨旸/YANG Yang^{1,2}

(1. 上海无线通信研究中心, 上海 201210;
2. 上海科技大学信息学院, 上海 201210)
(1. Shanghai Research Center for Wireless
Communications, Shanghai 201210, China;
2. School of Information Science and
Technology, ShanghaiTech University,
Shanghai 201210, China)

智能手机飞速发展、用户数量急剧增长、高清晰多媒体流业务不断涌现,凸显出频谱匮乏与需求间的深刻矛盾。2014年2月,思科发布报告^[1]预测至2018年,移动设备和连接的数量将从2013年约30亿增长到100多亿;移动连接的平均速度将从2013年1.4 Mb/s提高到2.5 Mb/s,几乎翻一番。为了缓解授权移动网络的流量压力,许多运营商通过部署Wi-Fi网络来减轻无线网络的负担,通过免授权频谱分流无线业务。在LTE网络覆盖的室内和公共热点区域,由于授权频谱资源有限,很容易达到网络容量极限,造成网络拥塞。目前,全球已经开放了大量免授权频谱,在这种情况下,以大量免授权频谱补充有限的LTE授权频谱,增加可用频谱,可有效扩充无线容量,缓解移动网络的流量压力。

免授权频谱是指在满足政府部

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868(2015)01-0043-004

摘要: 针对授权辅助接入,提出了一种适用于LTE-U与Wi-Fi共同使用免授权频段的方法,该方法无需更改Wi-Fi协议就能实现LTE-U与Wi-Fi比例公平使用免授权频谱,有效聚合授权频谱与免授权频谱,提升频谱效率,为用户提供更好的业务体验。

关键词: 免授权频段; 授权辅助接入; 双连接; 无授权辅助接入; 共存

Abstract: In this paper, we propose a method for realizing the coexistence of LTE-U and Wi-Fi systems in unlicensed bands. This method is based on the Licensed Assisted Access scheme. With our proposed method, LTE-U and Wi-Fi systems can jointly use the unlicensed spectrum in a proportional and fair way, without changing the Wi-Fi protocol. Therefore, our method can aggregate licensed and unlicensed spectrum resources, improve spectrum efficiency, and provide better user experience.

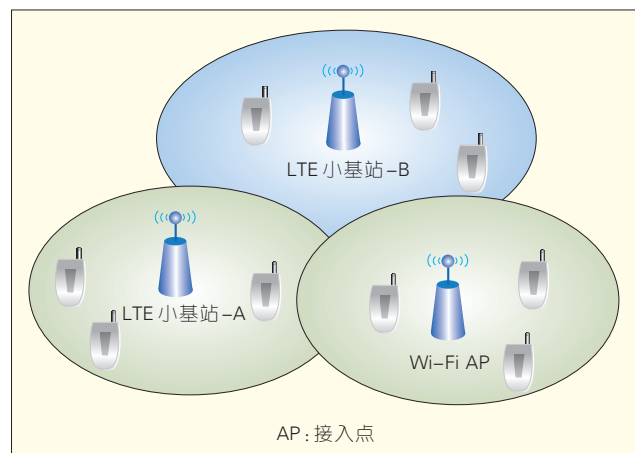
Key words: unlicensed bands; licensed assisted access; dual connectivity; standalone; coexistence

门(如国家无线电管理委员会)无线电管制下,不需要政府授权就能直接使用的频谱资源,Wi-Fi是部署在免授权频段的典型技术。Wi-Fi通过载波监听和随机退避机制与其他无线接入技术(RAT)友好共存于免授权频段。由于部署在免授权频段的Wi-Fi缺乏服务质量(QoS)保证机制,遭受着潜在的不可控的干扰,适合低速接入,无法很好的支持高速移动业务,而LTE部署到免授权频段,在免授权频段上采用LTE空口协议完成通信,简称为LTE-U,可以借助集中调度,干扰协调,自适应重传请求(HARQ)等技术,鲁棒性好,可获得更高的吞吐量,将提供更大的覆盖范围和更高的频谱效率。

目前,已经有多家公司和研究机构向3GPP提出采用免授权频段部署LTE技术,来加速LTE室内传输。主要候选方案包括:授权辅助接入(LAA)、双连接(DC)、无授权辅助接入(Standalone)技术,作为第五代移动通信系统(5G)增强技术,吸引了世界范围内移动通信技术研究工作者的广泛关注^[2-6]。

LTE-U通信的典型应用场景如图1所示。同一区域同时部署了不同无线网络(LTE与Wi-Fi),不同移动运营商的小基站(LTE小基站A与B)。当LTE网络负载过重,为了缓解流量压力,在免授权频段使用LTE-U技术传输数据,不仅可以实现无线资源的优化和不同接入网络间的负载

收稿日期: 2014-11-16
网络出版时间: 2014-12-16
基金项目: 上海市科委项目(13511500600)



◀图1
免授权频段部署
LTE-U的典型应用场景

均衡,为用户提供更好的业务体验,还能帮助移动运营商增大移动宽带网络容量和市场空间^[6]。

本文首先介绍了LTE部署免授权频段提出的背景。其次,简要介绍了灵活使用免授权频段的几种技术方案。然后简要分析了未来LTE-U与Wi-Fi灵活使用免授权频段面临的挑战。提出一种基于授权辅助接入技术,实现LTE与Wi-Fi公平使用免授权频段的方法。最后给出了总结。

1 灵活使用免授权频段的关键技术

与Wi-Fi相比,LTE部署在免授权频段的优点如下,从用户角度看,数据速率更高、覆盖性能更好、可靠性更高,用户体验将得到明显提升;从移动运营商角度看,核心网同时适用于授权与非授权频段,可与现有LTE网络共同运营及管理。

1.1 授权辅助接入

LAA是一种可以扩展LTE兼容频谱至未授权频段上的技术,用于增强LTE和LTE-A,为LTE网络运营商提供补充接入。2014年9月,3GPP将LAA列为下一代LTE增强网络(R13)的重点研究项目^[7]。LAA采用载波聚合技术,聚合授权频谱和免授权频谱,前者作为主载波单元(PCC)传送关键信息和保证QoS,后者作为辅载波单元(SCC),可配置成下行补充链

路或配置成上行和下行链路,提供额外的无线资源,如图2所示。免授权频谱资源由基站集中调度分配,通过媒体访问控制(MAC)单元的激活/去激活操作控制免授权频谱资源的使用和释放,动态使用资源。当LAA基站激活免授权频谱资源时,LTE在此频谱传输蜂窝数据;当LAA基站去激活或释放免授权频谱资源时,Wi-Fi系统可基于竞争方式抢占并使用免授权频谱资源,从而实现灵活使用免授权频谱的目的。

1.2 双连接

双连接^[8]是指用户终端同时在授权频谱和免授权频谱上建立连接,其中授权频谱发送系统广播信息,用于实现控制平面的功能,包括连接管理和移动性管理,从而保证蜂窝通信的连续性。在数据平面,小基站数据业务可以在授权频谱发送、免授权频谱发送,或者两者都发送。双连接原理如图3所示。从图3可以看出,双连接要求授权频谱和非授权频谱网络同步。通过双连接,核心网可以将数

据直接卸载到免授权频段,实现数据无缝连接^[9]。通过双连接技术,使LTE-U小基站确保链路可靠性和移动鲁棒性^[10],用户终端灵活在授权频谱和(或)免授权频谱资源上接收和发送数据,从而无缝组合两个频段的数据流,灵活使用免授权频谱资源。

1.3 无授权辅助接入

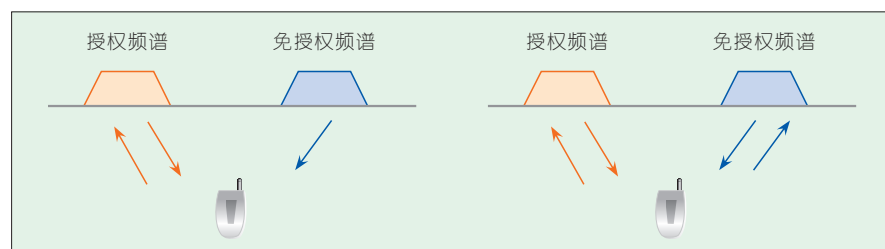
无授权辅助接入的原理如图4所示^[9-10]。图4是指将LTE技术单独部署于免授权频段,不存在授权频段的连接链路,主要考虑用在授权频带无法覆盖的区域。无授权辅助接入不占用授权频段,因此不需要进行授权频谱与免授权频谱间的网络同步,缺点在于无法保证移动性鲁棒性和不易实现灵活流量控制,且对标准化影响较大。

2 LTE与Wi-Fi灵活使用频谱面临的挑战

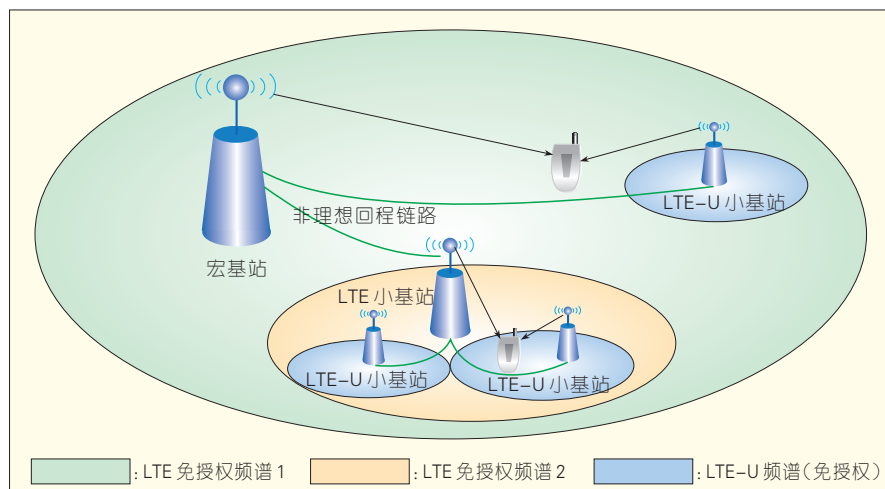
免授权频段部署LTE技术给蜂窝移动通信系统带来机遇的同时,更带来了许多全新的挑战。本章节首先重点分析授权辅助接入技术的频谱公平使用问题,并提出一种适用于LTE-U与Wi-Fi比例公平使用免授权频段的方法,实现对免授权频谱资源的高效利用。其次,LTE-U部署于免授权频段面临着各种复杂的干扰环境^[11-12],LTE-U还需满足通用空中接口的要求^[13-14]。

2.1 LTE-U和Wi-Fi公平使用免授权频段

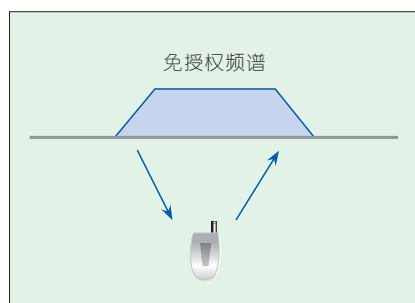
公平接入免授权频段是确保LTE-U能与现有接入技术(如Wi-Fi



▲图2 授权辅助接入示意



▲ 图3 双连接示意



▲ 图4 无授权辅助接入示意

系统)共存的重要因素。由于当前LTE系统是连续传输的,且排他性地使用授权频谱,不与其他运营商和无线接入技术共同使用。而免授权频谱是开放性资源,允许任何无线接入技术使用。如果LTE系统不作任何改变直接占用免授权频谱资源,将违背免授权频谱的法规要求,对部署在公用免授权频谱的其他无线接入系统也是不公平的。在这种情况下,本文提出一种基于LAA技术的比例公平使用免授权频段的方法。假设LAA基站可伪装成虚拟Wi-Fi设备,当系统满载运行于授权频段时,LAA基站通过先侦听后传输(LBT)尝试竞争免授权频段(载波),如果竞争成功,则将其作为辅成员载波;LAA基站也可以根据需要直接抢占免授权频段。

为兼顾频谱利用率及不同用户或不同系统公平使用频谱资源,定义

比例公平吞吐量效用函数为:

$$T_{PF} = \max \sum_i \log_2 \bar{R}_i(t), \bar{R}_i(t) \text{ 表示运行在}$$

免授权频段的各个系统在 $[0,t]$ 时间段内的平均速率, $r_i(t)$ 是在 t 时刻系统 i 内所有设备在免授权频段上的瞬时速率之和,依据比例公平原则^[15],具有最大优先级 $\frac{r_i(t)}{\bar{R}_i(t)}$ 的系统可以优先

使用免授权频段。例如,假设已知Wi-Fi和LTE-U将会在免授权频段上传输数据, $\bar{R}_{Wi-Fi}(t)$ 和 $\bar{R}_{LTE-U}(t)$ 分别为 $[0,t]$ 时间段内Wi-Fi和LTE-U系统的平均传输速率,则 t 时刻的免授权频谱使用需要最大化效用 $(\log_2 \bar{R}_{Wi-Fi}(t) + \log_2 \bar{R}_{LTE-U}(t))$ 。 $r_{Wi-Fi}(t)$ 和 $r_{LTE-U}(t)$ 分别为 t 时刻Wi-Fi和LTE-U系统的瞬时传输速率,为了最大化比例公平吞吐量效用函数,LTE-U基站需要比较 $\frac{r_{Wi-Fi}(t)}{\bar{R}_{Wi-Fi}(t)}$ 和 $\frac{r_{LTE-U}(t)}{\bar{R}_{LTE-U}(t)}$ 的大小,如果 $\frac{r_{LTE-U}(t)}{\bar{R}_{LTE-U}(t)} > \frac{r_{Wi-Fi}(t)}{\bar{R}_{Wi-Fi}(t)}$,且Wi-Fi

当前数据包传输结束,则LTE-U基站直接抢占免授权频段,采用LTE-U技术传输蜂窝数据;反之,LTE-U基站暂停使用免授权频段,或者不抢占免授权频段,由Wi-Fi系统基于LBT方式传输数据。基于比例公平准则,LTE-U基站能够适时暂停免授权频段上的数据传输,释放免授权频谱资

源,从而实现LTE与Wi-Fi系统灵活公平使用频谱,提升频谱效率,具体流程见图5。

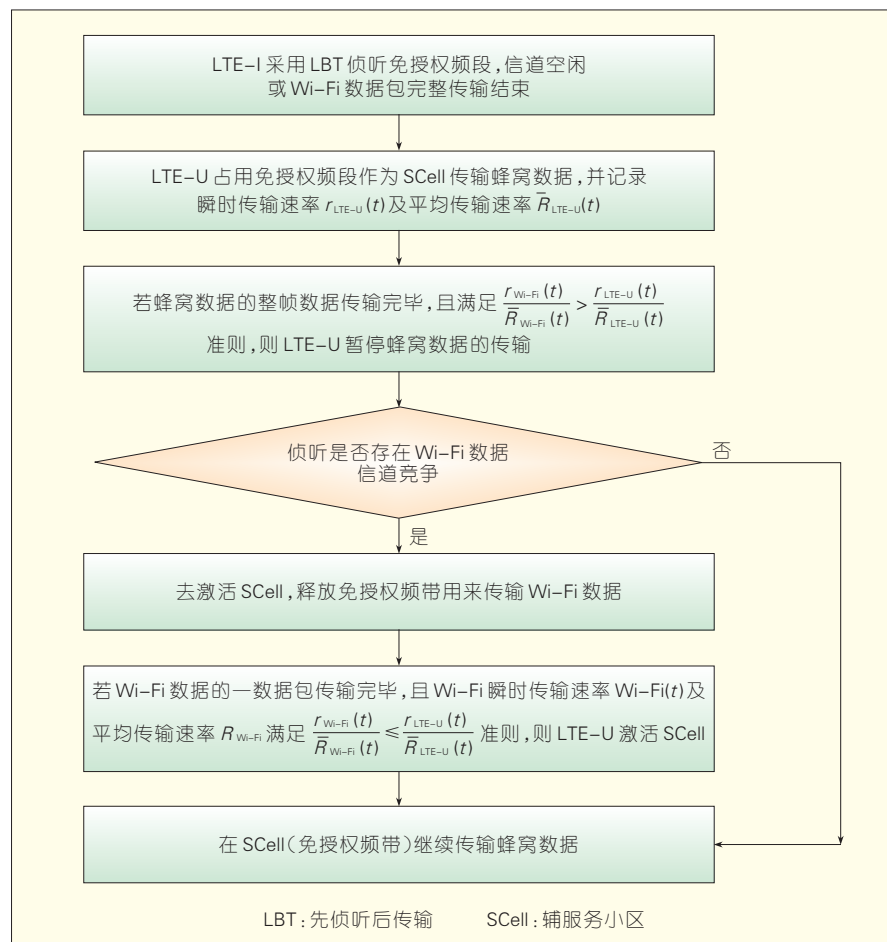
该方法可以实现免授权频段Wi-Fi和LTE-U系统友好共存,达到不同系统比例公平使用免授权频段资源的目的。当LTE-U利用免授权频段传输蜂窝数据时,能公平地发挥LTE-U技术优势,提升频谱利用率,为用户提供更好的业务体验,同时帮助运营商扩大移动宽带网络容量和市场空间。

2.2 免授权频段干扰协调与管理

免授权频段是开放式接入频谱资源,只要工作在免授权频段上的无线设备满足国家或区域规定要求,无需认证过程,任何RAT,任何用户终端或设备均可接入免授权频段,任何无线接入技术都可以部署该频段。这就意味着免授权频段不会限制运营商的数量和类型,同区域同信道免授权频段上可能同时存在多RAT系统发射数据的情况。如果LTE-U部署在免授权频段,那么就需要考虑不同运营商间的干扰,密集部署网络的干扰情况将更加复杂严重。自适应进行异构系统间和(或)异运营商间的干扰补偿,可以降低干扰和提升无线网络的鲁棒性。

2.3 LTE-U空中接口设计

LTE-U部署在免授权频段时,一方面需要满足某些国家或地区规定使用免授权频段需符合的诸如发送功率控制(TPC)、先侦听后传输(LBT)、动态频率选择(DFS)^[16]等要求;另一方面,应尽量继承和保留LTE协议基本原理和设计理念,继承LTE空口链路协议的鲁棒性和卓越的系统性能。为了公平有效使用免授权频谱,同时保持或增强LTE系统优势,LTE可能需要对空中接口作必要改变,以实现多RAT共存于免授权频段,最大化频谱效率,形成一个具有全球通用的无线移动通信网络。



▲ 图5 LTE-U 与 Wi-Fi 比例公平分配免授权频谱资源

同时, 还可能需要标准化组织 3GPP 和 IEEE 共同进行 LTE-U 空口传输协议的标准制订。

3 结束语

基于授权频谱接入技术, 本文提出一种 LTE 与 Wi-Fi 网络公平使用免授权频谱的机制。将 LTE 部署到免授权频段进行业务传输, 可以满足公众对高带宽无线业务爆发式增长需求, 提升免授权频谱效率, 为下一代移动通信系统 (5G) 奠定坚实基础, 促进宽带移动通信技术发展。授权辅助接入、双连接和无授权辅助接入等技术方案为不同无线接入技术, 异运营商共享免授权频谱提供了解决思路。

参考文献

[1] CISCO. Visual networking index [EB/OL].

- (2014-11-02). <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/visual-networking-index-vni/index.html>
- [2] ERICSSON. RP-141664: RAN1 SI on licensed assisted access v11 [C]//Proceedings of the 3GPP RAN meeting, 2014
- [3] QUALCOMM. RP-131635: Introducing LTE in unlicensed spectrum [C]//Proceedings of the 3GPP RAN meeting, 2013
- [4] VERIZON. RP-131680: New band for LTE deployment as supplemental downlink in unlicensed 5.8 GHz in USA [C]//Proceedings of the 3GPP RAN meeting, 2013
- [5] ERICSSON. RP-131788: Study on LTE evolution for unlicensed spectrum deployments [C]//Proceedings of the 3GPP RAN meeting, 2013
- [6] T-MOBILE. RWS-140007: View on LTE carrier aggregation with unlicensed spectrum [C]//Proceedings of the 3GPP workshop on LTE in unlicensed spectrum, 2014
- [7] FLORE D. Initial priorities for the evolution of LTE in Release-13 [EB/OL]. (2014-11-02). <http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1628-rel13>
- [8] ZTE. RP-141470: Supporting dual connectivity in LTE-U [C]//Proceedings of the 3GPP TSG RAN meeting, 2014
- [9] HITACHI. RWS-140017: Hitachi perspectives on LTE-U [C]//Proceedings of

the 3GPP workshop on LTE in unlicensed spectrum, 2014

- [10] NTT DoCoMo. RWS-140026: Views on LAA for unlicensed spectrum-scenarios and initial evaluation results [C]//Proceedings of the 3GPP workshop on LTE in unlicensed spectrum, 2014
- [11] ANDREWS J, BUZZI S, et al. What will 5G be? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6):1065-1082
- [12] RAHMAN M, BEHRAVAN A, et al. License-exempt LTE systems for secondary spectrum usage: scenarios and first assessment [C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), Bellevue, 2011: 349-358
- [13] MEDEISIS A, SYDOR J, et al. ISM-Advanced: improved access rules for unlicensed spectrum [C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), McLean, 2014: 194-205
- [14] KANG D, SUNG K, ZANDER J. The validity of unlicensed spectrum for future local high capacity services [C]//Proceedings of the 24 European Regional ITS Conference, Florence, 2013, 10: 1-15
- [15] LIU E, LEUNG K K. Expected throughput of the proportional fair scheduling over rayleigh fading channels [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(6): 515-517
- [16] ETSI EN 301 893 V1.7.1. Broadband Radio Access Networks (BRAN); 5 GHz high performance RLAN; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive BRAN [S], 2012

作者简介



徐景, 上海无线通信研究中心研究员; 研究方向为新一代移动通信系统和 Wi-Fi; 已发表学术论文 30 余篇。



杜金玲, 上海无线通信研究中心助理研究员; 研究方向为异构无线网络融合与共存; 已发表学术论文 3 篇。



杨畅, 上海无线通信研究中心主任, 上海科技大学信息学院教授; 研究方向为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等; 已发表学术论文 100 余篇。

车联网何去何从

Future Direction of Internet of Vehicles

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 01-0047-005

摘要: 认为发展车联网应高度重视车联网标准化工作,特别是加强车载终端及服务的开放性、标准化,以及相关应用的标准制订;应开展车联网关键技术的研发,在终端、通信技术以及服务计算技术方面力争突破技术壁垒;车联网的长期发展还必须与智能车辆技术深度融合,形成车辆(群)乃至整个交通系统的智能化解决方案;应加强产业合作,建立积极有效的合作机制,实现资源高效共享、有机整合;需创新思维,将免费模式与收费模式相结合,将汽车思维与互联网思维相融合,探索新型商业模式。

关键词: 车联网;车载终端;车间通信;商业模式

Abstract: For the rapid development of Internet of Vehicles (IoV), the standardization of IoVs should be emphasized. Open functions of on-board terminals and related applications should be standardized, and R&D must be done on key IoV technologies. Technical barriers of OBDs and communication and service computing technologies are expected to be overcome. Deep integration between IoVs and intelligent vehicle technologies is required and intelligent solutions for vehicles (groups) and the whole transportation system is expected. Various industries must also collaborate on IoV. Active and efficient collaboration mechanism should be established for efficient sharing and unification of resources. Innovative thought is required, the combination between free and charging modes and the integration between the thoughts in car field and internet thought are encouraged and new business models should be explored.

Key words: Internet of vehicles; on-board terminal; inter-vehicle communication; business model

陈前斌/CHEN Qianbin

柴蓉/CHAI Rong

岑明/CEN Ming

(重庆邮电大学,重庆 400065)
(Chongqing University of Posts and
Telecommunications, Chongqing 400065,
China)

- 精准定位,设计多层次、个性化需求的车载终端及服务系统
- 拓展领域,构造车辆乃至整个交通系统的智能化解决方案
- 加强合作,建立有效的合作机制,实现资源高效共享、有机整合
- 创新思维,探索新型商业模式

车联网的概念自诞生之日起,便受到来自工业界及研究机构的广泛关注^[1-2]。中国作为全球最大的汽车市场以及全球最大的移动互联网市场,车联网领域的巨大市场及商机已吸引了包括汽车企业、经销商集团、电信运营商、互联网公司等多个行业大量企业的积极涉足。近年来,车联网相关技术及产品在中国乘用车

及商用车领域均得到一定应用。易观智库预计,2015年中国车联网用户的渗透率有望突破10%的临界值,届时中国车联网的市场规模将超过1 500亿元。然而,在规模增长的可喜势头背后,中国车联网行业却也面临着缺乏统一标准及统一参考平台;关键技术及核心产品有待突破;产业链不完善、产业链各实体之间缺乏有效合作及资源整合;缺乏明确的商业模式等严重制约其快速发展的问

题。本文在对车联网的概念、主要功能、发展历程及发展现状进行介绍的基础上,指出了车联网面临的挑战并

提出相应对策。文章认为发展车联网,应高度重视车联网标准化工作,特别是加强车载终端的标准化、开放性功能研发,以及相关应用的标准制订;应开展车联网关键技术的研发,在终端、通信技术以及服务计算技术方面力争突破技术壁垒;车联网的长期发展还必须与智能车辆技术深度融合,形成车辆(群)乃至整个交通系统的智能化解决方案;在产业链方面,应加强产业合作,建立积极有效的合作机制,实现资源高效共享、有机整合;同时,还需创新思维,将免费模式与收费模式相结合,将汽车思维

收稿日期: 2014-12-23

网络出版时间: 2015-01-02

基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2012AA111902);国家自然科学基金(61171111、61102063);国家科技重大专项(2014ZX03003010-004)

与互联网思维相融合,探索新型商业模式。

1 车联网概念及主要功能

1.1 车联网概念的提出

车联网作为物联网在智能交通领域的重要应用,这一概念在2010年首届“车联网”研讨会上首次被提出。车联网产业技术创新战略联盟对车联网给出如下定义:车联网是以车内网、车际网和车载移动互联网为基础,按照约定的通信协议和数据交互标准,在车与车、车与路旁基础设施、车与外部网络之间,执行无线信息传输及交互,进而实现智能交通管理,智能动态信息服务和车辆智能化控制的一体化网络。车内网是指基于的控制器局域网网络技术(CAN)建立的包含多种车辆状态传感器的车内局域网,也称汽车局域网;车际网是指基于专用短程通信(DSRC)技术和IEEE 802.11p等协议建立的、以车辆为节点的车辆自组织网络^[3-4];车载移动互联网是指车载终端通过3G、4G等蜂窝通信技术接入互联网,从而实现车辆与信息服务平台及外部网络之间信息交互的网络。

1.2 车联网主要功能

车联网具有提供信息服务、提高行车安全与效率及促进节能减排等功能^[5-6]。车联网网络模型及主要功能如图1所示。

(1) 信息服务功能

车载终端通过车载移动互联网与信息管理平台及外部网络服务器交互,可获取交通管理、位置、导航、电商、保险、车辆服务等信息,以及互联网广播及视频等车载娱乐信息,从而为驾乘人员带来更好的驾乘体验及更低的沟通成本。

(2) 提高行车安全与效率

车内网的各传感器节点监测车辆设备状态,并通过车际网及车载移动互联网实现车辆危险预警,如车辆

碰撞预警、盲点预警、行人及非机动车预警,以及车辆管理如远程诊断、道路救援、远程维护等,从而减少交通事故发生率,提高行车安全通行与效率。

(3) 节能减排

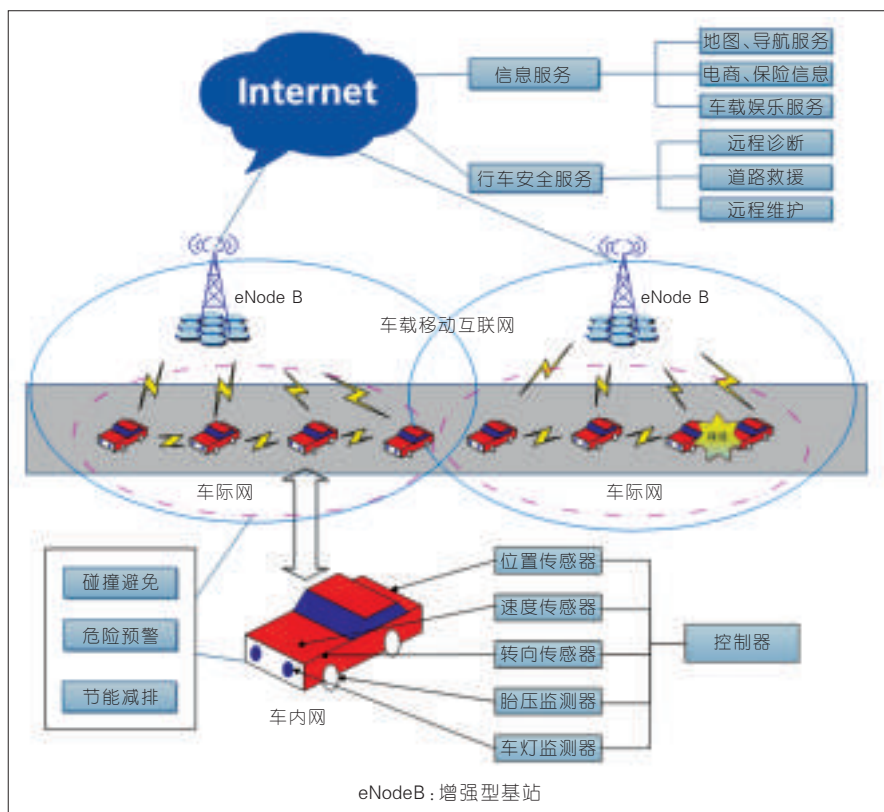
车载终端及车内传感器节点通过对车辆设备状态以及车主驾驶习惯的监测,可提供经济驾驶建议及动力系统优化方案等,从而有效降低油耗成本,实现节能减排。

2 中国车联网发展历程

与欧美、日、韩等国家地区相比,中国车联网技术及相关应用起步较晚。2007年12月,通用汽车公司与上汽集团联合成立了上海安吉星信息服务公司,在亚洲市场推出通用汽车的安吉星(Onstar)服务。该服务通过蜂窝网络及全球定位系统(GPS)为车辆提供碰撞自动求助、紧急救援协助、车辆定位、车辆防盗等服务。2009年,赛格导航、好帮手、城际通等

企业陆续推出车载信息(Telematics)服务系统,标志着中国进入车联网时代,2009也被称为车联网元年。2010年2月,由工信部指导的车载信息服务产业应用联盟(简称“车联网联盟”)正式成立,该联盟由国家车联网相关部门、车载信息服务领域骨干企业、部分科研机构、标准工作委员会及高校共同组成,旨在加强车联网产业链多方合作,促进中国车载信息系统发展。2010年,首届“车联网”研讨会成功召开。2010年10月,车联网中智能车、路协同关键技术以及大城市区域交通协同联动控制等关键技术正式列入国家“863”计划。

“十二五”期间,工信部从产业规划、技术标准等多方面着手,加大对车载信息服务的支持力度,以推进车联网产业的快速发展。2011年,第二届“车联网”产业链合作研讨会在上海召开。12月,由多家高校、科研机构、企业发起组建的中国车联网产业技术创新战略联盟(车联网联盟)在



▲ 图1 车联网网络模型及主要功能示意

北京成立。2012年至今,车联网联盟等多家机构或单位已发起举办多个车联网领域技术研讨会、技术论坛、标准化会议及工作会议等。

3 中国车联网发展现状

近年来,车联网相关技术及产品受到广泛关注,并且已分别在私家车(乘用车)及行业领域得到一定应用。以下简要介绍车联网在中国乘用车及行业领域的发展现状。

3.1 车联网在乘用车领域的发展现状

车联网乘用车市场主要包括以车厂为主导的前装车联网及以车载终端厂家为主导的后装车联网市场。

前装车联网服务是指整车厂在车辆中安装车载终端等产品,在销售车辆的同时向车主捆绑销售车联网产品及服务。目前,主要前装产品包括上海通用汽车各主力车型安装的安吉星,丰田公司的G-book、日产的Carwings、荣威的iVoka以及长安的Incall等。前装车载产品主要基于电信运营商的网络提供语音、数据通信以及基于GPS卫星提供定位和导航等服务。前装车联网市场,整车厂通常采取免费试用与收费相结合的服务模式,即向购车新用户提供一段时间的免费试用期,服务到期后,用户可缴费续订相关业务。尽管车辆标配捆绑销售的模式帮助整车厂迅速积累了一些用户,但由于目前的服务内容及商业模式等问题,用户的粘性不高,续费率较低,通常低于30%。

后装车联网服务是指车载终端产品设备商等通过在已售卖的车辆中加装车载终端产品,实现车辆信息实时获取、一键导航、车辆安防、紧急救援等车联网功能。与前装市场相比,后装市场的产品形态多样,主要产品包括美赛达科技和欧华等公司推出的车机自带通信功能的产品、翼卡车联网推出的以蓝牙为传输介质的产品、车载诊断系统(OBD)加手机APP的产品形式以及基于MirrorLink™

技术的产品等,其中,基于MirrorLink™技术的产品因支持车主在车内通过智能手机实现联网,可有效解决车联网产品与外部网络信息交互问题。

除整车厂商、车联网终端制造商及车载信息服务提供商外,电信企业及互联网企业也已积极涉足车联网。电信运营商中国移动除提供线上音乐、实时路况、车上办公等功能外,还开展了4G多功能车机的研发工作,以支持一键导航、车辆“体检”、资讯、娱乐等功能;中国电信与通用汽车公司合作,为通用等汽车合作商提供音乐、听书、呼叫中心等车载业务;中国联通与特斯拉、宝马、奥迪等世界主流汽车厂商合作,拟在合作厂商汽车中搭载中国联通提供的车载通信3G/4G服务;最近,中国移动联合德国电信成立车联网合资公司,为中国车联网业务提供相应通信服务。

中国各大互联网巨头也已意识到车联网行业的巨大商机,纷纷开展研发并已推出相应产品。2014年5月腾讯公司发布路宝盒子,通过将路宝盒子插入汽车相应接口,可实现汽车与腾讯云服务互联,提供车辆诊断、油耗分析等服务。百度公司也于2014年上半年发布CarNet,该产品通过将用户的智能手机与车载系统无缝结合,实现“人、车、手机”之间的互联互通,可提供路线规划、导航、移动语音搜索、地图位置搜索及周边信息服务等应用。

目前车联网的发展还主要停留在基于移动互联网的导航、娱乐等信息服务阶段,基于车间通信实现车车协同、提高车辆安全性等的功能应用,如前车碰撞预警等应用相对较少,主要原因是车联网行业标准不统一、安全相关产品应用规模受限等问题导致车间通信模式难以实现。另外,基于车间通信的车联网安全相关应用技术要求较高,涉及车辆自组织网络无线信道接入、时延敏感业务传

输服务质量(QoS)保障、多跳高效路由等诸多具有挑战性的关键技术。目前技术尚不完善,产品成熟度不高也是应用迟迟难以推广的重要原因。

3.2 车联网在行业领域的现状

中国车联网在行业领域的发展速度较乘用车领域更快,从整车厂家、汽车设备商、GPS运营商到后装市场的设备制造商都积极地涉入到车联网的行业中。

商用车车联网市场受国家及地方政策影响相对比较大。2010年交通部办公厅发布了《关于加强道路运输车辆动态监管工作的通知》。通知要求,两客一危车辆必须安装相关的车载终端设备,且必须接入交通部监控平台。

由于商用车市场地域性很强,因而主要市场以后装车载终端为主。虽然车厂也推出了相应的品牌,如宇通集团的安节通,金龙客车的G-BOS,陕汽重卡的天行健,北汽福田的欧辉,但车厂因受限于与地方交通管理部门的沟通,以及车载终端设备与当地交通管理部门交管平台的接口,导致其真正实现高效、可靠的车联网服务仍是较为困难的问题。而后装市场通常由地方交通管理部门组织采购安装,一定程度可保证车辆监管功能的实现。业务推广方面,商用车市场基本上以企业与企业之间(B2B)的商务模式为主,且以自上而下的项目形式进行市场推广,无论是在收费方面还是在项目推进方面,均相对容易。

目前来看,商用车车联网的应用基本可实现车辆接入网络,远程平台对车辆进行安全监控及管理,然而,尚存在监管力度有限、效果差强人意,违法违规运营活动的及时发现及有效处理执行难度较大等问题,导致车联网在保障车辆安全运营、减少交通事故中所起到的积极作用远低于预期,另外,如何基于网络基础设施、车辆运营及网络信息资源为商用车企业、车主及驾乘人员带来增值服务

仍是需探讨的课题。

4 中国车联网发展的挑战及对策

4.1 中国车联网发展的挑战

近年来,车联网相关概念已引起行业上下游企业及用户的广泛关注,部分技术及产品也处在积极推广应用阶段,然而,整体而言,目前中国车联网发展仍较为缓慢,车联网行业及车载终端与服务等方面的技术产品仍面临着严峻挑战。

(1) 车联网架构与标准方面的挑战

在车联网发展的早期,汽车制造厂依靠服务提供商向车主提供车载信息服务,不同的车厂往往依赖不同的服务提供商,但不同车厂之间的服务提供商提供的服务基本雷同,而且并不兼容。统一、完整的标准是车联网产业化的基础,技术标准将直接影响设备、系统的互联互通性,缺乏标准致使交通信息化系统建设效率低、成本高、重复开发,造成资源浪费。

在车载信息服务方面,下一代Telematics协议(NGTP)是最早的车载信息服务体系框架及开放的技术标准协议,它为车联网产业应用提供了更大的灵活性及可扩展性,包括了从车载终端到后台各类服务的访问。在车际网方面,IEEE 1609定义了通信服务,而SAE J2735专用短距离消息集字典定义了交换的应用层消息。实际上车联网系统包含了上述两方面,而且这两方面不是孤立的,同样存在交互,因此需要一个更顶层的架构来描述^[7-9]。

如何构造能支持车载信息服务及车际网服务的开放式架构,统一不同车厂及信息服务商的服务接口,实现异构系统集成与终端接入的动态分配,从而支持车联网业务的透明分发与负载均衡,对中国车联网产业是一个极大的挑战。

(2) 车联网关键技术及核心产品研发面临的挑战

车联网中涉及信息传感、无线通信、移动计算、网络控制、信息安全等多项关键技术^[9],关键技术功能性能受限将严重影响车联网产品及应用的用户体验,而车联网中车辆快速运动、信道特性迅速变化、网络拓扑结构灵活多变等特性以及各类应用严格的QoS需求均对车联网各项关键技术,如车载终端语音识别、车载移动互联网无线接入、车际网动态组网、紧急消息可靠低时延传输以及车联网信息传输安全、用户隐私保护等提出严峻挑战^[10-11]。

如何合理统筹组织研发力量,力争实现关键技术的突破,研发具有竞争力及高性能的车联网关键产品及应用是亟待解决的问题。

(3) 车载终端面临来自智能终端的挑战

近年来,智能终端技术得到快速发展,各类智能终端功能性能不断扩展升级,且已得到广泛应用。车辆驾乘人员通过随身携带的智能终端可接入外部网络,实现信息交互。通过使用现有网络服务以及安装部分车辆信息服务软件或应用,智能终端可高效便捷地实现车载终端的信息服务功能。另一方面,因技术不够完善、缺乏统一标准等多种原因,目前已研发推广的车载终端功能、性能尚具较大局限,产品应用主要以信息服务为主,基于车际通信的安全相关应用尚不够完善。面临来自智能终端的严峻挑战,缺乏功能性能优势的车载终端如何避免被边缘化、如何发挥自身优势、实现功能性能提升是车载终端研发及车联网发展面临的重要课题。

(4) 车载终端提供商面临来自第三方服务商的挑战

近年来,中国各大互联网巨头纷纷进军车联网行业,并已研发出基于“人、车、手机”之间的互联互通实现车辆诊断、信息服务等功能的产品及应用,可较大程度满足车载互联网及车内网应用需求。互联网服务商在

研发满足用户个性化需求、便捷、实用的用户应用方面的丰富经验,以及开放、创新的互联网思维及商业模式均给传统车载终端提供商带来巨大冲击及严峻挑战。如何转变思路、开放创新以及采取合作共赢的模式研发具有竞争力的车载终端产品,在激烈的车联网行业竞争中占领市场是传统车载终端提供商亟需解决的重要问题。

4.2 中国车联网发展对策

针对中国车联网发展现状及面临的挑战,本文提出以下对策:

(1) 高度重视车联网标准化工作

体现在加强车载终端的标准化、开放性功能研发以及相关应用的标准制订。目前,中国车联网相关产品及应用尚无统一标准,各链接系统缺少统一的参考平台和接口,导致产业链上各厂商在布局车联网时缺乏相对统一的参照标准,研制产品及系统不兼容,车际通信及信息共享难以实现,为实现车联网应用的推广及普及,应高度重视车联网标准化工作,加强车联网相关产品及应用的标准化研究,特别是针对车载终端的标准化及开放性功能相关研发,以及各类应用的标准制订。

(2) 加大车联网技术研发力度

体现在加快推进试验系统开发验证,为产品及应用的推广普及提供坚实的理论及技术保障。

针对车联网特殊应用环境,充分考虑各类应用需求,开展各项关键技术研发与试验验证系统的研发。充分利用电信运营商网络资源,开展车载互联网无线接入技术,特别是接入有效性、可靠性、可扩展性的研究及试验验证;基于IEEE802.11p等车际通信国际标准,开展车际网组网、多跳数据传输及路由等关键技术研发,应着重不同网络场景下的传输性能以及安全相关业务的严格传输时延及可靠性保障等问题。

(3) 与智能车辆技术深度融合

体现在形成车辆(群)乃至整个交通系统的智能化解决方案。

为了保证车联网技术的长期持续发展,为行业应用提供有效支撑,有必要规划车联网技术的长期研究目标。车联网通过车内网、车际网以及移动互联网的互联,主要实现了车辆的信息化,为各种信息服务与应用提供一个基础平台。汽车与信息技术结合的更高阶段的目标则是车辆的智能化,这与车辆的信息化是密不可分的。从车联网的角度,可以将智能车辆技术视为车联网基础上的一类智能应用;而从智能车辆的角度,车联网则是智能应用的基础或者制程技术。因此车联网技术的长期发展还必须与智能车辆技术深度融合,形成车辆(群)乃至整个交通系统的智能化解决方案^[12-13]。

(4) 加强产业合作

体现在建立积极有效的合作机制,实现资源高效共享、有机整合。

车联网产业链庞大,涉及汽车生产商、车载终端设备制造商、技术提供商、服务提供商、经销商、运营商、互联网企业、车辆维修行业及保险业等多个行业。产业链各方应以积极、开放与包容的态度,建立有效的合作机制,实现资源高效共享、有机整合,共同探索和打造真正满足客户需要的刚性车联网服务,推动车联网应用的快速发展普及。

(5) 坚持创新思维

体现在将免费模式与收费模式相结合,将互联网思维与汽车思维相融合,探索新型商业模式。

车联网的商业模式是业界广泛关注和深入探讨的话题,然而,截至目前,车联网尚不存在一个广泛被接受的成功的商业模式^[14-15]。客观而言,目前车联网主要采用的免费与收费模式相结合的商业模式是扩大用户群、快速推广车联网业务的有效手段,然而针对用户免费期内使用率低,到期续费率低等问题,车联网服务商应考虑将汽车思维与互联网思

维相融合,利用服务免费期与用户建立密切联系,充分积累用户信息,应用大数据、云计算等新技术,对用户数据进行分析、挖掘,为用户提供个性化业务,同时也可基于用户数据挖掘与创新应用开发出能够提供车辆安全性、经济性的深度应用,让用户体验车联网的核心价值,提高用户忠诚度。在确定客户粘性后,按服务深度分层收费。特别地,针对目前车联网相关应用服务套餐年费较高,用户付款意愿较低的问题,服务提供商可考虑将服务拆分,化整为零,支持车主以较低费用按需购买服务。

应用互联网思维推广车联网业务,整车厂商也可考虑向车主推行一些永久免费的服务,以提升整车的功能和竞争力,提高销量。同时,以低成本尽可能地扩大整车厂车联网服务覆盖车主群体,以快速推广车联网产品及应用,建立车主与车厂之间、车主之间的信息交流通道,并基于该信息通道,拓展客户体验、增强服务。此外,通过收集、分析用户信息,也可有效开展个性化服务,如信息咨询、保险、广告定向推送、优惠加油信息等。

参考文献

- [1] KARAGIANNIS G, ALTINTAS O, EKICI E, et al. Vehicular networking: a survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, 14(4):584-616. doi:10.1109/SURV.2011.061411.00019
- [2] BHOI S K, KHILAR P M. Vehicular communication: a survey [J]. IET Networks, 2014, 3(3):204-217. doi:10.1049/iet-net.2013.0065
- [3] WILLKE T L, TIENTRAKOL P, MAXEMCHUK N F. A survey of inter-vehicle communication [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 12(2):3-20. doi:10.1109/SURV.2009.090202
- [4] TOOR Y, MUHLETHALER P, LAQUITI A, et al. Vehicle ad hoc networks: applications and related technical issues [J]. IEEE Communications Surveys, 2008, 11(3):74-88. doi:10.1109/COMST.2008.4625806
- [5] CESPEDES S, LU N, SHEN X M. VIP-WAVE: on the feasibility of IP communications in 802.11p vehicular networks [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(1):82-97. doi:10.1109/TITS.2012.2206387
- [6] 宋亚迪, 余建斌. 车联网:“智慧”驾车更惬意

[N]. 人民日报, 2013-11-12

- [7] ZHOU J Z, HU R Q, QIAN Y. A scalable vehicular network architecture for traffic information sharing [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(9):85-93. doi:10.1109/JSAC.2013.SUP.0513008
- [8] MANGHARAM R. The car and the cloud: automotive architectures for 2020 [J]. Winter Issue of The Bridge on Frontiers of Engineering, 2012, 42(4):25-33
- [9] 汪振兴, 王维莉. 车联网技术的一些新进展 [J]. 现代电子技术, 2014(6):76-77
- [10] VINEL A, CAMPOLO C, PETIT J, et al. Trustworthy broadcasting in IEEE 802.11p/WAVE vehicular networks: delay analysis [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(9):1010-1012. doi:10.1109/LCOMM.2011.070711.110999
- [11] PANICHPAIBOON S, PATTARA-ATIKOM W. A review of information dissemination protocols for vehicular ad hoc networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(3):784-798. doi:10.1109/SURV.2011.070711.00131
- [12] 李希金, 王志军. 电信运营商车联网发展战略思考 [J]. 现代电信科技, 2014, 44(3):29-33
- [13] 何宗键, 曹建农, 郑俊浩. 车联网社交网络:机遇、挑战和应用 [J]. 中兴通讯技术, 2014, 20(1):31-34
- [14] 马钧, 李喻. 中国车联网产业结构及商业模式研究 [J]. 汽车工业研究, 2014, 19(9):24-28
- [15] 李步峰, 江勇, 崔有祥. 车联网商业模式分析与研究 [J]. 软件产业与工程, 2014, 10(1):31-34

作者简介



陈前斌, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 重庆邮电大学通信与信息工程学院执行院长兼任移动通信技术重庆市重点实验室主任, 中国通信学会会员, 中国电子学会高级会员, IEEE高级会员; 主要研究方向为移动通信系统、通信网络技术、多媒体通信技术等; 已主持完成基金项目20余项; 已发表学术论文90余篇, 出版著作6部。



柴蓉, 重庆邮电大学副教授; 主要研究方向为移动通信系统、通信网络体系架构、无线资源分配、移动性管理等技术; 已主持及参与基金项目10余项; 已发表学术论文50余篇, 出版著作2部。



岑明, 重庆邮电大学教授, 重庆高校汽车电子与嵌入式系统工程技术研究中心副主任; 主要研究方向为信息融合、目标跟踪与识别、车联网技术等; 已主持或参与基金项目20余项; 已发表学术论文20余篇, 出版教材1部。

中国发展可见光通信技术与产业的思考

Development of Visible Light Communication Technologies in China

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 01-0052-003

摘要: 认为随着固体照明技术在世界范围的广泛应用,可见光通信已引起学术界和产业界高度关注,并逐渐取得小部分市场,但要真正大规模应用,还需综合考虑技术演进规律,并在国家和地方政府政策扶植下,加强产学研合作,共同推进LED信息化技术应用进程。

关键词: 可见光通信; 技术演进; 发光二极管信息化技术

Abstract: With the worldwide application of solid state lighting technologies, visible light communication has received significant attention from both academia and industry. Visible light communication technology has gradually gained a small market share. However, large-scale application of this technology requires consideration of technology evolution rules. It is also important to obtain support of central and local governments, increase research cooperation between industry and academia, and jointly promote the application of LED informatization technology.

Key words: visible light communication; technology evolution; LED informatization technology

徐正元/XU Zhengyuan

(中国科学技术大学信息科学技术学院, 安徽 合肥 230027)
(School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

- 建议依据技术演进规律制订中国可见光通信技术和产业分阶段发展规划
- 建议打破行业壁垒,融合多种技术和标准
- 建议国家与地方政府成立产学研合作实体,多方位多层次提供政策和保障措施

1 可见光通信技术

可见光通信(VLC)俗称灯光上网技术,又叫LiFi^[1],是一种在半导体照明发光二极管(LED)技术上发展起来的新兴的、短距离无线光通信技术^[2]。利用LED比传统光源光电转换速度快的特点,将信息高速加载到光强上并传输至空间覆盖区域的接收终端,经过光电转换而获得信息。与Wi-Fi等现有射频(RF)通信接入手段相比具有独特的优势。可见光覆盖波长范围380 nm至780 nm,相应

能提供超宽光谱(百太赫兹以上),每秒千兆比特的传输速率已在实验室得到展示,并借助密集分布的光源保证人口密集区域用户的平均容量,为未来宽带移动网络接入带来曙光,为高速大容量移动通信提供了新型手段。其次,可见光不能穿透遮挡物,也不易绕射,因而数据更具安全性和私密性,不易被窃取,对于电子支付、局域保密通信等提供有效手段。再者,由于光波与射频相互干扰很小,使得可见光通信更能适用于电磁复杂或电磁受限场景,如医院、矿井、油田和飞机机舱。另外在室内,手持终端可使用LED光源实现高精度定位导航功能,并可主动转送位置信息至远程监控中心。除了室内照明LED

外,信号显示LED如广告信息屏、交通信号灯、车路灯等也可作为信息发送装置,接入通信网络。

2 可见光通信全球现状

世界范围已展开新一轮可见光通信研究制高点 and 频谱资源开发利用的话语权争夺^[3]。欧美日等科技强国的大型科研计划和机构层出不穷,包括欧洲的OMEGA和EPSRC研究计划,美国波斯顿大学的ERC中心、加州大学的UC-Light中心、宾州州立大学的COWA中心,日本的可见光通信联盟(VLCC)等。2013年10月,欧洲的EPSRC将LiFi的通信速率刷新到10 Gb/s,美国的ERC和UC-Light已报道了室内手机和机器人的精确定位。

收稿日期: 2014-12-01

网络出版时间: 2014-12-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2013CB329200); 中国科学院重点实验室基金(2014DP173035)

中国一些机构和地方政府也资助了可见光通信研究。国家“973”计划项目“宽光谱信号无线传输理论与方法研究”于2013年1月正式启动,研究各波段的光信号传输和通信理论与方法。2013年4月国家“863”计划项目“可见光通信系统关键技术研究”也正式启动,目标实现480 Mb/s可见光通信。国家“新一代宽带无线移动通信网”科技重大专项2014年已完成可见光通信课题的论证评审工作。中科院半导体所研究出的每秒几兆比特的可见光通信系统在2010年上海世博会期间成功展示,目前速率已大幅度提升。深圳市科委资助了清华大学深圳研究生院无线光通信研究团队研究LED信息化技术,上海科委等资助复旦大学研究的可见光链路的视频传输系统在2013年11月上海工博会成功展示。南京和重庆也都投入资助可见光通信技术应用和产业化。最近,中科院成立的无线光电通信重点实验室进行多学科交叉合作,研究多种载波的无线光电通信器件、多模态光电传输技术、网络结构、移动大数据和多媒体等新型业务。国际学术界也掀起了涵盖各色光谱的无线光通信研究热潮。通信领域顶尖级期刊IEEE JSAC和IEEE Wireless Communications以及著名的IEEE GLOBECOM等国际会议近年来均开辟了专题讨论会。

在知识产权方面,从欧美日韩以及中国的可见光通信相关国际专利检索结果发现,索尼、三星在专利产出上有较大优势,而中国企业和机构虽然申请中国一定数量专利,但国际专利数量较少,对产业影响力较弱。在技术标准化方面^[4-5],IEEE于2011年9月通过了第一个无线可见光通信技术标准IEEE 802.15.7《Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light》,提出了减少闪烁和支持调光的相关机制,允许多种不同的拓扑结构,支持各种室内和室外应用,速率从11.67 kb/s至96 Mb/s。

但业界普遍认为该标准缺少足够的照明产业支撑和技术的实验验证,极大制约了它的参考和使用价值。2014年1月IEEE成立了IEEE 802.15. SG7a 研究工作组“Optical Camera Communications Study Group”,修订IEEE 802.15.7,引入闪光灯、显示器、光学相机等作为收发器件,以实现可变速率通信、定位导航和消息广播等功能。近期也有专家在酝酿修订IEEE 802.15.7,增加摄像头低速通信和多载波调制下的高速通信技术与网络协议,形成IEEE 802.15.7r1。

目前可见光通信的研究在世界范围处于起步阶段,在技术方面还有许多问题尚未解决,这些问题包括,如何优化现有LED器件达到照明通信一体化,能否集成LED驱动电源与通信模块,并设计出兼顾照明的通信透镜;从信号调制编码和通信协议方面如何提高通信链路的传输速率,有效解决上行链路、多光源干扰抑制和小区移动切换;在系统和网络层面,如何将空间、颜色、时间、频率、功率等各种资源在多用户间进行最优分配,取得系统总容量的最大化。

3 可见光通信应用市场预测

近年来,LED照明技术发展迅速,成本快速下降,产品应用得到迅猛发展,LED照明产品正快速替代传统照明产品。中国LED照明产业形成了较为完整的产业链和一定的产业规模,为LED可见光通信奠定了较好的发展基础。预计到2025年,LED市场将形成近万亿规模。

可见光通信将在许多有线通信不易实现的场景得到应用,同时在无线传输容量需求旺盛或电磁波受限的场景发挥独特的作用。可见光通信产业在全球还处在探索和起步阶段,但已显示出诱人的应用前景。不仅可以用于室内无线接入网络^[6-7],更可以用于智能家居、智能交通^[8-9]、实时数据采集、近场识别、安全支付和定位^[10-11]等各类应用场景。另外可见

光通信可用于一些特定场景,如射频受限(如航天、医疗应用),安全特殊要求(如采矿、油气田)以及特殊区域(如水下)场景。这些应用还将延伸到半导体显示通信,成像通信^[12],穿戴式设备传感通信等新型应用领域。

在短期内,可见光通信可以实现一些小范围应用。例如,在室内和矿井等区域的定位,在飞机中使用该技术帮助手机和笔记本上网,此外也可以在水下等无线电波无法传播的场所使用。可以预测,在相当长时间内仍需要Wi-Fi,需要射频通信系统。如果光信号被阻挡,当需要发送信息时,使用者可以无缝地切换至射频信号。新型成像定位通信功能将集成于手持终端,定位精度达到厘米级,成像通信达到兆级以上。

4 可见光通信未来发展方向与应对策略

针对可见光通信的全球研究现状和市场分析,中国正面临着千载难逢但稍纵即逝的机遇。一旦可见光通信在中国起步应用,随之而来的将是其在各种各样环境下极其丰富的创意应用和一个崭新的LED信息化时代的到来,同时伴随着光电器件如摄像头和光感二极管被广泛植入移动终端,这一时代的雏形已经出现。中国照明LED产品在国际市场中占据的显著份额将有助于中国在国际可见光通信技术应用和产品推广方面占据一席之地。国家需要统筹制订LED信息化产业战略规划,和可见光通信与测试设备标准,使得可见光通信关键技术研究及应用快速稳步发展,并带动照明LED产业升级。

可见光通信关键技术与网络大数据业务结合。基于不同波段的光波和电磁波作为信息传输载体,从照明约束下的可见光传输技术^[13-15]到大容量无线光电协同通信,以及未来无线光电网络业务与应用几个方向,进一步加大研究投入,提升未来通信网络的传输容量和带宽利用率,满足移

动大数据和移动多媒体业务需求,构建具有精准位置特征的室内高速可见光通信网络,手持和车载移动终端的光通信网络,以及水下无线光通信和传感网络。

可见光通信芯片研发。可见光通信系统诸多主要功能将会集成在未来光电芯片上,包括发射端的电光转换芯片,通信发送信号处理芯片,接收端的光电转换芯片和通信接收信号处理芯片。随着硅基光电子材料和工艺革新,有望研制出通信与照明驱动相结合的发射端LED通信发光芯片、宽带光源驱动芯片、新一代光电转换和处理芯片等,并嵌入薄膜滤光片和微透镜进一步增强可见光通信系统性能,满足低功耗小型化大数据网络终端的要求。

可见光通信技术相关的知识产权风险将会对可见光宽带无线接入产业形成威胁。目前中国面向802.11高速通信的可见光通信专利主要是中国专利,而且集中在点对点通信系统关键技术上,需进军国际专利申请阵营,并拓展技术层面,涵盖新的范畴,比如通信照明器件技术,超大规模阵列收发技术,光谱复用技术,干扰信号处理技术,可变窗口的成像传感器数据读取技术,高精度可见光定位技术,通信照明网络技术。在标准化方面,面向IEEE 802.11和802.15,鼓励相关机构和企业参与全球标准化工作,提交标准草案,推动高速可见光无线局域网和低速成像通信的应用推广和产业化。中兴通讯正在牵头中国可见光通信的标准化工作,华为海思、联想、中国科大、东南大学、北京邮电大学等多家单位参与,在此过程中需要加强与半导体照明标准和企业的衔接。预期在可见光通信这一新兴技术领域,中国将有望拥有更多话语权,取得较多具有自主知识产权的技术成果。

5 结束语

在LED照明产业升级和强大的

通信与基于位置服务应用需求驱动下,未来无线移动通信技术体系将会全面融合从微波至光波不同波段。一方面,现有无线(电)通信的移动通信和宏覆盖等诸多特性将会继续秉承,另一方面,可见光通信在超宽带宽、高精度定位和免受电磁干扰方面将突显优势,更能适应未来多场景和多样化速率的应用需求,包括大数据、高清视频等多媒体业务和微波受限场景。多波段融合将会充分发挥无线通信和可见光通信的各自优势,自适应传输场景及多应用模式,并且深度拓展与其他异构通信网络的互通互联。

可见光通信将能源与信息技术有机结合,目前正处于快速发展的时期。产业界、学术界、金融界正在齐心协力解决目前在应用和产业化推进过程中面临的挑战。预测在相关标准出台后各种移动终端和光源将会标配可见光通信光电模块,与现有无线通信技术深度融合,互相补充,真正让用户快速便捷享受高质量的信息服务。中国在可见光通信技术与产业化方面与大部分国际强国处于同一起跑线上,又具有相对完备的条件和良好的LED产业基础,这将有助于中国取得具有自主知识产权的研究成果,在标准制订及专利申请方面抢占话语权,推动知识经济的发展,增强中国在这一新兴战略性领域的国际竞争力。

参考文献

- [1] ELGALA H, MESLEH R, HAAS H. Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art [J]. IEEE Communication Magazine, 2011,49(9):56-62
- [2] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible light communication system using LED lights [J]. IEEE Trans. Consumer Electronics, 2004,50(1):100-107
- [3] JOVICIC A, LI J, RICHARDSON T. Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(12):26-32
- [4] HRANILOVIC S, LAMPE L, HOSUR S. Visible light communications: the road to standardization and commercialization [J]. IEEE Communications Magazine, 2013,51

(12):24-25

- [5] RAJAGOPAL S, ROBERTS R D, LIM S. IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support [J]. IEEE Communications Magazine, 2012,50(3):72-82
- [6] LI Y Y, WANG L J, NING J X, PELECHINIS K, KRISHNAMURTHY S V, XU Z Y. VICO: A framework for configuring indoor visible light communication networks [C]//Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS), Las Vegas, Nevada, USA, 2012:136-144
- [7] CUI K Y, QUAN J G, XU Z Y. Performance of indoor optical femtocell by visible light communication [J]. Elsevier Optics Communications, 2013,298(2):59-66
- [8] CUI K Y, CHEN G, XU Z Y, ROBERTS R D. Traffic light to vehicle VLC channel characterization [J]. Applied Optics, 2012,51(27): 6594-6605
- [9] BAI B, CHEN G, XU Z Y, FAN Y Y. Visible light positioning based on LED traffic light and photodiodes [C]//Proceedings of the IEEE VTC Fall, San Francisco, 2011,9:1-5
- [10] 姜鹏华, 张洪明, 郎凯, 姚敏玉, 徐正元. 基于室内可见光照明的位置服务系统 [J]. 光子 • 激光, 2012, 23(12):2299-2303
- [11] XU Z Y, GONG C, BAI B. Visible Light Positioning and Communication [M]. Visible Light Communication, Eds: Shlomi Arnon, Cambridge University Press, UK, 2014
- [12] DAMBUL K D, O'BRIEN D, FAULKNER G. Indoor optical wireless MIMO system with an imaging receiver [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2011, 23(2):97-99
- [13] BAI B, HE Q F, XU Z Y, FAN Y Y. The color shift key modulation with non-uniform signaling for visible light communication [C]//Proceedings of the 1st IEEE Workshop on Optical Wireless Communications in China, Beijing, China, 2012:37-42
- [14] BAI B, XU Z Y, FAN Y Y. Joint LED dimming and high capacity visible light communication by overlapping PPM [C]//Proceedings of the 2010 19th Annual Wireless and Optical Communications Conference (WOCC 2010), Shanghai, China, 2010:14-15
- [15] GANCARZ J, ELGALA H, LITTLE T D C. Impact of lighting requirements on VLC systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2013,51(12): 34-41

作者简介



徐正元, 中国科技大学信息学院副院长, 中国科学院无线光电通信重点实验室主任, 中国科技大学无线光通信与网络研究中心主任, 国家“千人计划”特聘专家, 国家“973”项目首席科学家, 加州大学终身教授, 曾为UC-Light研究中心主任; 主要从事宽光谱无线光通信和宽带移动通信理论与实验研究; 已发表学术论文190余篇。

基于优化的分布式深度覆盖研究

Deep Coverage Based on Distributed Optimization

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 01-0055-004

摘要: 认为电磁辐射和用户感知矛盾日益突出, 导致高档社区面临网络覆盖差和宏基站无法建设。通过模拟无线环境、评估现有网络资源, 提出了一种分布式基站加美化庭院型路灯天线的新模式。采用该模式, 网络开通优化后, 网络质量由差提升为优, 随机回访 10 位投诉用户完全解决率达到 90%、基本解决率达到 10%, 有效提升了用户感知。

关键词: 分布式; 深度覆盖; 用户感知; 优化; 仿真

Abstract: There are increasing contradictions between electromagnetic radiation and user perception. In particular, upscale communities often have poor network coverage and few stations. We simulate a wireless environment and evaluate existing network resources and propose a new model based on distributed station plus garden landscaping type streetlights antenna. The quality of the network promotion is excellent. Random visiting 10 users, the completely resolved rate of is 90%, and the basically resolved rate is 10%. User perception is enhanced.

Key words: distributed; deep coverage; user perception; optimization; simulation

邓巍/DENG Wei

(中国联通重庆分公司, 重庆 400044)
(Chongqing Branch of China Unicom,
Chongqing 400044, China)

综合分析住宅小区覆盖困难、信号比较杂乱。

1.2 建设方案论证

(1) 建站方式

室外宏基站主要包含灯塔式照射基站和分布式基站两类, 两类基站各有利弊。

灯塔照射式基站, 大功率、高容量, 可控制覆盖范围, 广泛应用于郊区、城市道路等广覆盖、受限建筑物分布、室内深度覆盖较差的地方, 建设方便。

分布式基站, 狭义指射频模块线性或面性分布式放置, 如远端无线射频单元(RRU); 同时也包含天馈系统物理位置相对独立, 如室外分引、单小区多天线等方式; 建设方式灵活, 功率、容量可配置, 布防位置合理可有效规避覆盖阴影, 广泛应用与深度覆盖、线带状区域覆盖等^[4]。

居民区采用何种覆盖完全取决于目标覆盖区域地理图形、建筑物分布和周边基础无线环境。但必须包含点、线、面广度覆盖需求, 并不断用路测和呼叫质量拨打测试(DT&CQT)、数据分析挖掘等手段向用户深度需求挖掘。相关方案思路如图 1 所示。

(2) 信源选取

近年来, 随着移动互联网业务的蓬勃发展, 在繁华都市中用户对 3G 网络质量的期望也越来越高。虽然每年网络建设的投入在不断加大, 但城市水泥森林中的住宅小区特别是高档社区由于建站困难, 用户经常抱怨网络深度覆盖差、业务体验感知不好等问题, 分布式基站采用“小覆盖, 广分布”建设方式^[1-2], 合理优化后, 能有效消除覆盖空洞, 增强用户感知。

1 网络覆盖分析

1.1 传播模型分析

参照 Walfisch-Ikegami^[3]无线模型,

可对 3G 网络小区覆盖分析:

(1) 自由空间损耗

$$L_0 = 32.45 + 20 \log d_{km} + 20 \log f_{MHz}$$

(2) 屋顶到街道损耗

$$L_{ris} = -16.9 - 10 \log w + 10 \log f_{MHz} + 20 \log(h_r - h_2) + L_{ori}$$

(3) 方向损耗

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\phi, & 0 \leq \phi < 35 \\ 2.5 + 0.075(\phi - 35), & 35 \leq \phi < 55 \\ 4.0 - 0.114(\phi - 55), & 55 \leq \phi \end{cases}$$

(4) 多重衍射

$$L_{msd} = L_{bsh} + ka + kd \log d_{km} + kf \log f_{MHz} - 9 \log b$$

$$L_{bsh} + ka + kd \log d_{km} =$$

$$\begin{cases} 72 - 18 \log(l + h_1 - h_r), & h_1 > h_r \\ 72 - 0.8(h_1 - h_r) - 15(h_1 - h_r)h_r, & d_{km} \geq 0.5, h_1 \leq h_r \\ 72 - 1.6(h_1 - h_r) - 15(h_1 - h_r)h_r, & d_{km} \geq 0.5, h_1 \leq h_r \end{cases}$$

住宅小区因楼距近、入射角度有限、基站与建筑物高差参差、多重衍射, 同时 3G 网络频率高传播损耗大,

收稿日期: 2014-03-12
网络出版时间: 2014-10-12
基金项目: 国家科技重大专项
(2010ZX03005-002-03)

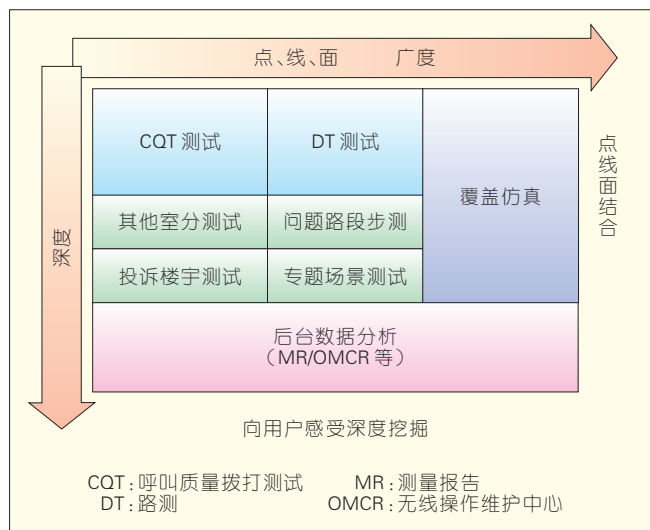


图1
用户深度需求挖掘
方案思路

结合主流基站建设方式,可以选取宏基站作为信源、单独RRU信源、室分外引信源、一体化未功率设备信源和无容量RRU(类似直放站)作为信源。信源选取需首先满足容量需求,其次考虑工程实施。

(3) 天馈选型

照射式基站推荐高增益宽波束天线,尽量解决住宅小区边缘一层及道路覆盖;分布式基站推荐使用中低增益美化天线,方面工程实施,减少信号外泄。

1.3 规划前端优化

方案规划需同时考虑网络质量,因此优化必须前移接入规划,主要考虑3个方面:

(1) 覆盖控制

各规划小区必须控制在各自覆盖半径内,避免过覆盖和覆盖收缩,控制小区干扰,提升小区业务质量,对用户感知有较大帮助。

(2) 邻区设置

分布式基站布放小区过多,受邻区列表影响,部分邻区无法添加,因此在规划前端必须控制小区数量和覆盖交叠范围,减少后期因邻区受限导致语音掉话、数据业务掉线。

(3) 容量规划

容量规划需结合用户数、小区覆盖半径、规划信源和邻区数量,根据

用户数大小合理配置小区半径和小区信源,建议小区资源利用率达到总容量60%。

1.4 覆盖仿真

覆盖方案必须经过严密的仿真才能实施,仿真环境选取3D传播模型,并结合实测楼宇矢量图对3G频

段模型实测校正,模型误差和标准方差控制在较小方位内。

2 高档小区优化分布式建站案例

某高档小区由13栋高层和52栋别墅组团组成,小区内房屋布局亭台楼榭交错,人群聚集地绿化植被茂密,无线信号传播损耗大,在多次呼叫质量拨打测试(CQT)网络测试评估中质量评级为差。小区用户投诉严重,月底投诉高达85例。

2.1 小区覆盖测试及仿真

某高档小区DT&CQT测试后,主要是底层深度覆盖差、车库无覆盖和高层信号杂乱问题。住宅小区覆盖问题分布如图2所示。

获取小区3D信息图,通过选取目标小区楼宇CQT抽测和小区道路DT测试后,得到小区点、线模拟覆盖仿真效果如图3所示。

仿真后找到的问题可划分为7个

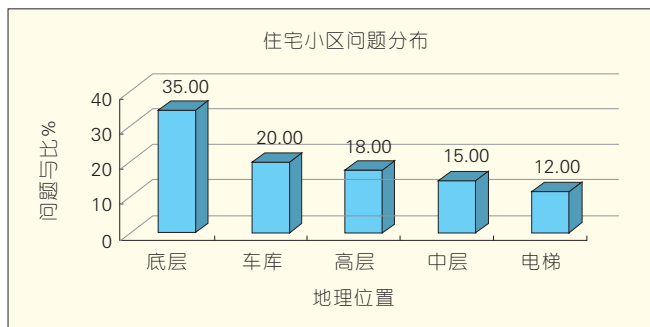


图2
住宅小区覆盖问题分布

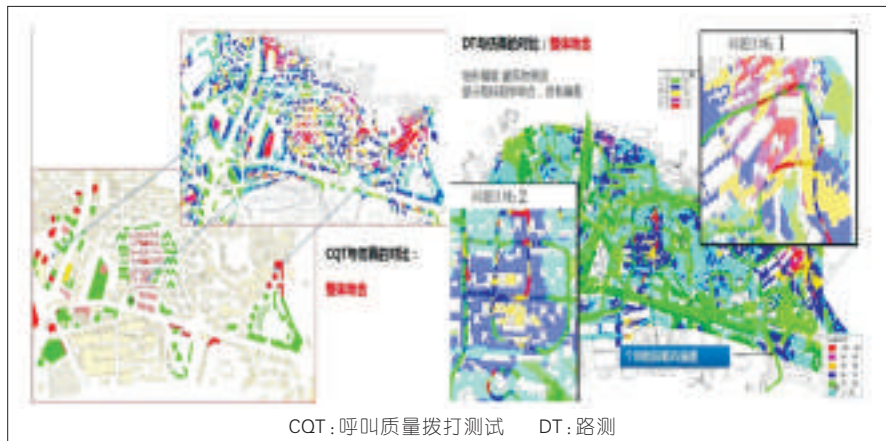


图3 小区点、线模拟覆盖仿真效果

区域,如图4所示。区域1、2室内弱覆盖连片,区域3、4、5、6零星覆盖较差,区域7信号杂乱。

区域1,附近有高层建筑,建议方案实施灯塔照射式基站,天馈建议采用楼顶美化、室内天线、外阳台隐蔽天线。区域2,建筑物较矮且高度基本同高,建议安装室外一体化小基站或独立RRU,天馈安装位置可选择楼中部露台空调伪装或选择相对较矮的临街楼顶或绿化带内路灯杆伪装天线。区域3、4、5、6,建议新增室分外引方式。

2.2 验证测试

实施优化后的分布式建站方式后,网络覆盖率由57%提升到90.8%,信号外泄率接近为零,干扰水平由67%提升至96%,质量评级由“差”提升为“优”;随机回访投诉用户完全解决率达到90%、基本解决率达到10%;语音和数据话务量较原来分别增加了150%和100%。测试验证效果如图5所示。

2.3 后台数据挖掘分析

测量报告(MR)数据包含小区标识、小区扰码、公共导频信道(CPICH)每码片能量比干扰功率谱密度(E_c/I_o)、CPICH信道接收信号功率(RSCP)、事件类型、业务类型、传送时延(TP)值、用户终端设备(UE)发射功率、误码率、无线接入承载(RAB)信息等,结合MR数据和话统指标,可以优化小区过弱覆盖、导频干扰、切换和业务指标等^[5]。

提取小区业务指标,根据MR数据筛选业务问题点TP、RSCP和 E_c/I_o 情况,分析导致业务指标差的原因。Site-D_1小区的自适应多速率(AMR)统计周期一周内掉话152次,AMR掉话集中在无线侧,其中空口无响应66次、信令无线承载(SRB)复位53次,上行失步33次。统计RSCP、 E_c/I_o 、TP数据,该小区AMR业务TP大于3、RSCP小区-90 dBm、 E_c/I_o 小

于-10 dB采样点较多。分析该扇区干扰情况,得出结果:该小区的AMR业务掉话采样点导频污染。掉话点问题分析结果如图6所示。

深度分析掉话采样点,导频污染区域所有小区覆盖都较差,RSCP低于-90 dBm, E_c/I_o 低于-12 dB,弱覆盖是导致掉话的主要原因,可以采用增



▲ 图4 仿真后找到的有问题区域



▲ 图5 测试验证效果

▲ 图6 掉话点问题分析结果

加小区功率、射频(RF)调整等提升覆盖手段解决。

3 结束语

优化分布式建站方案,结合灯塔式照射基站形成立体纵深覆盖,利用了拉远基站设备的灵活性,与庭院美化天线配合,既减少了对小区环境的影响,降低了建设难度,又实现了信号覆盖均匀分布,避免信号外泄对宏站的干扰^[6-15],为解决别墅高档住宅区的深度覆盖提供了一条新思路。

参考文献

- [1] 吴钰. WCDMA分布式基站技术与应用[J]. 移动通信, 2012,43(9):12-16
- [2] 刘清. 分布式基站在移动通信网络中的应用[J]. 硅谷, 2012,8(19):33-36
- [3] 叶银法. WCDMA系统工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006
- [4] 罗崇光. 移动网络分布式基站建设方案研究[J]. 通信技术, 2012,25(2):19-22
- [5] 韩伟禧. 利用手机测量报告数据分析解决WCDMA网络问题[J]. 邮电设计技术, 2010,29(5):11-15
- [6] 曹晓冬. WCDMA热点区域立体覆盖方案探讨[J]. 中国新通信, 2012,33(3):19-23
- [7] 尤广志. 多业务数字分布系统在移动网深度覆盖中的应用分析[J]. 移动通信, 2012,43(4):23-25
- [8] 姜雨薇. WCDMA小区深度覆盖解决方案[J]. 黑龙江科技信息, 2012,27(9):8-12
- [9] 蔡伟明. WCDMA深度覆盖解决方案[J]. 移动通信, 2007,38(1):21-24
- [10] 刘兵. WCDMA深度覆盖解决方案—移频网的建设[J]. 移动通信, 2006,37(5):12-16
- [11] 朱佳佳. WCDMA深度覆盖场景2G/3G互操作参数优化探讨[J]. 邮电设计技术, 2011,30(1):15-17
- [12] 曹晓冬. WCDMA室内覆盖距离理论计算方法[J]. 中国新通信, 2013,34(8):16-19
- [13] 盛国. 室内分布系统设计中干扰问题的分析与研究[J]. 宿州教育学院学报, 2010,8(2):6-9
- [14] 何英哲. 通过联通WCDMA无线网络分析与优化[D]. 北京邮电大学, 2012
- [15] 李合菊. 基于WCDMA无线网络优化的研究[D]. 山东大学, 2012
- [16] (ICC), Glasgow, Scotland, UK, June 2007:4634-4639
- [8] CHEN W, BEN LETAIEF K, CAO Z. Buffer aware network coding for wireless networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012,20(5):1-13
- [9] CHEN W, CAO Z, HANZO L. Maximum Euclidean distance network coded modulation for asymmetric decode-and-forward two-way relaying[J]. Communications IET, 2013,7(10):988-998
- [10] CHEN W, HANZO L, CAO Z. Network coded modulation for two-way relaying[C]// Proceedings of the IEEE WCNC 2011, Cancun, Mexico, Mar. 2011
- [11] ZHAO S H, CHEN W. To Code or Not to Code: Maximizing the Achievable Rate Region of Two-Way Decode-and-Forward Multi-antenna Relay Channel[J]. IEEE Commun. Letters, 2014,18(8):1303-1306
- [12] CHUNG S T, GOLDSMITH A J. Degrees of freedom in adaptive modulation: a unified view[J]. IEEE Trans. Commun., 2001,49(9):1561-1571
- [13] GOLDSMITH A J, VARAIYA P P. Capacity of fading channels with channel side information[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 1997,43(6):1986-1992
- [14] GOLDSMITH A J, CHUA S G. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002,50(11):1860-1866
- [15] CHEN X, CHEN W. Capacity of the broadcasting phase of time varying two-way relaying[C]//Proceedings of the IEEE IWS 2013, Beijing, China, Apr. 2013
- [16] ZHOU X, BAI B, CHEN W, HAN Y. Energy efficient transmission for DF MIMO relay systems with antenna selection[C]// Proceedings of the IEEE GlobalSIP 2014, Dec. 2014, Atlanta, Georgia, USA, 2014
- [17] YANG Y, LI O, CHEN W, HANZO L. Variable-Rate, Variable-Power Network-Coded QAM/PSK for Bi-Directional Relaying Over Fading Channels[J]. IEEE Trans. Commun., 2014,66(10):3631-3643
- [18] SIMA J, CHEN W. Joint network and gelfand-pinsker coding for 3-receiver gaussian broadcast channels with receiver message side information[C]//Proceedings of the IEEE Int. Symp. Inform. Theory, 2014:81-85
- [19] SIMA J, CHEN W. Joint Network and Dirty-Paper Coding for Multi-way Relay Networks with Pairwise Information Exchange[J]. accepted by IEEE Global Commun., Dec. 2014
- [20] CHEN W, BEN LETAIEF K, CAO Z. A cross layer method for interference cancellation and network coding in wireless networks[C]//Proceedings of the IEEE ICC 2006, Istanbul, Turkey, Jun. 2006

作者简介



邓巍,中国联通重庆分公司网优中心工程师;从事WCDMA、GSM无线网络优化网络规划工作;已发表学术论文7篇。

←上接第33页

- [15] CHEN X, CHEN W. Capacity of the broadcasting phase of time varying two-way relaying[C]//Proceedings of the IEEE IWS 2013, Beijing, China, Apr. 2013
- [16] ZHOU X, BAI B, CHEN W, HAN Y. Energy efficient transmission for DF MIMO relay systems with antenna selection[C]// Proceedings of the IEEE GlobalSIP 2014, Dec. 2014, Atlanta, Georgia, USA, 2014
- [17] YANG Y, LI O, CHEN W, HANZO L. Variable-Rate, Variable-Power Network-Coded QAM/PSK for Bi-Directional Relaying Over Fading Channels[J]. IEEE Trans. Commun., 2014,66(10):3631-3643
- [18] SIMA J, CHEN W. Joint network and gelfand-pinsker coding for 3-receiver gaussian broadcast channels with receiver message side information[C]//Proceedings of the IEEE Int. Symp. Inform. Theory, 2014:81-85
- [19] SIMA J, CHEN W. Joint Network and Dirty-Paper Coding for Multi-way Relay Networks with Pairwise Information Exchange[J]. accepted by IEEE Global Commun., Dec. 2014
- [20] CHEN W, BEN LETAIEF K, CAO Z. A cross layer method for interference cancellation and network coding in wireless networks[C]//Proceedings of the IEEE ICC 2006, Istanbul, Turkey, Jun. 2006

作者简介



杨延平,解放军信息工程大学在读博士研究生,目前就读于清华大学电子系认知与协同通信实验室;主要研究方向为无线认知通信、网络编码、自适应调制;参与基金项目1项;已发表学术论文1篇。



陈巍,清华大学电子工程系教学委员会主任、系务会成员、教授、博士生导师;主要研究领域为无线通信、信息论与网络理论;已主持基金项目10余项;已发表学术论文130余篇,其中被SCI/EI检索100余篇。



李欧,解放军信息工程大学教授、博士生导师;主要研究方向为无线通信、无线传感器网络和无线认知网络;已发表论文60余篇。

综合信息

文件传输新技术问世

创业公司 Keyssa 开发了一种新技术允许用户在不 到 5 秒钟的短短时间里即可完成大型文件的传输,而且无需插入式设备。一部标清电影 3 秒钟传完。

Keyssa 开发的这种所谓“亲吻式连接”(Kiss Connectivity)技术在两部设备之间来回传输信息,这种

技术在某种程度上与近场通信技术类似,但传输速度却快得多。从本质上来说,这种技术是利用高频无线电在两部设备之间传输信息。

Keyssa 称,该公司的第一批客户是智能手机、平板电脑和电脑公司,但并未透露具体包括哪些厂商。

(转载自《中国信息产业网》)

跨界的力量

Strength of Crossover

袁飞/YUAN Fei

孙枕戈/SUN Zhenge

(中兴通讯股份有限公司战略规划部,
深圳 518057)
(The Strategy Planning Department of ZTE
Corporation, Shenzhen 518057, China)

1 跨界的诠释

很显然,“跨界”并非一个晦涩难懂的词语。简而言之,“跨界”就是跨越自己的本来领域而进入另外一个领域,包括跨界竞争和跨界合作等等。当然,最有可能的是合作里面包含竞争,竞争里面蕴涵合作,纯粹的竞争和合作在当今世界是不可现实的。反过来说,害怕“跨界”就是害怕尝试、害怕失败、害怕前功尽弃。更进一步说,被动的、迟疑的、迟到的跨界注定会错失很多机遇。

“跨界合作”就是“他山之石,可以攻玉”,就是“拿来主义”,就是抱着谦虚好学的态度去吸取其他领域的精华来发展壮大自己。而“跨界竞争”呢,则有“侵袭”的意味,有可能是因为自己原来的领域的市场空间缩小了,需要大力进行拓展,也有可能是因为原有领域的技术落伍了,不再具备核心竞争优势了,需要主动冲出去开辟新的途径。

在英语里面,“Crossover”的原意就是“跨界合作”。如果我们试图用时髦的话来诠释,那就是:在更多的时候,跨界代表着一种新锐的生活态

收稿日期: 2014-11-16
网络出版时间: 2015-01-14

中图分类号: TN9215; TP393 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 01-0059-004

摘要: 认为当前各行各业的跨界正在如火如荼地发生着,以前所未有的姿态和步伐改变着我们经济生活和社会生活的方方面面。除了 ICT 领域和其他领域间的大胆跨界外, ICT 领域内部的跨界也异常引人注目。指出作为 M-ICT 战略的提出者、倡导者和推动者,中兴通讯将在今后若干年内展现丰硕成果,为 ICT 产业做出应有的贡献。

关键词: 跨界; 信息与通信技术; 大数据; 云计算

Abstract: Crossover is happening in most domains at a rapid speed and is changing every aspect of our economic and social life. In addition to the bold crossover between ICT domains and non-ICT domains, crossover inside ICT domains is also attractive and meaningful. As an author, advocator and facilitator of the M-ICT strategy, ZTE will achieve fruitful results in the next few years and make its contribution.

Keywords: crossover; information communication technology; big data; cloud computing

度和审美方式的融合,对于一个产品品牌而言,跨界最大的益处是让原本毫不相干的元素相互渗透、相互融合、相互磨合,从而给品牌带来一种立体感和纵深感,抑或能创造一种新的品牌出来。

2 跨界的例证

尽管跨界有许许多多吸引眼球的例证,但我们没有太多时间以及预留太多篇幅去讨论信息与通信技术 (ICT) 领域以外的、或者说与 ICT 毫不相干的跨界。比如一个直观的例子就是“飞行汽车”,属于飞行技术和汽车技术的跨界产品,人们还热切期盼这类神器在地面交通严重堵塞时能及时升空并发挥奇效。还有炙手可热的 3D 打印,也是打印技术与制造技术以及新材料技术紧密结合后的典型跨界。针对本文,我们需要将

目光投向我们所熟悉的物联网、互联网 (移动互联网和工业互联网)、云计算、大数据以及由它们而产生的跨界效应。同时,我们也不忽视新一代 ICT 基础设施 (服务器、存储和网络),还有它们支撑、催生的新型业务以及由此引发的跨界思索。

2.1 ICT 领域和其他领域间的跨界

2.1.1 各行各业争相与物联网进行联姻和跨界

以汽车行业为例,原来的汽车是以发动机作为核心,其他外围部件加上车轮作为配套的,而驾驶员则是操控汽车正常行驶的关键所在。而“物联网”的兴起以及衍生出的“车联网”概念,则为传统汽车产业的求新变革带来了机遇。总体说来,“车联网”将实现车与车、车与路、车与行人以及

车与远端互联网之间的信息交互,这种跨领域的统一通信和娱乐功能无疑将使得汽车更加智能化、人性化,更加符合互联网时代人们的精神追求。可以预测,这种“多领域跨界应用”极有可能是下一个利润增长点,于是乎众多汽车厂商风起云涌般地抢占市场先机,加剧和促进了传统汽车产业的升级、转型以及变革。可以观察到,一些传统汽车厂商主动向ICT领域的巨头们寻求合作,将互联网语音技术和云计算技术伺机引入到汽车行业,力图使车联网的交互更加便捷、功能日臻完善、应用愈发多彩。同时,未来的智能汽车也没有理由不成为大数据应用的重要载体之一,必将成为嗅觉灵敏的互联网巨头的兵家必争之地。

除此之外,消费者可以反客为主,比如积极参与到互联网终端的创新探讨和创意设计中去。个中理由并不复杂,在车联网的浪潮中,车体的功能、性能、可操控性和车主(车内用户)的体验、感受同等重要,人们的出行兴致和游玩乐趣不会因为临时性的塞车和长时间的拥堵而变得枯燥乏味。为此,搭载先进的自动操作系统,打破原有的人与车的关系,实现人、车、智能终端三者之间的交互就变得尤为重要。毋庸置疑,各式各样的互联网应用程序可以随时被下载、升级和变更,从而使得车内的生活变得丰富多彩。当然,行车安全是第一位的,驾驶员和车主绝对不能因为某些新奇应用的诱惑而分散了注意力。

2.1.2 各行各业争相与互联网进行

联姻和跨界

在互联网迅猛发展、大行其道的今天,“互联网思维”也被正式提出来,登上了大雅之堂,其四大特征是开放合作、客户互动、跨界颠覆和弯道超车,核心是以开放合作的精神,着手搭建平台模式,宗旨是实现去中心化和建立商业生态圈。基于互联

网思维,传统的商业模式将被重塑,流程、组织和架构将被重新规划。互联网设计人员将最大程度与客户直接进行互动,产品更新换代不再基于传统的“一代接一代”,而是按照实际需求进行“快速迭代”。一种新颖的、基于大规模定制的营销和盈利模式将引领“跨界颠覆”,从而弯道超车的机遇竞相迸发出来。

另外,不管是用于电商、教育和医疗,还是用于餐饮和娱乐,目前互联网的应用主要在人际沟通和消费领域。现在业界同仁不断地发问:如果把互联网用于工业和制造领域会怎么样呢?“工业互联网”就是指将全球工业系统,比如风力发电机、内燃机车、飞机发动机、医疗保健设备,还有石油天然气设备等,基于传感技术、高级计算技术和大数据分析技术改造成为“智能机器”,并通过互联网实现机器相连和人机连接,从而释放整个制造行业的巨大潜能,目标是进一步激发生产力,并重构全球工业体系,使其变得更经济、更清洁、更节能以及更安全。

据统计,鉴于工业互联网本身基于“巨无霸”而发展,即使它只能让效率提升1%,其经济效益也是惊人的,这和个人互联网以及消费型互联网有着显著的区别。

2.1.3 各行各业争相与云计算进行

联姻和跨界

实事求是地说,几年前为很多人所不解、称之为“云里雾里”的云计算已经在各行各业生根落地。“应用为王”、“实践是检验真理的唯一标准”成为云计算迅猛发展的根因。无论是从运营性质来区分的公有云、私有云和混合云,还是逐渐往下渗透的企业云、园区云、接入云乃至个人云、终端云,可以看出,云计算不只是一种技术形态,而是升华为一种商业理念。只要有“资源共享”和“集约经营”需求的地方,云计算都能找到用武之地。所以,各行各业争相引入云

计算就不足为奇了。拿当前炙手可热的智能家居产业来举例,你可以将用户家里的IT设备全部变为纯硬件的“哑盒子”,而将大部分功能提升到局端或者运营侧。你也可以在用户家里创建一套“家庭云”,使之变成“麻雀虽小、五脏俱全”的应用场景:家庭云服务器、家庭云存储、家庭云网络、家庭云编排器、家庭云管理一个都不能少。谁主沉浮?哪一种模式能笑到最后?只有等市场竞争的结果来评判了。

进一步,我们来谈谈云存储。众所周知,对众多用户而言,家里最珍贵的文件就是那些形形色色的照片和视频文件了,尤其是长辈们的稀有照片和孩子们婴儿时代的留影。可以说,备份这些文件的重要性不亚于买保险。为了保护这些私有数据不受灾害的影响,曾几何时,光盘刻录以及移动硬盘俨然成为每个现代家庭必备的工具和手段。然而,云计算改变了这一格局。通过云服务提供商提供的云存储方案(比如云盘或网盘),只需要一个账户和密码,以及远低于移动硬盘的价格,就可以在任何有互联网的地方使用更加快捷方便的服务。可以断言,随着云存储的成熟应用和发展,移动硬盘和光盘刻录等手段必将退出历史舞台。值得一提的是,有些家庭用户害怕将私密数据存储在云服务提供商那里不安全,担心自己的隐私会被泄露,可行的替代办法就是前面提到的“家庭云”:你依然在自己的手机、PC和iPad上进行操作,将你认为重要的文件从前台转入后台的“家庭云盘”上去,你也可以将不太重要的文件存到更后台的云服务提供商提供的海量云盘中去。然而,值得警醒的是,天灾人祸和野蛮外力是不可避免的,一旦发生火灾或者地震,当家里的所有东西毁于一旦时,再先进的“家庭云”也是无济于事的,因为你不可能拥有云服务提供商提供的、鲁棒性很高的“容灾备份”功能,“家庭云”和“公有云”的

天生差别由此可见一斑。

2.1.4 各行各业争相与大数据进行

联姻和跨界

不可否认,各行各业在长时间的发展过程中,都积累了一些历史数据,在现在和未来都不断产生着新的数据。这些数据有体量大的,也有体量小的;有结构化的,也有半结构化和非结构化的;有估值不菲的,也有价值卑微的;有的已经“动如脱兔”,有的依然“静若处子”。不管如何,变废为宝或者挖掘数据金矿早已成为各行各业都异常关注的话题。

迄今为止,大数据的概念已经喧嚣了若干年,在全球(包括中国)的各行各业正逐步落地。但由于经营和运作的特性差异较大,各行各业对大数据的理解角度和程度明显不一样,在具体的“跨界应用”上也存在着千差万别。虽然某些行业/企业已通过大数据获取了实实在在的收益或者极大提升了效率,但不可否认依然处于探索之中的行业/企业也大量存在。尽管多数组织能认识到大数据在改善决策流程和业务成效方面的潜能,甚至高层决策者们对大数据的术语和基本概念耳熟能详,但却不知道该如何入手。

在这里,我们试图将应用大数据的行业分为如下几类。

(1) A类行业

本身的外部客户比较多,而且多多少少带点垄断性质,可以直接收集客户数据,提取有价值的信息后向公众客户进行反馈,或者根据客户的行为习惯和个人偏好为之提供更上乘、更周到的服务。比如,互联网和电信运营、金融、电力、交通等行业都属于该范畴。这些行业不一定要利用“大数据”径直向客户收取额外的费用,原因也很简单:客户满意度高了,效益自然就上升了。

(2) B类行业

对于规划/设计/制造/营销/销售一条龙的企业,则应采取一种注重实

效的方式开展大数据工作。因为客户资源面临着竞争,粉丝数量也会被瓜分,所以要花大力气收集、分析、评判以及精确定位客户的个人喜好及使用习惯,要尽量争取把客户从竞争对手处吸引过来。当然,不清楚客户的真实心态而盲目对客户进行推送也会引起客户的反感,一是客户会觉得不是锦上添花或者雪中送炭,而是觉得多此一举或者增添了额外的麻烦;二是客户发现自身隐私被暴露时也会表现出愠怒。总之,大数据分析结果的推送方式应该更加“潜移默化”或者“润物细无声”,不要让客户感觉赤裸裸地被暴露在阳光下。

(3) C类行业

这类行业相对封闭,自身员工数量比较多,但是外部客户比较少或者外部客户比较单一、比较固定(比如纯生产型、加工型的企业),引入“大数据”主要是用于自身流程的改造,基本上“对内不对外”。然而,如果能预测到某一天情况将会改变,这些行业/企业在大数据策略上也可以采取一些灵活的策略。

2.2 ICT领域内的跨界

在大家都非常熟悉的ICT领域内部,跨界早已悄然发生,有点“润物细无声”的味道。由于传统通信技术(CT)的显著特征是“软硬件垂直一体化封闭架构”,容易被厂家锁定,开放性极度不够,性价比不高,运营商的建设成本(CAPEX)和维护成本(OPEX)长期居高不下……而基于IT简洁架构、以软件创新和经营的互联网业务则发展得如火如荼,因此CT向信息技术(IT)学习借鉴进而实现跨界就成为大势所趋了^[1]。这就是业内不提纯粹的CT,也不提纯粹IT的根本原因。而新一代ICT绝非IT和CT的简单拼凑和捆绑,是一种真正的跨界,比如中兴通讯提出的M-ICT战略就融入了“移动互联(Mobile Internet)”、“万物互联(Man-to-Man/Man-to-Machine/Machine-to-Machine)”

等关键元素。

ICT领域内的跨界还表现在“端-管-云”产业布局的变化,画地为牢和固步自封已经成为历史,生态链上的每个环节在自身能力允许的情况下,都尽可能地扩展地盘并踊跃跨界。我们可以清楚地观察到:原来从事“端”的正在进军“管”和“云”的范围,原来从事“云”的也试图渗入“端”和“管”的领地,而原来从事“管”的依靠对通信技术的深刻理解,更是摩拳擦掌,分别朝两头挺进“端”和“云”的版图。

2.2.1 “云”和“端”的跨界

提起谷歌、微软和亚马逊,人们都不约而同地赞美它们是公有云领域的杰出代表,因为它们所建立的数据中心规模非常庞大,经营的云业务是面向公众的,在“多租户”理念上具备强大的话语权。而且,它们正致力于降低租金,让更多的中小企业和个人用户享受到更多的实惠。但这些云服务提供商同时清醒地认识到,如果没有用户和终端数量的积累,它们的云就如同“房地产泡沫形成的鬼城”,所以它们非常重视终端生态链的发展,比如谷歌就通过对开源手机操作系统Android的所有权和经营权严密掌控了手机产业链的发展。而微软长期以来就是终端软件和操作系统的巨头,近几年在服务器操作系统和云操作系统上获得了突飞猛进的发展。亚马逊虽然拥有王牌的电商公有云AWS,但其终端Kindle则是为用户提供购买、下载和阅读电子书、报纸、杂志、博客及其他电子媒体的利器。另外一个明证就是苹果,不断推陈出新的iPhone和iPad终端以及配套的iOS操作系统和“后台应用商店”形成了一套封闭的端到端生态链,但你不得不承认它仍然被称做“苹果云”。在云中,每天都有形形色色的应用“上架”和“被下架”,无数的粉丝和忠实客户捧着心爱的苹果终端津津有味、乐此不疲地享受着它

们中意的应用。“工欲善其事必先利其器”，这就是“云”和“端”遥相呼应、跨界经营的坚实理由。

2.2.2 “云”和“管”的跨界

在逐渐消逝的纯 CT 时代，管道的“透明性”是其最大的特征，业务层只要以合适的接口带宽和管道连接并提出粗略的需求，剩下的事情就交由管道自己去折腾。在这种情况下，尽管也提“智能管道”的概念，具备所谓的“业务感知”功能，但实现起来总是不够酣畅淋漓，多数时候有一种“捉襟见肘”的感觉。

而在新一代 ICT 环境中，尤其是云计算应用如日中天的时候，由于“物理上的分布、逻辑上的集中”还有“虚机的迁移和管理”成为主流，管道（网络）需要做出深刻改变，需要建立全局视图，网络自身需要虚拟化来保证。云计算业务的“一键下单”和“迅速响应”要求网络不能拖后退，因此软硬件解耦、网络操作系统、网络虚拟化、网络功能虚拟化、开放流表、开放的南向和北向接口、网络应用程序等概念就应运而生，实际上是依靠“顶层设计”解决了“业务”和“网络”长期以来两张皮的问题，走出了“网络自动化严重滞后于云业务自动化”的窘境和困境，同时将网络的硬件 IT 化，形成资源池，让“云网络”的概念正式得到认可和确立，最终实现“云管合一、相生相克”的至高理念。

已经热炒若干年，现正在大力商用化的软件定义网络（SDN）和网络功能虚拟化（NFV）就是“云管跨界”的典型例证，尽管这两种技术各有侧重点，但它们的进一步跨界还会诞生出令人信服的解决方案。具体说来，狭义的 SDN 特指基于 OpenFlow 的网络，广义的 SDN 则是指具备这种理念的所有网络。而 NFV 侧重于网络功能的虚拟化，对于电信运营商而言，就是要采用 IT 虚拟化方式来改造现有的通信网络，让网络功能在任何时间、任何地点、任何场景下都能被随

心所欲地调度。迄今为止，已经没有人故意把 SDN 和 NFV 对立起来了，多数人认为 SDN 和 NFV 是相辅相成、互为补充的：其一，只有实现了网络功能的极度虚拟化，才能保证 SDN 的水到渠成或者说让 SDN 轻装上阵，并让 SDN 真正有别于传统的转发控制分离模式；其二，SDN 也是 NFV 的基础设施（NFVI）中针对网络域的一项使能技术，其全局、集中的控制方式能有效支持网络资源的虚拟化和池化，有利于实现多租户虚拟网络的动态性与自动化需求；另外，在新型云数据中心和部分企业网/园区网里面，诸如“服务、存储和网络一体化”的设计理念已经得到贯彻和落实，云操作系统和网络操作系统的高度紧密互动已经深入人心。

2.2.3 物联网、云计算、大数据的跨界

这三者之间的辩证关系是什么呢？如果它们不跨界，独立发展，那么 ICT 的发展就失去了灵魂，或者说偏离了主线。众所周知，物联网的最终目标是实现万物互联，而万物互联会诞生形形色色、规模不一的数据，并且是来自五花八门的垂直行业，如果不依靠云计算的虚拟化和后台集中能力，这些数据就像一些无头苍蝇，到处乱窜，最终形不成合力，也形不成平台，所以需要海量的云存储将这些数据整合起来，这是第一步，也就是说物联网和云计算必须实现跨界。第二步，整合分为两个档次：松散的整合和有机的整合。要实现有机的整合，必须求助于精准的大数据分析工具。既然庞大的数据是鱼龙混杂的，整体价值难以评估，需要一些先进的工具来进行筛选、挖掘，让数据的集成者和数据的源头输送者都能享受到“价值数据”给企业运营、政府管理和社会生活带来的便利和实惠，也只有这样，前面提到的“变废为宝”、“数据金矿”才能成为现实。

值得指出的是，大数据和云计算的结合是一个早已存在的话题，目前

已经得到验证。其一，大数据要从初始阶段的跟软件即服务（SaaS）结合逐步过渡到和平台即服务（PaaS）以及基础设施即服务（IaaS）的紧密结合。比如，能否从电信运营商的管道里面直接挖掘和分析大数据已经不是一个技术问题，而是牵扯到通信业的法律法规等问题。其二，只有把各式各样的“垂直行业”通过云计算有机整合起来，让各类数据真正实现互联互通，大数据才会更有价值，也只有这样，One2M/智慧城市/万物互联才能真正落地。毋庸置疑，大家都不愿意看到“数据孤岛”的形成。

3 结束语

当前，各行各业的跨界正在如火如荼地发生着，正以前所未有的姿态和步伐改变着我们经济生活和社会生活的方方面面。除了 ICT 领域和其他领域的大胆跨界外，ICT 领域内部的跨界也异常引人注目。作为 M-ICT 战略的提出者、倡导者和推动者，中兴通讯已经吹响了前进的号角，必将在今后若干年内展现更加丰硕的成果，同时为 ICT 产业做出更令人信服贡献。

参考文献

- [1] 孙枕戈. M-ICT 产业发展动态及值得关注的要点 [J]. 中兴通讯技术, 2014, 20(1): 2-4

作者简介



袁飞，中兴通讯股份有限公司战略规划部标准副总工；主要从事新一代 ICT 战略、标准和相关技术的研究；已负责 5 项国际标准的总体架构设计；已发表学术论文 15 篇。



孙枕戈，历任中兴通讯 3G 产品总经理、技术中心主任、美国公司 CEO 等职务；现任中兴通讯股份有限公司战略规划部部长；长期从事新产品新技术研究、通信行业标准和高端国际市场开拓等工作，目前负责中兴通讯产品市场发展策略、对外合作、国际高端市场开拓等工作。

《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 120 期
2015 年 2 月 第 21 卷第 1 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
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:合肥添彩包装有限公司
出版日期:2015 年 2 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