

非均匀密集无线组网

Non-Uniformly Dense Wireless Networking

陶小峰/TAO Xiaofeng

吴慧慈/WU Huici

许晓东/XU Xiaodong

(北京邮电大学, 北京 100876)

(Beijing University of Posts and
Telecommunications, Beijing 100876, China)

2010年4G开始部署,全球范围内开始了5G研究的热潮。5G通信系统的研究预计通过已有技术与新技术的融合解决现有网络不能支撑的诸多挑战,各类新技术的融合能在支持预计移动数据量的同时扩大移动通信所能支持的应用范围^[1]。国际电信联盟(ITU)结合各类业务与应用对网络性能的不同要求,将IMT-2020与已有的IMT-Advanced系统作对比,总结了5G系统的关键性能指标^[2],其中峰值速率预计可以达到10 Gbit/s且用户体验速率达到100 Mbit/s,网络能效及频谱效率分别达到现有系统的100倍和3倍。为了实现更高的用户数据率、更优的无线链路能效以及开发利用更高的频率资源,非均匀超密集组网成为无线网络的发展趋势。虽然通过不断增大网络基站或热点的非均匀密集化组网方式能提供更高的数据速率以及海量的连接,但是同样也带来了严重的干扰问题,复杂的资源分配等问题,而且随着网络的发展,用户体验需求也更加苛

收稿时间: 2016-02-10

网络出版时间: 2016-04-27

基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2014AA01A701)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 03-0002-004

摘要: 无线密集网络作为未来移动通信系统的主要场景,能提供超高的、非均匀的数据量及海量的连接服务,并有提高无线链路的能效以及利用更高的频谱等诸多优势,将成为未来移动通信系统的主要架构之一,研究无线密集组网架构及关键技术意义重大。无线密集网络的网络架构、网络建模分析以及异构密集网络之间的融合是非均匀密集无线网络中的重要研究问题。

关键词: 无框架网络架构;异构融合;随机几何

Abstract: Dense wireless networking, seen as a major communication architecture in future mobile communication systems, can provide super high and non-uniform data traffic as well as massive connectivity services. It can also improve energy efficiency and spectrum efficiency of the wireless systems. Researches on dense wireless networks, including network architecture, network modeling and the convergence among heterogeneous networks, are meaningful and important.

Keywords: frameless network architecture; heterogeneous convergence; stochastic geometry

刻,如安全需求更高等。因此如何在非均匀的超密集组网趋势下,利用有限的无线通信资源,适应未来无线业务的空-时非均匀性和OTT等业务多样化的需求,成为5G组网面临的最大技术挑战。

1 无框架网络架构

无线组网技术的基础是无线网络架构,1G到4G移动通信系统的发展都是基于蜂窝小区架构的演进,这些无线组网方式虽然在一定程度上提高了移动通信系统的网络容量,但由于5G系统中采用非均匀高密度的异构混合组网方式,基于传统蜂窝小区架构的技术演进将难以真正解决限制5G系统网络容量的关键技术问题,进而很难实现5G无线组网架构及组网方式的真正变革。为了突破蜂窝小区架构所带来的一些的限制,

并在未来5G系统拟部署的非均匀高密度异构混合无线网络环境下实现干扰可控与资源可管的容量有效提升,相关研究机构提出了“无框架组网架构(FNA)”及其相应的无线组网策略^[3-7]。

1.1 无框架网络架构部署场景及特点

基于无框架网络架构及组网方法,未来网络中将不再存在具体的小区边界,而是以用户为中心,基站及其天线单元的覆盖范围可以根据用户的业务需求及干扰分布等情况进行自适应调整。

无框架网络架构中,传统基站被分解为集中处理单元和天线单元。集中处理单元与天线单元之间通过光纤回程链路、无线回程链路、有线回程链路等多种方式连接。集中处理单元承担着主要的网络控制功能,

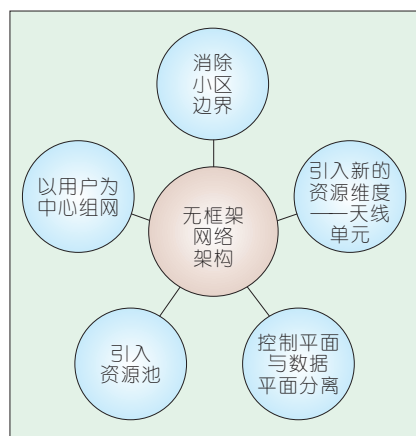
负责无线信号的处理、维护无线接入网络的控制平面及用户平面；天线单元负责无线信号的发送和接收。网络按用户的业务服务质量需求动态地选择合适的天线单元来构建针对各个用户的专属服务天线单元集合。

通过这种功能分解,天线单元被释放,成为一维新的无线资源,从而参与到多维无线资源的管理与控制过程之中。这种无框架网络架构及其组网方法具有如图1所示特点。

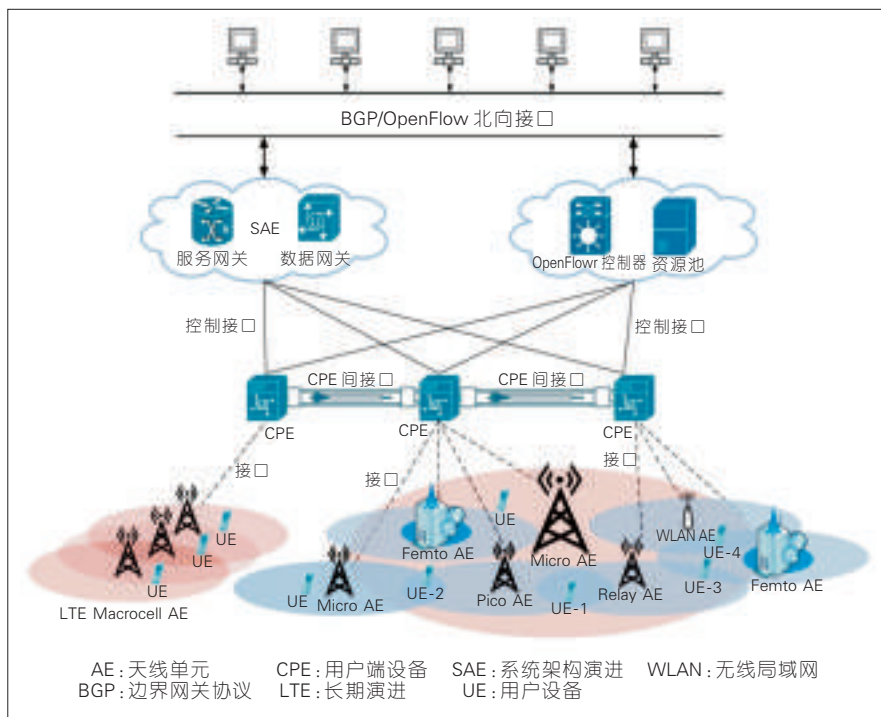
1.2 基于软件定义网络的无框架网络架构演进

基于软件定义网络(SDN)及OpenFlow协议的无框架网络演进架构^[3,7]包括由不同制式、不同类型天线单元组成的,支持各节点完全协作的虚拟化接入网结构,具体包括实现信号处理功能的集中处理单元、连接集中处理单元与天线单元的接口、连接各不同集中处理单元的集中处理单元间接口、支持OpenFlow等协议的控制接口、连接集中处理单元与控制器的控制接口、实现虚拟化无线资源管理的资源池等基本组件^[3]。

此外,传统移动通信中的多天线技术、协作通信技术、中继技术、载波聚合等技术可以灵活地应用到本架构中,从而实现各天线单元以及各天线单元所属的各集中处理单元等接入节点的充分协作,具体的架构^[3]如图2所示。



▲图1 无框架网络架构组网特点



▲图2 基于软件定义网络的无框架网络架构演进

该演进架构不仅支持无框架网络架构所支持的用户平面与控制平面的分离及自适应调整策略、以用户为中心的资源管理及移动性管理策略、自适应业务卸载策略以及集中式干扰管理策略,还融合了SDN与OpenFlow的技术优势,支持基于虚拟化的无线资源管理策略、业务分片策略等组网关键技术,实现了传统移动通信网络架构中接入网的虚拟化,提出了将SDN技术及OpenFlow等协议应用到移动通信接入网架构中的解决方案。与此同时,这种无框架的网络架构中基站、热点以及移动终端的位置更加随机,用于建模传统小区的规则六边形模型不再适用于密集网络的建模,因而需寻找适合于密集网络建模和分析的数学工具与模型。

2 基于随机几何的无线密集网络分析

随机几何是目前应用最普遍的一种针对随机网络的建模工具,它用于研究网络整体所呈现出的统计平均特性,具有非常成熟的数学基础以

及较易分析的数学模型,因此被广泛应用与随机网络、异构网络和密集网络的建模与分析。

2.1 随机几何基本概念

随机几何主要用于解决随机空间问题,可具体解决以下几类问题^[8]:

- 描述一维、二维或更高维度的点的集合;
- 刻画一个点集合所呈现的统计特性以及这个点集合的所有可能实现结果的统计平均值;
- 描述一个存在固定位置参考点的点过程,以及这个点过程呈现的统计特性;
- 给定一个点集合,确定一个产生这样的点集合的统计模型。

根据以上4个问题,我们可以看出:随机点过程是随机几何中最基础也是最重要的一个分支,它是某一区域内的点的随机集合,这些点的分布特性可通过空间平均性来表示。在无线网络中的研究对象通常是基站或者用户,因此利用随机几何对无线网络的建模与分析中一般采用随机

点过程。

2.2 基于随机几何的无线密集网络建模与分析

将无线网络看成是一系列分布在一定区域内的节点组成的集合,根据所考虑的网络,这些节点可能是发送端,如蜂窝网中的基站、WiFi中的接入节点,或者接收端如移动终端等。将具有相同特性的节点建模为一个点过程,每个点过程之间相互独立或存在一定的相关性。在已有的无线网络建模和分析研究中使用最多的随机点过程是泊松点过程(PPP)以及其衍生的泊松点过程,如Cox过程、泊松簇过程等。

以PPP为例,采用PPP对无线密集网络建模,通常假设网络中发送节点和接收节点的位置是独立的、在二维平面服从Poisson点过程。以一对目标发送-接收节点的密集网络为例,将所有信号发送源的位置建模为密度参数为 λ_s 的PPP过程 $\Phi_s \subset \mathbb{R}^2$,所有信宿的位置建模为与 Φ_s 相独立的PPP过程 $\Phi_r \subset \mathbb{R}^2$,密度参数为 λ_r 。对于任意一个接收节点 $x \in \Phi_r$,假设其目标发送端位置为 $y_0 \in \Phi_s$,则接收端接收到的干扰信号功率为除了目标信号之外的其他发送端发送的信号功率 I_{x,y_i} 的累加,即 $I_{agg}(x) = \sum_{y_i \in \Phi_s, y_i \neq y_0} I_{x,y_i}$ 。由于 I_{x,y_i} 与发送端和接收端之间的信道衰落及距离相关,因此接收端的累积干扰信号功率是可数随机变量 I_{x,y_i} 的和,且每个随机变量均是多个随机变量的乘积。

直接分析干扰信号的特性十分复杂,但是在无线网络的分析过程中,干扰信号的功率直接影响接收端的信干噪比(SINR),从而对网络容量、连接、覆盖等重要参数有着至关重要的影响。因此,我们对接收端的累积干扰信号功率的分析有非常重要的意义。随机几何为得到累积干扰信号的统计特性提供了很好的方法。对于随机变量 $I_{agg}(x)$,其拉

氏变换可表达为:

$$L_{I_{agg}(x)}(s) = E \left[e^{-s I_{agg}(x)} \right] = E_{\Phi_s} \left[e^{-s \sum_{y_i \in \Phi_s, y_i \neq y_0} P_i \|x - y_i\|^{-\alpha} h_{s,y_i}} \right] \quad (1)$$

结合PPP过程的概率密度生成函数(PGF)以及Slivnyak-Mecke定理、移位定理^[8]等,可得到干扰的拉普拉斯函数,从而可得到累计干扰的概率密度分布函数和阶距特性。

在得到干扰信号的统计特性基础上,可进一步分析得到网络的终极参数SINR的统计特性,从而可以对网络性能,如网络容量、覆盖^[9-11]、连接度、延时等进行分析。文献[9-10]中采用K层独立PPP对异构网络进行建模并分析了用户的覆盖性能和覆盖性能,结果表明在干扰受限环境下增大基站密度对网络覆盖不产生影响,但在高路径损失环境下增加基站密度能提高用户的网络的安全性能。

为了兼容异构无线网络中大量共同存在的不同制式的无线通信系统,并合理有效地对不同系统进行功能分工,例如传统宏蜂窝系统主传信令信号而热点网络系统主传数据信号等,需要针对移动用户不同需求或根据网络自身状态而对网络功能进行调整。文献[10]中为了实现用户安全传输与基站选择复杂度的折中,提出了一种基于门限的用户接入策略,可针对用户的计算能力和安全需求等通过调整门限值实现安全提升或者基站复杂度的降低。为了实现异构网络间的协作,并能根据实际网络状态调整协作基站集合,文献[11-12]中提出了一种基于用户位置和基于信号门限的异构基站协作机制,用户可根据自身所处位置或者网络状态选择合适的协作基站集合,网络自身也可通过调整门限值增加或降低接入用户的数量。

3 超密集聚合无线网络融合设计

密集聚合无线网络的系统设计

可从系统结构与聚合协作方面考虑,并分别从物理层、数据链路层、网络层等层面实现。

物理层的协作技术不仅可以扩展小区的覆盖范围,消除或减少通信盲点,还可以根据网络环境进行干扰协调,以提高同频组网的性能,改善系统容量。

数据链路层屏蔽下层的差异,为网络层提供透明传输。在具体协议栈实现中,不同接入网络由于各自的特性,具有不同的数据链路层实现。

网络层一方面可以为传输层提供统一的IP接口,另一方面可以屏蔽不同网络底层传输介质的异构性,在异构的网络环境中扮演着“同构层”的角色,其并发传输对于其上的传输层以及其下的数据链路层都是透明的,且其实现自由度大,可以自定义添加各种网络算法模块,但是实现相对复杂,难度较大。

为了验证密集聚合网络的协作与融合设计的性能,图3分别展示了密集聚合网络的系统原理和实际搭建的密集聚合网络。其中蜂窝网络管理控制和维持信令,3个热点网络进行数据传输,通过以上工作模式实现控制与用户(C/U)分离。特别在小区切换时,只需跨宏小区进行信令切换,有效地提高用户接收信号的稳定性并降低切换频率。所搭建的密集聚合网络支持长期演进(LTE)/WiFi等多种网络融合协作,扩展性高;数据包近数据链路层,存储效率高,且协议数据在Linux内核完成,代码执行效率高。

图3中所示的异构密集聚合网络能够实现达7.5 Gbit/s的数据率,且能按需扩展。表1对5G移动通信目标以及理论值做了对比,从表中可以看出:已实现的密集聚合网络在峰值速率和频谱效率方面接近5G目标值,而在功率效率及流量密度方面远超5G目标值。与理论值相比,已实现的3热点+1蜂窝网络还存在较大差距,后续将继续着重研究4个热点网



▲ 图3 密集无线网络原型系统

▼ 表1 不同网络指标对比

指标	目标	已实现(3WiFi频段+1蜂窝频段) 220 MHz, 100 m ²	理论值(4WiFi频段+1蜂窝频段) 260 MHz, 100 m ²
业务峰值速率/(Gbit/s)	100	7.5	13
频谱效率	10 X	34 bit/(s·Hz) (6.8 X)	51.2 bit/(s·Hz) (10.24 X)
功率效率	10 X	10 ⁻⁹ J/s (40 X)	5.8 * 10 ⁻⁹ J/s (232 X)
流量密度	25 X	7.5 Tbit/(s·km ²) (75 X)	13 Tbit/(s·km ²) (130 X)

络与蜂窝网络共存的异构密集网络融合方案与原型系统搭建。

4 结束语

在超密集组网的趋势下,如何利用有限的无线通信资源,适应未来海量的、非均匀的无线数据业务以及满足业务多样化的需求,成为5G组网面临的巨大技术挑战。组网架构是5G组网研究的骨架,从根本上改革网络架构方能满足未来无线业务需求。在此推动下,无线密集网络将成为未来移动通信系统的主要架构之一,研究无线密集组网架构及关键技术

术对满足未来无线通信需求具有很重要的意义。

参考文献

- [1] OSSEIRAN A, BOCCARDI F, BRUAN V, et al. Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications: The Vision of the METIS Project [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 26–35. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6815890
- [2] VISION IMT. Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond [R]. ITU, 2014
- [3] 许晓东, 张慧鑫, 戴巡, 等. 一种移动通信接入网架构: 201410052534.9 [P]. 2014
- [4] XU X D, WANG D, TAO X F, et al. Resource Pooling for Frameless Network Architecture with Adaptive Resource Allocation, Science China Information Sciences, 2013, 56(2): 83–94. DOI: 10.1007/s11432-013-4788-7

- [5] XU X D, ZHANG H X, XUN D, et al. SDN Based Next Generation Mobile Network with Service Slicing and Trials [J]. China Communications, 2014, 11(2): 65–77. DOI: 10.1109/CC.2014.6821738
- [6] 许晓东, 戴巡, 张慧鑫, 等. 一种基于遗传算法的集中式资源管理方法: 201310226342.0 [P]. 2013
- [7] HAENGGI M. Stochastic Geometry for Wireless Networks [M]. British: Cambridge University Press, 2012
- [8] DHILLON H S, GANTI R K, BACCELLI F, et al. Modeling and Analysis of K-Tier Downlink Heterogeneous Cellular Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3): 550–560
- [9] WU H C, TAO X F, XU J, et al. Secrecy Outage Probability in Multi-RAT Heterogeneous Networks[J]. IEEE Communications Letter, 2016, 20(1): 53–56. DOI: 10.1109/LCOMM.2015.2499748.
- [10] WU H C, TAO X F, XU J, et al. Coverage Analysis for CoMP in Two-Tier HetNets With Nonuniformly Deployed Femtocells [J]. IEEE Communications Letter, 2015, 19(9): 1600–1603. DOI: 10.1109/LCOMM.2015.2444836
- [11] WU H C, TAO X F, and LI N. Coverage Analysis for K-Tier Heterogeneous Networks with Multi-Cell Cooperation [C]// 2015 IEEE Globecom Workshops, 2015. USA: IEEE, 2015:1–5. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2015.7413970
- [12] CUI Q M, SHI Y L, TAO X F, et al. A Unified Protocol Stack Solution for LTE and WLAN in Future Mobile Converged Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(6): 24–33. DOI: 10.1109/MWC.2014.7000968

作者简介



陶小峰, 北京邮电大学教授、博导, IET会士, 国家工程实验室主任, 国家杰出青年获得者; 长期从事无线通信基础理论的研究及实践, 现主要研究5G移动通信理论与技术; 两次获得国家技术发明奖; 出版中、英文著作各1部, 发表论文160余篇, 拥有授权专利74项。



吴慧慈, 北京邮电大学在读博士研究生; 研究方向为异构协作无线网络的覆盖与容量分析、异构无线网络物理层安全性能分析与优化。



许晓东, 北京邮电大学信息与通信工程学院副教授、博导; 长期从事无线网络架构及组网理论研究; 承担多项国家自然科学基金等项目; 发表论文70余篇。