

认知融合网络的关键技术

杨春刚, 岳健, 李建东, 盛敏, 李红艳, 刘勤

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 信息科学研究所, 陕西 西安 710071)

摘 要: 关注异构蜂窝网络和认知无线网络的发展, 分别总结了认知异构蜂窝网络、认知家庭基站和认知 WiFi 2.0 网络的概念和相应研究, 凝练了认知融合网络的概念。针对认知融合网络中宏站与多小站共存于相同频段, 必然导致严重的干扰问题, 提出了认知资源管理和认知干扰管理环路框架, 实现资源和干扰的高效管理, 有效提升端到端的用户体验质量。最后展望了认知融合网络的未来发展方向和关键技术问题。

关键词: 认知无线网络; 干扰管理; 资源管理; 异构网络

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)06-0169-11

Key techniques of cognitive convergence networks

YANG Chun-gang, YUE Jian, LI Jian-dong, SHENG Min, LI Hong-yan, LIU Qin

(State Key Lab of ISN, Information Science Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Concentrating on the development of heterogeneous cellular networks and cognitive radio networks, the cognitive cellular networks, femtocell and WiFi 2.0 networks were firstly summarized, respectively. The promising combination potentials of them motivates to define the newly-form networking architecture termed as the cognitive convergence network. In addition, two cognition loops of cognitive resource management and cognitive interference management were proposed to mitigate the intra-tier and inter-tier interference. These cognition loops can help to improve the end-to-end quality of user experience. Finally, the future development and the key techniques of the presented the cognitive convergence networks was looked forward.

Key words: cognitive radio network; interference management; resource management; heterogeneous network

1 引言

高速发展的无线网络提供了多样信息服务。然而, 新的高速宽带业务的不断涌现使得本来日益紧缺的频谱资源更加紧张。因此, 如何探索“频谱空洞”以弥补当前高速业务的频谱亏缺和提高频谱资源利用率是关键技术问题之一^[1,2]。未来的无线网络必将是多种网络共存协同工作, 支持无缝移动的异构融合网络, 如何有效利用多种接入技术取长补短为用户提供高的感受质量也是研究重点。

认知无线电可快速探测和择机使用频谱白空和灰空, 因此, 可提高频谱利用率^[3]。长期演进计划(LTE, long term evolution)的主要目标是提高数据速率、增大系统容量和覆盖范围、降低系统时延和运营成本。学术界和标准界已经开始关注认知技术

在 LTE 系统中的应用。LTE-A 作为 LTE 的演进版本, 目的是满足无线通信市场需求和更多应用。增强的基站(eNB)可依据终端信息进行分布式的自主决策, 其中, eNB 之间增加 X2 接口为信息交互提供高效通道。这些网络架构上的变革有利于未来 LTE/LTE-A 系统中的终端和网络智能化及分布式决策, 为实现认知技术和功能提供了保障。为满足网络容量提升千倍的要求, 探索新频谱、提高频谱效率和增加网络密度 3 个维度构成“立方体”^[4], 如图 1 所示。

如图 1 所示, 物理层技术可有效改善频谱效率, 包含载波聚合、3D/Massive-MIMO 和多点协作(CoMP)等新技术。先进的收发机设计和干扰环境分析等技术可实现收发天线协作增益, 然而, 这些技术面临着边缘小区信号质量较差等问题。同时, 研

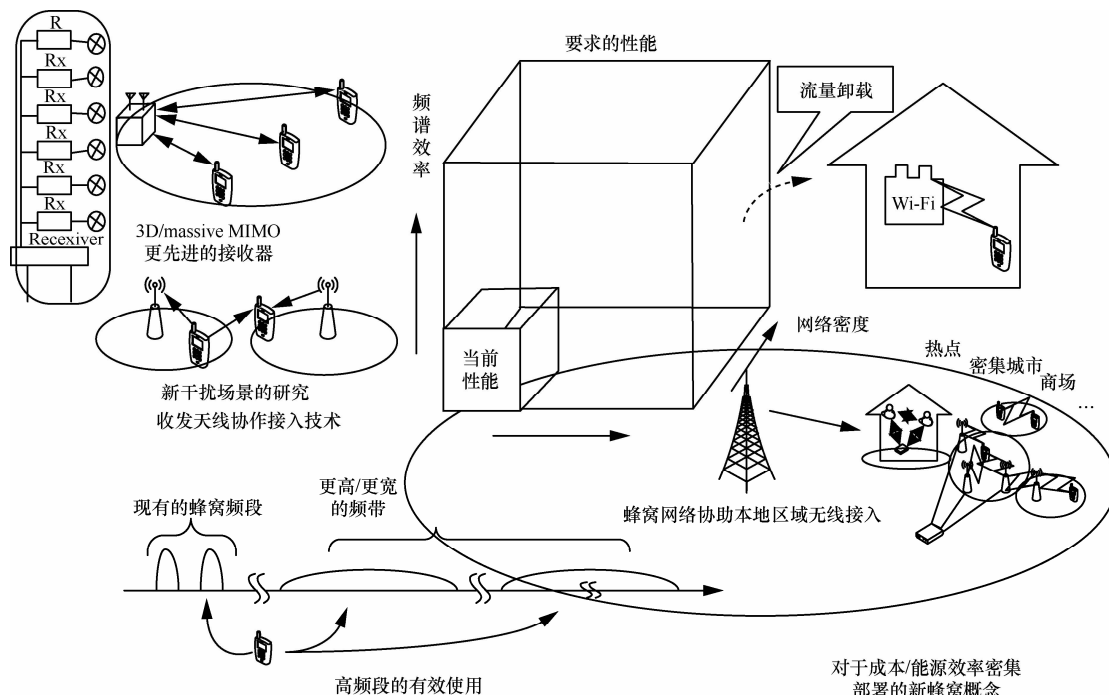


图 1 网络容量提升千倍的 3 个维度

研究表明物理层技术已经基本达到点到点容量极限。目前，微基站、微微基站、室内覆盖、中继站和家庭基站等同制式无线接入网与 WiMAX、移动 2G/3G 网络、无线局域网等不同制式无线接入网共存于热点、商场和城市密集区域。各种异构网络需要高效的管理平台和功能模块来解决日趋复杂的网络接入问题。在网络结构上，需要结合成本和能源消耗探索新型的网络概念，实现宏站和小站的互补互利。已经达成共识是增加网络密度，尤其是增加低成本低功率节点，即部署异构网络(HetNet)是革命性地提升网络容量的新技术。异构网络中小区间负载均衡分布、频谱资源分配、功率资源分配和系统间的干扰协调等十分关键。

认知无线电是智能的、自主感知、自适应和具备频谱资源管理能力的无线电技术。它可以智能地观察和学习周围的无线环境及用户行为，并通过调整自身的参数选择最佳状态以适应周围环境。它作为探索新频谱可实现频谱扩展，从时间和空间上充分利用空闲的频谱资源，以解决频谱短缺与浪费之间的矛盾，即合法的授权用户具有高的优先权接入频谱，而具有认知功能的认知用户允许在对授权用户不造成干扰的情况下机会地接入频谱^[4-6]。目前，已成立的 IEEE 802.22 无线局域网工作组就采用认知无线电技术复用 54~862 MHz 频段。IEEE SCC41

也致力于认知无线电技术的研究，它提出的动态频谱接入方法要求能够避免或降低干扰、无线技术之间能够协同工作，同时还包括了网络管理和信息共享。它的关注点并不在于给物理层或媒体接入层添加某个具体的管理机制，而是更注重发展构架型的概念，以及为不兼容的网络提供协同管理方法^[2]。IEEE SCC41 正在研究 3G/4G 蜂窝网络，WiFi 和 WiMAX 几种网络间基于动态频谱接入策略的网络管理方法。IEEE SCC41 今后将能够为非集中式的多种无线网络提供横向和纵向的网络重配置管理方法，从而实现这些网络之间的互操作。

目前，已经有大量关于认知无线网络和 HetNet 的研究，其中，文献[8]描述在有线网络和无线网络中实现认知网络的动因、架构、功能和设计等。强调了认知对于历史决策和环境信息的学习对未来的行为影响。文献[9]探讨了认知在智能电网、公共安全、宽带蜂窝网和医疗等方面的应用，指出相应的挑战和解决方案，同时介绍了标准化进展。文献[10]基于协作分集和多用户分集的概念提出几个顽健协作频谱感知技术。文献[11]介绍了 HetNet 分层结构中不同的设计技术和相应分析性能的分析工具。文献[12]总结了当前 HetNet 异构网的发展和空口等，明确了空口、网络节点和频谱分配，并对干扰管理作为重要的部分详细介绍。文献[13]关注自

配置和自优化的 HetNet 异构网络,讨论了自动物理小区标识分配和无线资源配置。

进一步深化合作思想和认知技术到 LTE/LTE-A 系统,例如,利用异构蜂窝网络中特有的分层结构^[14],采用认知的思想提出基于宏站和小站之间合作的节能方法^[15]。面向 LTE/LTE-A 的千倍速率提升的要求,本文基于合作的思想采用认知技术的观点探讨异构网络融合。认知异构网络融合是基于认知技术实现异构或者同构网络高效融合的网络形态。认知融合网络区别于认知无线网络和异构网络的特点:通过认知实现多种异构网络、异构频段和异构环境的多维感知,在资源调度和干扰规划方面具有更多可以调整的空间。本文是在总结当前认知技术在异构蜂窝网、家庭基站网和无线局域网的发展和应用的基础上,并针对最新的关于多模家庭基站、认知 WiFi 2.0 网络以及 WiFi 有效卸载宏蜂窝业务等研究成果的基础上,提出认知融合网络的概念。明确认知融合网络的优缺点,通过充分探索认知技术和协作技术等实现认知异构融合网络的独特的优势。重点考察了认知融合网络中的多种异构网络、异构频段和异构环境中的资源管理和干扰问题。

2 认知融合网络的技术背景和定义

本节针对工作在授权频段的宏站与多小站共存的异构蜂窝网络和工作在非授权频段的无线局域网,分别总结了认知家庭基站和认知 WiFi 等关键技术,并明确提出认知融合网络的概念、结构和优缺点。认知技术不仅为未来异构网络提供更多的频谱资源,同时为多种制式的网络进一步融合提供可行思路。在蜂窝网络方面,面向进一步提高网络容量和边缘覆盖的要求,学术界出现了大量认知异构蜂窝网络场景下的研究。

2.1 认知异构蜂窝网络

认知无线电的网络化和系统化日益引起关注,涌现了认知无线系统、认知无线网络和认知网络等概念、框架和模型。面向 LTE/LTE-A 的千倍速率提升的要求和未来异构网络发展的必然趋势,各种小站包含微蜂窝、微微蜂窝、射频前端和家庭基站等必将大量部署。因此,认知异构蜂窝网络是具备认知能力的宏站或/和多种小站共存共用相同的频谱的异构蜂窝网络。针对认知异构蜂窝网络中资源管理、择机合作和业务卸载等方面的研究较广泛,例如,文献[16]研究了具备认知能力的宏站和多个具

备认知能力的家庭基站的物理资源块分配问题,家庭基站具备认知能力可实现最小化对于宏基站干扰的情况下,实现频谱效率最大化。采用非合作博弈建模多个认知家庭基站之间的物理资源块的分配问题,并提出分布式的方法求解相关均衡策略。文献[17]关注认知 LTE 网络中多个认知家庭基站小区的下行子信道分配问题,建模上述问题为联盟博弈,提出基于分布式的博弈资源管理机制,实现用户自主决定参与哪个子信道联盟,实现干扰避免提升速率。文献[18]探讨了家庭基站用户和宏基站用户之间 2 种机会协作的方式,包含协作认知中继模型和干扰模型,被证明二者都可以帮助宏基站用户提高成功传输概率,同时也增加家庭基站用户的传输机会。文献[19]列举了部署小站的技术挑战,包含用户卸载和动态信道接入等,进而描述随机几何等新分析方法,并研究了小站的拓扑等问题。文献[20]进一步基于随机几何考虑两层网络中多信道场景下的下行性能建模和分析。

面向家庭和公共场所等用户密集区, LTE/LTE-A 提出了采用用户自主安装家庭基站保证室内良好覆盖。然而,由于家庭基站是用户自主随机部署,安装位置等不像宏站等是经过规划的,同时,家庭基站将复用宏站的频谱,因此,家庭基站将与附近的家庭基站和宏站都将产生严重的层间和层内的干扰问题。借助认知的思想,学术界提出了认知家庭基站的概念,家庭基站依据当前无线环境信息实现合适的载频选择和功率控制等技术有效抑制干扰。进一步,多模家庭基站也为下一代宽带无线系统的多层择机接入提供了更多可能的机会。

2.2 认知家庭基站

在 2010 年 10 月 3GPP 发布 Release 10 对于家庭基站的描述是自优化的节点,实现与服务运营商最小交互情况下的服务质量保证。文献指出具备认知能力的家庭基站将有助于实现负载均衡、干扰管理和信道随机接入、覆盖和切换等优化。例如,文献[21]指出在可以预见的未来,随着互联网的多媒体应用的普及,例如, YouTube、分布式网上游戏和在线视频等,频谱资源需求会越来越大。认为认知家庭基站是解决室内环境下的多种频谱消耗型的多种应用的频谱紧缺问题和本地融合问题的关键途径。文献[22]提出了基于家庭基站的认知架构实现多层择机接入,该架构包含传统的家庭基站和具有基础设施的认知网络。文献[23]从经济学模型

的角度出发探讨了家庭基站 3 种不同的接入方式, 包含闭式接入、开放接入和混合接入等, 指出混合接入的方式由于允许距离家庭基站较近的宏基站用户接入, 因此具备灵活性、可实现高频谱效率。文献[24]认为未来的家庭基站将是支持多种制式的多模家庭基站。因此, 未来认知家庭基站是基于认知技术而允许混合接入的多模家庭基站。

2.3 认知 WiFi 2.0 网络

除了上述介绍的认知网络、认知家庭基站和认知异构蜂窝网络, 认知雷达^[25]和认知绿色网络^[26], 也逐渐兴起且成为研究热点, 例如, IEEE 802.2 标准对运行在广播电视频段的无线广域网络进行规范, 使其在保证电视用户性能的前提下, 利用认知无线电技术择机利用广播电视空白。进一步, 认知的思想和理念也在无线局域网中得以延伸。认知 WiFi 2.0 网络是基于认知无线电技术, 工作于授权频段的良好传播特性, 为用户提供更好的服务以及更大的覆盖范围。作为认知无线电技术与 WiFi 技术的结晶, 认知 WiFi 2.0 网络具有广泛研究及应用前景, 得到学术界^[27,28]和标准界^[29]的共同关注。文献[30]针对认知 WiFi 2.0 网络典型的布设场景, 总结其特有的信道捆绑等关键技术。提出双层动态频谱接入模型, 总结其多样的动态资源共享策略。面向频谱资源的高效利用和经济收益, 重点关注多种博弈模型, 刻画动态频谱接入和智能策略选择等行为。最后, 提出联合频谱的技术特性和经济收益特性的频谱共享策略, 并展望该领域的未来研究问题。在总结上述认知异构网络、认知家庭基站网络和认知 WiFi 网络的基础上, 本文提出认知融合网络的概念。

2.4 认知融合网络

基于认知的异构蜂窝网络和无线局域网等异构网络为认知融合网络。认知融合网络将基于认知技术充分挖掘异构频谱资源为多模家庭基站或者认知接入节点使用, 能发挥其授权频段和非授权频段的效益。同时, 认知融合网络也面临前所未有的复杂的干扰问题。针对蜂窝网络的授权频段和无线局域网的非授权频段。实际上, 文献[31]已经提出了面向能效的站址部署方式实现小站部署在宏站的边缘区域, 称为边缘(COE, cell-on-edge)部署。这种 COE 部署可以实现谱效和能效最佳折中。文献[32]关注本域(local area)和广域(wide area)之间的

融合, 是本域采用高频或更广阔的其他频率的小站和传统采用低频的宏站之间的协作问题。NTT DOCOMO 提出了“Phantom Cell”的概念^[32], 即幻影小区。本质上它是宏站辅助的控制面和用户数据面分离小蜂窝, 幻影小区的控制面采用宏站的低频段而用户数据面采用高频, 而宏站用户的数据面和控制面与传统的宏蜂窝一致均采用宏站本身的授权频谱。它实现充分利用高低频目的的同时, 又保证一定移动性。认知融合网络将在上述本域和广域协作, 以及大小站协作的基础上进一步基于合作的思想采用认知技术的观点探讨异构网络融合可能性。认知异构网络融合是基于认知技术实现异构或者同构网络高效融合的网络形态。认知融合网络区别于认知无线网络和异构网络的特点: 通过认知实现多种异构网络、异构频段和异构环境的多维感知, 在资源调度和干扰规划方面具有更多可以调整的空间。典型的认知融合网络如图 2 所示。

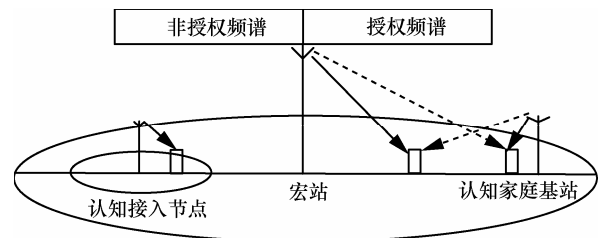


图 2 认知融合网络场景

认知融合网络场景包含宏基站(macro)、家庭基站(femto)和无线局域网(WiFi)接入节点异构网络场景, 其中, 家庭基站和局域网接入节点均具备认知能力, 因此定义这种基于认知技术实现异构网络融合的网络场景为认知异构网络。未来无线局域网和家庭基站网络将具备感知能力, 可获得频谱空洞信息。家庭基站是低功率的小型基站, 为室内环境的用户提供无线网络覆盖。它类似 WiFi 路由器, 用户可放置在室内, 向用户提供蜂窝基站的几乎所有功能。与 WiFi 相比, 家庭基站有很多优势。家庭基站的工作频谱是被授权的频谱, 它既可以与宏蜂窝基站共享也可以专门划分一个频谱, 相当于现有网络的延伸; 另一方面, 家庭基站采用与宏基站相同的无线技术, 对于终端来说, 不需要增加模块和无线技术切换的开销; 此外, 家庭基站与 WiFi 相比在功率控制、安全等方面也存在一定的优势^[33-35]。然而, 与家庭基站相比, WiFi 能提供更丰富多彩的高带宽业务, 这是目前家

庭基站所无法匹及的。因此，认知异构网络中基于认知感知能力和协作保证实现各种无线网络共存、相互补充、协同工作、支持终端无缝移动的异构融合网络，必将有效地利用各种无线网络的接入技术和各自的优势以取长补短、融合地为用户提供高质量的服务体验。

2.5 认知融合网络的技术优势

由功率/覆盖不同、大小不一和回程传播特性等不同的各种本地节点构成的异构蜂窝网络异军突起，同时，快速探测和高效利用电视频谱空白的认知无线局域网迅猛发展。认知融合网络将实现 WiFi 和 LTE 蜂窝两大阵营的有效融合，是兼顾未来室内高数据速率需求和室外高移动性要求，而实现高性价比的提升网络容量必然趋势之一^[36]。认知技术为这种未来异构网络提供更多的频谱空洞资源和提高频谱利用效率。具备认知能力的移动终端采用分布式 RRM 可以有效降低信令开销和处理负担。例如，文献[37]在 IEEE 1900.4 的框架下提出半集中式的资源管理方案。具体抗干扰和提高用户感受质量等方面的技术优势，如图 3 所示。

情景 1：次服务提供商(SSP, secondary service provider)盲目复用主服务提供商(PSP, primary service provider)的频谱资源，将导致其各自服务用户之间的干扰问题。例如，情景 1 中隶属于 PSP 的用户 1 受到来自 SSP 的干扰。隶属于 SSP1 的用户 3 也将受到 PSP 的干扰。同时，在情景 2 中，如果隶属于 PSP 的用户 2 距离 PSP 距离较远，但是距离某个 SSP 距离较近，此时用户 2 将受到严重干扰。

本文提出的认知融合网络框架下，解决方案是距离 PSP 较远的用户，例如，在情景 3 中的用户可

以接入到 SSP2，即 SSP 是混合接入的工作模式。同时，PSP 将采用适当降低功率的技术实现干扰补偿。这样带来的好处是首先距离 PSP 较远的用户或者小区边缘用户，以及处于阴影严重区域的用户，可以获得较好的 SINR 保障；同时，PSP 的干扰补偿将进一步减少对于 SSP 用户造成的干扰。同时，SSP 向 PSP 请求频谱租赁可以避免互扰关系，同时 SSP 也给 PSP 带来频谱的经济收益。同时，PSP 和 SSP 之间也可以形成关于资源共用的协议，例如可以采用频谱租赁的方式，即 PSP 依据当前承载的业务情况择机地租赁频谱给当前承载业务较重的 SSP。SSP 及其服务的次级用户也可以作为中继协助 PSP 的用户实现节能抗干扰的目的，且上述方案均可以实现 PSP 用户和 SSP 用户的双赢。总结认知融合网络的技术优势包含：1)开发频谱，提升频谱利用效率和环境感知适应性；2)感知信息，智能资源协调抑制干扰和智能决策灵活性；3)主次协作，增强网络结构灵活性、扩展性和丰富资源可重构性。如下将针对干扰问题和资源管理等关键技术，首先阐述认知融合网络中干扰产生的原因，并提出认知资源管理和干扰管理环路框架。

3 认知融合网络的关键技术

随着对无线网络带宽的更高追求和业务多样化的现状，同时网络模式越来越复杂，无线频谱资源越来越宝贵。如何有效地融合异构网络中的资源，进而提高无线资源利用效率面临巨大的挑战。因此，无线环境的认知、异构网络的融合已经成为了业界研究的重点，它能够在保证现有网络结构与传输质量的同时，降低未来网络的硬件成本、部署

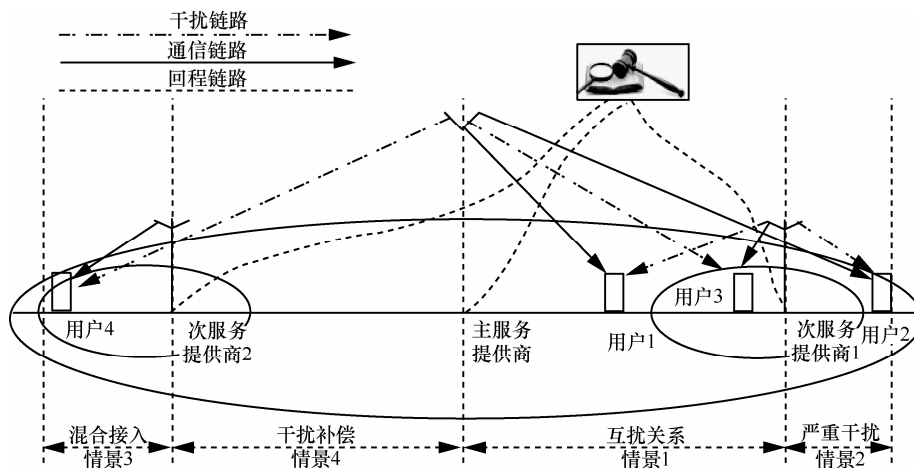


图 3 认知融合网络的技术优势

成本、维护成本^[38,39]。异构网络中不同类型节点间干扰主要有以下 4 点原因。

1) 无规划部署。低功率节点(例如家庭基站)由用户自行随机部署,用户可在任何时间移动或开关。由于运营商不能控制这类小站的数量和部署位置,因此传统的网络规划和优化并不能有效解决干扰问题。所以,需要新的分布式干扰避免方案,利用本地信息,有效解决全网干扰问题。

2) 闭式用户组接入。有些小区可能工作在封闭用户组接入模式。在此模式下,小区的用户接入是受限的,没有权限的用户不允许接入最近的基站,因此会产生较强的层间干扰。例如,家庭基站如果采用此模式接入,即使宏基站用户距离家庭基站很近,其仍然无法接入到家庭基站,反而由于可能与家庭基站用户使用相同的资源而受到家庭基站下行的严重干扰。

3) 不同节点的功率差异。微微蜂窝和中继节点通常工作在开放接入模式,即相同运营商的所有用户可以接入到这些基站。开放接入使得用户接入到信号最强的蜂窝并最小化下行干扰,从而避免了封闭用户组接入方式带来的干扰问题。然而,异构网络中如果采用最强下行接收信号强度作为基站选择的原则,大部分用户趋于接入宏蜂窝基站而不是距离最近、路径损耗最小的基站,这是因为宏基站和低功率节点发射功率之间的较大差异。在这种情况下,业务负载会不均匀分布,造成宏蜂窝基站过载。而且,如果采用这种选择接入方式,接入宏基站的严重干扰所在区域内低功率节点的上行链路。因此除了考虑应用负载均衡和上行干扰抑制,接入方式的选择也是至关重要的。

4) 覆盖范围扩展用户。为了解决由于异构网络中节点间功率差异带来的问题,新的服务小区选择方法允许用户接入到下行导频信号质量较弱的基站。当前研究的方案为覆盖范围扩展,即将微微蜂窝的参考信号强度加上某个偏移值来增加其下行覆盖范围。由此可以使靠近于微微蜂窝的宏蜂窝边缘用户选择接入到微微蜂窝,提升宏蜂窝边缘用户性能,并显著抑制上行链路的层间干扰。

针对认知融合网络的特殊场景可能的干扰问题,提出认知融合网络干扰管理系统,包括频谱资源管理器、干扰信息管理器和认知干扰管理等,其中,认知干扰管理器包含层间认知干扰管理器和层内认知干扰管理器,如图 4 所示。

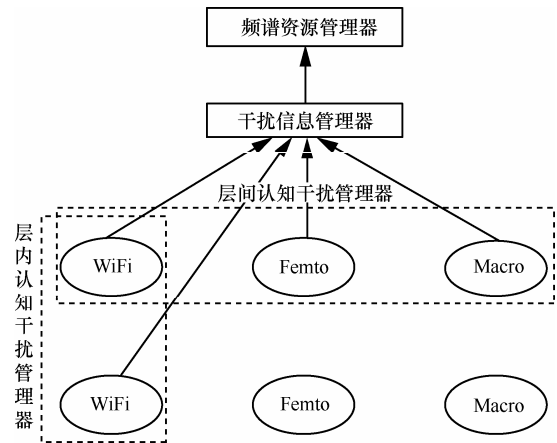


图 4 认知融合网络干扰管理系统

层间认知干扰管理器:用于完成异构网络中不同层间的干扰管理和干扰信息维护,为频谱资源管理模块提供相应的决策信息支撑。层内认知干扰管理器:用于完成异构网络中同层内的干扰管理和干扰信息维护,为频谱资源管理模块提供相应的决策信息支撑。干扰信息管理器:根据收集的来自各个层内和/或层间干扰信息,周期性地更新历史干扰信息数据库,为频谱资源管理器的正确高效的频谱决策提供所需的信息。频谱资源管理器:依据干扰信息管理器周期性或者实时的干扰信息,完成频谱资源的重新配置。层间认知干扰管理器与层内认知干扰管理器具有相同的构成模块,包含干扰信息感知模块、干扰信息交互模块、干扰信息管理模块。认知融合网络干扰管理系统中关键的 2 个技术环节是认知资源管理和认知干扰管理。

3.1 认知资源管理

随着信息服务高带宽化,内容形式多元化,提供方式智能化的需求不断增长,无线网络正朝着更高传输速率、更广覆盖范围、融合多种异构接入网络,并与多种周边网络高效协同的方向发展,但仍然面临着诸如网络资源尤其是频谱资源高效利用,网络高能效数据传输以及网络认知性和适变性等关键技术挑战。传统 HetNet 中宏站与家庭基站等小站之间的资源分配是宏站和家庭基站等采用不同的正交资源,这种传统的固定分配的模式为专用模式。这种方式的频谱利用效率十分低,且对于越来越多的家庭基站的部署,不是可行的思路。而共道模式下的层间和层内的干扰问题异常严重。在这种情况下,在不影响宏站的情况下,笔者希望家庭基站能够具备自主资源决策的能力,从而避免采用与宏站或者其周围家庭基站采用相同的资源,从而避

免干扰,且提升频谱的利用效率。因此,认知资源管理要求:1)自主资源决策实现层间和层内干扰的有效抑制;2)宏站用户和家庭基站用户的高效资源保障,从而实现 QoS 要求;3)有效资源的快速探测和高效利用。

目前关于认知资源管理的研究有很多,例如,文献[40]针对密集部署家庭基站场景,实现采用分配时域和空域正交资源实现层间和层内的干扰不可行的现状,以及当前集中式的资源管理不利于实现层间的扩展性等问题,提出采用基于认知无线电技术的认知资源管理实现家庭基站的高效动态使用资源,避免层间干扰。文献[41]探讨 3G 的 LTE 系统中增强型的具备认知能力的无线资源管理。基于认知技术可以充分挖掘 OFDMA 多址接入技术,网元可以实现依据环境状态调整 RRM 实现子载波、功率和自适应的调制选择。同时,认知技术也可以搜集系统的历史信息,包含以往与环境的交互信息等。因此,如果 CRRM 能够学习和推理足够多的历史交互信息,那么具备认知能力的 RRM 可以实现依据历史事件自主智能选择策略的目的。新型的认知资源管理系统用于改善频谱效率,文献[42]考虑了异构的主要用户的多种特征可以用于改善认知网络的自适应性。频谱感知性和捷变性扩展到无线资源管理中,有效开发频谱资源的接入机会,主要是探索当前授权频谱的空白,以获得灵活的频谱利用和提高频谱利用率。此外,面对复杂多变的业务需求和瞬息万变的外部环境,迫切需要突破原有无线网络设计思想,为网络引入认知能力和学习能力,并通过与外界环境信息交互,设计出具有环境感知功能的异构融合网络体系结构及相应的感知推理机制,从而解决静态网络模式与动态需求之间的矛盾。文献[43]描述了基于 LTE 的通用链路层应用程序的调用接口(ULLA)和认知资源管理器模块的演示器。通过 ULLA,认知资源管理器可以获得 eNB 和用户之间的 PHY/MAC 链路状态信息,进而改变系统参数获得资源利用。从上述文献可知,认知资源管理过程如图 5 所示。

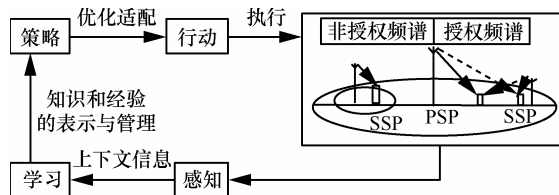


图 5 认知资源管理

如图 5 所示,在认知融合网络环境下,由于终端和认知节点都具有多模多频和宽带认知能力。可以根据外部环境、系统目标、原则、经验和知识等主动或被动地决定无线资源管理的行为,提高有效性。认知融合网络可以定义为自管理功能模块,根据运营上下文(环境要求和特性)、目标和策略(对应于原则)、情景模式(能力)及机器学习(知识和经验的表示与管理)动态选择网络的配置。这种自管理功能模块可以引入到终端、接入点或网络端。

3.2 认知干扰管理

虽然 OFDMA 等技术实现全频率复用(universal frequency reuse),未来大量小站的布设也会增加多点协作的空域机会,但是这种大量部署小站必然更加剧层间和层内的干扰问题。为了解决小区间的同频干扰问题,3GPP 在 LTE 技术研究过程中分析了各种小区间的干扰抑制技术。目前有 3 种干扰抑制技术曾被广泛地讨论,包含小区间干扰随机化算法、小区间干扰消除算法和小区间干扰协调技术。另外,基站的波束成型也被认为是一种下行的干扰抑制技术。各种小区间的干扰抑制技术的特点。干扰随机化,不能真正地降低干扰功率,只是把干扰随机化为“白噪声”,从而使得终端依赖处理增益抑制干扰,主要方法包括加扰和跳频等。小区间干扰消除,通过多天线对空间有效干扰进行抑制,或者利用交织多址实现干扰抵消。小区间干扰协调(ICIC),限制小区边缘区域可用的时频资源,做出合理的资源管理,以协调多个小区的动作,避免产生严重的小区间干扰。波束成型天线技术,通过空间隔离的干扰抑制方法。因此,目前看小区间的干扰协调基本维持在时频域和空域,也有大量的研究关注本域,即从干扰源入手兼顾距离干扰受害者的距离实现采用传输功率的控制方式等。面向在 HetNet 的宏站、射频前端和低功率节点包含微蜂窝、家庭基站和中继,文献[44]介绍异构网络的概念和主要的技术挑战,尤其关注 3GPP 在增强型小区间干扰协调(eICIC)方面的标准化活动。

由于 ICIC 的强大干扰抑制功能,这里简单总结 ICIC 的功能、本质、研究现状和展望。ICIC 的功能是通过合理管理无线资源,将小区间的干扰水平保持在可以控制的状态下。其核心思想是采用频率复用技术,使得相邻小区之间的干扰信号源的距离尽可能远,从而抑制相邻小区干扰,达到改善传输质量、提高小区及其边缘用户吞吐量的目的。

ICIC 本质上是合理管理多小区的物理资源块(PRB)和发射功率资源来控制小区间干扰(ICI),需要同时考虑来自多小区的资源使用状态、业务负荷情况和服务用户数目等。资源包含时域、频域和功率资源等,在频域上对频率资源的使用作出限制和规划,使得频率复用系数大于 1。

按照资源调度灵活程度和频率规划的调整周期,ICIC 可分为静态 ICIC、半静态 ICIC 和动态 ICIC。静态 ICIC 是指在部署网络时已经完成资源限制的协商,也即在网络运营前就已经规划好频率,网络运营过程中不再进行调整。比较典型的静态 ICIC 方式是华为、爱立信等公司提出的软频率复用(SFR)方案和部分频率复用(FFR)方案。动态 ICIC 的方式指的是资源限制的协商在网络运营时期根据业务分布、网络负荷等各种情况频繁动态调整,调整的时间尺度为几个或者几十个 TTI,远小于一个业务会话的持续时间,使得资源得到更大效率的使用。比较典型的动态 ICIC 方式是 Nortel、Lucent 公司的方案。静态的 ICIC 方式由于调整周期缓慢,所以不够灵活。动态 ICIC 在实际系统中实现复杂,且信息交互大,当前不能实际应用。半静态 ICIC 方案由于可以适当增加静态方案的灵活性,并减少动态方案的信令开销,因此,最适用且最有效。但是未来随着技术的不断进步,动态 ICIC 才是未来的发展趋势。

面向认知融合网络,这些 ICIC 技术也必将发挥重要的干扰管理功能,因为小区间的干扰协调中的小区,如果在认知融合网络中就是多异构网络之间的干扰协调技术。对认知融合网络的干扰管理技术具有重要启示作用。干扰处理技术也面临着一些实际系统的约束,包含家庭基站和宏站之间的协调、回程技术、家庭基站的闭式工作方式和随机部署等问题。例如,认知技术可以实现环境信息获取,弥补家庭基站和宏站之间因没有回程无法实现有效交互协调的干扰避免,因此,近年来广泛引入到 HetNet 场景中的干扰抑制研究过程中。在 UMTS 的 LTE 网络中实现认知基站具有更多的收益,考虑 2 类认知基站包含认知宏基站和家庭基站。首先分析传统的干扰管理方式在单小区或者多小区场景下存在的问题,继而,采用认知基站通过感知无线环境和学习历史信息实现动态的资源管理。针对共道干扰问题提出基于 2 种博弈模型的分布式方法^[45]。与以往文献只是关注频谱共享和干扰避免问题不

同,文献[46]从能效的角度出发为充分发挥认知的能力提出无线网络的架构,其中,宏站和家庭基站均具有认知能力。每个认知家庭基站可以通过感知无线环境识别干扰签名(interference signature),并择机分配合适的信道模式实现干扰最小化。基于认知干扰识别和自适应信道管理的新的频谱管理方法^[47]。文献[48]指出由于家庭基站的随机部署,宏站和家庭基站之间也没有共存的协议,认知技术可以实现这种共存信息的有效交互,考察时频空域等多维的正交无线资源的分配,提出基于新的解码技术的干扰消除技术。无论是层间和层内的认知干扰管理过程基本表述如图 6 所示,二者的区别在于认知节点对于干扰环境的认识程度不同,获取的干扰信息完美程度不同。

结合认知的思想,提出如图 6 所示的认知干扰管理环路结构。

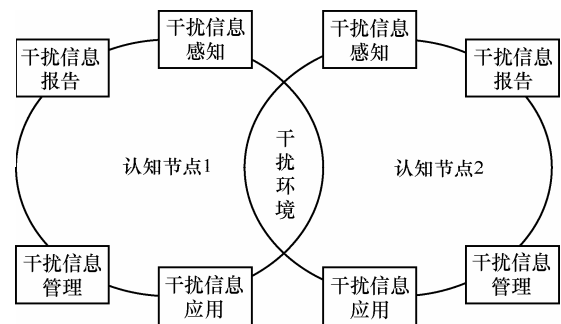


图 6 认知干扰管理环路结构

具体的认知干扰管理方法包含如下步骤。

1) 干扰信息感知,具有认知能力的家庭是认知无线接入节点实现对于当前所述网络的干扰感知;认知家庭基站需要感知周围家庭基站的频谱使用情况,同时,所有家庭基站需要获取当前宏基站的频谱使用状态;每个家庭基站尽可能实现与其周围邻家庭基站采用同频,同时避免与宏基站采用相同频谱。

2) 干扰信息上报,为实现层间或者层内更好地掌握部分或全局信息,每个认知节点实现当前局部感知信息的上报给干扰信息管理器。

3) 干扰信息管理实现信息汇聚,以及对于信息的推理和学习,形成具有一定特征的干扰信息,将指导频谱管理模块。

4) 干扰信息协助频谱管理,面向局部和全局信息的支撑实现频谱资源的调度。局部实现多个认知节点在不同信道上的分配。利用认知融合网络中具

有的异构频谱, 包含 LTE 授权频段和无线局域网的授权频段。全局频谱管理将实现认知节点在授权频段和开放频段之间的灵活跳变。

干扰信息感知是关键和第一步, 干扰信息感知内容与提出认知干扰管理环路思想的不同场景、网络结构和控制参量相关。一般情况下干扰相关的信息应该包含信道状态信息、业务承载信息和资源剩余状态信息等。感知蜂窝系统中的干扰信息一般有 2 种方法, 包含基于模型方法和基于测量的方法。简单说, 基于模型方法是采用分析或者经验模型进行计算, 例如, 信道衰落和干扰分布等理论模型。而基于测量的方法是通过收发共知的部分信息加以估算, 例如, 收端采用接收到的功率信息与已知的发端功率做比值, 可以估算信息衰落信息。另外, 在认知融合网络中, 依据特有的多网协作信息也是感知干扰等信息的重要途径之一。

4 结束语

当前, 异构网络融合是必然所趋, 面对异构融合网络中用户环境的多变性、网络环境的异构性和业务环境的多样性, 真正实现异构网络融合仍存在大量关键问题需要解决。本文通过总结当前认知技术在蜂窝网络和无线局域网等方面的应用, 认为认知技术是异构网络实现融合的关键技术之一。本文首先总结零散的认知家庭基站和认知无线接入节点等研究。进而明确认知融合网络等概念。同时, 针对层间和层内干扰问题和资源管理等关键技术, 提出认知资源管理和认知干扰管理环路框架。在网络设备和终端节点的智能化程度越来越高的未来, 然而, 要具体实现认知的融合网络, 首先宽带频谱感知技术至关重要, 它是资源灵活调度的前提。其次, 高效灵活的频谱管理、频谱共享和共道干扰抑制技术。面向大量小站部署和大量高带宽业务的用户需求快速找到可用的频谱资源, 并为不同的通信节点分配正交的资源可以有效避免干扰。同时, 在合作网络协议设计^[49]以及运营商的频谱经济收益^[50,51]、频谱使用政策等层面上都面临挑战^[52]。

参考文献:

[1] ITU-T, SERIES Y: Global Information Infrastructure, Internet Protocol Aspects and Next-Generation Networks-Next-Generation Networks Future Networks[S]. ITU-T Recommendations Advanced Search, 2011.

[2] IEEE Standards Coordinating Committee 41, IEEE Standard for Architectural Building Blocks Enabling Network-Device Distributed Decision Making for Optimized Radio Resource Usage in Heterogeneous Wireless Access Networks[S]. 2009.

[3] HU H L, ZHANG J, ZHENG X Y, *et al.* Self-configuration and self-optimization for LTE networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2010,48(2):94-100.

[4] Requirements, Candidate Solutions & Technology Roadmap for LTE Rel-12 Onward[S]. 3GPP RWS-120010, 2012.

[5] MITOLA J. Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio[A]. Doctor of Technology, Royal Institute of Technology[C]. Stockholm, Sweden, 2000.

[6] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.

[7] AKYILDIZ I F, LEE W Y, VURAN M C, *et al.* Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey[J]. Computer Networks, 2006,50(13): 2127-2159.

[8] THOMAS R W, FRIEND D H, DASILVA L A, *et al.* Cognitive networks: adaptation and learning to achieve end-to-end performance objectives[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(12): 51-57.

[9] WANG J, GHOSH M, CHALLAPALI K. Emerging cognitive radio applications: a survey[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(3): 74-81.

[10] LETAIEF K B, ZHANG W. Cooperative communications for cognitive radio networks[A]. Proceedings of the IEEE[C]. 2009, 97(5):878-893.

[11] WU X, MURHERJEE B, GHOSAL D. Hierarchical architectures in the third-generation cellular network[J]. IEEE Wireless Communications, 2004,11(3):62-71.

[12] DAMNJANOVIC A, MONTOJO J, WEI Y, *et al.* A survey on 3GPP heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3):10-21.

[13] PENG M, LIANG D, WEI Y, *et al.* Self-configuration and self-optimization in LTE-advanced heterogeneous networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2013,51(5): 36-45.

[14] PENG M, LIU Y, WEI D, *et al.* Hierarchical cooperation relay based heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communication, 2011, 18(3): 42-50.

[15] YANG C, LI J, SHENG M, *et al.* Green hetNets: a cognitive radio idea[J]. IET Communications,2012, 6(13):1952-1959.

[16] HUANG J W, KRISHNAMURTHY V. Cognitive base stations in LTE/3GPP femtocells: a correlated equilibrium game-theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011,59(12): 3485-3493.

[17] GHAREHSHIRAN O N, ATTAR A, KRISHNAMURTHY V. Col-

- laborative sub-channel allocation in cognitive LTE femtocells: a cooperative game-theoretic approach[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013,61(1): 325-334.
- [18] URGAONKAR R, NEELY M J. Opportunistic cooperation in cognitive femtocell networks[J]. *IEEE JSAC*, 2012, 30(3): 607-616.
- [19] ELSAWY H, HOSSAIN E, KIM D I. HetNets with cognitive small cells: user offloading and distributed channel access techniques[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(6):28-36.
- [20] ELSAWY H, HOSSAIN E. Two-tier hetnets with cognitive femtocells: downlink performance modeling and analysis in a multi-channel environment[J]. *IEEE Trans Mobile Computing*, 2014,13(3):649-663.
- [21] AL-RUBAYE S, AL-DULAIMI A, COSMAS J. Cognitive femtocell: future wireless networks for indoor applications[J]. *IEEE Veh Technol Mag*, 2011,6(1):44-51.
- [22] HU H L. Cognitive femtocell networks: an overlay architecture for localized dynamic spectrum access[J]. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2011, 17(4):62-70.
- [23] LIN P, ZHANG J, CHEN Y J, *et al.* Macro-Femto heterogeneous network deployment and management: from business models to technical solutions[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2011,18(3):64-70.
- [24] BENNIS M, SIMSEK M, CZYLWIK A, *et al.* When cellular meets WiFi in wireless small cell networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(6):35-41.
- [25] HAYKIN S. Cognitive radar: a way of the future[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2006,23(1):30-40.
- [26] GUR G, ALAGO Z F. Green wireless communications via cognitive dimension: an overview[J]. *IEEE Network*, 2011, 25(2):50-56.
- [27] BAHL P, CHANDRA R, MOSCIBRODA T. White space networking with WiFi like connectivity[A]. *ACM SIGCOMM[C]*. Barcelona, Spain, 2009.
- [28] KIM H, SHIN K G. Understanding Wi-Fi 2.0: from the economical perspective of wireless service providers dynamic spectrum management[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2010, 17(4):41-46.
- [29] KIM H, SHIN K G. Admission and eviction control of cognitive radio users at Wi-Fi 2.0 hotspots[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012,11(11):1666-1677.
- [30] YANG C, XU C, SHENG M. Cognitive Wi-Fi 2.0 networks: future intelligent WLAN[J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(2):71-80.
- [31] SHAKIR M Z, QARAQE K A, TABASSUM H, *et al.* Green heterogeneous small-cell networks: towards reducing the co2 emissions of mobile communications industry using uplink power adaptation[J]. *IEEE CM*, 2013,51(6):52-61.
- [32] KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A, NAKAMURA T, *et al.* Future steps of LTE-A: evolution towards integration of local area and wide area systems[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2013, 20(1):12-18.
- [33] Juniper, WiFi and femtocell integration strategies 2011-2015[EB/OL]. <http://www.juniperresearch.com/>,2011.
- [34] Qualcomm, a comparison of LTE advanced HetNets and WiFi[EB/OL]. <http://www.qualcomm.com/media/documents/files/a-comparison-of-lte-advancedhetnets-and-WiFi.pdf>, Sept. 2011.
- [35] LEE K. Mobile data offloading: how much can WiFi deliver?[A]. *Proc ACM CoNEXT[C]*. 2010, 21(2):563-550.
- [36] GHOSH A, MANGALVEDHE N, RATASUK R, *et al.* Heterogeneous cellular networks: from theory to practice[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(6): 54-64.
- [37] HADDAD M, ELAYOUBI S E, ALTMAN E, *et al.* A hybrid approach for radio resource management in heterogeneous cognitive networks[J]. *IEEE JSAC*, 2011, 29(4): 831-842.
- [38] YANG C, LI J. Joint resource management framework under IEEE P1900.4: a network utility maximization approach[A]. *MobiCom[C]*. Beijing, China, 2009.1-2.
- [39] YANG C, LI J. Dynamic resource management mechanism design for heterogeneous networks under IEEE1900.4 framework[A]. *A Network Utility Maximization Perspective*, 2010 IEEE International WCNIS[C]. 2010.
- [40] LIEN S Y, LIN Y Y, CHEN K C. Cognitive and game-theoretical radio resource management for autonomous femtocells with QoS guarantees[J]. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2011, 10(7): 2196-2206.
- [41] SAATSAKIS A, TSAGKARIS K, VON-HUGO D. Cognitive radio resource management for improving the efficiency of LTE network segments in the wireless B3G world[A]. *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks[C]*. Chicago, IL, 2008.1-5.
- [42] VIZZIELLO A, AKYILDIZ I F, AGUSTI R, *et al.* Cognitive radio resource management exploiting heterogeneous primary users[A]. *Proceedings of GLOBECOM 2011[C]*. Houston, TX, USA, 2011.1-5.
- [43] CAI T, KOUDOURIDIS G P, JOHANSSON J. An implementation of cognitive resource management on LTE platform[A]. *PIMRC[C]*. 2010. 2663-2668.
- [44] LOPEZ-PEREZ D, GUVENC I, DE LA ROCHE G. Enhanced inter-cell interference coordination challenges in heterogeneous networks[J]. *IEEE Wireless Comm*, 2011, 18(3):22-30.
- [45] ATTAR A, KRISHNAMURTHY V, GHAREHSHIRAN O N. Interference management using cognitive base-stations for UMTS LTE[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(8): 152-159.
- [46] XIE R, YU R, JI H, *et al.* Energy-efficient resource allocation for heterogeneous cognitive radio networks with femtocells[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(11): 3910-3920.
- [47] LI Y, SOUSA E S. Cognitive interference management in 4G autonomous femtocells[A]. *PIMRC[C]*. 2010.1567-1571.
- [48] VIERING I, DOTTLING M, LOBINGER A. On exploiting cognitive radio to mitigate interference in macro/femto heterogeneous net-

works[J]. IEEE Trans Wirel Commun, 2011,10(8):2196-2206.

- [49] FRIAS Z, PÉREZ J. Techno-economic analysis of femtocell deployment in long-term evolution network[EB/OL]. <http://creativecommons.org/licenses/by/2.0>.
- [50] DUAN L, HUANG J, SHOU B. Economics of femtocell service provision[J]. IEEE Trans Mobile Compu, 2013,12(11):2261-2273.
- [51] AHOKANGAS P, MATINMIKKO M, YRJOLA S, *et al*. Simple rules for mobile networks operator' strategic choice in future cognitive spectrum sharing networks[J]. IEEE Wireless communication, 2013, 20(2): 20-26.
- [52] KHAN M A, TEMBINE H, VASILAKOS A V. Game dynamics and cost of learning in heterogeneous networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(1): 198-213.

作者简介:



杨春刚 (1982-), 男, 黑龙江肇东人, 博士, 西安电子科技大学副教授, 主要研究方向为认知无线网络、无线资源管理和博弈论等在无线通信网络中的应用。



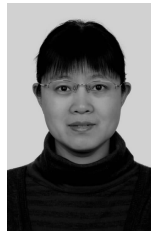
岳健 (1988-), 男, 陕西渭南人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为异构蜂窝网络中干扰协调和功率控制等。



李建东 (1962-), 男, 江苏阜宁人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带无线通信(未来移动通信和未来局域网)、大规模 ad hoc 网、软件无线电等。



盛敏 (1975-), 女, 湖南长沙人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为移动 ad hoc 网络、QoS 保障技术、认知网络等。



李红艳 (1966-), 女, 陕西西安人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为异构网络融合、无线移动自组织网络、无线传感器网络、深空通信网络等。



刘勤 (1976-), 男, 陕西西安人, 博士, 西安电子科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线通信、移动通信、通信仿真、空时处理等。