



专题:5G

面向 5G 无线网络的智能干扰管理技术

李建东,刘磊,盛敏,徐超

(西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室,陕西 西安 710071)

摘要:作为 5G 关键技术之一的超密集组网是满足未来千倍数据流量需求的主要手段。然而,网络密集化部署将导致严重的干扰问题,因此干扰管理是 5G 超密集网络中的重要研究课题。首先从规避及利用两个方面归纳总结现有的干扰管理算法。其次,为了更好地适应未来 5G 无线网络智能化、异构化的发展趋势,提出了一种智能的无线网络干扰管理体系,实现了无线网络环境与干扰管理的动态紧耦合。最后,从干扰管理与资源管理的本质联系这一角度出发,介绍了 3 种联合异构网络资源的新型干扰管理算法,有效实现了网络资源的高效利用和网络容量的提升。

关键词:干扰管理;资源管理;异构无线网络

中图分类号: TN919

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016167

Intelligent interference management in 5G wireless networks

LI Jiandong, LIU Lei, SHENG Min, XU Chao

State Key Laboratory of ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China

Abstract: As one of the key technologies in 5G networks, ultra-dense wireless network is utilized to approach the future 1 000 ultra-high traffic volume. Nevertheless, the dense deployment of network nodes would result in severe interference, and thus interference management was proposed as the big principle behind 5G ultra-dense wireless networks research. Firstly, the interference management schemes were classified from two aspects: avoidance and utilization. Then, an intelligent interference management architecture was proposed to accommodate the development trend of future wireless networks in terms of intelligence and heterogeneity in order to realize the dynamic tightly coupled interference management of wireless network environment and interference management. Taking the intrinsic relationship between interference management and resource management into consideration, three cutting-edge interference management schemes were introduced, which could significantly improve the network resource utilization and the network capacity.

Key words: interference management, resource management, heterogeneous wireless network

1 引言

随着无线通信技术的飞速发展和智能终端设备的普

及,移动业务呈现出种类繁多、数据爆炸增长的发展态势。为了应对未来无线网络超高流量密度、超高连接数密度等带来的严峻挑战,通信学术界和产业界正积极致力

收稿日期:2016-05-11;修回日期:2016-06-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目“无线网络的干扰原理与容量研究”(No.61231008)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China “Study on the Interference Management and Capacity of Wireless Network”(No.61231008)



于 5G(the fifth generation)无线网络的研究和标准化。为了实现“万物互联”的美好愿景,5G 无线网络将是一个高度融合、高度智能的无线网络。根据目前的研究现状,推动 5G 发展的革新技术可以划分为无线技术和网络技术两个层面。其中,无线技术主要包括新型非正交多址接入技术(例如稀疏码分多址接入技术等)、大规模天线技术、毫米波技术、终端直通技术、灵活双工技术(例如动态时分双工技术等)以及全双工技术等;在网络技术方面,5G 的技术创新得益于超密集组网,同时基于软件定义网络和网络功能虚拟化等网络架构也获得了广泛的认同。但是,这些关键技术正处于研究阶段,技术本身仍存在一些亟待解决的问题。例如超密集组网通过增加无线网络基站布设密度可以获得频率复用效率的巨大提升,从而实现系统容量的增加,但微蜂窝、微微蜂窝更密集的部署以及小区覆盖范围的重叠,将带来更为严重的干扰。不难看出,如果没有合适的干扰管理策略,网络中的干扰会随着小区密度的增加而愈发严重,并成为限制无线网络迈入 5G 时代的关键制约。因此干扰管理是提升 5G 无线网络性能的关键技术。

本文首先概述无线网络中的干扰管理方法,并对其进行分类;然后,从系统的设计与实现角度提出了一种智能的无线网络干扰管理体系,阐述了网络干扰管理与资源管理的内在联系,并从网络资源维度出发提出了 3 类新型干扰管理算法;最后总结概括全文并展望未来的研究方向。

2 干扰管理的研究动态

在无线通信网络中,当多对通信链路共享相同资源域时,所产生的相互干扰将导致网络资源浪费并使网络性能恶化。因此干扰管理是改善网络性能的重要手段。如果将干扰分别视为不利因素或者可用因素,则可以从规避以及利用干扰两个方向进行干扰管理,具体分类方法如图 1 所示。

在多数干扰管理方法中,干扰都被视为不利因素。在这些方法中,可以通过资源分配及调度来避免干扰的

产生^[2-5]。随着无线通信系统的多样化、网络结构的异构化以及多种新的通信技术的应用,干扰管理算法可与多天线(MIMO)^[6]、串(并)行干扰消除^[7]、协作^[8,9]及认知^[10,11]等多种技术相结合。

2.1 干扰被视为不利因素

(1) 干扰随机化

干扰随机化(interference randomization)^[12]的目标是在接收端得到接近白噪声的干扰信号,即随机化的干扰信号,从而获得抑制干扰的处理增益。常见的干扰随机化方法有:跳频,即对每个小区采用不同的跳频模式获得干扰白化的效果;交织,即在信道编码之后对各个小区的信号采用不同的交织图案进行信道交织,从而随机化干扰;加扰,即在信道编码和信道交织之后,对各个小区的信号利用不同的伪随机码进行加扰以实现干扰白化的目的。

(2) 增强型小区间干扰协调

为了降低宏小区与微蜂窝之间的层间干扰,提高边缘用户的性能,基于小区间干扰协调(inter-cell interference coordination)^[13]技术,3GPP 在 LTE-Advanced 的 R10 版本中提出增强型小区干扰协调(enhanced inter-cell interference coordination,eICIC)^[14,15]技术,包括以下 3 种解决方案。

① 频域 eICIC

即通过调度和频谱资源分配,使不同小区的控制信道和物理信道使用正交或者部分正交的频谱资源。虽然频域 eICIC 能够消除层间干扰,但是资源的正交划分降低了频谱资源的利用率,造成频域资源的浪费。

② 基于功率控制的 eICIC

其主要思想是在保证用户 QoS 约束的条件下,降低发射功率来避免干扰。参考文献[16]中从博弈论协议价模型出发,提出一种异构网络中的功率控制算法。该算法基于结合系统谱效与能效的效用函数设计了一种具有闭式解的功率协调方案,并提出了一种简化系统信令开销的低复杂度算法。

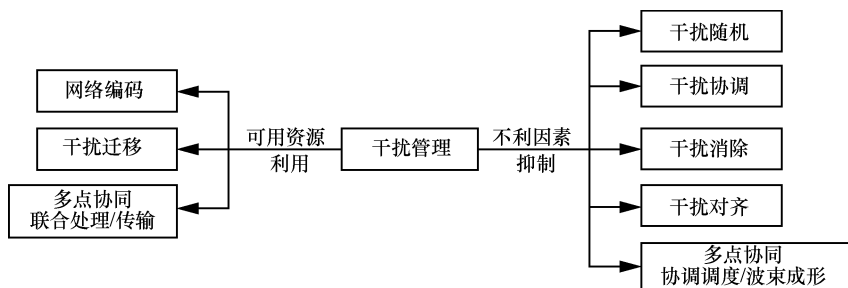


图 1 干扰管理算法分类方法

③时域 eICIC

该方法是在一个子帧上从时间域进行干扰协调。其基本原理是通过在下行设置几乎空白的子帧 (almost blank sub-frame, ABS), 即在该子帧上保持静默, 其他被干扰小区中的用户只在干扰源小区的 ABS 上对其数据进行译码和解调, 从而避免来自干扰小区的干扰。

可以看到, 时域 eICIC 与频域 eICIC 仅分别使用了时域与频域资源, 然而考虑到实际无线信道受到时间-频率二维衰落的影响, 参考文献[17]提出了一种联合时间和频率二维资源进行干扰协调的策略。通过联合利用在时域和频域的信道变化, 并在时频二维资源上联合进行干扰协调, 该算法能够灵活稳健地适应重负载业务。

(3) 干扰消除

干扰消除 (interference cancellation, IC) 技术的最早应用是在 CDMA 系统中的多用户检测技术中^[18]。其主要思想是对干扰信号进行译码, 然后重构干扰信号, 并从接收信号中删除。按照译码干扰信号方式的不同, 可分为串行干扰消除 (successive interference cancellation, SIC) 以及并行干扰消除 (parallel interference cancellation, PIC)。SIC 的核心是对接收信号进行多级循环迭代^[19], 逐次检测并消除一个干扰信号。由于 SIC 是逐次进行检测消除, 所以如何确定检测顺序是 SIC 的关键问题。在实际中, 通常根据接收信噪比或者接收信号的强度来确定检测顺序。SIC 接收机结构设计简单、计算复杂度低, 具有很好的稳健性和实用性。但是由于干扰信号的检测存在一定偏差, 用不完全准确的估计干扰信号去重构并消除干扰会导致误差传播, 故 SIC 是一种次优的检测算法。同时, 由于 SIC 检测器每次只能检测一个信号, 每一级的干扰删除都会导致一定时延。而 PIC 利用多次迭代能够同时删除干扰信号, 相比 SIC, 有效降低了检测时延并能克服误差传播。PIC 的核心思想是利用相关检测得到粗略的多用户检测结果, 并分别重建所有用户的干扰信号, 然后从接收信号中并行消除干扰, 再进行判决, 即可得到发送信号^[20]。在实际中通常采用多级 PIC 检测, 可以有效提高干扰消除效果。在实际应用中, SIC 通常结合调度策略以获得更好的性能。在参考文献[21]中, 结合 SIC 设计了一种感知链路带宽的分布式路由协议。该协议利用启发式算法分析估算结合 SIC 的链路带宽。基于此链路带宽, 定量地描述了系统使用 SIC 前后的增益, 并以此度量作为路由设计标准, 实现了能够提高系统端到端吞吐量的路由协议。参考文献[22]提出了一种联合 SIC 的

调度策略。利用 SIC, 设计了实现相邻通信链路同时并传的传输策略, 并提出了两个低复杂度路由算法, 有效增加了系统频谱效率。

(4) 干扰对齐

Cadambe 和 Jafar 在研究 K 用户干扰信道时, 在符号扩展的基础上给出了干扰对齐 (interference alignment, IA) 的概念, 并利用干扰对齐技术实现了系统 $K/2$ 的自由度^[23]。干扰对齐的基本思想是将来自不同干扰源的干扰信号在接收端对齐压缩至较小的信号维度, 从而减小干扰信号所占用的维度。由于进行干扰对齐的符号扩展数目随着系统用户数的增加呈指数增长, 故在实际系统中利用无符号扩展的 MIMO 技术, 实现空域的干扰对齐。目前, 干扰对齐已经在多用户干扰信道^[23]、中继网络^[24,25]、多跳网络^[26,27]中得到广泛的研究, 并且被应用于蜂窝网络场景之中^[28]。在此基础上, 参考文献[29]提出了一种适用于两小区蜂窝网络下行场景的干扰对齐策略。在参考文献 [30] 中, 在多小区下行 MIMO 多用户网络中提出了一种基于广义特征值分解并联合用户分组和基站关联的干扰对齐算法, 并给出了预编码矩阵与解码矩阵的闭式解, 与现有方案相比, 有效提高了系统可达自由度。这些研究成果表明, 干扰对齐可以有效地解决网络中的干扰问题, 使网络取得更高的自由度。然而在异构网络场景中, 由于受到干扰对齐可行性条件的约束以及异构网络特殊性的影响, 传统的干扰对齐方案难以直接应用到异构网络场景中。因此设计适用于异构网络的干扰对齐方案具有更高的挑战性。

(5) 多点协同传输技术——协调调度/波束成形 (CoMP CS/CB)

CoMP CS/CB 通过协调调度或者波束成形抑制小区边缘用户的干扰。各个协作小区共享不同小区之间的信道状态信息但不共享用户数据。利用该信道状态信息, 通过合适的调度算法选择不仅使得本小区性能最优且对相邻小区造成的干扰最小的波束成形矩阵, 即协调发送信号波束的方向, 从而使得网络性能达到最优。针对 CoMP CS/CB 会对回传链路引入额外负荷这一问题, 参考文献[31]通过联合 S1 和 X2 链路的调度, 减小回传链路对 CoMP 传输的约束, 提出了基于容量受限的分布式 CoMP 数据传输方法。

上述干扰管理算法将干扰视为不利因素, 通过资源的协调、规划达到消除或抑制干扰的目的。虽然这些方式能够在一定程度上消除干扰, 但同时也降低了资源的利用效



率。随着研究的深入,人们考虑尝试发掘干扰的可用可管部分,将干扰作为一部分可利用资源,从而更好地实现网络干扰管理,提升网络性能。

2.2 干扰被视为可用资源

(1) 网络编码

网络编码^[32](network coding)正是在重新认识干扰的基础上发展起来的一种重要技术,应用于无线网络链路层的网络编码技术充分利用了无线信道的广播特性,改善多个单播流并存的吞吐量性能。模拟网络编码,巧妙地利用无线干扰,提高传输速率,进一步改善了网络性能。参考文献[33]联合考虑网络编码技术和调度机制,分析了采用网络编码可获得的网络最大吞吐量。参考文献[34,35]分析了网络编码所带来的网络容量增益。

(2) 干扰迁移

在参考文献[36]中,巧妙地利用了异构网络中由非均匀负载导致的干扰分布非均匀特性,提出干扰迁移(interference migration),即通过引入移动热点对数据进行分流,从而将严重的干扰引导至低负载小区中,有效缓解了重负载小区的干扰,提高了系统能量效率,具体见第3.3.1节。

(3) 多点协同传输技术——联合处理/传输

区别于CoMP CS/CB,CoMP联合处理/传输(JP/JT)技术中协作小区共享所要传输的数据信息,多个协作小区同时向用户传输数据。通过联合处理传输的方式,将不同小区间的干扰转变成了有用信号,从而提高接收信号质量,实现系统性能的提升^[37]。CoMP JP/JT有两种模式,即单用户联合处理/传输和多用户联合处理/传输。在单用户CoMP JP/JT中,协作簇内的多个协作基站同时为一个用户传输数据。用户利用不同协作基站之间所产生的分集增益,有效提高了接收信号质量。但是在单用户CoMP JP/JT中,单用户接收需要多个协作簇基站的资源,从而降低了频谱利用率;在多用户CoMP JP/JT中,协作簇内的多个协作基站可以同时为多个用户传输数据。类似于MU-MIMO,协作基站通过迫零预编码或者块对角化预编码消除多用户之间的干扰,并对不同用户的数据使用不同的预编码矩阵。由于多用户CoMP JP/JT需要获得每个用户到所有协作基站的信道状态信息,因此信道状态信息误差会严重制约系统性能的提升。在参考文献[38]中,利用随机几何分析了使用CoMP JP/JT时的信干噪比分布,从实际设计角度定量地分析了信道状态信息误差对系统覆盖概率的影响。

3 智能干扰管理体系和方法

3.1 智能干扰管理体系

为了实现万物互联的美好愿景,5G网络将在多样化的场景中满足人们更加丰富的业务需求并渗透到物联网及各种行业领域,与工业设施、医疗仪器、交通工具等深度融合。可见,5G网络将具备高异构性、高动态性、高智能性等特征。因此,干扰管理应该匹配网络特征,根据网络环境的反馈进行动态调整,从而实现干扰管理与网络环境的互动,更好地提升网络性能。干扰管理环如图2所示。

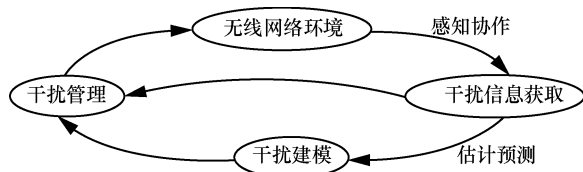


图2 干扰管理环

如图2所示,干扰环境作为网络环境的组成部分,决定了干扰管理方法的设计,干扰信息可通过感知或协作获得,通过干扰信息处理得到干扰模型,不同层次的干扰模型决定了相应的管理策略,而干扰管理机制的运用又会导致干扰环境的变化,进而影响网络容量并重新作用于干扰管理策略的设计。根据这一特点,在实际网络中需要智能动态的干扰管理架构,从而实现网络干扰管理。

在图2的基础上,设计如图3所示的智能无线网络干扰管理体系。该体系由3部分构成,分别为干扰感知、干扰管理决策和执行模块。其中,干扰感知模块负责对无线网络干扰环境进行感知,从而获得干扰在空间上的分布以及干扰的结构特征,这些信息映射成为干扰的状态特征;干扰管理决策模块由一个干扰管理方式库和干扰管理方式融合策略构成。干扰管理方式库中包括了可采用的干扰管理方式。干扰管理机制模块根据干扰的状态特征,凭借可采用的干扰管理方式,通过智能算法,产生一个融合的干扰管理策略,并且对采用该策略后网络的性能进行预测。执行模块根据决策在网络侧和/或终端进行资源配置和信号处理等。网络干扰环境具有动态特征,一方面源于网络本身,另一方面可能来自干扰管理策略的执行,干扰感知模块又重新对网络环境进行感知,并提供对当前网络性能的评估。接着,干扰决策模块根据当前网络性能和预测网络性能之间的差异以及网络和干扰的状态,通过自学习的算法,调整干扰管理策略。

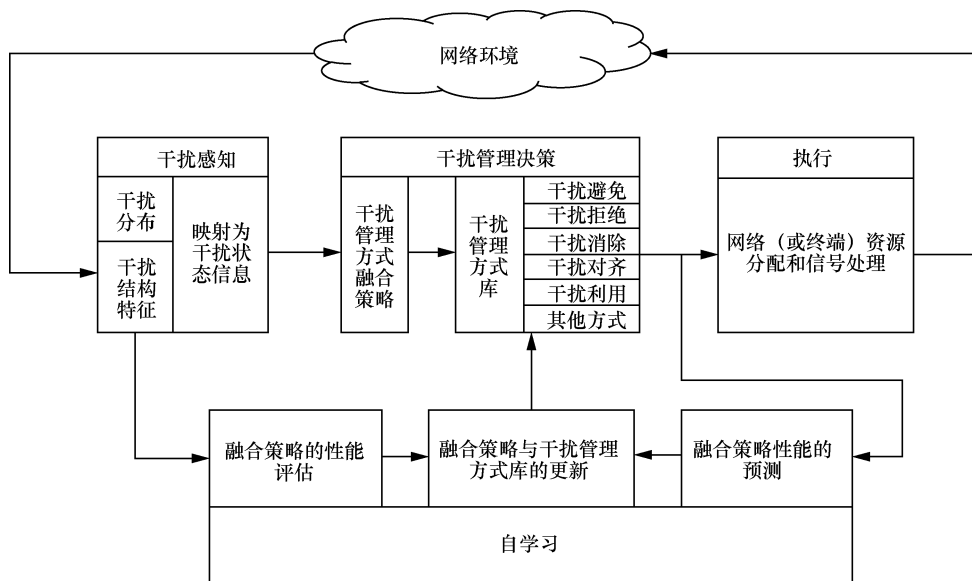


图3 智能无线网络干扰管理体系

3.2 干扰管理与资源管理的内在联系

从第2节中可以看到,干扰管理具有多种多样的实现方式,与资源管理紧密相连。这是因为干扰产生的本质是资源的冲突使用,因此,网络资源分配的非理想性是产生干扰的根本原因。

完美的资源管理能够实现对干扰的完全规避,所实现的网络容量域如图4中的矩形所示。然而在实际中,资源管理的非理想性降低了网络资源使用率,使得基于可用资源的网络容量域减小(图4中矩形左边界至B的区域)。由于资源的冲突使用造成干扰,导致网络容量损失,即对干扰不加管理导致网络容量域减小至A。干扰管理能够修正网络资源的不合理分配,有助于提升网络容量,即可达容量域边界扩展至C。

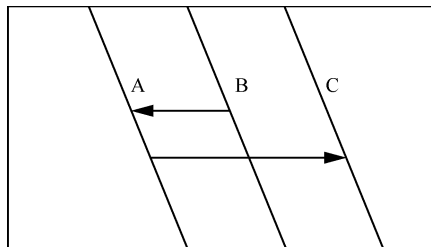


图4 干扰管理对网络容量影响示意

如果将资源分配作为干扰管理的重要手段,一方面可以通过合理利用网络资源,增加网络容量(即图4中改善边界B);另一方面,则可通过干扰管理修正资源分配策略,促进网络容量提升(即图4中改善边界C)。不难看出,

联合设计以上两个方面将有效提高网络容量。因此,研究干扰管理与资源管理的相互关系对提升无线网络容量具有重要意义。

在无线网络中,信号空间和时频资源是网络重要的资源维度。同时,由于在异构网络中微蜂窝基站具有低功率率的特点,距离较远的微蜂窝小区可以无干扰地复用相同资源。因此地理位置是异构网络的一个重要资源维度。为了充分利用这些网络资源维度,设计高效的资源干扰联合管理机制,可以从地理位置、信号空间以及时频资源维度与干扰进行联合管理。根据研究中所涉及的异构网络资源维度,具体可归纳分类如下。

(1) 联合地理位置与时频资源维度的干扰管理^[36,39,40]

该策略的基本思想主要来源于考虑到由于微蜂窝的随机布设,宏小区内的微蜂窝小区呈现出疏密不一的特点。对处于密集布设环境中的微蜂窝小区分配正交的时频资源,完全消除层内/层间干扰。同时由于微蜂窝基站具有低发射功率率的特点,稀疏布设环境中的微蜂窝小区采用复用相距较远的其他微蜂窝小区资源,从而有效缓解层内/层间干扰。结合地理位置与时频资源的干扰管理策略,允许在同一个宏小区内的不同微蜂窝复用相同的时频资源,提供了资源的空间复用率,然而如何结合地理位置设计高效的时频资源分配算法是研究难点。

(2) 联合信号空间与时频资源的干扰管理^[41-43]

这一类干扰管理算法通过为宏小区和微蜂窝分配相互正交的时频资源消除层间干扰。利用多天技术技术在信号



空间上消除微蜂窝小区之间的层内干扰。在多天系统系统中,利用干扰对齐可以将干扰对齐到特定的信号维度上,使得剩下的信号维度无干扰即可用于有用信号传输。故可将微蜂窝小区之间的层内干扰通过干扰对齐完全消除。如何设计高效的联合信号空间的资源分配算法是这类算法的关键问题。另一方面,由于受限于干扰对齐的可行性条件,如何选择构建干扰对齐组是该类算法的难点。在参考文献[41]中,利用转化冲突图研究了异构网络中联合信号空间干扰对齐的资源分配问题。利用转化冲突图表征可行的干扰对齐组,从而可将资源分配问题建模为最大 K 可染色子图问题进行求解。在参考文献[41]的基础上,参考文献[42]进一步结合干扰对齐设计了保障用户公平性的资源分配算法。

(3)联合地理位置与信号空间的干扰管理^[44]

与算法(1)类似,这类算法利用微蜂窝小区随机布置的特点,稀疏布置的微蜂窝小区通过复用间距较远的其他微蜂窝小区缓解层内干扰。但不同的是,密集布置环境中的微蜂窝小区在信号的空域维度上利用干扰对齐等技术消除邻近的微蜂窝产生的强干扰。受限于干扰对齐可行性条件,参与干扰对齐的微蜂窝小区数目存在限制条件。

(4)联合地理位置、信号空间及时频资源的干扰管理^[45]

该类算法充分利用了异构网络的重要资源维度。利用地理位置资源,对相距较远的微蜂窝小区复用相同资源。对集中布置的微蜂窝小区使用资源分配消除干扰。利用干扰对齐在信号空间上消除宏小区与微蜂窝之间的层间干扰。这类算法能够充分利用资源维度管理干扰,从而能够

显著增加网络容量,但是如何在充分利用所有资源维度的同时设计低复杂度的干扰管理算法是研究难点。

3.3 联合异构网络资源的新型干扰管理策略

如上所述,设计高效的资源与干扰联合管理算法存在亟待解决的关键问题。将通过联合优化网络资源及利用干扰管理修正资源使用,提出3种新型资源干扰联合管理策略。

3.3.1 干扰迁移

在异构网络中,微蜂窝基站布置具有随机性。其分布与覆盖情况无法预期。这就可能导致微蜂窝基站分布不均匀,即在某些区域同时存在交叠覆盖的多个微蜂窝小区,而在另一些区域甚至不存在微蜂窝小区。微蜂窝小区疏密不一的随机分布将导致网络中不同区域的干扰分布不均。

如图5所示,密集布置的微蜂窝基站在左侧区域造成了严重的层内/层间干扰,网络容量被严重制约,而在右侧区域内,由于用户数少且业务强度低,故该区域内的干扰相对较弱。仅简单提升信号发射功率并不能改善强干扰区域内的干扰情况,这是由于提升信号发射功率会进一步加重干扰,迫使其他用户也提高发射功率,从而形成一个恶性循环,不但没有减小系统中的干扰,反而由于高发射功率耗尽用户电池,降低了用户的能量效率。为了改善强干扰区域内的用户服务质量,提升强干扰区域对网络容量的短板影响,参考文献[36]从降低处于强干扰区域内用户受到的干扰的角度,联合网络资源设计了一种新型干扰管理策略。考虑到干扰分布的不均匀性,该策略将重干扰区域的干扰引导迁移至周边轻干扰区域,从而提升系统性能。

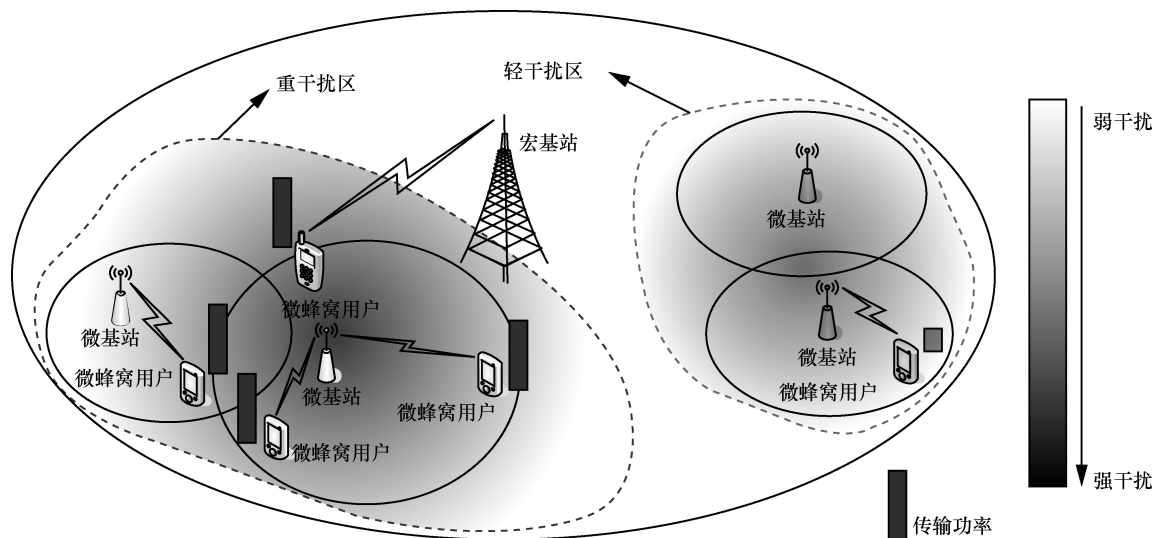


图5 干扰空间分布示意

该策略的关键问题在于如何将空间上分离的干扰进行统一处理。移动热点(mobile hotspot, MH)的出现为建立重干扰区与轻干扰区之间的桥梁提供了解决方案。MH有Wi-Fi接口和蜂窝网络接口,在使用MH时用户通过两跳无线网络实现上行业务传输。首先多模用户设备(multimode user equipment, MUE)能够通过Wi-Fi接口接入移动热点,其次通过蜂窝网络接口实现Internet回程,在这个过程中MH可以被认为是蜂窝用户。MH同时利用Wi-Fi接口和蜂窝网络接口,并且由于Wi-Fi链路工作频段与蜂窝网络工作频段无交叠,从而不会对蜂窝网络传输造成干扰,因此将WLAN和蜂窝网络有机地结合起来。

如图6所示,利用MH通过蜂窝网络和WLAN对并发用户MUE进行并发传输,就可以通过控制分流比例来调整不同接口的发射功率,从而平衡不同区域的干扰水平。其中,WI指Wi-Fi接口,CI指蜂窝网接口。可以看出,在无法减弱整个系统的总干扰情况下,参考文献[36]通过联合微蜂窝网络的地理位置资源有效地引导转移干扰,获得了干扰空间分集增益,从而提高系统的性能。

参考文献[36]给出了使用并发传输进行干扰转移的主要阶段:

(1)MUE和MH分别测量其干扰噪声和,MH将测量结果发送给MUE;

(2)MUE根据速率需求以及MUE、MH的干扰噪声和计算需要转移的干扰情况,并计算出对应的分流比例;

(3)将业务数据根据分流比例进行分流,并根据此数据分组从对应的接口进行传输。

可以看出,业务的分流比例就是重干扰区域与轻干扰区域之间干扰转移的桥梁。干扰转移的过程受到整个系统中信道状态和用户行为的影响。并且轻干扰区和重干扰区的分布也随着网络状态发送改变,因此在实际网络中需要周期性地对干扰转移算法。

3.3.2 联合子信道选择与功率控制的分布式干扰协调

由于异构网络中微蜂窝的布设具有随机特性,其布设的位置与数量通常难以提前预测,导致传统的中心式的资源分配机制^[45,46]不再适用。参考文献[40]在微蜂窝与宏小区使用正交信道布设的异构网络场景中,联合信道与功率资源分配进行干扰协调,提升网络容量。

通过简单分析可以发现,为了提升系统容量,每个微蜂窝基站需要选择干扰较小的一组子信道进行数据传输。这样一来,导致每个微蜂窝基站在选择子信道时需要考虑其他微蜂窝基站的传输,另一方面,每个微蜂窝基站对子信道的选择结果又会影响其他微蜂窝基站的决策。即不同微蜂窝基站的传输策略相互耦合。为了有效解决相互耦合下的微蜂窝基站子信道分配问题,参考文献[40]从博弈论角度出发,利用非合作速率最大化博弈模型建模子信道选择问题。在兼顾微蜂窝个体理性的同时能够提升系统全局收益,即微蜂窝网络的整体容量。

为了实现有效的分布式子信道分配方案,参考文献[39]

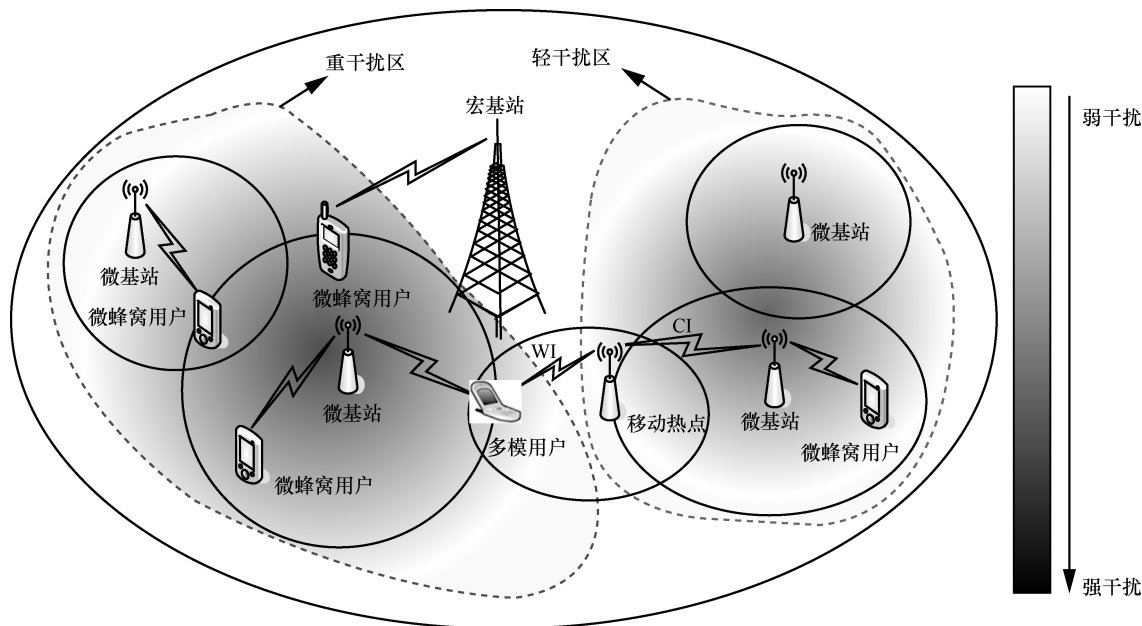


图6 干扰转移示意



中设计了一种分布式基于效用(utility-based)学习模型,利用该模型,任意局中人可以根据感知到的环境信息自主调整自己的策略。该学习模型的示意如图7所示。基于该学习模型,在参考文献[40]中,微蜂窝基站可以仅根据自己获得的效用以及历史状态等局部信息进行决策,并能够根据以上信息完成新一轮的决策过程,从而有效地解决了不同微蜂窝基站的传输策略相互耦合的问题。另一方面,该学习模型有效限制了多主体(multi-agent)系统中各个主体之间的信息交互,即在不同的微蜂窝基站与用户之间不会产生信息交互。在每个微蜂窝基站中,通过引入认知环实现基于效用的学习模型。该认知环包括感知周围干扰强度、测量效用以及进行决策3部分。

基于该学习模型,设计了一种基于效用的分布式的子信道选择算法。由于该学习模型的特点,所设计的算法简单可行且具有完全分布式的特点。在参考文献[40]中,证明了所提算法可以渐进收敛到一个全局最优的策略组合。值得注意的是,在所使用的博弈模型不存在纳什均衡(Nash equilibrium, NE)点的情况下,该算法仍然能够稳定收敛。

3.3.3 基于干扰对齐和干扰避免的联合干扰管理技术

由于异构网络中宏蜂窝基站及微蜂窝基站在传输功率、天线配置、服务用户数等方面存在异构性,导致异构网络中的层内干扰与层间干扰具有不同的特点。同时,由于实际网络中基站,尤其是用户侧配置的天线数目有限,受限于干扰对齐可行性条件的约束,完美的干扰对齐难以在整个网络中实现。因此,在异构网络中设计干扰对齐算法

同时消除层间/层内干扰更具挑战性。

虽然网络异构性对算法设计造成困难,但是在参考文献[44]中,巧妙地利用了异构网络的异构性,提出了一种两阶段干扰对齐方案。由于异构网络中的微蜂窝基站发射功率低,加之路径损耗、阴影衰落等影响,使得微蜂窝网络呈现部分连通特性,即某些干扰源对接收端造成的干扰非常微弱,可以忽略不计。根据该特点,参考文献[44]设计了一种适用于异构网络的干扰对齐方案,提升了网络性能。利用部分连通特性,可将如图8所示的异构网络中的微蜂窝基站划分为两组(分别为图8中实线与虚线标注的小区)。在第一组微蜂窝小区中,微蜂窝基站布设密集,相互之间存在较强干扰;而在第二组微蜂窝小区中,由于布设稀疏,相互之间的干扰较弱。

根据该部分连通模型,参考文献[44]提出了两阶段干扰对齐方案,增加了系统的可用自由度。两阶段干扰对齐的核心思想是:在第一阶段中,利用宏基站的多余天线消除宏基站对弱干扰区域的微蜂窝小区产生的层间干扰。然后,宏基站对强干扰区域的微蜂窝小区利用传统的干扰对齐算法计算其预编码矩阵与解码矩阵;在第二阶段中,利用微蜂窝小区之间的部分连通性,设计处在弱干扰区的微蜂窝小区内通信链路的预编码矩阵和解码矩阵。其设计目标是完全消除与宏小区链路之间的干扰,并且最大化链路的传输速率。

虽然两阶段干扰对齐能够充分利用异构网络的部分连通特性以及信号空间资源,但是由于微蜂窝小区数目众

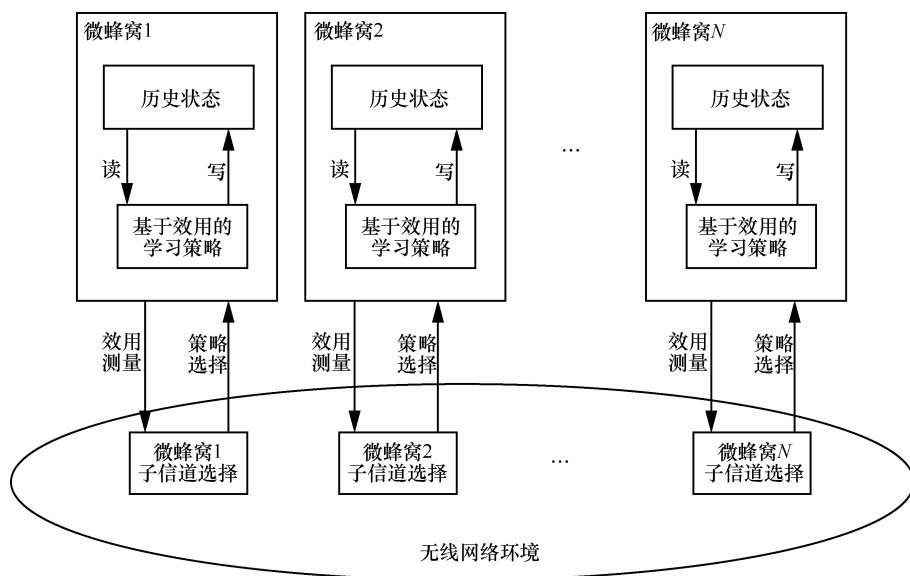


图7 基于效用的学习模型示意

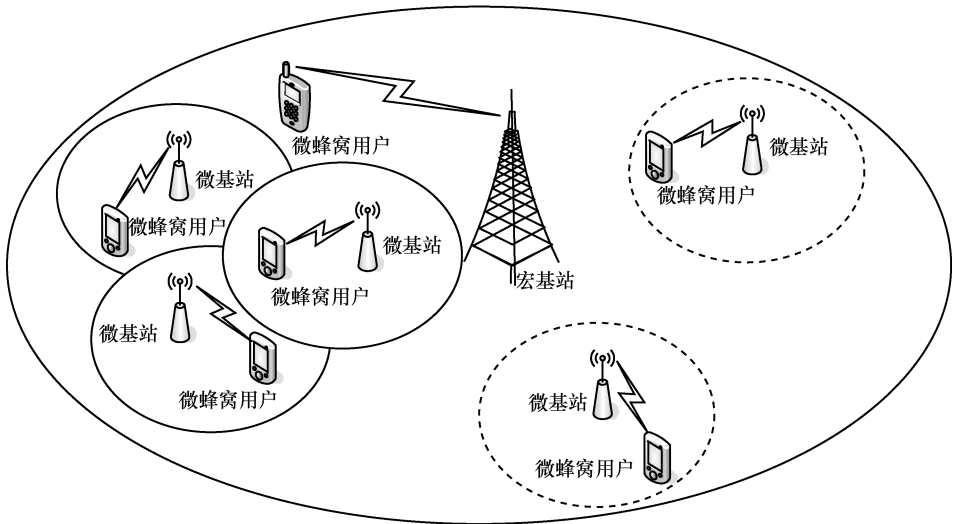


图 8 具有部分连通性的异构网络示意

多且布设随机,使得仅仅利用干扰对齐难以完全消除网络中的干扰。针对这一问题,参考文献[43]利用网络时域资源与信号空间资源,联合微蜂窝调度机制与两阶段干扰对齐进行干扰管理。该方法的基本原理是:考虑到两阶段干扰对齐可行性条件的约束,无法让所有的微蜂窝都参与干扰对齐。因此需要一种微蜂窝的调度方案,使得每个时隙内被调度的微蜂窝都满足两阶段干扰对齐的可行性条件,从而利用参考文献[44]提出的算法进行干扰消除。在参考文献[43]中,以最小化对所有微蜂窝进行一次调度所需要的时隙数为目标,实现了最大化微蜂窝调度次数。该方案在保证最快遍历所有微蜂窝的基础上,保证了用户之间的公平性,同时最大化调度次数可以提升网络频谱资源利用率,进而提升网络性能。参考文献[43]证明了所设计的微蜂窝小区调度问题等效于一个用最少数目对图进行染色的问题,并提出了一种低复杂度的算法获得了调度问题的次优解,通过仿真验证了该次优调度算法可以以较低的复杂度逼近最优调度方案,有效提升了系统速率。

这 3 种新型干扰管理算法的特点见表 1。可以发现,这些算法从多维度设计资源与干扰联合管理策略。一方面,从资源分配角度提升资源利用的合理性,抑制非合理因素,为网络容量提供增量。例如通过对业务分流比例的设定,第 3.3.1 节中的算法利用干扰空间分布资源从而有效转移了网络干扰;第 3.3.3 节中的算法使用时隙资源调度,并在相同的时隙资源内联合地理位置资源进行干扰消除。另一方面,通过对干扰状态信息的利用,修正设计新的

表 1 3 种新型干扰管理算法对比

算法	联合使用的资源域	干扰管理角度
第 3.3.1 节中的算法	地理位置、时频资源	利用
第 3.3.2 节中的算法	时频资源	抑制
第 3.3.3 节中的算法	地理位置、信号空间	抑制

资源分配算法,从而有益于网络容量。例如第 3.3.2 节中的算法通过学习模型利用干扰状态,设计了分布式的资源分配算法。这些都是在改善资源分配不理想的同时合理管控干扰,进而提升网络容量。

4 结束语

干扰问题成为限制无线通信网络性能的重要因素,对干扰的管理可以从设计调度协调机制进行干扰规避以及将干扰作为可利用资源的一部分加以有效利用这两方面进行。通过将干扰视为可用资源或者不利因素,首先从概念及特点等方面归纳讨论了几类典型的干扰管理算法。其次考虑到 5G 无线网络智能、动态、异构的特性,设计了一种智能的干扰管理体系,并阐述了资源管理与干扰管理的内在联系,指出需要从资源分配与干扰管理两个角度联合设计干扰资源管控算法,提升网络容量。在此基础上,讨论了 3 种新型资源干扰联合管理算法。综合以上讨论,对异构网络智能干扰管理技术的研究与发展趋势展望如下。

(1) 构建多维度干扰空间

为了确立异构、动态、智能的 5G 网络环境与干扰管理的互动关系,首先需要从多个维度研究干扰状态信息的表



征与评价,这就需要对不同维度的干扰参数考察量进行有机结合从而形成干扰的多维表示。在此基础上,可以进一步探索网络环境以及资源分配方法等对干扰形态和分布的影响,通过估计和预测等方法对干扰信息进行不同程度的加工,以适应不同层次的干扰管理需求。

(2)资源和干扰的联合管理

多维度的干扰空间能够刻画网络环境与用户间干扰的关系。基于多维度干扰空间,可以充分挖掘干扰的多维特性,即浪费资源的无线干扰和提升容量的无线干扰。以此作为网络资源及干扰的管控依据,联合网络资源设计高效的干扰管理机制,有效利用新型无线传输机制带来的增益,提升网络容量。

(3)智能的动态干扰管理机制

由于干扰和网络环境的关系不是静态、单向的,而是存在着反馈与互动,因此基于多维度干扰空间设计的资源和干扰联合管理机制应适应于网络环境的动态变化,确立并完善干扰管理环,设计智能动态的干扰管理机制,实现网络容量的提升。

参考文献:

- [1] COX D. Fundamental limitations on increasing data rate in wireless systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(12): 16-17.
- [2] SHENG M, SUN H, WANG H, et al. On-demand scheduling: achieving QoS differentiation for D2D communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(7): 162-170.
- [3] SUN H, WILDEMEERSCH M, SHENG M, et al. D2D enhanced heterogeneous cellular networks with dynamic TDD [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014(14): 1.
- [4] JU H H, LIANG B, LI J D, et al. Adaptive cross-network cross-layer design in heterogeneous wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(2): 655-669.
- [5] WANG M M, JI T. Dynamic resource allocation for interference management in orthogonal frequency division multiple access cellular communications[J]. IET Communications, 2010, 4(6): 675-682.
- [6] ZHANG J, CHEN R H, ANDREWS J, et al. Networked MIMO with clustered linear precoding [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(4): 1910-1921.
- [7] MIRIDAKIS N, VERGADOS D. A survey on the successive interference cancellation performance for the single antenna and multiple antenna OFDM systems [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2013, 15(1): 312-335.
- [8] LEE J, KIM Y, LEE H, et al. Coordinated multipoint transmission and reception in LTE-advanced systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(11): 44-50.
- [9] ZHANG R, CUI S G. Interference management with MISO beamforming[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(10): 5450-5458.
- [10] ZHAO G D, YANG C Y, LI G Y, et al. Fractional frequency donation for cognitive interference management among femtocells [C]//IEEE Global Telecommunications Conference, December 5-9, 2011, Houston, USA. New Jersey: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [11] ATTAR A, KRISHNAMURTHY V, GHAREHSHIRAN N O. Interference management using cognitive base-station for LTE[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(8): 152-159.
- [12] BOSISIO R, SPAGNOLINI. Interference coordination vs. interference randomization in multicell 3GPP LTE systems[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference, March 31-April 3, 2008, Las Vegas, USA. New Jersey: IEEE Press, 2008: 824-829.
- [13] HAMZA A, KHALIFA S, HAMZA H, et al. A survey on inter-cell interference coordination techniques in OFDMA-based cellular networks [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2013, 15(4): 1642-1670.
- [14] 3GPP. Further advancements for E-UTRA physical layer aspects: TR-36.814 [R/OL]. [2016-05-24]. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36814.htm>.
- [15] 3GPP. Requirements for support of radio resource management: TR-36.133 [R/OL]. [2016-05-24]. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/htmlinfo/36133.htm>.
- [16] YANG C G, LI J D, ALAGAN A, et al. Joint power coordination for spectral-and-energy efficiency in denser small cell networks: a bargaining game-theoretic perspective[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(2): 1364-1376.
- [17] LIU P, LI J D, LI H Y, et al. Two-dimensional resource pattern optimization for interference avoidance in heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(8): 3536-3546.
- [18] PATEL P, HOLTZMAN J. Analysis of a simple successive interference cancellation scheme in a DS/CDMA system[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1994, 12(5): 796-807.
- [19] VITERBI A J. Very low rate convolution codes for maximum theoretical performance of spread-spectrum multiple-access channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1990, 8(4): 641-649.
- [20] VARANASI M K, AAZHANG B. Multistage detection in asynchronous code-division multiple-access communications [J]. IEEE Transactions on Communications, 1990, 38(4): 509-519.

- [21] LIU R Z, SHI Y, LUI K S, et al. Bandwidth aware high-throughput routing with successive interference cancellation in multi-hop wireless networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(12): 5866-5877.
- [22] WANG Y, SHENG M, LUI K S, et al. Joint spectrum-efficient routing and scheduling with successive interference cancellation in multi-hop wireless networks [J]. Springer Wireless Networks, 2015, 22(4): 1299-1314.
- [23] CADAMBE V R, JAFAR S A. Interference alignment and degrees of freedom of the K -user interference channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(8): 3425-3441.
- [24] KATTI S, RAHUL H, HU W, et al. Xors in the air practical wireless network coding [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 16(3): 497-510.
- [25] LEE N, LIM J B, CHUN J. Degrees of freedom of the MIMO Y channel: signal space alignment for network coding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(7): 3332-3342.
- [26] CADAMBE V R, JAFAR S A. Degrees of freedom of wireless networks with relays, feedback, cooperation, and full duplex operation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(5): 2334-2344.
- [27] BOLCSKEI H, NABAR R, OYMAN O, et al. Capacity scaling laws in MIMO relay networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(6): 1433-1444.
- [28] SUH C, TSE D. Interference alignment for cellular networks[C]// IEEE 46th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing September 23-26, 2008, Urbana-Champaign, IL, USA. New Jersey: IEEE Press, 2008: 1037-1044.
- [29] SHIN W, LEE N, LIM J B, et al. On the design of interference alignment scheme for two-cell MIMO interfering broadcast channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(2): 437-442.
- [30] LIU W, SUN J X, LI J D, et al. Interference alignment for MIMO downlink multicell networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015(3): 1.
- [31] 赵林靖, 韩莹, 张岗山, 等. 基于多点协作传输的家庭基站网络节能方法: 201510570580.2[P]. 2015-11-29.
ZHAO L J, HAN Y, ZHANG G S, et al. Based on the home base of multi-point collaborative transmission network energy saving method: 201510570580.2[P]. 2015-11-29.
- [32] CHACHULSKI S, JENNINGS M, KATTI S, et al. Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing [J]. ACM Sigcomm Computer Communication Review, 2007, 37(4): 169-180.
- [33] CHAPORKAR P, PROUTIERE A. Adaptive network coding and scheduling for maximizing throughput in wireless networks[C]// International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM 2007, September 1-5, 2007, Montréal, Québec, Canada. New York: ACM Press, 2007: 135-146.
- [34] LE J L, LUI J, CHIU D M. How many packets can we encode-an analysis of practical wireless network coding [C]//IEEE 27th Conference on Computer Communications (INFOCOM), April 13-18, 2008, Phoenix, AZ, USA. New Jersey: IEEE Press, 2008: 1040-1048.
- [35] LIU J N, GOECKEL D, TOWSLEY D. Bounds on the throughput gain of network coding in unicast and multicast wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Area in Communications, 2009, 27(5): 582-592.
- [36] MA X, SHENG M, ZHANG Y. Green communications with network cooperation: a concurrent transmission approach [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(12): 1952-1955.
- [37] MAMORU S, YOSHIHISA K, AKIHITO M, et al. Coordinated multipoint transmission/reception techniques for LTE-advanced [J]. IEEE Wireless Communication Magazine, 2010, 17(3): 26-34.
- [38] LIU J Y, SHENG M, QUEK T, et al. CoMP transmission in cloud radio access networks [C]//IEEE Global Telecommunications Conference Workshops, December 6-10, 2015, San Diego, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [39] SHENG M, XU C, WANG X J, et al. Utility-based resource allocation for multi-channel decentralized networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(10): 3610-3620.
- [40] XU C, SHENG M, WANG X J, et al. Distributed sub-channel allocation for interference mitigation in OFDMA femtocells: a utility-based learning approach [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(6): 2463-2475.
- [41] MENG Y, LI J D, LI H Y, et al. A transformed conflict graph-based resource allocation scheme combining interference alignment in OFDMA femtocell networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(10): 4728-4737.
- [42] LI J D, MENG Y, LI H Y, et al. Graph-based fair resource allocation scheme combining interference alignment in femtocell networks[J]. IET Communications, 2015, 9(2): 211-218.
- [43] LIU G Q, SHENG M, WANG X J, et al. Joint interference alignment and avoidance for downlink heterogeneous networks[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(8): 1431-1434.
- [44] LIU G Q, SHENG M, WANG X J, et al. Interference alignment for partially connected downlink MIMO heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(2): 551-564.
- [45] LEE H C, OH D C, LEE Y H. Mitigation of inter-femtocell interference with adaptive fractional frequency reuse [C]// IEEE International Conference on Communications, May 3-8, 2010, Cape Town, South Africa. New Jersey: IEEE Press, 2010: 1-5.



- [46] LIANG Y S, CHUNG W H, NI G K, et al. Resource allocation with interference avoidance in OFDMA femtocell networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61 (5): 2243-2255.
- [47] LIU P, WANG X D, LI J D. Uplink co-tier interference management in femtocell networks with successive group decoding [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(9): 4797-4809.
- [48] LI Y Z, SHENG M, WANG X J, et al. Max-min energy-efficient power allocation in interference-limited wireless networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64 (9): 4321-4326.

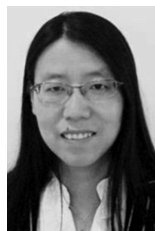
[作者简介]



李建东(1962-),男,博士,西安电子科技大学教授、博士生导师,教育部长江学者特聘教授,国家杰出青年科技基金获得者,主要研究方向为宽带无线通信(未来移动通信和未来无线局域网)、认知无线网络、大规模自组织网络、软件无线电以及无线网络的干扰管理等。



刘磊(1989-),男,西安电子科技大学博士生,主要研究方向为无线网络的性能分析及干扰管理等。



盛敏(1975-),女,博士,西安电子科技大学教授、博士生导师,主要研究方向为5G移动通信系统、异构网络融合以及无线网络自组织理论与方法等。



徐超(1987-),男,博士,西安电子科技大学在站博士后,主要研究方向为无线网络分布式资源管理、博弈理论以及分布式学习理论等。