



专题：5G

5G 绿色超密集无线异构网络：理念、技术及挑战

李渝舟¹, 江涛¹, 曹洋¹, 李赞²

(1. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074; 2. 西安电子科技大学, 陕西 西安 710071)

摘要: 超密集无线异构网络被公认为是大幅提升无线网络容量、解决蜂窝网所面临的 1 000 倍数据量挑战最富有前景的一种 5G 组网技术。但是, 与 5G 愿景背道而驰的是网络的超密集化部署在提升谱效的同时也极大地增大了系统的能耗, 降低了通信能效。旨在利用超密集异构网络具有的全网管理能力和网络分集效应, 从宏观的网络匹配与微观的资源聚合两方面探索超密集异构网络绿色演进的关键理论与技术。首先论述了绿色演进的基本理念, 然后提出了利用负载自适应的基站开关控制、主动缓存和干扰感知的跨网资源分配三大关键技术来提升网络的能效, 同时也讨论了每种技术在应用时所面临的挑战。

关键词: 超密集异构无线网络; 能效效率; 频谱效率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017197

Green 5G ultra-dense wireless heterogeneous networks: guidelines, techniques, and challenges

LI Yuzhou¹, JIANG Tao¹, CAO Yang¹, LI Zan²

1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2. Xidian University, Xi'an 710071, China

Abstract: Ultra-dense wireless heterogeneous network (Ud-HetNet) has been recognized as one of the most promising 5G network-organization techniques to significantly improve the wireless capacity and thus solve the 1 000× data challenge faced by cellular networks. However, counter to the expected 5G vision, although benefiting from the spectrum efficiency (SE) improvement, ultra-dense network deployment significantly increases system energy consumption and thus decreases network energy efficiency (EE). The key theories and techniques for energy-efficiently deploying Ud-HetNet were investigated from two aspects of macroscopic network matching and microscopic resource aggregation by exploiting their overall network management capabilities and network diversity effects. Specifically, the overall design guidelines for green evolution were introduced firstly, and then three techniques, namely load-aware base station on/off switching, proactive caching, and interference-aware cross-network resource allocation, were proposed to improve the network EE. Open issues and challenges that need to be further explored were also discussed.

Key words: ultra-dense wireless heterogeneous network, energy efficiency, spectrum efficiency

收稿日期: 2017-05-10; 修回日期: 2017-06-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61601192, No.61631015, No.61601193, No.61428104, No.61471163); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.2016YXMS298)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61601192, No.61631015, No.61601193, No.61428104, No.61471163), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2016YXMS298)

1 引言

无线通信网络正处在一次前所未有的深度变革之中。据思科预测，全球移动数据业务量从 2016 年到 2021 年将增长 7 倍^[1]。与 2010 年相比，蜂窝无线通信网络 2020 年将面临着 1 000 倍数据量的挑战^[2]。数据量的爆炸式增长宣告了大数据时代的到来。在这些海量的数据中，一个最明显的特征是：无线网络的主导业务类型已经从传统的语音业务转向了以移动视频为代表的能量饥饿型数据业务^[1]。与此同时，移动互联设备数量持续飙升。未来全球移动通信网络连接的设备总量将达到千亿规模^[3]。预计到 2020 年，全球移动终端（不含物联网设备）数量将超过 100 亿，其中中国将超过 20 亿。全球物联网设备连接数也将快速增长，2020 年将接近全球人口规模达到 70 亿，其中中国将接近 15 亿^[3]。人与人、人与物、物与物等丰富多彩的“万物互联”的通信形态预示着物联网时代的到来。

超千倍的数据流量增长，海量规模的移动互联设备数量，跨越人与人界限的泛在通信，正推动着移动无线网络的颠覆式变革和跨越式发展。然而，正如中国古言：“祸兮福之所倚，福兮祸之所伏”，机遇与挑战并存。现有无线网络容量已经难以支撑爆炸式的数据流量增长以及泛在的高质量通信需求，极其受限的网络容量已构成了用户追求身临其境的极致化业务体验的最大挑

战。因此，亟需新的无线、网络技术来解决现有网络的有限无线带宽资源与无处不在的大量高速率传输需求之间的矛盾。从而，大幅提升单位面积的频谱效率，急剧增加网络的容量，满足泛在的具有用户体验保障的通信需求。

在众多的技术方案中，超密集无线异构网络被公认为是解决上述挑战最富有前景的网络技术之一，其已被明确地纳入 IMT-2020 发布的《5G 概念白皮书》中^[4]。具体而言，超密集无线异构网络融合多种无线接入技术（如 5G、4G、UMTS、Wi-Fi 等），由覆盖不同范围、承担不同功能的大/小基站在空间中以极度密集部署的方式组合而成的一种全新的网络形态。在超密集无线异构网络中，如图 1 所示，多种无线接入技术共存，大/小基站多层覆盖，既有负责基础覆盖的在传统蜂窝网络中所使用的宏基站，也有承担热点覆盖的低功率小基站，如 micro、pico、relay、femto 等。为了解决 1 000 倍容量挑战，为用户提供极致化的业务体验，未来实际部署的超密集无线异构网络会远远超出现网的布设密度和规模。据预测，在未来无线网络中，在宏基站的覆盖区域中，各种无线传输技术的各类低功率节点的部署密度将达到现有站点部署密度的 10 倍以上，站点之间的距离将降至 10 m 甚至更小^[5,6]，支持高达 25 000 个用户/km²^[7]，甚至将来激活用户数和站点数的比例达到 1:1，即每个激活的用户都将有一个服务节点^[8,9]。

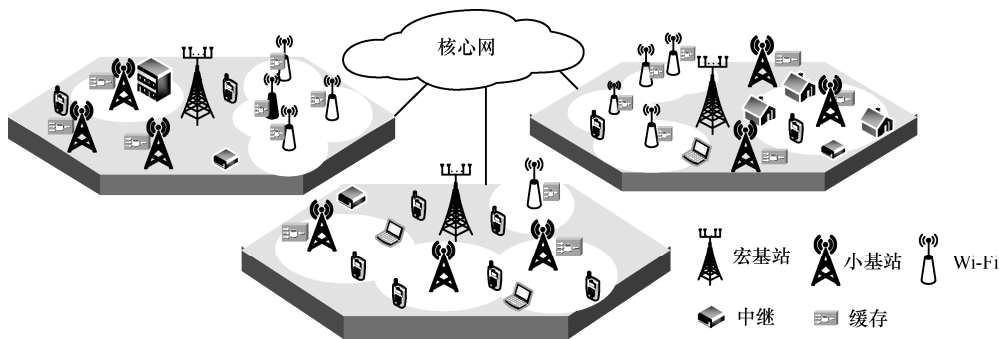


图 1 超密集无线异构网络示意



稀缺的频谱资源和宝贵的能量资源是每一代无线通信向前演进的最大桎梏。超密集组网技术能有效地解决大幅度提升蜂窝网络频谱效率的需求。但令人遗憾的是，网络的超密集部署也带来了前所未有的能量开销。跟踪现实网络一周所得的实测数据显示，密集部署的功能各异的基站在大多数时间里都处于低负荷状态，且网络的业务负载在空、时域上都是变化的^[10]。具体而言，在一天之内，负载低于峰值的 10%的时间比重在工作日和周末分别高达 30%和 45%^[10]。因此，在超密集网络中，很大一部分基站在绝大多数时间都没有得到充分利用。然而，即使处在低或者空负载状态，基站仍将消耗超过 90%的整体能耗。例如，一个典型的 UMTS 基站消耗 800~1 500 W，但射频输出功率仅有 20~40 W^[11]。巨大的能量开销所导致的经济支出已经构成了运营商持续向前发展的最大障碍之一^[12]。参考文献[13]显示运营商正面临着入不敷出的严峻局面，在 2G、3G 时代主要依靠的增加覆盖区域和提高数据速率等盈利方式难以为继，节能已成为今后盈利的主要方式。因此，如何实现超密集异构无线网络的高能效部署是一个值得深入研究的重大科学问题。

特别地，IMT-2020 发布的《5G 愿景与需求》白皮书明确期望，5G 相比于 4G 通信系统在频谱效率方面须提高 5~15 倍，在能量效率方面须实现 100 倍以上的提升^[3]。能、谱效率分别从不同的角度来评估协议架构、网络控制和资源管控等对无线网络中能量和频谱两大关键受限资源的有效利用程度。因此，在超密集无线异构网络中，亟需解决网络部署密集化所导致的谱效提升与能效降低之间的矛盾。本文旨在利用超密集异构网络具有的全网管理能力和网络分集效应，从宏观的网络匹配与微观的资源聚合两方面探索超密集异构网络绿色演进的关键理论与技术。具体地，本文首先论述了超密集异构网络绿色演进的基本思路，然后提出负载自适应的基站开关控制技术以

实现网络供给与用户需求间的第一级匹配，并进一步提出主动缓存与干扰感知的跨网资源分配技术以实现资源供给与用户需求间的第二级匹配，从而实现在超密集网络中在保证需求的频谱效率的基础上网络能效有量级的提升。

2 绿色演进的基本理念

要实现超密集异构网络的高能效泛在部署，需要突破传统蜂窝无线网络耗能的服务模式和缺乏灵活度的网络管控方法。本节讲述超密集异构无线网络绿色演进的基本思路及设计理念。

2.1 革新服务模式

在传统的“请求-传输-消费”服务模式下，网络在收到用户请求后才开始发送数据，用户则在收到数据后开始享受服务，但将该模式应用于大数据化的超密集异构无线网络时会导致过大的网络能耗开销。这是因为内容的流行度和用户的一些典型行为（如偏好、影响力和移动性等）看似随机，实则具有规律性，可被近似或准确地预测。因此，系统可以在网络条件好（如信道质量好或干扰小）的时段，将一些原本存储在远端服务器中且仅当收到用户请求后才发送的内容提前推送到用户附近的网络设备（如基站）中，甚至可以直接预缓存到用户设备中。这是一种网络服务理念的革新，由被动式的“请求-传输-消费”模式转变为主动式的“传输-请求-消费”模式。这种模式的转变可大幅提升大数据化的超密集异构网络的能量效率，同时也可实现用户对请求内容的快速获取。

2.2 提升管控灵活度

传统广泛采用的所谓的“最坏情况”的网络设计理念致力于无时无刻满足用户的需求，即使是在业务负载高峰时段。如前所述，在实际无线网络中业务负载具有时、空变化性，因此这种传统设计理念就不可避免地会导致网络能量的大量浪费和网络能效的大幅降低。实际数据表明，在

传统低密集部署的蜂窝网络中,几乎 60%~80%的总能量消耗在基站处^[10, 14]。毫无疑问,这一情况在未来的超密集无线异构网络中将变得极其严重。初步研究结果已表明,单位面积基站密度增加 10 倍,在带来 35.6%谱效提升的同时会导致 59.2%的能效降低。因此,在小基站密集化部署的超密集无线异构网络中,如仍像传统的网络管控那样即使在轻业务负载时段(如午夜)也开启全部基站无疑会浪费大量的能量。为此,从传统“最坏情况”的网络管理模式转变为感知负载的自适应管控模式来提升网络控制的灵活度和资源联合分配的高效性,从而达到实现节能的目的是十分必要的。

3 关键技术

在绿色演进基本理念的指导下,提出实现超密集异构无线网络高能效部署的 3 类重要技术,即负载自适应的基站开关控制、主动缓存和干扰感知的跨网资源分配。接下来,将对 3 类技术分别展开详细论述,并讨论每种技术在应用时所面临的挑战。

3.1 负载自适应的基站开关控制

在基于“最坏情况”的传统网络管理模式下,所有基站一直处于运行状态以随时满足最高的网络业务需求,这完全没有必要且会造成极大的能量浪费。通过大数据分析,能够获知网络业务的时空分布及变化规律,进而采用具有负载感知能力的自适应基站开关模式。该模式的主要目的是开启适当数量的基站以支撑当前的网络业务负载,并关掉剩余的基站以减小能量开销。这种模式使得网络规划能够从宏观上匹配时、空变化的网络业务负载,减少基站的静态功率,从而在大尺度实现能量节省(因为静态功耗占基站总功耗的绝大部分)。

已有一些研究尝试从不同的角度来解决基站控制问题,如参考文献[11, 14-16]。在参考文献[14]

中,提出了蜂窝缩放技术,即根据业务负载变化情况来调整蜂窝的覆盖范围,从而达到控制能耗的目的。参考文献[15]引入了“网络因子”的概念,从动态基站状态切换的角度来研究网络节能的问题。参考文献[11, 16]进一步研究了基站调控和用户关联的联合优化方案,分别分析了“能量-时延”和“能量-收益”的权衡问题。尽管参考文献[11, 14-16]考虑了业务分布在空间维度上的不均匀性,但是都没有分析业务分布在时间维度的变化性,这一特性同样会显著影响网络能耗。

此外,以下 3 个因素也给负载自适应的基站开关控制应用于实际无线网络中带来了挑战。

- 基站开关控制在多大时间尺度上执行较为合适,因为频繁的基站开关操作会给系统带来额外的信令开销并可能引起网络振荡。
- 如何保证为了节能而关闭基站不会显著地降低用户的服务质量,如数据传输速率。
- 如何对网络-用户能耗权衡问题进行严格的数学建模并灵活地调控二者,这是因为关闭基站可以节省网络能耗,但同时也增大了用户与基站的通信距离,进而会增加用户的发送功率。

3.2 主动缓存

随着半导体工艺的发展,在用户终端设备或者网络设备中配置大容量的存储器越来越容易。通过大数据分析,可以获得网络中的内容流行度、用户行为特征、用户影响力和用户的社交关系等信息。据此,可以利用内容提前推送和预缓存来提高超密异构网络的能量效率。例如,如果已经预测到各内容的流行度,那么系统可以在有影响力的用户的智能设备中预先缓存那些流行度较高的内容。另一方面,一旦知道用户间的社交关系,如果用户彼此接近,则可以通过设备直连通信(device-to-device communication)的方式直接获取共享内容^[17, 18]。通过设备直连通信和预缓存内容



可以有效减小传输距离并且避免网络拥塞，从而可以显著地降低网络和用户的发射功率，同时可以减轻基站的流量负载，而且用户也可以快速获取所需的内容，进而提高用户的服务质量。网络中流行度高的或某个用户很有可能要访问的内容可以提前从服务器推送到相应的基站或者用户终端处。因此，主动缓存目前主要分为基站级缓存和用户级缓存两类。与基站级缓存相比，用户级缓存是进一步将缓存在基站处的内容提前推送到用户终端处。所以，尽管用户级缓存可能会冒着耗费更多能量的风险，但是一旦缓存的内容的确被用户访问，其能量效率将更高。关于主动缓存，以下几方面需要被严谨地解决。

- 如何准确定义网络内容的流行度，即确定预推送内容的流行度阈值（超过此值则意味着将启动主动缓存）。
- 如何根据用户行为特征等因素确定提前推送给他们的内容以及提前推送、预缓存多少内容。
- 启动主动缓存后，采用基站级缓存和用户级缓存哪种方式更好（即主动缓存内容的时候，应当选择哪种方式）。
- 是否有其他的缓存方式，如混合式缓存，即将基站级缓存和用户级缓存灵活地结合。

另一方面，尽管通过主动缓存技术来降低网络能耗有着非常诱人的前景，但是不合理的内容预推送，如预缓存的内容从没被用户访问，将会导致能量资源和存储空间的浪费。因此，主动缓存就像一把双刃剑，除了要关注上述与主动缓存技术自身相关的挑战外，还需要仔细考虑其带来的收益和可能导致的开销间的权衡问题，具体如下：

- 对于基站级或者用户级缓存，需要选择多少基站或者用户终端设备来进行内容预缓存；
- 数据的预推送和预存储在用户发出正式请求之前什么时候开始启动；

- 针对无线网络的随机性和时变性，如何设计出可靠的主动缓存机制以尽可能多地减少网络开销；
- 如何对主动缓存下的收益-开销权衡问题进行严格的数学建模并灵活地调控二者。

目前对于这些问题的研究仍然处于探索阶段，还没有取得能应用于实际系统的成果。

3.3 干扰感知的跨网资源分配

虽然发射功率远小于基站运行的整体功耗，但是资源分配时所确定的发射机的发射功率会对放大器、冷却系统等网络组件所消耗的能量产生重大的影响。例如，参考文献[19]表明，仅通过将发射功率由 20 W 减小至 10 W，一个宏基站的总功耗就能由 766 W 降至 532 W（也就是说节省了 234 W 的功耗）。因此要实现绿色超密集无线异构网络的愿景，除了通过基站开关控制在大尺度上减少静态功耗外，通过资源分配在小尺度上降低发射功率也是不可或缺的。

如影随形，用户关联是基站操作后的一个必不可少的问题。这是因为一旦关闭某些基站，最初与之关联的移动终端需要重新与其他基站关联。而且，用户关联考虑与否，如果考虑，对应的关联方案会显著影响网络的负载分布及能、谱效率。在超密集无线异构网络中，多网络制式并存（如 5G、4G、UMTS、Wi-Fi 等），而对于同一网络制式，其服务用户的行为可能又由密集部署的覆盖不同范围、承担不同功能的大/小基站完成。超密集无线异构网络的这一独有特征为用户关联提供了网络分集，具有多模接口的终端不必再像传统的单模终端拘泥于只能通过同一制式网络收发数据。因此，不同的用户关联策略会导致业务负载在不同类型的网络间以及同一类型网络不同基站间的差异化承载和分布，从而影响到各网络的工作状态，进而影响网络的干扰程度和跨网资源联合优化，最终影响网络的能谱效率。

基站开关和用户关联确定了网络的宏观工作

状态,进一步还需要从微观上优化网间异质资源,以实现能谱高效的数据传输。在超密集网络中,频谱和能量等资源被独立、无协作地分割在了功能各异的网络中。为了提升频谱效率,时、频资源在超密集网络中将被极度复用,从而导致严重的同层、跨层干扰。一方面,强烈的互干扰通常会急剧降低人们所期望达到的频谱效率。另一方面,互干扰也会增大能耗,降低能效。因此,网络呈现异构性,资源表现出异质性,且时频资源的高度复用导致了严重的网络干扰。需要有抽象并统一表征网络资源的方法,并基于跨网协作,利用网络分集,整合网内与网间资源,联合优化经统一表征的异质资源,从而协调网间干扰,设计具有干扰抑制能力的联合资源分配方案,以实现能谱效率在小尺度上的进一步提升。

作为一个例子,考虑了一个面积为2 km×2 km包含5个宏基站(macro BS)、7个微基站(micro BS)的异构无线网络拓扑^[20],图2直观地展示了不同方案对网络能耗的影响。从图2中可以看出,相比于固定的资源分配方法(既不考虑基站开关也不优化资源分配),传统的“最坏情况”网络设计方法(不考虑基站开关,仅执行干扰感知的资源分配)能较大地降低能耗,而联合本文提出的负载自适应的基站开关控制和干扰感知的资源分配方案相比于传统的方法又能进一步极大地降低网络能耗。

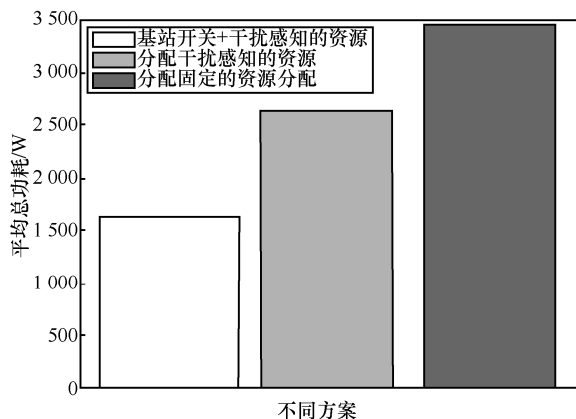


图2 不同方案下的网络平均总功耗

4 结束语

超密集无线异构网络融合多种无线接入技术,是由覆盖不同范围、承担不同功能的大/小基站在空间中以极度密集部署的方式组合而成的一种全新的网络形态。超密集无线异构网络能够大幅度提升无线网络容量,被公认为是5G中解决蜂窝网络所面临的1000倍数据量挑战的重要组网技术之一。但是,网络的超密集化部署在提升网络容量的同时也极度地增大了系统的能耗,降低了网络能效。本文从能量效率须实现100倍以上提升的5G愿景出发,讨论了如何构建绿色超密集无线异构网络。首先,论述了革新服务模式和提升管控灵活度的绿色演进基本理念,然后提出了负载自适应的基站开关控制、主动缓存、干扰感知的跨网资源分配三大关键技术来降低网络能耗,同时也讨论了每种技术在应用时所面临的挑战。目前,对这些技术的研究仍处在一个初步探索的阶段,如何利用超密集无线异构网络的高维度、灵活性和可扩展性的架构特征来实现其泛在的绿色部署也还需要深入的研究。

参考文献:

- [1] Cisco. Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2016–2021, white paper [R/OL]. (2017-03-28) [2017-05-10]. <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>.
- [2] Qualcomm Technologies. The 1000x data challenge[EB/OL]. [2017-05-10]. <http://www.qualcomm.com/solutions/wireless-networks/technologies/1000x-data>.
- [3] IMT-2020 (5G) Promotion Group. 5G vision and requirements, white paper[R/OL]. (2014-05-01) [2017-05-10]. <http://www.imt-2020.org.cn/zh/documents/1>.
- [4] IMT-2020 (5G) Promotion Group. 5G Concept, White paper[R/OL]. (2015-02-01) [2017-05-10]. <http://www.imt-2020.org.cn/zh/documents/1>.
- [5] HWANG I, SONG B, SOLIMAN S S. A holistic view on hyper-dense heterogeneous and small cell networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(6): 20-27.
- [6] Nokia Siemens Networks. 2020: beyond 4G radio evolution for the gigabit experience, white paper [R/OL]. (2011-08-01)



[2017-05-10]. [http:// www.nokiasiemensnetworks.com](http://www.nokiasiemensnetworks.com).

[7] LIU S, WU J, KOH C H, et al. A 25 Gbit/s (/km²) urban wireless network beyond IMT-advanced[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(2): 122-129.

[8] Qualcomm Technologies. LTE Rel-12 & beyond[EB/OL] [2017-05-10]. [Http:// www.qualcomm.com/1000x/](http://www.qualcomm.com/1000x/).

[9] Qualcomm Research. (2013) Neighborhood small cells for hyper-dense deployments: taking HetNets to the next level[EB]. 2013.

[10] KRISHNAMACHARI E O B, LIU X, NIU Z. Toward dynamic energy-efficient operation of cellular network infrastructure [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(6): 56-61.

[11] SON K, KIM H, YI Y, et al. Base station operation and user association mechanisms for energy-delay tradeoffs in green cellular networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(8): 1525-1536.

[12] China Mobile Research Institute. C-RAN: The road towards green RAN. white paper [R/OL]. (2011-10-01) [2017-05-10]. <http://labs.chinamobile.com/report/59826>.

[13] CHECKO A, CHRISTIANSEN H, YAN Y, et al. Cloud RAN for mobile networks—a technology overview [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(1): 405-426.

[14] NIU Z, WU Y, GONG J, et al. Cell zooming for cost-efficient green cellular networks[J]. IEEE Communications, 2010, 48(11): 74-79.

[15] OH E, SON K, KRISHNAMACHARI B. Dynamic base station switching-on/off strategies for green cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5): 2126-2136

[16] KIM S, CHOI S, LEE B G. A joint algorithm for base station operation and user association in heterogeneous networks [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(8): 1552-1555.

[17] LI Y, JIANG T, SHENG M, et al. QoS-aware admission control and resource allocation in underlay device-to-device spectrum-sharing networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(11): 2874-2886.

[18] SHENG M, LI Y, WANG X, et al. Energy efficiency and delay tradeoff in device-to-device communications underlying cellular networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communi-

cations, 2016, 34(1): 92-106.

[19] FEHSKE A, RICHTER F, FETTWEIS G. Energy efficiency improvements through micro sites in cellular mobile radio networks[C]//2009 IEEE GLOBECOM Workshops, Nov 30-Dec 4, 2009, Honolulu, HI. New Jersey: IEEE Press, 2009: 1-5.

[作者简介]



李渝舟（1986-），男，华中科技大学讲师、硕士生导师，主要从事 5G 无线网络、绿色通信和海洋探测与定位等领域的研究工作。



江涛（1970-），男，华中科技大学二级教授、博士生导师，教育部“长江学者”特聘教授，国家杰出青年科学基金获得者，国家“万人计划”科技创新领军人才，科技部“创新人才推进计划”中青年科技创新领军人才，长期从事宽带移动通信、天地一体化信息网络、深空与深海探测、信息与网络安全工作。



曹洋（1987-），男，华中科技大学讲师、硕士生导师，主要从事 5G 蜂窝通信、未来网和物联网等领域的研究工作。



李赞（1975-），女，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，科技部“创新人才推进计划”中青年科技创新领军人才，中国青年女科学家奖和中国青年科技奖获得者，主要从事突发通信、数字信号处理、无线通信系统和流星余迹通信系统等领域的研究工作。