



专题:4G&5G

分层异构密集无线网络的能效性能分析^{*}

张珩智,赵中原,杨富栋,李 勇

(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室 北京 100876)

摘 要: 分层异构密集无线网络节点部署更加密集,对系统模型和场景部署都有了新的要求。与之前的分层异构网络相比,大规模小小区的部署不仅使异构节点的干扰环境更加复杂,能量消耗也更大。针对小小区增强技术的系统模型和部署场景,从系统级的角度对分层异构密集无线网络的能效性能进行了分析,并仿真了不同 pico 数目对系统能效性能的影响。这些性能分析对以后分层异构密集无线网络中能效的优化以及研究具有指导意义。

关键词: 分层异构密集无线网络;能量效率;系统级仿真

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.03.009

Performance Evaluation of Energy Efficiency in Dense Heterogeneous Wireless Network

Zhang Hengzhi, Zhao Zhongyuan, Yang Fudong, Li Yong

(Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education,
Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In dense heterogeneous wireless network, the large-scale small cell deployment can substantially increase not only the complexity of the interference environment but also the network energy consumption. Based on the system model and deployment scenario of small cell enhancement, the energy efficiency in dense heterogeneous wireless network was analyzed and simulated from the sight of system level under different scenarios with different pico numbers. The evaluation has profound guiding significance for the future energy efficiency analysis and optimization in dense heterogeneous wireless network.

Key words: dense heterogeneous wireless network, energy efficiency, system level simulation

1 引言

2013年12月4日,工业和信息化部同时向三大电信运营商发放了TD-LTE 4G牌照。2014年3月3日,继中国移动、中国电信先后启动4G网络商用之后,中国联通也宣布将在3月18日启动4G的正式商用。这也标志着在

3G商用近5年之后,4G在我国正式进入商用阶段。目前,已有超过260个国家和地区部署了商业LTE,其中超过200个属于LTE FDD范畴,28个属于LTE TDD范畴,还有13个属于LTE FDD/TDD融合网络,全球已有120家制造商发布了1240款LTE终端设备。4G网络正在进入全面发展阶段。

^{*} 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No.2013CB336600),“新一代宽带无线移动通信网”国家科技重大专项基金资助项目(No.2013ZX03001001, No.2012ZX03001031),教育部博士点学科专项科研基金资助项目(No.20120005140002),北京市自然科学基金资助项目(No.4131003)

工业和信息化部电信研究院在2014年2月21日召开的“ICT深度观察大型报告会”上,发布了中国通信产业“2013年十大关键词和2014年十大趋势”。报告中指出,我国有望跃升4G全球第二大市场,3G用户数量将突破5亿户。如此庞大的用户群对于无线网络的容纳能力、覆盖范围以及服务质量都提出了更高的要求。按照目前的增长速度,到2020年,无线接入网络将会发生巨大的变化。业务量将会提升500~1 000倍,同时热点区域用户数量和业务量需求也会使得异构节点数量越来越多,可能是宏基站的10倍以上,在这样的密集部署场景中,更多异构节点的部署,使得无论是干扰环境,还是系统能量消耗都更加复杂。

已有研究表明,分层异构技术可以提升链路的质量和频谱效率,有效解决宏网络覆盖空洞的问题^[1]。分层异构无线网络的节点包含宏蜂窝、远端无线头(RRH)、微微小区(picocell)、家庭基站(femtocell)、中继等。分层异构无线网络的部署可以减轻宏蜂窝负载、提高特定区域的覆盖质量、改善边缘用户性能。此外,采用这样的部署方式还可以有效降低网络开销、减少能量消耗、降低运营商网络部署成本,是LTE-Advanced系统中的关键技术之一^[2]。基于分层异构技术在学术界已有的研究成果,在3GPP LTE R10/R11所定义的异构网络的基础上,各运营商在3GPP LTE R12中提出了小小区增强(small cell evolution, SCE)技术解决方案,SCE网络也被称为分层异构密集无线网络。

与之前的3GPP R10、R11版本相比,SCE网络拓扑结构有较大的改变。异构低功率节点部署更密集、部署呈现簇部署特性、业务量时变非均匀是SCE网络拓扑的主要特

性。这种无线组网新方式会带来一些新的问题。从系统性能和频谱效率的角度考虑,每个小小区业务量波动较大,小小区之间的干扰情况更加严重,用户的移动和切换问题更加复杂,在3GPP R10和R11版本中所提出的干扰协调和干扰消除技术需要加以改进来适应小小区的要求,同时性能提升和算法复杂度上需要进行折中;从能效的角度考虑,密集部署和簇部署特性使得系统能量消耗更加严重,另外这些异构节点的回传链路(主要指连接无效接入网络和核心网络的链路)容量受限和时延对频谱效率和能效也会产生影响。

2 系统模型和小小区部署场景

在3GPP TR 36.932中,对小小区增强技术的场景和要求做了详细的定义和规范^[3]。根据协议,小小区场景部署需要考虑宏覆盖、室内/室外、回传链路的理想性、稀疏/密集、同步、频谱分配、业务量、后向兼容性等因素。分层异构密集无线网络结构如图1所示。

小小区不仅可以部署在宏小区覆盖范围内,也可以单独部署,例如室内场景。而室内与室外场景中一个关键的不同点就是移动性;室内用户一般会保持静止或者以一个较低的速度移动;室外场景存在高速移动的用户,这对于小小区部署也是一大挑战。回传链路在大规模小小区部署场景中是非常重要的一个因素,一些非理想回传链路性能见表1。需根据业务量和业务热点区域,例如市郊、市内、大型商场超市等,合理地选择合适的小小区节点部署密度,以平衡部署成本和用户需求。在考虑宏覆盖的场景中,小小区节点和宏基站之间可以是同步的,也可以是非同步的;可以是同频的,也可以是非同频的,非同频的情况

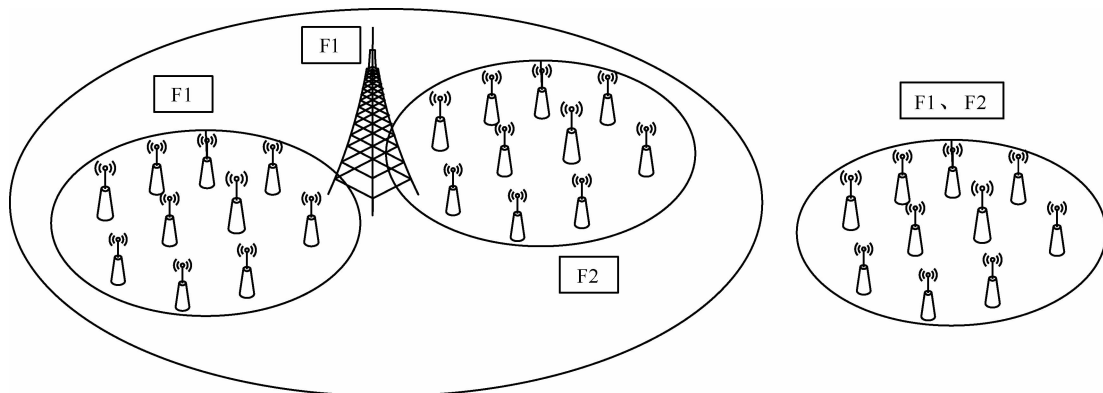


图1 分层异构密集无线网络结构



下,小小区节点使用频段目前集中在更高的频段(如3.5 GHz),在这一频段下可以使用更宽的带宽。由于每个小小区节点用户数较少而且分布不均,因此业务量的波动会很大,上行和下行的业务量并不对称,在时域和频域上业务量分布存在非均匀分布的情况。在后向兼容性方面,允许传统(R12版本之前)的用户接入小小区节点,同时新的用户也会引入以适应小小区网络和技术。

表1 非理想回传链路性能

回传链路	时延(单程)	吞吐量	优先级(1最高)
光纤接入1	10~30 ms	10 M~10 Gbit/s	1
光纤接入2	5~10 ms	100~1 000 Mbit/s	2
光纤接入3	2~5 ms	50 M~10 Gbit/s	1
DSL接入	15~60 ms	10~100 Mbit/s	1
电缆	25~35 ms	10~100 Mbit/s	2
无线链路	5~35 ms	10~100 Mbit/s, 可达1 Gbit/s	1

3 能效指标和模型

在蜂窝无线网络中,基站端的能量消耗占据了系统总能耗的60%^[4]。因此,如何提升基站端的能量效率是系统能效研究的关键。与宏基站相比,小小区节点的能耗更小。在R10/R11版本的低密度部署中,基本对异构节点的能效考虑很少。但是,从3GPP R12标准中对小小区增强分析可以看出,小小区节点部署密度很大,总的异构节点能耗远远超过R10/R11版本中的异构节点能耗。因此在这一高密度部署场景中,与传统异构网络相比,能效性能和技术需要做改进和优化^[5]。

如何提升系统能效也是目前业界研究的重点。在2010年,欧洲启动了EARTH(Energy Aware Radio and Network Technologies)项目,其中提出了与能耗有关的系统模型,并指出在2012年LTE网络能耗能削减4倍以上。随后,在欧洲创新技术学院(EIT)提出的5GREEN项目(即5G系统下的绿色通信)中,GreenTouch联盟提出,与2010年相比,现有网络的能耗已经被削减10倍以上。同时,5GREEN项目报告中还提到了极端密集网络部署下避免能耗的问题(不连续发射/不连续接收)以及由此带来的回传链路的问题。此外,在Green Radio、OPERA-Net、eWin等项目中,也对无线通信能效模型、结构和提升能效的方法给出了可行的思路。但是,当前大多考虑链路级能效模型和技术,对系

统级能效模型和能效指标,尤其是小小区增强场景下的能效模型、指标和性能的研究较少。

现有能效指标可以分为两类,即系统容量(数据量)/能耗指标和能耗/面积指标。其中,系统容量(数据量)/能耗指标又可以根据容量和能耗的定义,分为系统容量/能耗、数据量/能耗、频谱效率/功耗3种。参考文献[6]中运用系统容量与功耗之比作为衡量能效的指标,这个指标目前应用广泛,但是在部分场景中功耗是定值,这时评价能效与评价吞吐量是等价的,只是在量纲和数值上成比例变化。参考文献[7]中运用数据量与能耗之比作为衡量能效的指标,这个指标目前支持的场景最多,它统计的是一段时间内成功传输的数据量以及一段时间内的系统性能。参考文献[8]中运用频谱效率与能耗之比作为衡量能效的指标,它可以权衡频谱效率与能效,能通过仿真比较设计出频谱效率性能和能效性能均很好的网络设计方案。但是对于同构网络,系统带宽为定值,这时评价频谱效率与评价能效是等价的,只是在量纲和数值上成比例变化。参考文献[9]中用的是功耗与区域面积之比作为衡量能效的指标,它适合低业务负载网络,考虑的是在不规则网络中,如何最小化功耗,但是覆盖面积并不适合用于衡量系统效率。其中,各个指标之间可以通过场景部署或者公式推导进行转换。

4 小小区增强场景仿真

针对3GPP TR 36.932提出的小小区增强技术部署要求,参考文献[3]提出了用于性能评估的4种典型场景,见表2。

表2 小小区增强场景

场景	是否处于宏覆盖范围	是否与宏小区共用相同的信道	室内/室外	是否考虑小小区簇
1	是	是	室外	是
2a	是	否	室外	是
2b	是	否	室内	是
3	否	否	室内	是

本文考虑室外场景,即场景1和场景2a。小小区节点采用pico基站。考虑小小区簇的情况下,簇中小小区数目从2个到16个不等。这样在热点区域(簇)中,小小区的密度可以从很小到非常大,最终甚至可以和用户的数量相比。

场景1如图2所示,宏小区与小小区使用相同的载波频率(2GHz),可使用的载波数量都为1,每个载波带宽为10MHz。

宏小区的部署与 R10/R11 异构网络相同,采用六边形蜂窝网格模型,19 小区或 7 小区、三扇区结构。小小区的部署采用簇部署方式,先在宏小区地理区域内均匀随机部署若干个小小小区簇,再在小小小区簇中均匀随机部署若干个小小区。每个宏小区内小小小区簇的个数为 1、2 或 4 个,每个小小小区簇内小小区的个数为 2、4、8 或 16 个。每个宏小区地理区域内有 60 个用户,其中 2/3 的用户均匀随机地被放置在小小小区簇内,1/3 的用户均匀随机地被放置在整个宏小区地理区域内。

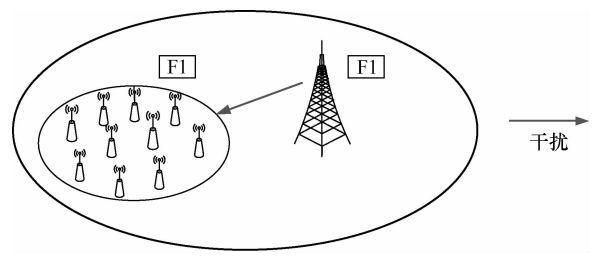


图 2 场景 1 网络结构

场景 2a 如图 3 所示,与场景 1 不同之处在于小小小区使用 3.5 GHz 的载波频率,与宏小区载波频率不同。在这一场景下小小小区可以使用最多 2 个载波。宏小区、小小小区以及用户的部署与场景 1 一致,信道模型也与场景 1 相同。

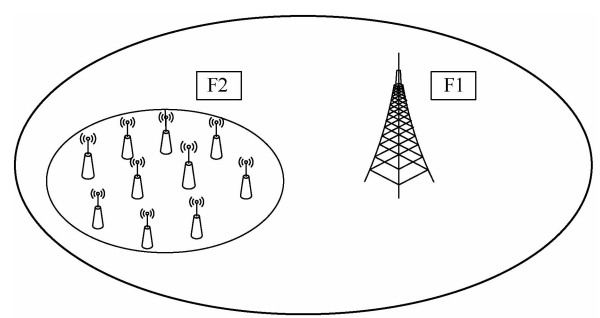


图 3 场景 2a 网络结构

能耗模型采用发射功率+基础功耗的方式,能效指标采用频谱效率/功耗表达式。

在宏基站覆盖范围内,小小小区节点和宏基站同频的情况下(场景 1),系统能效模型可以表示为:

$$EE = \frac{C}{P} = \frac{C_{\text{macro}} + C_{\text{pico}}}{P_{\text{macro}} + P_{\text{pico}}} \quad (1)$$

其中, C_{macro} 和 C_{pico} 分别是宏基站和 pico 基站的频谱效率, P_{macro} 和 P_{pico} 分别是宏基站和 pico 基站的功耗, 功耗表达式分别为:

$$P_{\text{macro}} = P_{\text{max}} + P_{\text{no}} \quad (2)$$

$$P_{\text{pico}} = P_{\text{px}} + P_{\text{p0}} \quad (3)$$

其中, P_{max} 和 P_{px} 分别是宏基站和 pico 基站的发射功率, P_{no} 和 P_{p0} 分别是宏基站和 pico 基站的基础功耗。

在宏基站覆盖范围内,小小小区节点和宏基站异频的情况(场景 2a)下,系统能效模型可以表示为:

$$EE = \frac{C}{P} = \frac{C_{\text{pico}}}{P_{\text{pico}}} = \frac{C_{\text{pico}}}{P_{\text{px}} + P_{\text{p0}}} \quad (4)$$

5 仿真与分析

5.1 仿真场景设定

仿真选用符合 3GPP 规范的动态系统级仿真平台^[10], 具体仿真参数配置见表 3。

表 3 仿真参数

仿真参数	参数取值
载频	2.0 GHz、3.5 GHz
带宽	10 MHz
载波数	1、2
路损模型	宏小区采用 ITU UMa(urban macro)模型; 小小小区采用 ITU UMi(urban micro)模型; 基站和用户之间使用三维距离
穿透损耗	20 dB
阴影衰落	宏小区采用 ITU UMa 模型; 小小小区采用 ITU UMi 模型;
快衰	宏小区采用 ITU UMa 模型; 小小小区采用 ITU UMi 模型;
发射功率	宏基站:46 dBm; pico 基站:30 dBm
天线增益	宏基站:17 dBi; pico 基站:5 dBi
用户天线增益	0 dBi
每扇区簇个数	1 个
簇内 pico 数	2、4、8 或 16 个
每个扇区用户数	60
用户分布	2/3 用户随机分布在簇内,1/3 用户随机分布在宏小区内
pico 在簇中分布半径	60 m
用户在簇中分布半径	70 m
最小距离	pico 基站—pico 基站: 15 m; pico 基站—用户: 5 m; 宏基站—簇中心: 105 m; 宏基站—用户: 35 m; 簇中心—簇中心;簇中心小区基站分布半径
业务模型	全缓冲(full buffer)

表 4 是仿真时各功耗参数。



表 4 功耗参数

参数	宏基站	pico 基站
发射功率 P_{tx}	46 dBm	30 dBm
基础功耗 P_0	130 W	30 W 或 6.8 W

5.2 仿真性能

图 4~图 10 中,空闲基站表示无服务用户的基站基础功耗为 0,所有基站表示所有基站都有基础功耗。

(1)同频网络系统能效

图 4 仿真了不同 pico 数目下的扇区平均频谱效率。可以看出,随着 pico 数目的增加,扇区平均频谱效率也逐渐增加,但是增加的比例在逐渐减少。更多的 pico 基站的部署使得系统的频谱资源复用度增加,同时使得 pico 用户的干扰也越来越大。

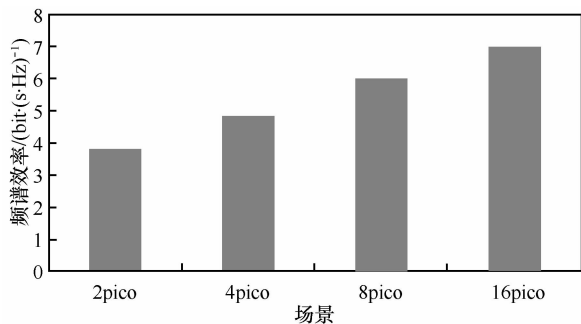
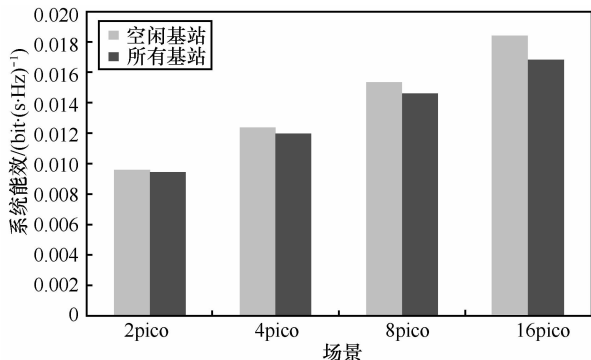
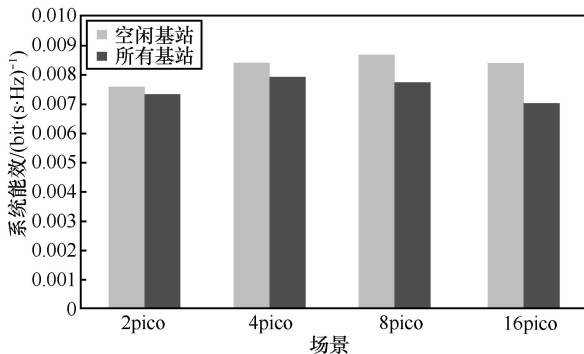


图 4 不同场景下的系统频谱效率

pico 基站基础功耗为 6.8 W 时,扇区平均系统能效如图 5 所示。可以看出,系统能效随着部署基站数量的增加而增加。对于无服务用户的基站,将其设为睡眠模式或关闭状态,可以有效提升系统能效,而且 pico 基站部署越多,这种基站睡眠或关闭策略对系统能效的提升越大。

图 5 $P_0=6.8$ W 时不同场景下的系统能效

pico 基站基础功耗为 30 W 时,扇区平均系统能效如图 6 所示。可以看出在这种场景下,能效随着部署基站数量的增加会先增加后减少,即出现一个最大点。这主要是由于此时扇区中 pico 基站的基础功耗(30 W)可以和宏基站的基础功耗(130 W)相比拟,功耗的增加与基站数成正比,而频谱效率由于受到干扰的影响,增长趋势不如功耗,因此 16pico 场景的能效反而比 8pico 的能效要差。

图 6 $P_0=30$ W 时不同场景下的系统能效

可以看出不同的参数设置(如图 5 和图 6 所示, P_0 分别为 6.8 W 和 30 W)会导致的能效性能趋势。

(2)异频网络系统能效

图 7 仿真了不同 pico 数目下的 pico 用户扇区平均频谱效率。可以看出,随着 pico 数目的增加,扇区平均频谱效率也逐渐增加。

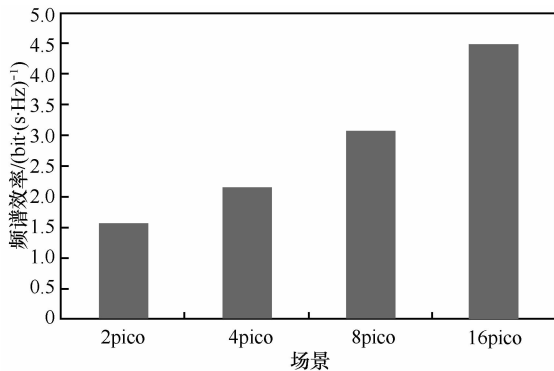
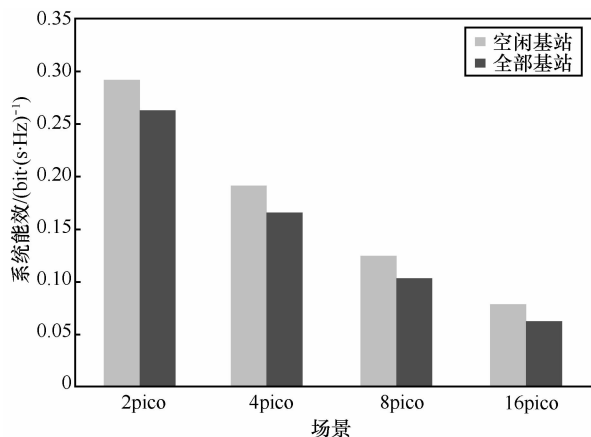
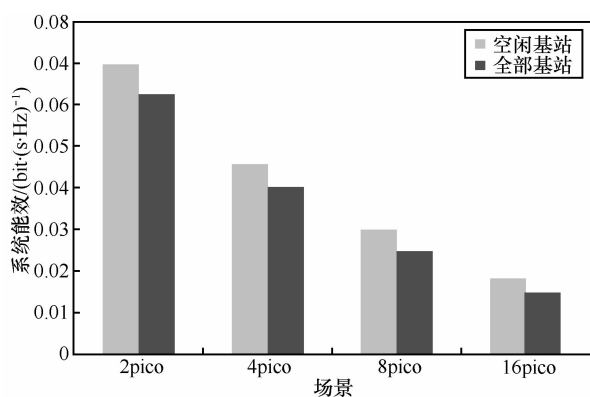


图 7 不同场景下的系统频谱效率

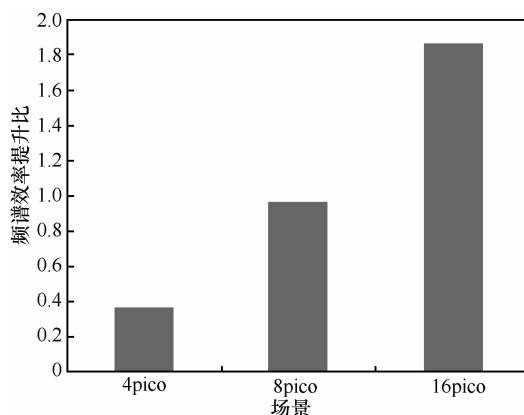
图 8 和图 9 分别仿真了基础功耗为 6.8 W 和 30 W 情况下的 pico 基站的系统能效。可以看出,无论基础功耗设置为多少,pico 基站的系统能效都随着部署的 pico 数的增加而减小。这主要是由 pico 基站频谱和功耗的提升比例导致的。图 10 仿真了 4pico、8pico、16pico 场景的频谱效率和功耗相对于 2pico 场景提升的比例。随着 pico 数的增加,频

图 8 $P_0=6.8$ W 时不同场景下的系统能效图 9 $P_0=30$ W 时不同场景下的系统能效

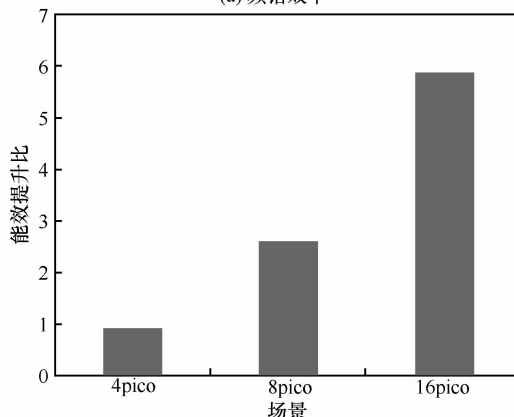
谱效率和功耗同时增加,但是功耗的增加是频谱效率提升的数倍(以 16pico 为例,功耗提升近 6 倍,而频谱效率只提升 1.8 倍),导致能效降低。造成这种增加不平衡有两个主要原因:用户的接入方式和基站间的干扰。用户按 RSRP (reference signal received power, 参考信号接收功率) 准则进行接入。RSRP 准则是使用户接收信噪比最大准则,按 RSRP 方式接入有利于提高系统的频谱效率,但是不一定有利于提升能效。可以通过寻找一种更合适的用户接入方式,达到频谱效率和能效之间的一个折中。由于基站部署在一个很小的区域中,所以随着部署基站数的增加会使得基站间干扰十分严重,这样不光使得功耗增加,还使得频谱效率的增加并没有预期的那么大,通过更好的资源分配来控制基站间的干扰,通过提升系统频谱效率来提高能效。

6 结束语

本文在分层异构密集无线网络中引入了能效模型和能效指标,从系统级的角度分析了宏基站和异构节点在同



(a) 频谱效率



(b) 能效提升比

图 10 频谱效率和能效提升比(相对于 2pico 场景)

频和异频的场景下的能效性能随异构节点部署数量的变化以及不同基础能耗对系统能效性能的影响。最后对仿真结果进行了分析,对分层异构密集无线网络中能效的优化以及以后的研究提供了依据。

参考文献

- 1 Peng M G, Wang W B. Technologies and standards for TD-SCDMA evolutions to IMT-Advanced. IEEE Communications Magazines, 2009, 47(12):50~58
- 2 Peng M G, Liu Y, Wei D Y, *et al.* Hierarchical cooperative relay based heterogeneous networks. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3):48~56
- 3 3GPP TR 36.932. Scenarios and Requirements for Small Cell Enhancements for E-UTRA and E-UTRAN (Release 12), 2012
- 4 Jones C E, Sivalingam K M, Agrawal P, *et al.* A survey of energy efficient network protocols for wireless networks. Wireless Networks, 2001, 7(4): 343~358
- 5 Nakamura T, Nagata S, Benjebbour A, *et al.* Trends in small cell enhancements in LTE-Advanced. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(2): 98~105



- 6 Tombaz S, Sung K W, Zander J. Impact of densification on energy efficiency in wireless access networks. Proceedings of Globecom Workshops (GC Wkshps), Anaheim, California, USA, 2012: 57~62
- 7 Chen T, Haesik K, Yang Y. Energy efficiency metrics for green wireless communications. Proceedings of 2010 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Suzhou, China, 2010: 1~6
- 8 Li C, Zhang J, Letaief K B. Energy efficiency analysis of small cell networks. Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC), Budapest, Hungary, 2013: 4404~4408
- 9 Richter F, Fehske A J, Fettweis G P. Energy efficiency aspects of base station deployment strategies for cellular networks. Proceedings of Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall), Anchorage, Alaska, USA, 2009: 1~5
- 10 3GPP TR 36.814. Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects (Release 9), 2010

[作者简介]



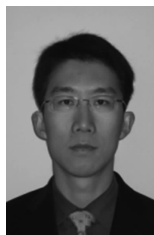
张珩智,男,北京邮电大学硕士生,主要研究方向为无线通信。



赵中原,男,北京邮电大学博士生,主要研究方向为无线网络编码技术、多天线技术、面向 5G 的大规模协作技术,已发表学术论文 10 余篇,申请发明专利 11 项,授权 3 项,提交提案文稿 12 篇。



杨富栋,男,北京邮电大学硕士生,主要研究方向为无线通信。



李勇,男,博士,北京邮电大学副教授、硕士生导师,目前的研究方向主要包括下一代无线宽带移动通信网络中的关键技术、无线网络建模仿真、无线网络协同信息论等。迄今为止在国际著名学术期刊和学术会议上发表论文近 30 篇,申请发明专利近 20 项,出版译著 1 本,获得软件著作权 3 项,提交标准提案多项。近年来作为项目负责人主持国家自然科学基金项目 2 项,并作为项目主要研究人员参与多个国家科技重大专项。

(收稿日期:2014-03-06)

(上接第 26 页)



胡南,男,中国移动通信有限公司研究院无线技术研究所项目经理,主要研究方向为 4G 以及后续技术的标准演进、产业推进和网络优化。



胡臻平,男,中国移动通信有限公司研究院无线技术研究所所长助理,主要研究方向为 4G、5G 无线技术和业务需求。



李男,男,中国移动通信有限公司研究院技术经理,主要研究方向为频谱演进策略与 LTE 及演进系统射频标准化。



刘光毅,男,中国移动通信有限公司研究院无线技术研究所总工程师,主要研究方向为 4G 的标准演进、产业推进和网络优化以及 5G 的预研与标准化。

(收稿日期:2014-02-20)