



4G 与 5G 双网共存时能效最优策略

薛亚辉, 邵泽才, 崔春风, 金婧, 王菡凝
(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘要: 无线网络的能量效率逐渐成为评估网络的重要指标, 4G 与 5G 能效存在差别, 双网共存时, 如何提高无线网络能效至关重要。为分析 4G 与 5G 能效差异, 从基站能耗组成出发, 通过实测数据建立 4G 和 5G 基站能耗模型, 然后进行仿真, 计算其能效。结果表明, 4G 和 5G 存在各自能效占优区间, 单站吞吐量小于 500 Mbit/s 时, 4G 效更优; 单站吞吐量大于 500 Mbit/s 时, 5G 能效更优。双网共存时, 吞吐量小于 500 Mbit/s 时只开 4G; 吞吐量大于 500 Mbit/s, 只开 5G, 单站功耗可降低 53.4%, 能效可提升 116.4%。

关键词: 4G; 5G; 双网共存; 能效

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022098

Optimal strategy for maximizing energy efficiency of 4G and 5G coexistence network

XUE Yahui, SHAO Zecai, CUI Chunfeng, JIN Jing, WANG Hanning
China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: The energy efficiency of wireless networks has gradually become an important indicator for evaluating network performance. It's very important to improve the energy efficiency of the coexisting 4G and 5G networks as there are differences in energy efficiency of them. Firstly, the energy consumption composition of base station was analyzed, energy consumption models for 4G and 5G base stations through measured data were established, and then its energy efficiency was evaluated through simulations. The results show that 4G and 5G have their own optimal energy-efficiency areas separated by the critical point of 500 Mbit/s, above which the 5G energy efficiency is better. When dual networks operate simultaneously under the proposed-solution where only 4G is used when the throughput is less than 500 Mbit/s and only 5G is used otherwise, the power consumption of a single station can be reduced by 53.4% and the energy efficiency can be improved by 116.4%.

Key words: 4G, 5G, coexistence network, energy efficiency

0 引言

随着移动通信网络的蓬勃发展, 信息通信技

术 (information and communications technology, ICT) 产业能耗不断攀升。2011—2020 年, 中国移动年度总耗电量年均增长量为 9.70%, 2020 年

收稿日期: 2021-12-16; 修回日期: 2022-05-12

通信作者: 邵泽才, shaozecai@chinamobile.com



度总耗电量达到 292.3 亿千瓦时,其中基站耗电量年均增长率为 11.33%。从全球范围来看,2020 年 ICT 产业能耗约 20 000 亿千瓦时,预计到 2030 年,移动接入网和数据中心将增长 3~4 倍^[1]。现如今,国际社会关于节能的呼声越来越高,国际电信联盟(International Telecommunications Union, ITU)、全球移动通信系统协会(Global System for Mobile Communications Association, GSMA)等国际组织号召全球 ICT 产业到 2030 年将碳排放降低 45%,绿色节能无线网络势在必行^[2]。

与 4G 相比,5G 满足了用户更低时延的需求,采用了更宽的频段资源,引入了大规模多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)技术,大大提高了峰值吞吐量^[3-4],但由于基带计算量大且射频效率略低,5G 基站功率更高。据中国移动 2019 年测得的数据,在满负荷下,5G 的平均测量吞吐量约为 4G 吞吐量的 16 倍,5G 基站的总功耗是 4G 的 3~4 倍,5G 能效比 4G 高。但在现网中,基站大多数情况下都是在中低负荷下运行。因此,针对 4G 与 5G 双网共存的状态,研究不同负荷下 4G 与 5G 的网络能效,寻求无线网络能效最优,对于运营商来说,至关重要。

1 网络能效

在以往的研究中,无线网络设计的重点集中在高容量、覆盖范围、数据速率、吞吐量和低时

延等方面,而近些年来,由于环境及运营成本等原因,无线网络的能源效率(energy efficiency, EE)已成为评估网络的重要指标之一^[5-7]。

在无线网络中,常见的网络能效定义主要有:系统级能效、网络级能效和链路级能效。系统级能效考虑整个通信系统的能效性能,定义为系统的输入功率和输出功率的比值。网络级能效考虑的范围较大,不仅考虑网络对功率的使用效率,同时也会考虑网络的覆盖范围、网络容量等信息。链路级能效可分析通信系统中单个设备的能效,比如基站能效^[8-10]。在本文中,主要研究基站的能效,能效度量形式为 bit/J,为每消耗 1 J 的功率所能成功传输的数据量,表示为:

$$\eta_{EE} = \frac{R}{P} \quad (1)$$

其中, R 代表传输速率, P 代表传输过程中消耗的功率。

2 基站能耗模型建立

2.1 基站能耗的组成

单个基站的能耗主要由站点基础设施和主设备两部分构成。站点基础设施通常包括用于将交流电转换为直流电的整流器、备用电源(如电池)和其他设施(如空调)。主设备是机柜中的基站设备,一般包括基带单元和无线电单元^[11]。单座基站的能量传输路径示意图如图 1 所示。

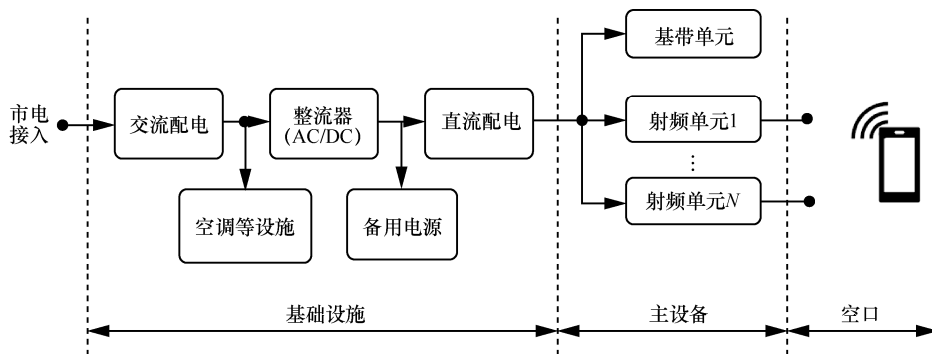


图 1 单座基站的能量传输路径示意图

由图 1 可见, 基站能量传输由基础设施、主设备和空口 3 个部分构成。其能量消耗很大一部分来源于基站主设备, 本文只考虑基站主设备的能效, 暂不考虑空调等基础设施的能效。

基站主设备从功能上大致分为基带处理单元 (base band unit, BBU)、远端射频单元 (remote radio unit, RRU) 和天线 3 部分。5G 基站中, RRU 与天线进行物理集成, 组成有源天线单元 (active antenna unit, AAU)。基站主设备的功耗主要来自于 BBU 和 AAU (或 RRU)。一套典型的 4G 基站主设备一般包括 1 个基带处理单元和 3 个远端射频单元。一套 5G 基站主设备一般包括 1 个 BBU 和 3 个 AAU。

BBU 完成基带、主控、传输以及时钟等功能, 其功耗主要来自内部处理器、ASIC/FPGA 等芯片。与 4G 相比, 5G 基站支持更高速率、更低时延, 内部芯片数量更多、性能更高, 故 BBU 整机功耗比 4G 更高。

AAU 的功耗主要来自于模拟信号处理模块、收发信机、功率放大器 (power amplifier, PA)、滤波器、双工器以及低噪声放大器等。收发信机主要完成上行射频处理、下行的 IQ 数据解复用等功能; PA 对收发信机输出信号的进行功率放大, 配合削峰 (crest factor reduction, CFR) 和数字预失真 (digital pre-distortional, DPD) 提高效率。

2.2 基站能耗模型建立

影响基站主设备能耗的因素有很多, 但主要因素为基站的业务量, 即基站负荷, 并且与主设备能耗呈正相关性, 基站负荷越高, 能耗越高。目前, 针对基站主设备能耗模型的研究已较为成

熟, 大量的研究表明, 基站 BBU 功耗随基站负荷变化很小, 基本和基站负荷大小无关, 射频单元的能耗与基站负荷呈线性关系^[12]。基站主设备能耗可表示为:

$$P = P_{\text{BBU}} + P_{\text{RF}} \quad (2)$$

$$P_{\text{RF}} = X \times L + P_0 \quad (3)$$

其中, P 为基站主设备总能耗, P_{BBU} 为基站 BBU 的能耗, P_{RF} 为射频单元能耗 (4G 为 RRU 能耗, 5G 为 AAU 能耗), L 表示为基站负荷, X 根据不同基站类型取不同的值, P_0 为射频部分静态功耗。

本文测量了两款典型的 4G 和 5G 宏基站在不同负荷下射频部分的功耗, 4G RRU 功耗值见表 1, 5G AAU 功耗值见表 2。

其中, 4G 宏基站额定发射功率为 40 W, 共 3 个扇区, 每个扇区 8 根天线, 载波频率为 2.6 GHz, 单载波带宽 20 MHz, 每扇区 3 载波; 5G 宏基站的额定发射功率为 240 W, 共 3 个扇区, 每个扇区 64 根天线, 载波频率为 2.6 GHz, 单载波带宽为 100 MHz。参考式 (3), 根据表 1 与表 2 的实测数据, 利用线性回归算法拟合得到 4G 与 5G 基站射频部分功耗模型^[13]。4G 基站 RRU 能耗与无线利用率关系式:

$$P_{\text{RRU}} = 366.67 \times X_1 + 99.07 \quad (4)$$

其中, P_{RRU} 为 4G 基站 RRU 功耗, X_1 为 4G 无线利用率 (平均占用 RB 数/RB 总数)。

5G 基站 AAU 能耗与无线利用率关系式为:

$$P_{\text{AAU}} = 316.6 \times X_2 + 361.8 \quad (5)$$

其中, Y_2 为 5G 基站 AAU 功耗, X_2 为 5G 无线利用率 (平均占用 RB 数/RB 总数)。

表 1 4G RRU 功耗值

RU 利用率	0	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%	80%	100%
RRU 功耗/(W·h)	99.07	116	138	155	168	202	249	318	390	465

表 2 5G AAU 功耗值

RU 利用率	0	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%	80%	100%
AAU 功耗/(W·h)	361.8	376	390	411	425	451	488	556	612	677



综上, 本文测试的 4G 基站和 5G 基站的能耗表达式为:

$$P_{4G} = 162 + 3 \times (366.67 \times X_1 + 99.07) \quad (6)$$

$$P_{5G} = 120 + 3 \times (316.6 \times X_2 + 361.8) \quad (7)$$

3 仿真计算

3.1 仿真参数

本文选择应用较为广泛的城市宏基站为仿真场景, 4G 与 5G 载波频率均选择 2.6 GHz。4G、5G 参数配置的主要区别在于 5G 载波带宽更宽、发射天线数量更多, 仿真配置参数见表 3。

表 3 仿真配置参数

参数	4G	5G
带宽	单载波 20 MHz, 共 9 个载波	单载波 100 MHz, 共 3 个载波
每用户最大流数	2	4
帧结构	DDDUU	DDDUU
基站数	19	19
站间距/m	500	500
天线高度/m	25	25
天线垂直间距(λ)	0.8	0.8
天线水平间距(λ)	0.5	0.5
单天线增益/dB	8	8
终端室外比例	20%	20%

3.2 业务模型

为更真实地对现实中的业务情况进行仿真, 本文中采用 3GPP TR 36.814 中的 FTP Model 1 业务模型^[14], 见表 4。

表 4 FTP Model 1 业务模型

参数	特征
文件大小 (S)	2 MB 或 0.5 MB, 每个用户下载一个文件
用户到达速率(λ)	用户到达速率 λ 符合泊松分布

Model 1 提供了 2 MB 和 0.5 MB 两种大小的数据包。本文采用的是 2 MB 的数据包。对于一个用户, 每次至多有一个数据包传输, 并且一个用户只产生一次 FTP 业务。FTP Model 1 业务生成示意图如图 2 所示。

用户到达速率 λ 符合泊松分布, 通过改变用户到达速率 λ 来表示系统负载:

$$\text{offered traffic} = \lambda \times S \quad (8)$$

通过设置不同的系统负载, 实现资源利用率 (resource utilization, RU) 的变化。本文仿真中共 57 个小区, 资源利用率 (RU) 和小区吞吐量 (cell throughput) 采用 57 个小区的均值。

资源利用率 (RU) =

$$\frac{\text{某时段内每个小区使用的RB数的总和}}{\text{某时段内每个小区可用的RB个数的总和}} \quad (9)$$

小区吞吐量 (cell throughput) =

$$\frac{\text{某时段内所有用户接收的数据大小}}{\text{观察时间} \times \text{小区数量}} \quad (10)$$

4 结果分析

本文利用 FTP 业务模型, 对 4G 和 5G 基站的不同流量负载进行了仿真。用基站的 RU 来表示基站负荷, 将不同流量负载下的基站的 RU, 分别代入能耗模型式 (6) 和式 (7), 计算 4G 基站和 5G 基站的能耗, 进而根据式 (1) 计算不同吞吐量下的基站能效, 4G 与 5G 能效曲线对比如图 3 所示。

可以看出, 4G 与 5G 均存在能效占优区间。当单站吞吐量大于 500 Mbit/s 时, 5G 的能效更优; 吞吐量小于 500 Mbit/s 时, 4G 的能效更优。

造成 4G 与 5G 各自存在能效占优区间的原

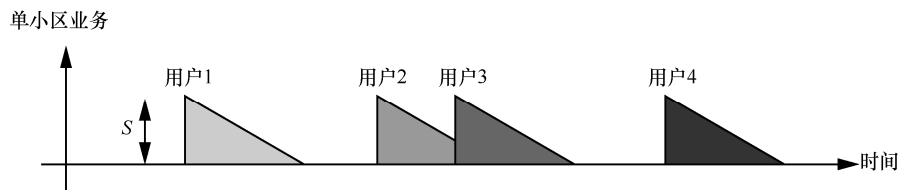


图 2 FTP Model 1 业务生成示意图

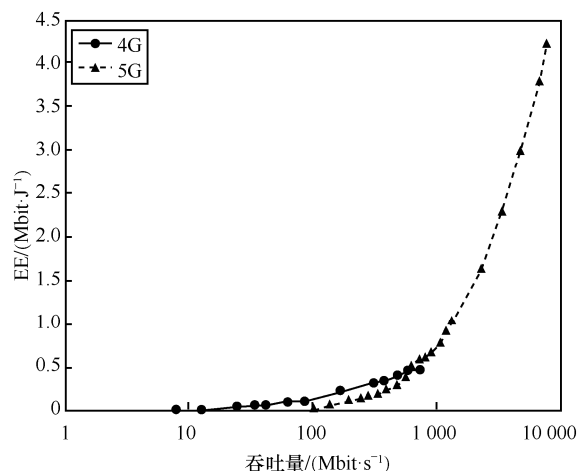


图3 4G与5G能效曲线对比

因可能在于, 5G 采用大规模 MIMO 技术, 提高 10 倍以上的频谱效率^[15], 但大规模 MIMO 通信系统使用了大量射频链路, 这些射频链路消耗大量能量^[16]。在低负荷情况下, 5G 基站静态功耗比 4G 基站更高。随着负荷的不断增大, 5G 的频谱资源利用率增加, 频谱效率提高, 由此带来的吞吐量增益越来越大, 使得 5G 基站能效逐渐大于 4G。

根据目前 4G 与 5G 双网共存时 4G 与 5G 业务流量占比情况, 基于以上结论, 制定网络运营策略: 4G 与 5G 双网共存时, 当业务量小于 500 Mbit/s 时, 只开 4G 基站; 业务量大于 500 Mbit/s 时, 只开能效更优的 5G 基站。执行该网络运营策略的基站功耗与吞吐量变化曲线以及基站能效与吞吐量变化曲线分别如图 4、图 5 所示。

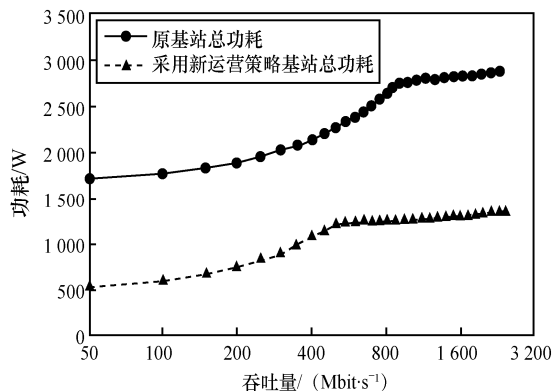


图4 基站功耗与吞吐量变化曲线

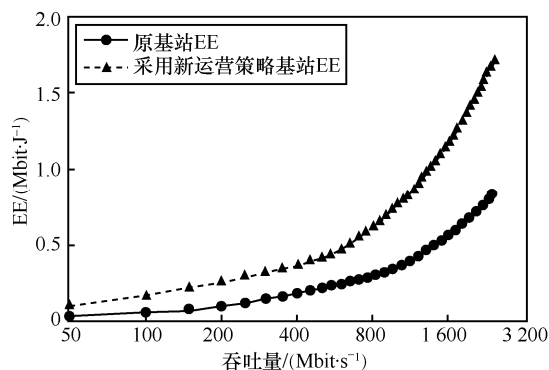


图5 基站能效与吞吐量变化曲线

可以看出, 4G 和 5G 双网共存时, 负荷较高的情况下, 5G 能效更优, 当基站吞吐量为 1 000 Mbit/s 时, 采用新运营策略的基站功耗为原基站功耗的 45.9%, 能效为原基站能效的 217.4%; 在低负荷情况下, 4G 能效更优, 当基站吞吐量为 200 Mbit/s 时, 采用新运营策略的基站功耗为原基站功耗的 40.1%, 能效为原基站能效的 249.4%。在本文的几种不同吞吐量的计算中, 采用新运营策略的基站平均功耗为原基站功耗的 46.6%, 基站平均能效为原基站能效的 216.4%。

5 结束语

本文首先分析基站能耗的主要组成部分及影响因素, 通过实测数据得出基站能耗与无线资源利用率的关系式, 进而建立 4G 与 5G 基站的能耗模型。然后利用仿真平台进行了不同吞吐量下的 4G 和 5G 基站的仿真, 计算了 4G 和 5G 基站在不同负载下的能效。结果表明, 4G 和 5G 单个基站能效随负载的变化而变化, 且存在各自能效占优区间。在双网并存时, 根据负载采取能效最优策略决定开启 4G 或 5G 基站, 基站能效可提升 116.4%, 此结果对基站运营策略具有一定意义。下一步研究中将进一步分析影响基站能耗的因素, 细化基站能耗模型。

参考文献:

- [1] ANDRAE A S G. New perspectives on internet electricity use in



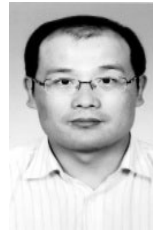
- 2030[J]. Engineering and Applied Science Letters, 2020, 3(2):19-31.
- [2] ITU. Greenhouse gas emissions trajectories for the information and communication technology sector compatible with the UNFCCC Paris agreement: ITU-T L.1470[R].2020.
- [3] I C L, HAN S F, BIAN S. Energy-efficient 5G for a greener future[J]. Nature Electronics, 2020, 3(4): 182-184.
- [4] 楼梦婷, 金婧, 王菡凝, 等. 面向大规模天线系统的稀布阵列技术与评估[J]. 电信科学, 2021, 37(9): 48-56.
- LOU M T, JIN J, WANG H N, et al. Research and evaluation of sparse array for massive MIMO[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(9): 48-56.
- [5] LI G Y, XU Z, CONG X, et al. Energy-efficient wireless communications: tutorial, survey, and open issues[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(6):28-35.
- [6] FENG D, JIANG C, LIM G, et al. A survey of energy-efficient wireless communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(1):167-178.
- [7] DAVASLIOGLU K, GITLIN R D. 5G green networking: enabling technologies, potentials, and challenges[C]//Proceedings of 2016 IEEE 17th Annual Wireless and Microwave Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [8] XIAO Z, LIU H, VINCENT H, et al. Analytical study on multi-tier 5G heterogeneous small cell networks: coverage performance and energy efficiency[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2014, 16(11).
- [9] PRASAD K, HOSSAIN E, BHARGAVA V K. Energy efficiency in massive MIMO-based 5G networks: opportunities and challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2017:2-10.
- [10] PEDRAM M, WANG L. Energy efficiency in 5G cellular network systems[J]. IEEE Design & Test, 2020, 37(1):64-78.
- [11] NGMN. Green future networks network energy efficiency V1.0[R]. 2021.
- [12] FRENGER P, TANO R. More capacity and less power: how 5G NR can reduce network energy consumption[C]//Proceedings of 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [13] 帅农村, 邵泽才. 基于多元线性回归算法的 5G 基站能耗模型[J]. 移动通信, 2020, 44(5): 32-36, 41.
- SHUAI N C, SHAO Z C. 5G base station energy consumption model based on multiple linear regression algorithm[J]. Mobile Communications, 2020, 44(5): 32-36, 41.
- [14] 3GPP. Further advancements for E-UTRA physical layer aspects: TR 36.814, v9.2.0[S]. 2017.
- [15] MARZETTA T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590-3600.
- [16] BJÖRNSON E, SANGUINETTI L, HOYDIS J, et al. Optimal design of energy-efficient multi-user MIMO systems: is

massive MIMO the answer? [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(6): 3059-3075

[作者简介]



薛亚辉(1995-), 男, 中国移动通信有限公司研究院研究员, 主要研究方向为 4G、5G 和 6G 等无线通信网络节能技术。



邵泽才(1977-), 男, 中国移动通信有限公司研究院高级研究员、高级工程师, 主要研究方向为 4G、5G 和 6G 无线设备节能技术、方案制定、标准化和测试等。



崔春风(1973-), 男, 中国移动通信有限公司研究院未来研究院院长, 主要研究方向为 4G、5G 和 6G 等多代移动通信技术与标准制定。



金婧(1986-), 女, 中国移动通信有限公司研究院高级研究员、高级工程师, 主要研究方向为无线通信、MIMO、多用户波束成形、干扰消除等。



王菡凝(1992-), 女, 中国移动通信有限公司研究院研究员, 主要研究方向为无线通信、MIMO、稀布阵、可见光等。