

# 5G 基站能效评估影响因素分析及分级体系初探

## Analysis of Influencing Factors of 5G Base Station Energy Efficiency Evaluation and Primary Exploration of Grading System

曹恒<sup>1</sup>,尚海波<sup>1</sup>,席向涛<sup>1</sup>,王昱皓<sup>1</sup>,张鹏<sup>2</sup>(1. 中讯邮电咨询设计院有限公司郑州分公司,河南 郑州 450007;2. 中国联合网络通信集团有限公司,北京 100033)

Cao Heng<sup>1</sup>,Shang Haibo<sup>1</sup>,Xi Xiangtao<sup>1</sup>,Wang Yuhao<sup>1</sup>,Zhang Peng<sup>2</sup>(1. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd. Zhengzhou Branch, Zhengzhou 450007, China; 2. China United Network Communications Group Co., Ltd., Beijing 100033, China)

### 摘要:

伴随着全社会数字化转型,5G网络作为重要的数字基础设施,能耗与碳排放快速增长,将成为通信行业在2030年前实现碳达峰的关键因素。通过5G基站能耗和能效洞察,提出5G基站设备能效评估方法与模型,首次完成了影响5G无线网设备能效的关键要素分析,并初步搭建5G基站设备能效分级体系和标准,可有效牵引5G无线网络持续朝着绿色低碳可持续发展。

### 关键词:

能耗;有效输出;能效;影响因素;分级体系

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2023.10.006

文章编号:1007-3043(2023)10-0026-07

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Abstract:

Accompanied by the digital transformation of the whole society, 5G network, as an important digital infrastructure, has a rapid increase in energy consumption and carbon emission, which will become a key factor for the communication industry to achieve peak carbon by 2030. It proposes 5G base station equipment energy efficiency assessment methods and models through 5G base station energy consumption and energy efficiency insights, for the first time completes the analysis of key elements which affect the energy efficiency of 5G wireless network equipment, and preliminarily builds a 5G base station equipment energy efficiency grading system and standards, which can effectively haul the 5G wireless network towards green, low-carbon and sustainable development.

### Keywords:

Power consumption; Effective output; Energy efficiency; Influencing factors; Grading system

引用格式:曹恒,尚海波,席向涛,等. 5G基站能效评估影响因素分析及分级体系初探[J]. 邮电设计技术,2023(10):26-32.

## 0 前言

目前我国正在加速推进5G网络基础设施建设,截至2023年6月,我国5G基站个数已达到293.7万。5G基站能耗高但拥有更强的性能和业务能力,采用“能效”来评估5G基站被业界广泛认可。能效的传统定义为单位能耗所提供的有效输出,随着5G应用新业务、新场景不断涌现,为了更全面地评价网络能效,评价

体系需不断演进。能效分级标准的设定可有效牵引无线网络持续朝着以更少的能耗提供更多的业务量以及更好的业务体验的方向发展。

## 1 5G基站能效评估方法

5G网络能效评估的关键是要选择合理的指标来刻画网络的单位能耗效果,能效的常见定义为单位能耗的有效输出,为了更全面地评价网络能效,评价体系不仅考虑业务输出,还需结合相应的质量因子,体现出有效的综合业务感知输出。能效的定义公式可

收稿日期:2023-09-09

表示为:

$$\text{能效} = \frac{\text{Service(业务量输出)} \times \text{质量因子}}{\text{能耗}}$$

3GPP定义了5G网络三大类业务场景,即eMBB、uRLLC、mMTC。基于5G业务特点,可采用场景化、多维度刻画网络能效表现,其中场景化为考虑不同业务场景下无线网络的有效输出,并结合网络建设目的判断单站适用的能效评估方法。

eMBB作为5G基本业务类型,主要面向5G无线网广域覆盖,可按照区域类型分为容量型为主场景和覆盖型为主场景,如学校、交通枢纽、商务办公区、住宅等为容量型为主场景,高速、行政村等为覆盖型为主场景。uRLLC业务和mMTC业务一般在局域2B专网或切片形式应用,有效输出可表示为时延、可靠性和连接数,可用来评估业务的局域专网能效或切片能效。5G业务能效评估体系如表1所示。

表1 5G业务能效评估体系

业务类型		有效输出		业务能效	
eMBB	容量为主	流量	上下行RLC层用户面流量之和	EE <sub>DV</sub>	DV/EC
	覆盖为主	覆盖面积	覆盖区域×覆盖质量	EE <sub>CoA</sub>	CoA/EC
uRLLC		时延	端到端时延	EE <sub>uRllc,L</sub>	1/(T <sub>uRllc,L</sub> ×EC)
		可靠性	包成功率百分比	EE <sub>uRllc,Rel</sub>	P <sub>uRllc,Rel</sub> /EC
mMTC	连接数	同时支持最大连接数		EE <sub>mMTC</sub>	N <sub>mMTC</sub> /EC

注:设备能耗(Engery Consumption, EC),数据容量(Data Volume, DV),有效覆盖面积(Coverage area, CoA), T<sub>uRllc,L</sub>为uRLLC端到端的环回时延, P<sub>uRllc,Rel</sub>为uRLLC在上行或下行接口的包成功率百分比, N<sub>mMTC</sub>为mMTC可同时支持的最大连接数。

## 2 能效洞察及影响因素分析

基于现实网络数据对5G基站能效进行评估分析,

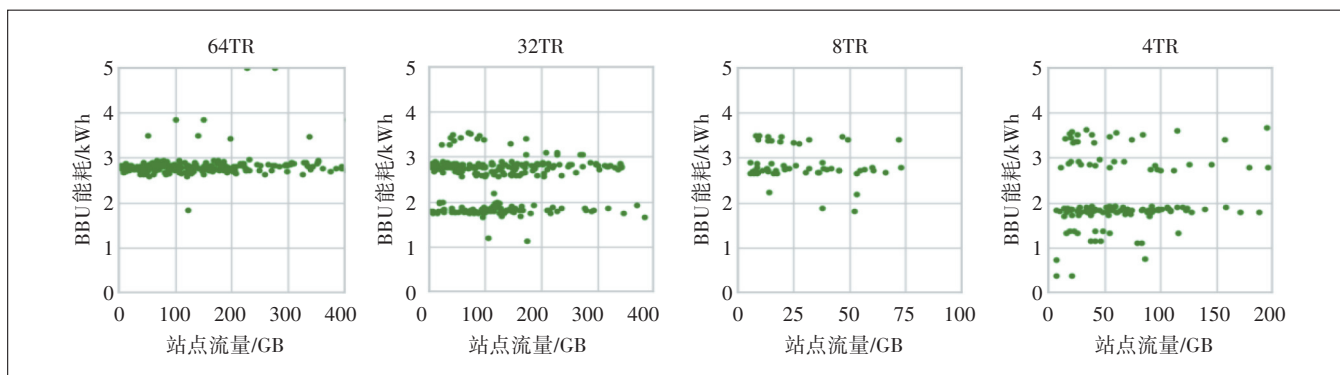


图1 5G分布式基站BBU能耗分布

洞察现网能效表现,量化各因素影响5G无线网络能效的作用规律和程度,并为网络能效优化和提升提供参考。

以eMBB场景下的5G无线网络现网全天(24 h)能耗及网络性能数据分析为例。

### 2.1 5G基站能耗测量与采集

3GPP定义了无线接入网PEE参数测量,具体包括功率、能耗、温度、电压、电流和湿度。能耗测量值反映了网元消耗的能耗,在测量周期内(Tr)基于瞬时电压和电流相乘后求积得出,  $E(Tr) = \int_0^{Tr} u(t) \cdot i(t) dt$ ,单位为kWh。设备功耗是以物理网元为单位测量和上报的,针对多模基站,能耗需区分不同的无线接入技术(RAT),按每个系统配置的射频功率比例分配能耗。

对比设备上报的能耗数据与现网外挂测试仪表数据,如果两者误差在5%以内,可以作为能耗采集数据。从能耗采集数据分析(见图1、图2和表2)来看,5G BBU能耗相对稳定,与流量关联性不大,与配置基带板数量相关;AAU/RRU能耗与流量、通道数有强关联性。

### 2.2 5G设备能效影响因素

影响5G无线网络能效的因素众多,为客观量化各因素的影响程度,从网络环境、设备部署类型及配置、业务分布等视角分类分析。

#### 2.2.1 网络环境因素

网络环境因素指5G无线网络部署的外部条件对能效的影响,主要包括人口密度、规划场景、气候条件等客观因素。

环境类因素属于外界客观因素,反映了能效与区域、场景等的相关性。不同人口密度的区域基站部署密度不同,业务量存在较大差异,具体如表3所示。气

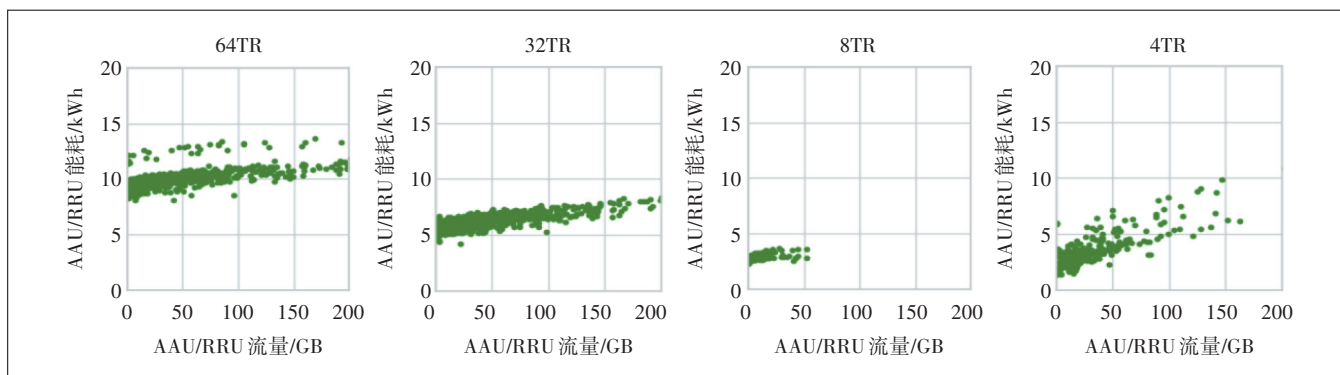


图2 5G分布式基站AAU/RRU能耗分布

表2 5G BBU/AAU全天能耗值

频段/通道数	BBU能耗/(kWh/天)	RRU/AAU能耗/(kWh/天)
3.5 GHz 64TR	2基带板:2.8	8~13
3.5 GHz 32TR	1基带板:1.9;2基带板:2.8	5~8
3.5 GHz 8TR	1基带板:2.9;2基带板:3.5	2.5~4
2.1 GHz 4TR	1基带板:1.9;2基带板:3.0	1.5~7.5

表3 基于人口密度的区域5G能效对比

区域	人口密度/(万/km <sup>2</sup> )	面积/km <sup>2</sup>	站点数	站点密度/(站/km <sup>2</sup> )	平均单站流量/GB	平均单站能耗/kWh	流量能效/(GB/kWh)	覆盖能效/(km <sup>2</sup> /kWh)
市区	0.63	3 364.7	13 285	3.95	194.22	31.17	6.23	0.008 1
县城	0.48	1 032.3	2 582	2.5	155.15	23.07	6.73	0.017 3
乡镇	0.10	2 277.6	2 269	1.0	87.77	17.55	5.00	0.057 2
农村	0.03	46 438.0	6 523	0.14	66.4	16.56	4.01	0.429 9

候条件影响主设备功耗,一定温度范围内设备功耗和环境温度呈正相关,南北方气候也对设备功耗影响程度不同。规划环境影响站址选择和网络规划策略,不同场景下的地形地貌特点对空口传播模型也有较大影响。

从实际数据分析,覆盖能效差异较流量能效差异更为显著。传统能效的计算主要考虑业务量维度,忽略了广覆盖基站建设属性,弱化了覆盖类基站的实际有效输出,考虑到基站建设一般具有多重属性,建议参考场景和主要建设目标区分容量型和覆盖型基站能效。

### 2.2.2 设备部署类型及配置因素

设备部署类型及配置因素指5G无线网络的部署方案和方式、配置差异、节能特性等对能效的影响。

网络部署时的组网策略直接决定了网络建设方

式、宏站室分规模、数字化室分应用比例、频段及收发通道配置等,对网络能耗和网络业务质量均有较大影响。一些节能特性的部署应用,也将优化和提升网络能效。

从分场景宏站和室分能效对比来看,学校校园、交通枢纽能效相当,政企单位室分能效略优于宏站,其余场景下宏站较室分优势明显,具体能效差异如表4所示。

从宏站在不同频段、不同通道配置的能效来看(见图3),射频模块的收发通道数越多,能耗越高,可以支撑的容量也越大。各类通道设备能效和流量基本呈线性关系,当业务量一定时,不同通道设备能效对比为:N2100 4TR≈N3500 8TR>N3500 32TR>N3500 64TR。对同类型通道能效拟合曲线,以64TR为基础对比差异比例,流量超过一定门限后,各类设备的能效比基本稳定,约为64TR能效:32TR能效:8TR能效:4TR能效=1:1.5:2.4:2.6。

从室分建设方式来看,在传统DAS部署场景中,

表4 分场景宏站室分能效差异

场景	能效/(GB/kWh)		宏站/室分/%	场景	能效/(GB/kWh)		宏站/室分/%
	宏站	室分			宏站	室分	
学校校园	10.11	10.79	94	政企单位	5.34	8.02	67
医院	9.27	2.29	405	公共场所	5.07	3.5	145
商务办公区	8.67	3.04	285	工业园区	5.06	2.1	241
城市地铁	8.43	4.08	207	其他	4.96	4.34	114
宾馆酒店区	7.72	1.44	536	乡镇	4.79	3.07	156
商业购物区	6.74	3.18	212	行政村	4.64	4.73	98
党政机关	6.65	0.9	739	公园及广场	4.6	1.96	235
住宅	6.08	3.14	194	交通干线	3.52	0.4	880
交通枢纽	5.96	5.88	101	-	-	-	-

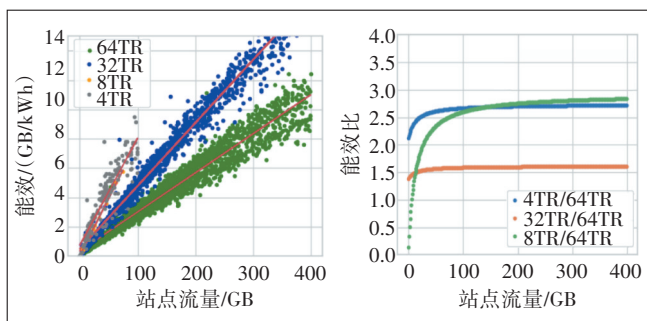


图3 不同配置下能效分布及对比

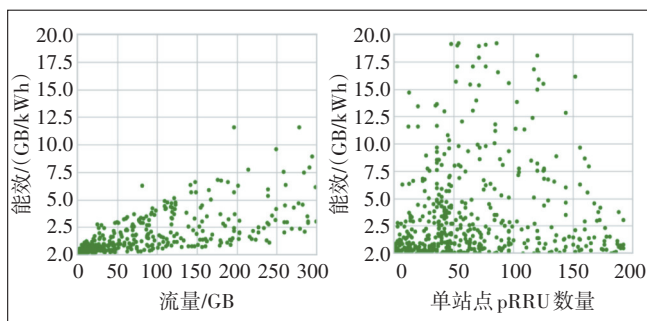


图5 数字化室分能效分布

能效和流量呈明显线性关系(见图4)。相同业务量情况下,1TR和2TR、3.5 GHz和2.1 GHz站点能效无明显差异。能效和通道数量、频段的相关性不强。

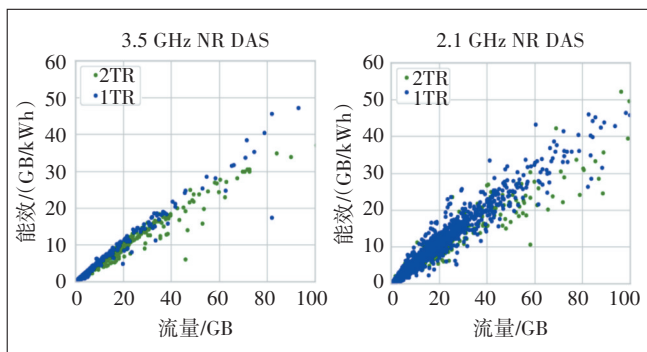


图4 传统DAS不同配置下能效分布

数字化室分部署场景中,能效和流量大致呈线性关系(见图5),其相关性弱于传统DAS室分场景,同时单站点pRRU数量和能效之间无相关性。在相同业务量情况下,数字化室分能效低于传统DAS室分,从节能角度考虑,在传统DAS室分能满足容量需求的情况

下,应优先部署传统DAS系统。

从节能特性开启与关闭角度分析(见图6),通常在00:00—06:00业务量较低时配置符号关断、RF通道关断和射频模块深度休眠3类节能功能,基于网络负荷变化按需开启。对开启和未开启节能模式时间段的能效分别进行计算,开启节能模式能够有效提升设备能效,效能提升2~4倍。

### 2.2.3 业务分布因素

业务分布因素指不同业务特点、业务负荷、用户分布等对网络能效的影响。

基于5G基站功耗测试数据分析,5G基站设备中AAU设备(64TR AAU)约占5G基站设备总能耗的90%。5G基站AAU主要模块包括PA模块、基带模块、收发信机、电源模块、滤波器,其功耗占比为40:32:20:5:3,下行业务对基站能耗影响较大。从样本上下行流量数据分析,5G流量以下行流量为主,97%的站点的下行流量占比高于70%,产生的流量占比为99.2%,上行流量占比较高的站点的流量绝对值不高且样本量较少。

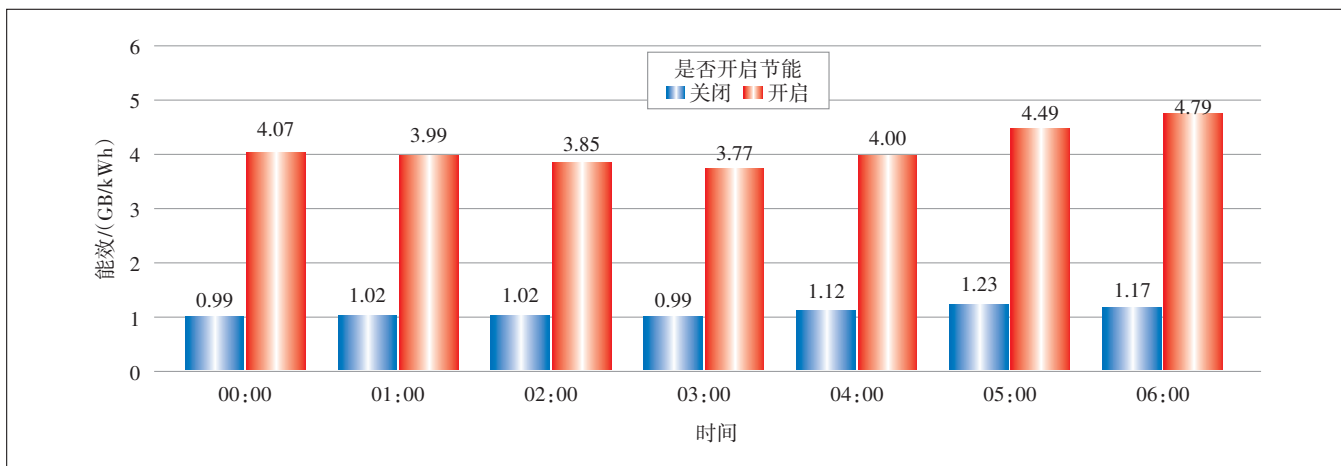


图6 节能模式移动对能效的提升



筛选 15 min 颗粒度内小区流量为 4~5 GB 的小区,分析其上下行流量与能效之间的关系(见图7),从图7可以看出,下行流量低于70%的小区能效和下行流量高于70%的小区能效分布基本相当,差异不明显。后续将扩大样本,持续关注上下行业务与能效的关系。

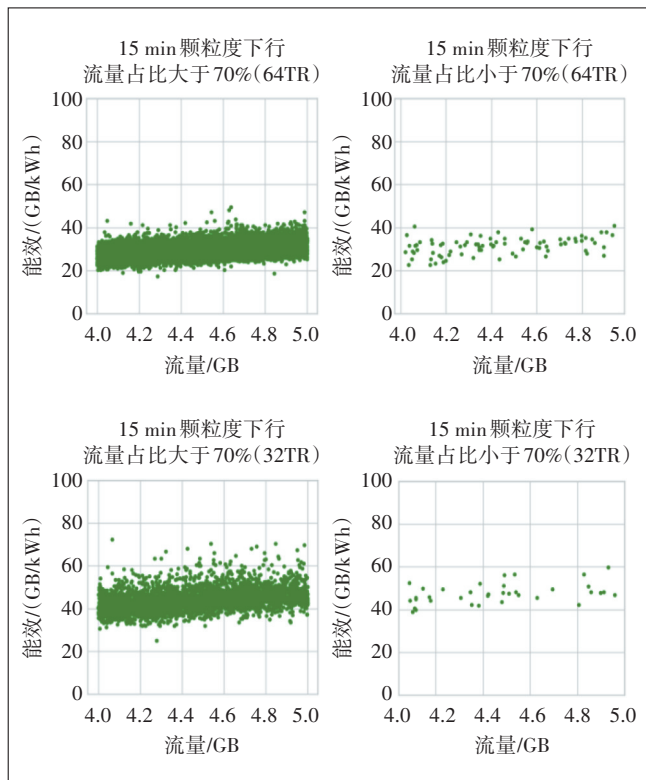


图7 同业务量小区不同下行占比与能效分布对比

网络业务负荷是影响网络能效的关键因素,业务负载表征了网络的利用率,在其他因素基本拉齐的前提下,网络能效和网络负载呈现显著的正相关性。根据小区忙时数据分析 PRB 利用率与能效之间的关系

(见图8),可以发现 3.5 GHz 站点能效与 PRB 利用率关联性较高,2.1 GHz 站点能效与 PRB 利用率关联性较低,3.5 GHz 站点能效随 PRB 利用率变化的敏感度为 8TR>32TR>64TR。

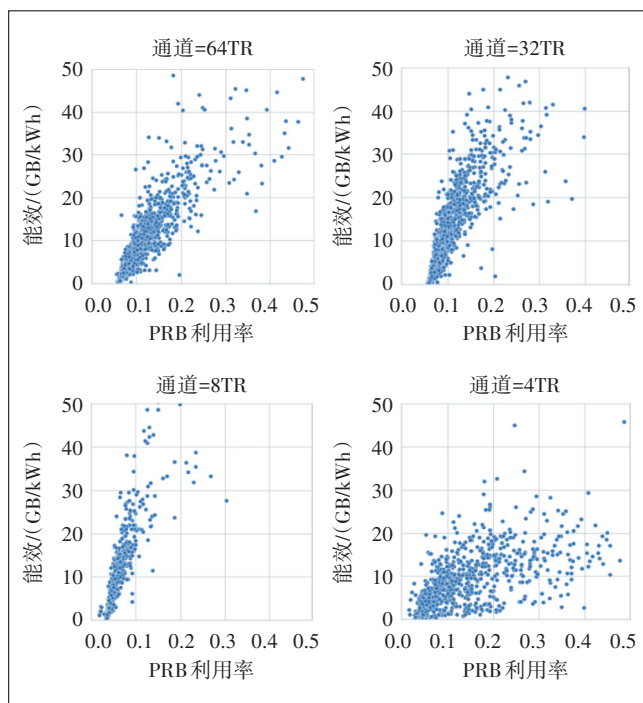


图8 PRB利用率与能效分布对比

从业务时间分布维度来看,业务流量与能效之间具有强相关性(见图9),夜晚能效较低,需利用多手段创新技术持续降低能耗、提升能效。

在蜂窝移动通信中,用户分布的远、中、近对空口链路占用有显著影响,进而影响业务传输效率以及业务质量。基于TA数据分析用户分布对能效的影响(见图10),能效变化趋势与小区平均覆盖距离呈反

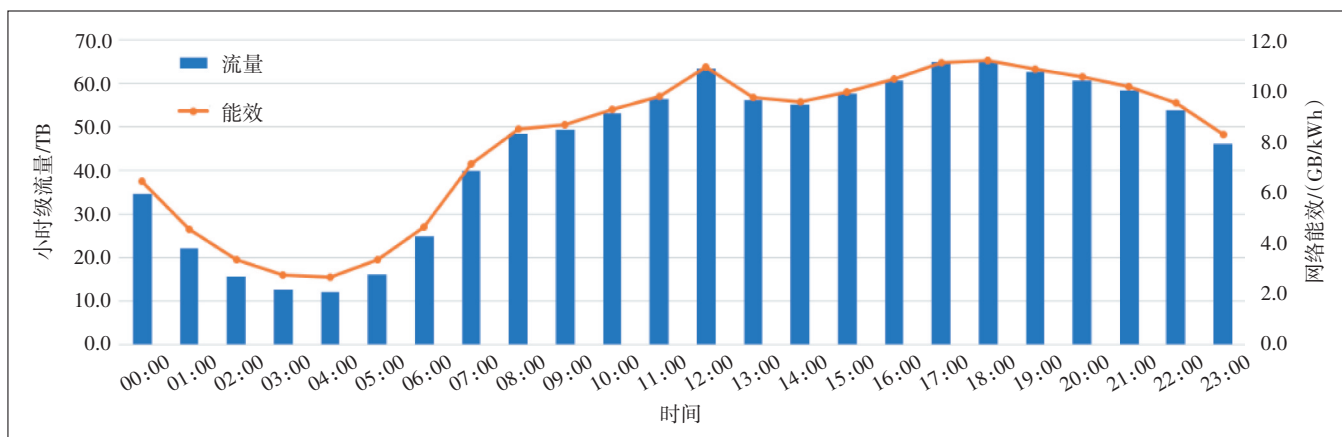


图9 24 h 流量与能效变化趋势

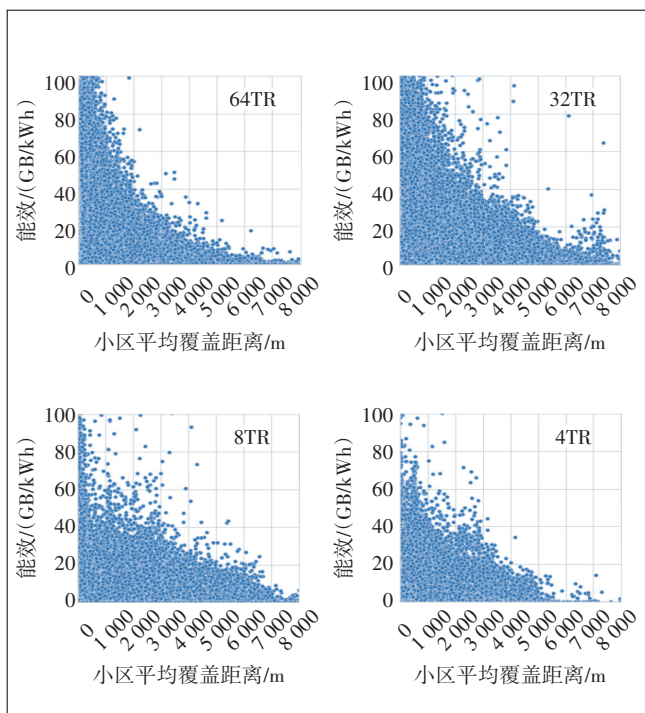


图10 小区平均覆盖距离(基于TA计算)与能效分布对比,随着小区平均覆盖距离增大,能效逐渐下降。

### 3 5G基站能效评估分级体系初探

能效等级是表示产品设备能效高低的一种分级方法,对于能源消耗和环境保护具有重要意义。根据移动通信网络特点,基站设备可以分为设备级能效分级和站点级能效分级。

设备级能效是无线网设备在一定的业务模型下,如固定测量时间、终端数量及位置、下行业务量等前提条件下的测试能效,用来评价设备的节能性、经济性等,可以认为是设备的固有属性。设备级能效测试使用的业务模型有2种,一种为借鉴ETSI标准测试模型,业务模型应包括低/中/高负荷持续时间、5G终端近中远分布数量、传输小/中/大/3种不同文件数据大小/间隔时间/文件数等。另一种为使用网络实际业务模型,按照现网典型场景下24h典型业务量负荷模拟业务模型,评估设备级能效,此方法测试能效将较接近现网实际值。将能效分为5级管理,其中“1级”为能效先进值,表示已达到基站设备行业能效先进水平;“2级”表示产品能效较高;“3级”为国内设备能效平均水平;“4级”为低于行业平均水平;“5级”为产品准入标准,设备能效低于“5级”不能入网。目前CCSA正在制定能效测试规范,未来可以根据规范测试设备级能效

并进行分类和分级管理。

站点级能效是指设备在实际运行中的能效,从第2章可知,站点级能效与部署环境、站点业务量、节能措施使用、终端远近等诸多因素均有较大关联。同一设备的设备级能效相同,但站点级能效会存在差异性。站点能效分级的目标为在保证网络性能的基础上,查找薄弱环节以发现问题,并提出对策建议,促进5G网络向高效网络发展。分级思路有横向和纵向2种,横向分级以设备能力为牵引,以最大全天业务量下的能效作为基准牵引值,按基准牵引能效达到的比例作为分级标准,可有效促进5G业务发展来提升网络能效。从图2可以看出64TR/32TR全天流量可达400GB,8TR/4TR全天流量可达100GB,分别以64TR/32TR在400GB全天流量、8TR/4TR在100GB全天流量下的能效最大概率确定基准牵引值,64TR、32TR、8TR、4TR的能效基准值分别为10GB/kWh、16GB/kWh、8GB/kWh、7GB/kWh,分类标准为基准牵引能效的85%、50%、30%、10%。依据分级标准,1~5类比例分别为18%:21%:26%:27%:8%。各类站点特定流量下能效概率分布如图11所示。

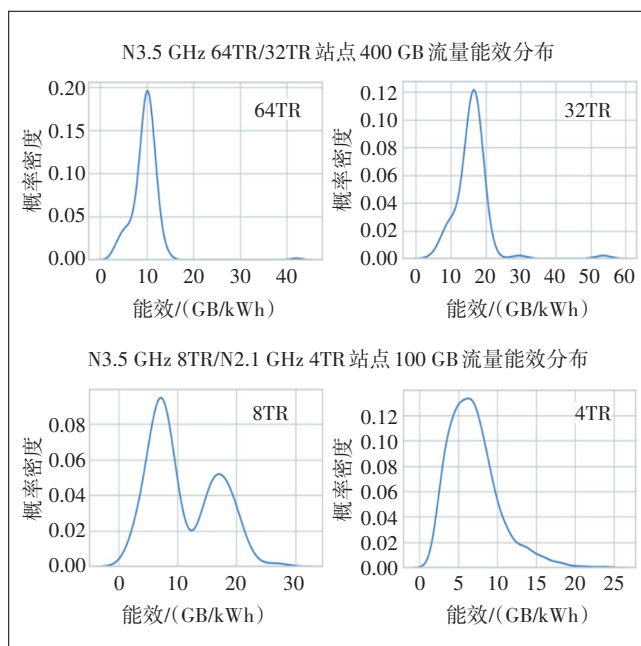


图11 各类站点特定流量下能效概率分布

纵向分级基于业务量在同一区间内的站点能效表现进行分类,在业务量相对一致的前提下对比能效有利于推广节能技术和优化节能策略。可按照四分位法判断,如按照 $20 \times n \pm 10$ (GB)区间分类(见图12),

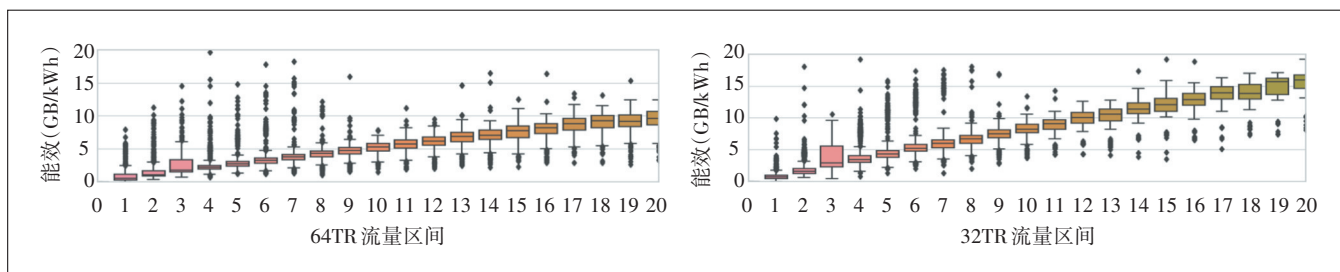


图12 不同业务量区间下站点能效四分位图

统计样本中区间内四分位比例分别为27%:24%:24%:25%。

## 4 能效评估意义及作用

能效评估跟随业务需求而演进,贯穿网络整个生命周期。以绿色节能为目标牵引,通过能效综合评价更科学地进行无线网络规划、部署和应用。

在规划计划阶段,精准规划支撑双碳战略。对规划期内5G基站能效及能耗变化趋势进行整体预估,包括5G能耗成本及能耗用量。设定合理的能效指标,基于存量节能技术效果,规划节能减排解决方案和节能技术推广应用措施。

在方案采购阶段,增加可持续发展维度助力方案最优。方案编制阶段,可基于不同方案设计选择,从网络能效角度对备选方案进行比对分析。在采购阶段增加5G能效作为一项评分内容,用来对比不同厂商的网元设备的能效先进性。

在运营阶段,动态监控能效变化提质增效。常态化的评估运营网络能效,进行全国同类城市及场景对标,查找能效短板,优化建设方案,加强节能减排方案部署等。识别能效落后的区域并进行根因分析,分析能效提升潜力,选择高效能方案。

## 5 结束语

5G基站能效评估及分级是一项系统性工作,需要大数据的持续积累,掌握能效规律,借助设备新架构、新材料、新节能技术等不断创新和演进,通过更加合理地规划、部署和应用功能网元和网络资源,有效降低运营成本,提升5G绿色可持续发展能力。

### 参考文献:

[1] ETSI. Environmental engineering (EE); assessment of mobile network energy efficiency; ETSI ES 203 228 [S/OL]. [2023-05-21]. [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_es/203200\\_203299/203228/](https://www.etsi.org/deliver/etsi_es/203200_203299/203228/)

01.04.01\_60/es\_203228v010401p.pdf.

[2] ETSI. Environmental engineering (EE); measurement method for energy efficiency of wireless access network equipment dynamic energy performance measurement method of 5G base station (BS); ETSI TS 103 786 [S/OL]. [2023-05-21]. [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/103700\\_103799/103786/01.01.01\\_60/ts\\_103786v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103700_103799/103786/01.01.01_60/ts_103786v010101p.pdf).

[3] ETSI. Environmental engineering (EE); metrics and measurement method for energy efficiency of wireless access network equipment; part 1: power consumption-static measurement method; ETSI ES 202 706-1 [S/OL]. [2023-05-21]. [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_es/202700\\_202799/20270601/01.07.01\\_60/es\\_20270601v010701p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_es/202700_202799/20270601/01.07.01_60/es_20270601v010701p.pdf).

[4] ETSI. Environmental engineering (EE); study on methods and metrics to evaluate energy efficiency for future 5G systems; ETSI TR 103 542 [S/OL]. [2023-05-21]. [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/103500\\_103599/103542/01.01.01\\_60/tr\\_103542v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103500_103599/103542/01.01.01_60/tr_103542v010101p.pdf).

[5] 中国联通研究院. 中国联通5G智能节能技术白皮书V3.0[EB/OL]. [2023-06-24]. <https://www.digitalelite.cn/h-nd-4632.html>.

[6] 吕婷,张猛,曹亘,等. 5G基站节能技术研究[J]. 邮电设计技术, 2020(5):46-50.

[7] 安涛,何明亮. 双碳目标达成与移动通信基站节能减排技术的探索[J]. 移动通信, 2022,46(3):93-98,102.

[8] 华为. 绿色5G白皮书[EB/OL]. [2023-06-02]. <https://www.digitalelite.cn/h-nd-3353.html>.

[9] 苟坤. 5G基站节能技术及应用研究[J]. 电信快报, 2021(10):44-46.

[10] 张蜀晋. 基于5G通信技术的无线网络节能降耗技术研究[J]. 数字通信世界, 2021(8):19-20,15.

[11] 彭钊,张旭. 5G基站能耗分析与节能探讨[J]. 通信与信息技术, 2021(2):49-50.

[12] 李露,李福昌,曹亘,等. 5G基站智能节能方案研究[J]. 移动通信, 2021,45(2):85-88.

### 作者简介:

曹恒,高级工程师,学士,主要从事移动通信咨询设计工作;尚海波,高级工程师,学士,主要从事移动通信咨询设计工作;席向涛,高级工程师,学士,主要从事移动通信咨询设计工作;王昱皓,工程师,硕士,主要从事移动通信咨询设计工作;张鹏,高级工程师,硕士,主要从事移动网络规划、移动通信新技术研究等工作。