

面向5G-A的无线网络节能关键技术



Key Technologies for 5G-A Wireless Network Energy Saving

郭诚/GUO Cheng, 陈梦竹/CHEN Mengzhu

(中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202306003

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20231211.1116.004.html>

网络出版日期: 2023-12-12

收稿日期: 2023-10-15

摘要: 建立网络能耗模型, 对基站在数据发送状态、接收状态、休眠模式及模式转换的相对功耗进行建模, 可以评估各种网络节能技术的节能增益。面向5G-A, 从时域、空域、频域和功率域等方面, 研究包括公共信号轻量化设计、极简小区架构、小区不连续发送/接收模式、基站唤醒机制、节能测量上报增强等网络节能的关键技术, 使能更动态、高效、精准的无线传输, 并通过终端和基站间信息交互的方式提升节能效果。随后, 仿真验证了这些技术的正确性和有效性。

关键词: 网络节能; 能耗建模; 极简小区架构; 测量上报增强

Abstract: The network energy consumption model is established to analyze the relative power consumption of base stations for transmission/reception, sleep modes, and mode transmission, and evaluate the energy-saving gains of various network energy-saving techniques. In terms of time domain, space domain, frequency domain, and power domain, key techniques for network energy saving, including light-weight design of common signals, simplified cell architecture, cell discontinuous transmission/reception mode, base station wake-up mechanism, enhanced channel state information measurement/reporting for network energy-saving are researched, and enabling more dynamic, efficient, and accurate wireless transmission. In addition, the energy-saving gain is improved through information interaction between the device terminal and the base station, and then the effectiveness of the techniques is verified and analyzed through system-level simulation.

Keywords: network energy saving; energy consumption modeling; simplified cell architecture; enhanced measurement report

引用格式: 郭诚, 陈梦竹. 面向5G-A的无线网络节能关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(6): 11-15. DOI: 10.12142/ZTETJ.202306003

Citation: GUO C, CHEN M Z. Key technologies for 5G-A wireless network energy saving [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(6): 11-15.

DOI: 10.12142/ZTETJ.202306003

1 5G-A无线网络节能演进

全球气候变化正在对全人类生存发展带来日益严峻的影响, 走向碳中和已成为全球的共识。作为数字化转型重要底座的移动通信网络, 聚焦数据中心、通信基站、通信机房3类重点设施。工业和信息化部发布的《信息通信行业绿色低碳发展行动计划(2022—2025年)》^[1]要求推动基站主设备及配套设施节能技术的应用推广, 使5G基站能效提升20%以上。通过信息通信行业数字化转型来赋能全社会降碳, 促进居民低碳环保生活, 从而更好地推动城乡智慧发展。

电信运营商及设备商自2G时代起就不断启动节能减排计划, 研究网络节能手段, 应对气候及能耗的挑战。在过去

的时间里, 随着产业链的不断发展与成熟, 芯片技术的不断提高, 通过不断优化电路设计、硬件实现算法, 网络节能已经取得了很大的进步。一些基础节能功能包含符号关断、通道关断、载波关断和设备深度休眠等被提出, 以适应不同的通信网络负荷^[2]。

随着5G-A时代到来, 无线通信将使用更高的频段作为信号载体, 数据速率达到太比特每秒量级, 同时全息通信、智能交互、感官互联、数字孪生、通信感知等新业务需求不断涌现, 这给网络流量带来了百倍甚至千倍的激增。要想在保持比特增长的同时尽量降低功耗, 需要基于高集成芯片、高效率器件、新升级工艺、强算力算法, 打造新一代绿色设备, 实现极致的关断深度和响应时间^[3]。

1) 极致关断深度。无线软件节能技术的核心理念为通过关闭部分无线能力,降低网络冗余容量,使得网络能耗匹配分布在网络中的话务负荷。未来,通过硬件模块化设计和软件可弹缩架构设计、精细化设备休眠机制,持续提升器件关断深度,从而实现硬件功耗随负载逐渐逼近线性变化,最大程度降低中低负载下设备能耗。

2) 极致响应时间。节能状态下的硬件响应时间是影响网络指标和用户体验的关键因素。硬件响应时间将实现分钟级到毫秒级的跨越,使得从仅闲时节能扩展到全天都可节能。

在低能耗硬件基础之上,面向5G-A,我们将从时域、空域、频域和功率域等方面展开网络节能新一轮的研究工作,通过定义基站节能状态和节能模式,用更准确的能耗模型,评估更加灵活的节能策略和关断方式,最终赋能百业,共建绿色生态。

2 网络能耗建模

2.1 基站节能模型

为了评估节能方案的节能增益,我们设深休眠状态下的基站功耗为单位1,定义了不同状态下的基站功耗模型^[4],具体如表1。

在没有数据发送和接收情况下,基站可以关闭部分器件,进入休眠状态。根据节能效果,我们可将基站休眠状态分为深休眠、浅休眠和微休眠。鉴于不同休眠状态下关闭器件的不同,基站唤醒时间和状态切换的能耗也有所差异,基站激活态和休眠态转换如图1所示,其中微休眠可以认为转换时间 T 和能耗 E 忽略不计。表2分别给出了深休眠和浅休眠的转换时间 T 和能耗 E ^[4]。

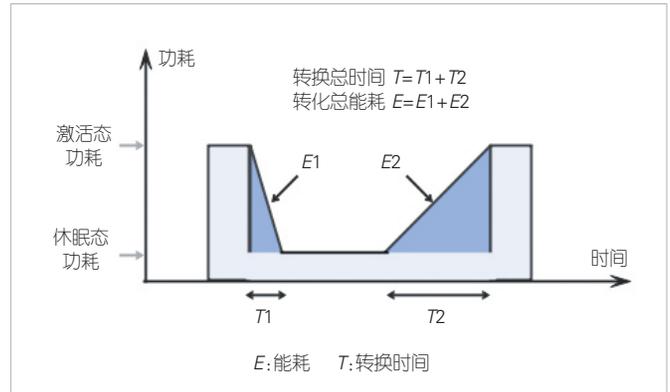
2.2 基站能耗模型

基站功耗可以分为静态功耗和动态功耗,其中静态功耗是指与业务负载和输出传输功率无关的能耗占用,而动态功耗随着负荷增加而增加。

▼表1 参考配置下基站功耗模型

节能状态	FR1 TDD	FR1 FDD	FR2 TDD
深休眠 P1		1	
浅休眠 P2		2.1	
微休眠 P3	5.5	5	3
下行激活状态 P4	32	26	17.6
上行激活状态 P5	6.5	5.8	4.2

FDD:频分双工 FR:频率范围 TDD:时分双工



▲图1 基站激活态和休眠态转换

▼表2 休眠态的转换总时间和总能耗

节能状态	转换总时间	转换总相对能耗
深休眠	10 s	17 000
浅休眠	640 ms	1 088

$$P^{DL} = P_{static}^{DL} + P_{dynamic}^{DL}, \quad (1)$$

$$P^{UL} = P_{static}^{UL} + P_{dynamic}^{UL}, \quad (2)$$

其中, $P_{static}^{DL} = P_{static}^{UL} = P_3$ 。

为了进一步深入分析不同负载对基站功耗的影响,我们定义了基站动态功耗在随不同因素变化时的计算公式^[4]。在下行激活状态下,基站动态功耗部分计算公式为:

$$P_{dynamic}^{DL} = s_a \times \left(P_{dyn, ante} + \frac{s_f \times s_p}{\eta(s_f, s_p)} \times P_{dyn, joint} \right). \quad (3)$$

仅和通道数相关的部分功耗计算公式为:

$$P_{dyn, ante} = \alpha \times (P_4 - P_{static}^{DL}). \quad (4)$$

和通道数、带宽、功率谱密度等多因素相关的部分功耗计算公式为:

$$P_{dyn, joint} / \eta(s_f = 1, s_p = 1) = (1 - \alpha) \times (P_4 - P_{static}^{DL}), \quad (5)$$

其中, s_a 、 s_f 、 s_p 分别是激活的通道数相对基线配置中通道数的比值,激活的带宽相对基线配置中最大带宽的比值,每通道的实际发射功率谱密度相对基线配置中功率谱密度的比值, α 为仅和通道数相关的部分能耗占比,参考业界数据取值为0.4^[5], η 为功放(PA)效率。

类似地,在上行激活状态下,基站动态功耗部分计算公式为:

$$P_{dynamic}^{UL} = s_a \times P_{dyn, ante}^{UL}, \quad (6)$$

其中, $P_{dyn, ante}^{UL} = P_5 - P_3$ 。

3 网络节能关键技术

3.1 基站不连续发送/接收模式

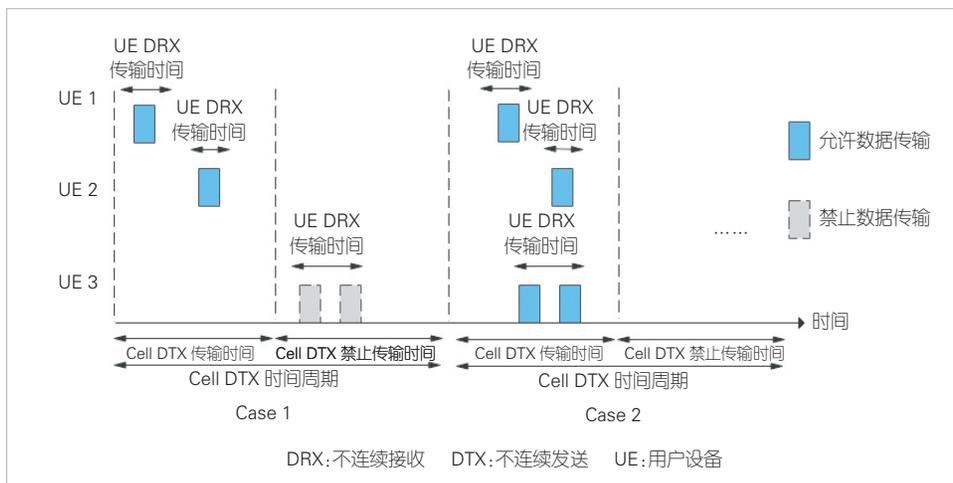
为终端配置不连续接收 (DRX) 模式以减少不必要的物理下行控制信道 (PDCCH) 监听功耗, 是实现终端节能的有效途径之一^[6]。与之类似, 引入小区不连续发送 (DTX) / DRX 功能, 可以减少基站不必要的下行信号发送/上行信号接收, 实现基站节能目的。其中, 小区 DTX 模式用于控制小区的下行传输, 小区 DRX 模式用于控制小区的上行传输。

小区 DTX/DRX 模式是周期性行为, 由终端专用无线资源控制 (RRC) 信令配置, 配置参数包括周期、起始时隙、位置偏移量和持续时间等, 支持以小区为粒度配置不同的小区 DTX/DRX 参数, 从而满足不同小区的节能需求。同时, 为了适配不同的业务需求, 还需要减少信令开销, 采用组播信令指示动态激活/去激活小区 DTX/DRX 配置。

在小区 DTX/DRX 生效期间, 基站周期性地不执行数据业务的发送/接收。为了减小对网络中终端的影响, 小区 DTX/DRX 维持同步信号块 (SSB)、接入信道 (RACH)、寻呼消息 (Paging) 和系统消息 (SIBs) 的正常接收和发送。小区 DTX 可与终端 DRX 协同应用, 在两者相重叠的传输时间段内, 才允许下行数据进行传输。如图 2 所示, Case1 中用户设备 (UE) 1 ~ UE2 均可正常传输数据, UE3 因为终端 DRX 与小区 DTX 可传输时间段不重叠因此禁止传输数据, 应用时需优先按照 Case2 方式配置, UE1 ~ UE3 均可正常传输数据。

3.2 公共信令轻量化传输

基站在持续性不发送信号时, 可以关闭器件, 进入休眠



▲图2 小区DTX与终端DRX协同关系示意图

状态, 以实现节能。但现有网络往往需要小区持续提供服务, 那么即便在仅少量数据传输甚至无数据传输时, 由于 SSB、RACH、Paging 和 SIBs 持续性地接收和发送, 使得基站无法有效进入休眠模式。为解决此问题, 我们提出了公共信令轻量化传输机制。

对于载波聚合 (CA) 场景, 广播及公共信令可由主小区 (Pcell) 承载, 终端在 SSB-less 辅小区上的激活流程以及同步定时等依赖于 SSB 传输的主小区。减少辅小区 (SCell) 上的 SSB 传输可以增加基站睡眠机会, 从而达到减少基站功耗的目的。

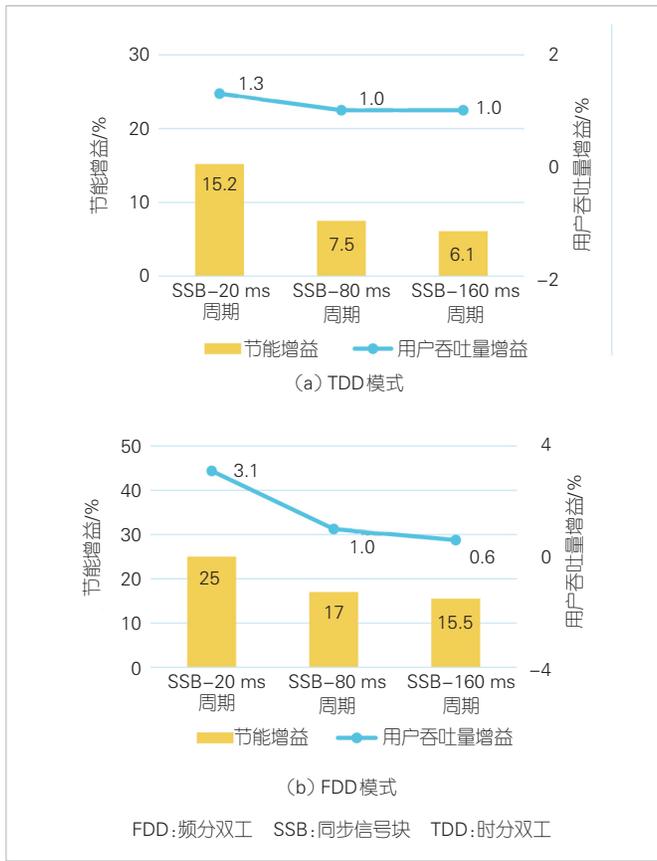
在不同的业务负载条件下, SSB-less 辅小区的节能效果不同。图 3 给出了 SSB-less 辅小区的节能效果: 在低负载场景, 时分双工 (TDD) 模式可以获得 6.1% ~ 15.2% 的节能增益, 频分双工 (FDD) 模式可以获得 15.5% ~ 25% 的节能增益。此外, 由于不需要发送 SSB, 基站可以利用更多资源调度数据, 仿真结果显示可增加 0.6% ~ 3.1% 的用户感知吞吐量 (UPT) 增益。

同样地, 这一节能方法也可扩展至非 CA 场景。为保证终端在节能小区的正常接入, 需要引入锚点小区。处于非连接态的终端可以从锚点小区获取所需的系统信息、同步信息和寻呼消息。当终端接入小区时, 可以在 SIB-less/SSB-less 节能小区 (即非锚点小区) 发起初始接入, 并进行连接态业务传输。当节能小区的 SIBs 在锚点小区上传输时, 会导致锚点小区上的功耗少量增加。但综合考虑节能小区和锚点小区的总功耗, 我们认为基站仍能够获得可观的节能增益。

基于基站功耗模型, 我们对 SIB-less/SSB-less 节能小区方案进行仿真评估。我们将不同的 SSB/SIB 传输周期作为对比基线, 在不同负载条件下, SSB-less/SIB-less 节能小区可以获得 9.4% ~ 24.5% 的节能增益。由于节能小区的系统信息在锚点小区上进行传输, 锚点小区的功耗增加 2.3% ~ 7.5%。

3.3 动态通道关断及测量上报增强

在 5G 现网中, 大规模多输入多输出 (MIMO) 由于其空分复用及发送接收分集的优势被广泛使用。大规模 MIMO 在带来高容量的同时, 其大量的收发通道及相关的硬件处理单元也会带来基站功耗的增加。一种有效的网络节能方案是根据流量负载或 UE 数量动态调整基站激活通道的数量,



▲图3 SSB-less节能和吞吐量增益仿真结果

但通道关断会导致基站发射功率和赋形增益降低。为了实现更高的节电增益并保持较低的性能损失，基站需要获取关断前后网络UE的信道状态信息(CSI)，从而评估通道关断的性能影响，辅助决策通道关断的生效判决和生效时机。

基站可以通过UE测量上报的CSI报告获得基站与UE间的信道状态^[7]，将不同的通道关断状态与CSI测量报告一一对应，从而获取到不同通道关断状态下的信道状态。但过多的CSI报告会增加空口开销，也会导致UE测量能力受限，影响其他用途的CSI报告配置。因此，对于动态通道关断方案中的一个重要研究方向就是CSI测量上报增强。

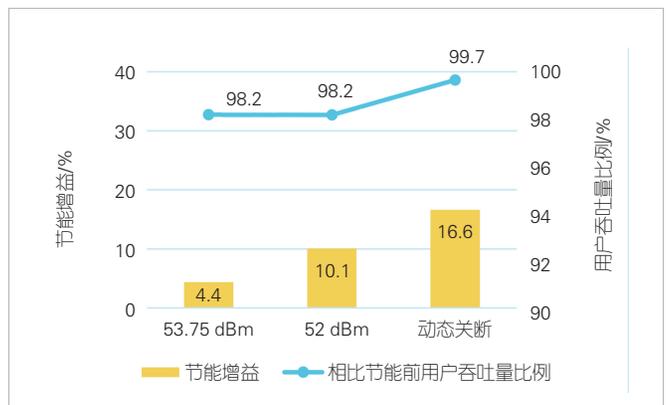
为了在一组CSI报告中包含多组CSI测量，需要引入Multi-CSI测量上报方案，并与多种天线关断状态的参考信号的CSI(CSI-RS)配置进行关联，具体可分为如下两种场景：

场景1：当通道关断导致CSI-RS port数量变化时，不同通道关断状态可共用同一CSI-RS配置。该公共CSI-RS配置对应非天线关断状态，其他CSI-RS配置为该公共CSI-RS配置的子集，对应于有天线关断的状态。

场景2：当通道关断没有导致CSI-RS port数量变化时，



▲图4 通道关断的节能增益和吞吐量仿真结果



▲图5 动态功率调整的节能增益和吞吐量仿真结果

不同通道关断状态的CSI-RS需要独立配置，即每个CSI-RS配置对应一种天线关断状态。

基于64通道基站，我们对动态通道关断方案的节能增益和用户吞吐量(UPT)影响进行了仿真评估。当对比基线方案为静态通道关断时，即静态关断至48通道、32通道、16通道时，节能增益分别为7.77%、15.53%、23.53%，UPT损失为1.5%~11.06%；而通过CSI测量上报增强方案辅助的动态通道关断能提供27.09%基站节能增益，并且UPT损失不到1%。由评估结果也可以看出，基于Multi-CSI测量上报增强的通道关断方案可以在提供较大节能增益的同时带来较少的UPT损失。

3.4 动态功率优化及测量上报增强

功率动态调整是功率域节能中的关键技术。基站在与终端交互的过程中，通常使用固定的发射功率进行下行数据发射。如果基站采用较小的发射功率，则可能导致小区边缘UE无法准确的获取传输的信息。基站采用较大的传输功率会带来功耗额外增加，因此，为了降低网络能耗的同时保证数据的正确传输，引入动态的自适应功率调整技术至关

重要。

当对业务信道进行动态功率调整时,可能会导致CSI报告/反馈不准确。为了减少对网络性能的影响,基站需要在功率调整时获得更准确、更实时的CSI信息,因此我们提出为终端配置多个功率偏移值的CSI-RS配置,与不同功率档位的CSI-RS配置进行关联,获取不同功率偏移档位所对应的CSI信息,辅助网络进行动态发射功率调整;并引入Multi-CSI测量上报方案,实现一组CSI报告中包含多组CSI测量。

基于最大发射功率为55 dBm基站,我们对动态功率控制方案的节能增益和UPT进行了仿真评估。当对比基线方案为静态功率回退时,即静态回退功率至53.75 dBm和52 dBm时,基站节能增益分别为4.38%、10.07%,UPT损失不到2%;而通过Multi-CSI辅助的动态功率控制方案能提供16.63%基站节能,并且UPT损失不到1%。由评估结果可以看出,基于Multi-CSI测量上报增强的动态功率调整方案可以在提供较大节能增益的同时带来较少的UPT损失。

3.5 基站节能唤醒机制

基站节能技术可以通过减少信号传输、增加基站睡眠时间等方案有效地减少基站功耗,获取基站节能增益。然而,当没有终端反馈参与时,仅依靠基站获取的信息进行基站节能,可能会对系统性能(如吞吐量、延迟等)和用户体验产生影响,最终导致基站节能方案不能被应用。为了在实现基站节能的基础上尽可能保证系统性能和用户体验,可以考虑引入终端辅助的基站节能方案,即基站唤醒信号。

基站唤醒信号是UE向基站发送的上行信号,用以辅助基站在节能状态和非节能状态之间的切换,例如:指示节能小区唤醒,触发下行公共信号传输、指示信号传输周期更新等。基站唤醒信号可以及时地将终端的需求反馈给基站,以确保基站快速响应/服务,并将对用户体验的影响降至最低。

4 结束语

基站多域节能技术的研究,旨在保证网络性能的基础上,减少网络能耗,提高信息通信行业绿色低碳发展质量,促进信息通信行业绿色转型。

1) 建立网络能耗模型。网络能耗模型通过建模基站不同的数据发送、接收状态,不同深度的睡眠模式及模式转换期间的相对功耗,来评估各种网络节能技术。

2) 制定评估方法。在对候选节能技术的评估中,除了考虑网络节能增益,还要兼顾网络关键绩效指标(KPI)、终端能耗,以及终端复杂度等。评估方法和能耗模型是选择能够平衡节能效果和网络性能影响的节能技术的方法。

3) 研究并识别出网络节能的关键技术点。从包括时域、空域、频域和功率域等各个方面使能更动态、高效、精准的无线传输,并通过终端和基站间信息交互的方式提升节能效果。每种节能技术均可匹配网络特征灵活设置触发条件,多种节能技术之间即可单独应用也可叠加部署。面向5G-A,通过对无线网络节能技术进行优化和升级以更好地满足绿色网络的发展和运营需求。

参考文献

- [1] 工业和信息化部,国家发展改革委,财政部,等. 信息通信行业绿色低碳发展行动计划(2022-2025年) [R]. 2022
- [2] 中兴通讯. 4G/5G网络节能降耗技术白皮书 [R]. 2020
- [3] 中兴通讯. B5G技术白皮书 [R]. 2020
- [4] 3GPP. Technical specification group radio access network; study on network energy savings for NR: TR 38.864 [S]. 2022
- [5] 中国移动研究院. 5G基站节能技术白皮书 [R]. 2020
- [6] 3GPP. Technical specification group radio access network; medium access control (MAC) protocol specification: TR 38.321 [S]. 2019
- [7] 3GPP. Technical specification group radio access network; physical layer procedures for data: TR 38.864 [S]. 2019

作者简介



郭诚,中兴通讯股份有限公司无线网络节能首席规划专家;长期从事无线通信系统的研发工作,主要负责无线网络节能和多频协同技术规划;所负责的中兴通讯绿色节能方案多次获得全球性行业奖项;拥有发明专利10余项。



陈梦竹,中兴通讯股份有限公司3GPP RAN1标准专家;长期从事无线通信系统的物理层标准工作,主要研究方向包括信道编码、干扰管理、终端节能、基站节能以及元宇宙等;发表论文5篇,拥有发明专利50余项。