



面向“双碳”的 5G 网络节能技术

官磊¹, 丁洋¹, 李锐杰¹, 苏桐¹, 胡丽洁², 王轶¹, 胡南²

(1. 华为技术有限公司, 广东 深圳 518129; 2. 中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘要: 基于“双碳”大背景下的网络能耗降低课题, 深入洞察网络能耗各部分占比, 最终聚焦在占比较大的基站天线单元的能耗降低。进一步地, 基于基站能耗模型以及兼顾网络能效和系统性能的评估方法论, 介绍和分析了多种网络节能技术, 具体包括时域关断、空域通道关断、频域扩展和功率回退, 并结合评估结果说明了各技术方向的潜在增益空间。此外, 还进一步考虑了其他维度的节能技术, 如多站组网节能、辅助信息和功率效率提升等节能手段。

关键词: 网络节能; 符号关断; 通道关断; 频域扩展; 功率回退

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022054

Network energy saving technologies for green 5G

GUAN Lei¹, DING Yang¹, LI Ruijie¹, SU Tong¹, HU Lijie², WANG Yi¹, HU Nan²

1. Huawei Technologies Co., Ltd., Shenzhen 518129, China

2. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: Based on the background of low carbon consumption and the network energy saving topic, deep investigation for the network energy occupancy ratio was performed, and finally the target was set on the energy reduction for the antenna unit of base station. In addition, based on the base station power consumption model and the evaluation methodology considering the tradeoff between energy efficiency and system performance, a set of technical directions for network energy saving were introduced and analyzed, including time domain shutdown, spatial channel shutdown, frequency domain extension and power back off. Evaluation results were provided to show the space for the above energy saving techniques. Furthermore, other dimensions were also considered, including multi-site networking based energy saving, assistance information based energy saving and PA efficiency enhancements.

Key words: network energy saving, symbol shutdown, channel shutdown, frequency extension, power back off

0 引言

从全球范围来看, 碳达峰(peak carbon dioxide emissions)和碳中和(carbon neutrality)(简称“双碳”)已经成为各行各业可持续发展的共同目标。

随着 5G 部署在全球各区域加速开展, 5G 正在助力千行百业数字化转型。通过 5G 提高生产效率, 可间接帮助企业节能减排, 实现绿色可持续发展。对于电信行业, ICT 基础设施的绿色节能减排同样重要。2021 年 12 月, 国家发展和改革委员会等



部门下达了关于印发《贯彻落实碳达峰碳中和目标要求推动数据中心和 5G 等新型基础设施绿色高质量发展实施方案》的通知。可见,降低网络能耗一方面有利于环境保护和可持续社会发展、符合“双碳”目标,另一方面可以降低运营商的网络运营成本,给运营商带来直接的经济收益。

从基站能耗组成来看^[1],无线处理(主要是天线单元)在基站中的能耗占比较大;然后到天线单元内部,功率放大器和传输通道是占据较大能耗比例的两个部分,因此需要尤其关注上述占比较大的部分的能耗降低,以达到节能通信的目标。

5G 通过引入大规模多天线技术,与 4G 相比,数十倍地提升了无线系统的比特能效。同时,5G 引入了更多的频段,单载波下可支持更大的载波带宽,以达到更高的终端速率;通过灵活可配置的带宽部分(bandwidth part, BWP)大小,能够实现根据业务需要降低射频带宽的大小,实现网络和终端双节能。此外,5G 在初始设计时,就考虑无线系统能耗的问题,采用尽可能清洁设计的理念,相较于 4G,能够大幅减少持续发送的公共信号,包括各种参考信号、系统消息等,显著降低轻载下的系统能耗。从进一步降低系统能耗的角度,例如,天线数的灵活配置、带宽或者频段的灵活选择等,仍存在较大的节能空间。

从运营网络中的实测数据来看,基站能耗随着小区负载变化并没有显著变化,深夜空载时段的资源占用率(如物理资源块(physical resource block, PRB))利用率极低(只有系统全部可用资源的 5% 以下),但是能耗高达满载情况下的 50% 以上;类似地,在某些轻载时段(如一些地区的上午),PRB 利用率上升,到 20%~30%,但是能耗仍然达到满载的 60% 以上。因此,可以得出观察结论:空载和中轻载下,基站功耗并没有随着负载线性降低,有较大的改善空间。

除了产品实现考虑降低网络能耗,在标准化方面,3GPP 在 5G 新空口(new radio, NR)

Release18(5G 从该版本起被产业界看作 5.5G,即 5G-Advanced)的立项讨论中,网络节能课题受到众多数量的运营商和设备商的支持,并且实现研究课题立项^[2-26]。聚焦 RAN 侧的网络节能也是第一次成功在 3GPP 标准化组织中立项。该标准立项主要包括 3 个部分:

- 讨论和制定网络能耗模型,该模型需要考虑基本网络参数配置、功率放大器效率、通道数、业务负载以及休眠状态等因素;
- 讨论和制定评估方法论,在考虑网络节能的同时,还要保证能够满足一定的系统指标,如给定的系统频谱效率或用户业务体验,必要时可以定义与网络能效直接相关的新指标;
- 基于上述能耗模型以及评估结果,讨论并识别得到网络节能的关键技术点,从各个方面(包括时域、空域、频域和功率域等)使能更动态、更高效、更精准的无线传输,并结合用户反馈和基站间交互信息等方式,尤其需要考虑中轻载下的能效提升。

本文也是重点基于 3GPP 标准化立项的范围,介绍与网络节能相关的内容,包括节能模型、评估方法论以及各个维度的网络节能关键技术等。

1 基站节能模型和评估方法论

1.1 基站节能模型

在讨论具体的基站能耗评估以及制定节能关键技术之前,需要对基站能耗模型进行建模。

除了需要考虑一些基本系统参数(如系统带宽、子载波间隔、总发送通道数等)之外,一般来说,基站会存在多档休眠状态(sleeping mode state, SM state)。不失一般性,基站休眠模式模型如图 1 所示,基站的休眠状态大致可以分为 3 种。在休眠态 1,基站基础能耗较高,但可以实现快速激活和休眠,比如可以做到符号级别的关断休眠和启动,也即基站的休眠持续时间(duration)通常也较短,因此也可以理解为该状态基站一直保持

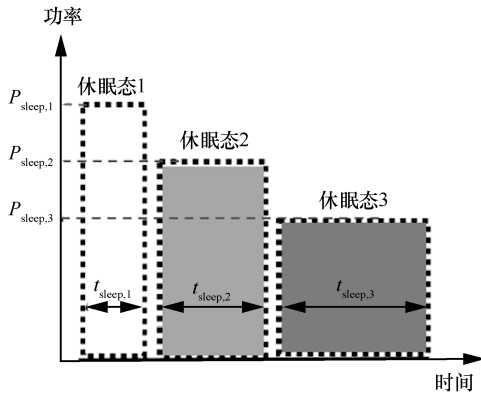


图1 基站休眠模式模型

在激活态；在休眠态 2，基站基础能耗较休眠态 1 有所下降，但需要激活和休眠的持续时间也随之增加，比如百毫秒至秒级休眠；在休眠态 3，基站可以进入深度休眠，基础能耗最低，比如达到分钟级甚至更长的休眠时间。在不同休眠态之间存在切换过渡期，在该过渡期的时长 $M_{\text{tran},l}$ 以及功耗 $P_{\text{tran},l}$ 取决于具体的实现情况。考虑上述多档休眠态的能耗建模如下：

$$P_{\text{total}} = P_{\text{active}} + \sum_{l=1}^L t_{\text{sleep},l} P_{\text{sleep},l} + \sum_{l=1}^L M_{\text{tran},l} \quad (1)$$

进一步地，根据前文所述，将影响基站天线单元的主要能耗因素通道和功放等引入其中来考虑上述激活态下的能耗建模：

$$P_{\text{active}} = t_{\text{active}} f(\beta_1, \beta_2, \beta_3) \quad (2)$$

$$f(\beta_1, \beta_2, \beta_3) = P_{\text{static}} + \beta_1 \tilde{P}_{\text{dyn},1} + \beta_1 \beta_2 \beta_3 \tilde{P}_{\text{dyn},2} / \varepsilon \quad (3)$$

其中， P_{static} 表示静态电路能耗项， $\tilde{P}_{\text{dyn},1}$ 和 $\tilde{P}_{\text{dyn},2}$ 分别为通道和功放的能耗项， β_1 、 β_2 和 β_3 分别表示通道的激活比例、频域 RB 激活比例和功率谱密度， ε 为功放效率。可以看到，能耗跟激活通道数成正比，影响功放的因素包括通道激活比例、RB 激活比例、功率谱密度以及功放效率。

在上述基站能耗建模的框架基础上，还可以采用一种考虑不同负载的平均能耗统计方法，也称为 ETSI 模型，见表 1，将 1 天 24 h 分为 3 个时间段，对应不同的负载情况，然后将各个时段的能耗进行平均得到 ETSI 能耗模型下的能耗。

表 1 ETSI 能耗模型

负载比例	时长/h	平均功耗/W
1% (空闲态)	6	Q
30%	10	
50%	8	

1.2 基站节能评估方法论

第 1.1 节中定义的基站能耗模型，可以用于评估系统能耗，以及不同技术方案下的能耗对比。但是，在技术方案的评估方法中除了要考虑降低能耗为目标，还需要在考虑降低能耗的同时，兼顾系统性能。系统性能可以包括系统吞吐量、频谱效率、用户感知吞吐量 (user perceived throughput, UPT)、小区接入性能等。具体，可以从两个方面考虑。

- 对于无线资源控制 RRC 空闲态，公共信令发送占比是影响基站能耗的主要矛盾，因此在精简公共信令的方案设计时，需要考虑用户的接入性能，包括接入成功率、时延、接入资源的负载平衡等。
- 对于 RRC 连接态，关注的节能收益需要在相应的系统吞吐量或频谱效率不下降或下降值在某个门限内这个大前提下，比如最大损失 5% 或 10%；或者对于用户来说，需要考虑用户感知吞吐量，即单位时间内传输每个数据包的平均可达数据速率。对于特殊业务（如低时延高可靠），还需要考虑时延范围内且可靠性可达成的限制下的容量或速率。

1.3 3GPP 评估基站节能的场景

基站节能的适用场景显然是越多越好的。然而，当前的实际网络中，如前文所述，空载和中轻载下的无线资源利用率与对应场景下的基站能耗占比极不成比例，因此具有较大的收益预期空间。3GPP 在第一个版本的研究项目中，同意优先考虑这些负载场景，包括多载波负载不同的场景。

另外，在 3GPP 研究立项的过程中，对具体的评估场景（用于给出评估的系统配置和参考参



数等)做了讨论。当前的研究范畴还比较宽泛,可以简单地理解为低频和低频、FDD 和 TDD、多载波聚合和双链接场景都可以考虑,包括在低频 FDD 频段也会考虑 small cell、与 LTE 共站共频谱的场景以及应用了大规模多天线技术的场景。

2 网络节能技术

从上述分析可以看出,网络节能收益的主要空间来自中轻载场景,而重载场景下能效与谱效基本是成正比的,因为此时可以关断的时频空资源是很少的。那么对于中轻载场景,一方面是公共信号的时域占比,另一方面是寻求时频域资源利用上的能耗要尽量与业务负载相匹配,再有就是其他维度的网络节能。下面从这个逻辑分别介绍网络节能关键技术。

2.1 时域节能技术

对于时域节能方面,就是尽可能在不损失或少损失网络性能的前提下,关断信号的发送。一方面,对于 RRC 空闲态,相当于系统空载,此时能耗瓶颈主要在于公共信号的发送;另一方面,对于中轻载,可以在无业务时进行符号关断,甚至在业务到达后推迟一段时间,统一发送或推迟到与公共信号一起发送,即汇聚调度。

2.1.1 极简公共信号发送

5G NR 中的公共信号主要是同步信号块(SSB)、系统消息、寻呼消息及相应的调度信息等,其中 SSB 包括主辅同步信号和物理广播信道,系统消息主要包括系统信息块 SIB1。为了保持用户的初始接入,5G 相关协议要求 SSB 发送周期至少为 20 ms。此外,由于 5G NR 部署的频点比 4G 系统高,如在 3 GHz 以上甚至在毫米波频段,而非连接态下,基站无法获取用户的信道信息,这要求公共信号以波束成形的方式来发送。由于一个波束只能覆盖较窄的方向,因此基站需要以时分复用的方式轮询发送多个公共信号波束,以达到全方向的覆盖要求。5G NR 的公共信号的时域占比见表 2,在保持 20 ms 的初始接入能力且 7 个公共信令波束

的情况下,SSB 和 SIB1 的时域占比可达 22.7%。

表 2 5G 新空口系统的公共信号的时域占比

信号	周期/ms	时域占比		
		2 波束	4 波束	7 波束
SSB	20	1.9%	3.7%	6.5%
SIB1	20	6.5%	13%	22.7%
	40	3.2%	6.5%	13%

在中轻载场景下,尽管业务数据较少,但由于需要传输 SSB 和 SIB1,基站无法有效进行时域关断,导致无法有效降低功耗。因此,减少 SSB 和 SIB1 传输,是实现基站节能的一个重要手段。

一种降低公共信号时域占比的多载波方案极简公共信号发送如图 2 所示,基础成员载波或者基础载波(basic component carrier, BCC)上提供全套的 SSB 和 SIB 消息以及其他容量成员载波或者节能载波(capacity component carrier, CCC)上的 SIB 消息,这样可以保证 CCC 上不需要发送 SIB 消息。CCC 上还可以发送简化的 SSB,这里面称为发现参考信号(discovery reference signal, DRS),以供用户对 CCC 进行同步和测量。如果基站和用户能力可以保证用户根据 BCC 的 SSB 进行 CCC 的同步,甚至可以节省 CCC 上的 SSB。通过这种 CCC 上极简的公共信号发送方案,可以极大地降低 CCC 上的公共信号时域占比,尤其适用于空载和轻载场景的情况,以达到 CCC 上的能耗降低的收益。此外,用户从 BCC 上获取 CCC 上的系统消息,还可以直接在 CCC 上发起随机接入,缓解 BCC 上初始接入的拥塞问题。

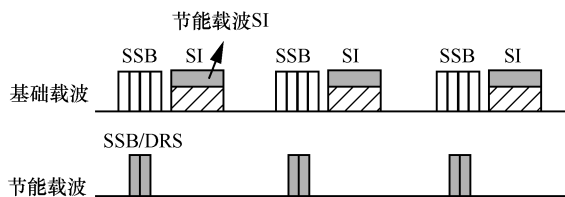


图 2 极简公共信号发送

2.1.2 符号关断和汇聚调度

在轻载场景下,由于用户的业务突发特性,

在没有业务的时间段, 基站可以动态进行符号关断, 以达到节能的目的。此外, 在业务到达后推迟一段时间, 将多次业务到达积攒在一起统一进行发送, 或者推迟到与公共信号一起发送, 即汇聚调度。符号关断和汇聚调度如图 3 所示。

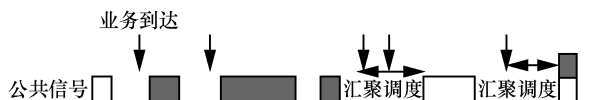


图 3 符号关断和汇聚调度

需要指出的是, 汇聚调度需要一定程度上预测业务到达时间, 且需要根据业务需求, 决定最大推迟发送时间, 否则会导致用户的感知数据速率下降。

2.2 空域节能技术

在上述符号关断的基础上或者不考虑上述符号关断的情况, 还可以考虑多天线的通道关断, 相比于符号关断的关断粒度进一步细化到空域通道的维度, 即在业务负载匹配的情况下, 即使不关断符号, 仍然可以关断其中一部分通道, 以达到节能目的。与 4G 基站相比, 5G 基站通道数目急剧增加, 通道关断不仅可以降低功放功耗还可以降低通道的静态功耗, 已经成为一种主流的节能方案。与符号关断相比, 通道关断在保证服务连续性上更具优势。空域通道关断如图 4 所示。

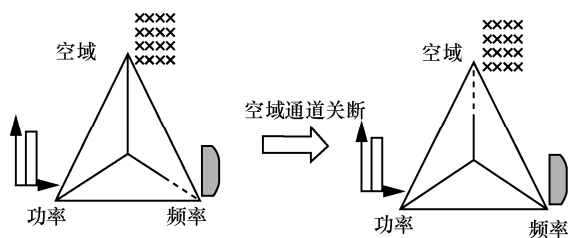


图 4 空域通道关断

一种解决方案是半静态通道关断, 即基站会根据一段时间内的业务和负载预测, 长时间地关断一部分通道。但是, 由于业务到达的随机性, 即使在中轻载下, 不同传输时间间隔 (transmission time interval, TTI) 如间隙上的 RB 利用率也会有较大波动, 半静态通道关断虽然可以保证服务连续性, 但是在某些 RB 占用

较高的 TTI, 会造成数据传输时延增加, 用户体验降低。但好处是半静态关断的实现较为简单, 且可以匹配不同通道开启下的信道状态信息 (channel state information, CSI) 的测量和上报配置。

另一种解决方案是动态通道关断, 相较于半静态通道关断, 可以提供更精细粒度的调整, 更加匹配业务负载和需求。但是, 动态通道关断的主要挑战是会打乱系统的连续性, 基站的通道配置动态变化会造成很多测量和调整无法及时收敛。例如, 可能在 CSI 测量时刻, 用户的基站状态是 32 通道, 但是到数据传输时刻就变为 16 通道, 则测量上报的 CSI 不再匹配激活通道数的变化。又例如, 对于典型的开环链路自适应技术, 需要一定时间才能收敛, 但是基站通道不断动态变化, 会造成开环技术难以收敛, 进而影响系统传输效率和用户业务体验。因此, 需要针对动态通道关断下的 CSI 不准确问题, 进一步评估和研究相应的解决方案。

通道关断的节能评估如图 5 所示, 给出了在不同资源占用率且在不同 UPT 损失的情况下, 半静态通道关断和动态通道关断相比不进行通道关断的基线能够带来的能耗收益。图 5 中最左边显示为 0 的为不进行通道关断的基线能耗, 图 5 中其他柱状体为相比于该基线能耗在不同关断情况下的节省能耗。可以看出, 随着允许 UPT 损失数值的增加, 节能收益逐渐增加; 且动态通道关断可以更加匹配业务特征, 因此, 相比于半静态通道关断可以带来更大的能耗节省。

2.3 频域和功率域节能技术

对于中轻载业务场景, 通道关断技术的核心是利用数据传输资源在空域的冗余, 将传输资源在空域进行汇聚, 即将数据传输汇聚到更少的空域通道上, 从而降低基站能耗。类似地, 利用数据传输在频域的资源冗余, 将数据传输进行频域资源扩展, 从而降低基站能耗。频域扩展和功率回退示意图如图 6 所示。

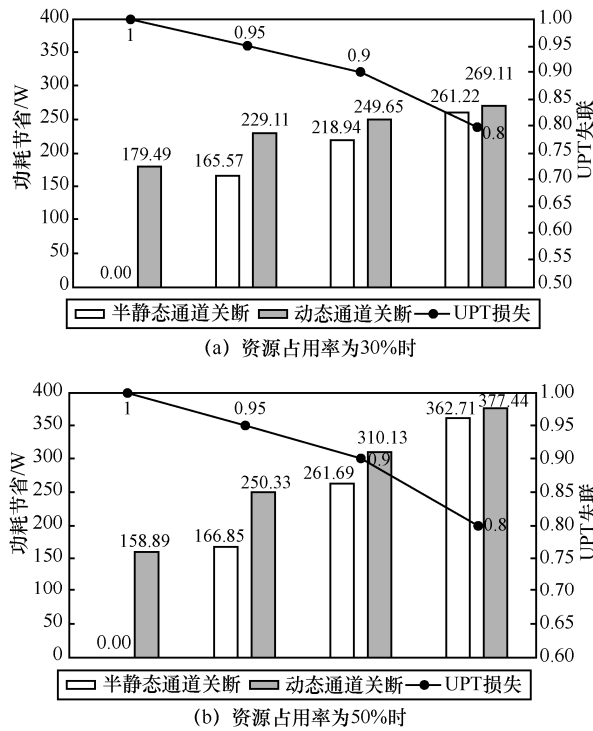


图5 通道关断的节能评估

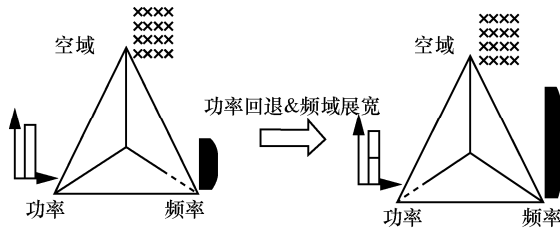


图6 频域扩展和功率回退示意图

根据香农公式 $B = W \log(1 + P)$ 可知，给定传输速率 B bit/s，需要的传输功耗为：

$$P_{out} = P \times W = W \left(2^{\frac{B}{W}} - 1 \right) W \quad (4)$$

P_{out} 是随着传输带宽 W /Hz 的增大而降低的，其中 P 是数据传输的功率谱密度，单位为 W /Hz。因此，在频域资源冗余的时候，可以通过增大传输资源结合降低传输功率谱密度的方案，降低整个传输的动态功耗。该方案的思想还可以扩展到空域和时域：当空域通道冗余时，可以将数据传输扩展到剩余通道上来降低整个传输的动态功耗；当时域资源冗余时，可以将数据传输扩展到剩余时域符号上来降低整个传输的动态功耗。但

是无论是占用更多的空域通道还是时域符号，都不利于器件关断，会带来一定的静态功耗提升，同时，占据更多的时域符号还会造成传输时延增加，降低用户体验。

对于半静态资源扩展，基站会根据一段时间内的业务量预测或者根据 RB 占用率预测，确定一个资源扩展因子 α （对于 SE 降低为 $1/\alpha$ ），然后在每个 TTI，基站会根据每个 UE 的 CSI 反馈值确定合适的调制编码方式 MCS_1 ，然后根据扩展因子 α 确定调整后的 MCS_2 ，最后根据 MCS_1 和 MCS_2 分别对应的解调信干噪比 $SINR_1$ 和 $SINR_2$ 来确定发送功率谱回退值：

$$\rho = SINR_2 - SINR_1 \quad (5)$$

对于动态资源扩展，基站会在每个 TTI 上根据当前 TTI 上的待传业务量和预测 RB 占用率，来确定当前 TTI 的资源扩展因子 α ，再同样执行 MCS 回退和发送功率谱回退。当然，这种方式也有其适用的场景或限制。例如，考虑小区边缘用户的接收 SINR 本来就已经很低，进一步回退发送功率谱密度会急剧恶化信道估计性能和接收性能，因此可以考虑设定 MCS 门限，只有当 MCS 大于或等于该门限时，才会进行资源扩展和功率谱回退。

上述解决方案中，发送功率谱回退值默认为是解调 SINR 回退值，这个在单用户单流传输下是正确的，但是在单用户多流或多用户多流传输下，不再正确。假设用户侧采样最小均方误差（minimize mean square error, MMSE）接收机，则基站发送功率谱回退 ρ 后，用户的接收 SINR 可以表示为：

$$SINR_i(\rho) = \max_c \frac{\rho |c^H h_i|^2}{c^H R_{uu} c} = \max_c \frac{\rho |c^H h_i|^2}{c^H \left(\rho \sum_{j \neq i} h_j h_j^H + R_{inter} + \sigma_n^2 I \right) c} \rightarrow SINR_i(\rho) = h_i^H \left[\sum_{j \neq i} h_j h_j^H + \frac{R_{inter} + \sigma_n^2 I}{\rho} \right]^{-1} h_i \quad (6)$$

其中, h_i 是基站到 UE 的目标数据流对应的传输信道 (包含预编码处理), h_j 是基站到 UE 的干扰数据流对应的传输信道 (包含预编码处理), R_{inter} 是目标基站外的干扰自相关矩阵, c 是用户对目标数据流的接收向量。从式 (6) 可见, 当 $\sum_{j \neq i} h_j h_j^H \gg R_{\text{inter}} + \sigma_n^2 I$ 时, 即当流间干扰是主要干扰时, 用户的接收 SINR 与基站侧发送功率谱回退 ρ 近似无关; 反之, 当 $\sum_{j \neq i} h_j h_j^H \ll R_{\text{inter}} + \sigma_n^2 I$ 时, 用户的接收 SINR 随着基站侧发送功率谱回退 ρ 线性降低。因此, 需要进一步评估和研究上述功率回退值与 MCS 不匹配的问题。

频域扩展和功率回退的节能评估如图 7 所示, 给出了在不同 UPT 损失的情况下, 功率回退与不进行功率回退相比的基线能够带来的能耗收益。图 7 最左边显示为 0 的为不进行功率回退的基线能耗, 图 7 中其他柱状体为相比于该基线能耗在不同 UPT 损失情况下的节省能耗。可以看出, 随着允许 UPT 损失数值的增加, 节能收益逐渐增加, 这是因为将空余频域资源进行扩展换取了功率谱密度的降低。

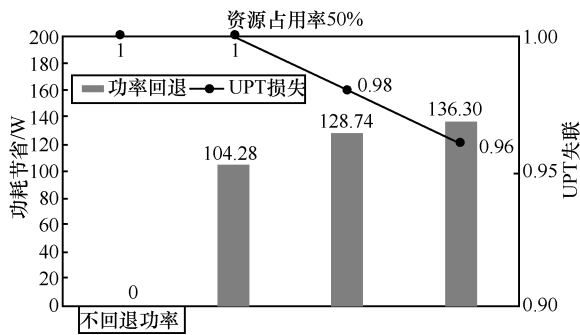


图 7 频域扩展和功率回退的节能评估

2.4 其他节能技术

除了上述时域、空域、频域和功率域的基础节能技术之外, 还可以考虑其他维度的网络节能技术。

(1) 组网节能

单站节能技术之外, 还可以考虑多站组网下的节能技术。具体地, 在轻载场景下, 可以关断

一些基站, 而依靠剩余的少量基站来保证用户的空闲态驻留以及轻载下的数据传输需求。因此, 需要进一步研究多站情况下的接入和数据传输技术。此外, 还可以考虑基站间交互信息, 比如交互负载信息以辅助多站联合的关断和业务接管等功能。

(2) 辅助信息

网络节能还可以依赖一些辅助信息, 比如上述基于用户的 CSI 反馈等也可以看作是一种用户上报的辅助信息。此外, 还可以进一步研究其他用户的辅助信息, 比如用户的业务类型和具体需求、用户移动信息和历史接入信息等, 这些可以帮助网络更好地做出调度决策或者关断决策, 应用到前述的汇聚调度、负载预测等中, 甚至可以实现网络和用户的双向节能。

(3) 功放效率提升

除信号传输技术之外, 还可以考虑器件效率提升, 其中最主要的是功放效率提升。影响功放效率的最直接的因素就是信号的峰均功率比 (peak to average power ratio, PAPR)。

随着移动通信系统的不断发展, 正交频分复用 OFDM 技术和多输入多输出 (MIMO) 技术由于在数据吞吐量、链路可靠性、抗干扰能力等方面的优异性能, 已成为当今移动通信系统的关键技术。然而, OFDM 技术以及 MIMO 技术的使用也会带来一些新的问题, 其中一个问题就是发射信号在时域上存在较大的波动, 即 PAPR 较高, 具体定义为:

$$\text{PAPR} = \frac{\max_{0 \leq n \leq N-1} \{|x(n)|^2\}}{E\{|x(n)|^2\}} \quad (7)$$

其中, $x(n)$ 表示发射天线上长度为 N 的时间序列。

高 PAPR 的传输信号会严重降低通信系统的传输效率。当传输信号有较高的 PAPR 时, 发射端的高功率放大器需要工作在较低的工作区间, 这使得功放效率不高。因此, 需要持续研究降低多载波系统的 PAPR 的一系列技术, 甚至考虑新波形技术。



3 结束语

本文从网络节能的能耗模型入手,从需要同时兼顾网络能效和系统性能的角度,在满足系统性能需求的前提下,评估和研究面向“双碳”的绿色网络节能技术。具体的网络节能技术可以包括时域关断、空域通道关断、频域扩展和功率回退。此外,还可以扩展地考虑其他维度的节能技术,比如多站组网节能、辅助信息和功率效率提升等节能手段。这些已经在 3GPP 的评估考虑范畴之内。最终需要在性能和节能收益之间达到较好的平衡。评估工作将在 2022 年年底结束,届时 3GPP 将会推荐候选技术方案,成立工作项目,在 2023 年完成核心的工作,标准化其中多项技术,使得基站在不同的场景下按需使用合适的方案或其组合。

参考文献:

- [1] Green Future Networks. Network energy efficiency v1.1[S]. 2019.
- [2] 3GPP new SI: study on network energy savings for NR: RP-213554[R]. 2021.
- [3] 3GPP NR network energy saving enhancement for Rel-18:RWS-210153[R]. 2021.
- [4] 3GPP. LG Uplus views on Rel-18 non-eMBB area: RWS-210281[R]. 2021.
- [5] 3GPP. Motivation for network energy saving in Rel-18: RWS-210310 [R]. 2021.
- [6] 3GPP. Network energy saving: RWS-210358 [R]. 2021.
- [7] 3GPP. Network power savings: RWS-210398 [R]. 2021.
- [8] 3GPP. On energy saving in Rel-18: RWS-210415 [R]. 2021.
- [9] 3GPP. Network energy saving and green operation for NR: RWS-210447 [R]. 2021.
- [10] 3GPP. Discussion on network power saving for 5G-Advanced: RWS-210486 [R]. 2021.
- [11] 3GPP. Moderator's summary for discussion [RAN93e-R18 Prep-13] Network energy savings: RP-211663 [R]. 2021.
- [12] 3GPP. NR network energy saving for Rel-18: RP-211958 [R]. 2021.
- [13] 3GPP. Discussion on network energy saving: RP-211994 [R]. 2021.
- [14] 3GPP. Views on network energy savings for Rel-18: RP-212104 [R]. 2021.
- [15] 3GPP. Updated views on Rel-18 network energy saving: RP-212156 [R]. 2021.
- [16] 3GPP. Views on Rel-18 network energy saving: RP-212253 [R]. 2021.
- [17] 3GPP. Discussion on network energy saving for 5G-Advanced: RP-212384 [R]. 2021.

- [18] 3GPP. Motivation for network energy saving in Rel-18: RP-212422 [R]. 2021.
- [19] 3GPP. On scope of network energy savings in Rel-18: RP-212465 [R]. 2021.
- [20] 3GPP. Discussion on network energy saving for Rel-18: RP-213086 [R]. 2021.
- [21] 3GPP. Comments on Rel-18 draft SID on network energy saving: RP-213164 [R]. 2021.
- [22] 3GPP. Views on Rel-18 network energy saving: RP-213309 [R]. 2021.
- [23] 3GPP. System energy efficiency: RP-213355 [R]. 2021.
- [24] 3GPP. Discussion on Rel-18 network energy saving: RP-213390 [R]. 2021.
- [25] 3GPP. Discussion on SID on network energy savings for NR and EN-DC/NR-DC: RP-213471 [R]. 2021.
- [26] 3GPP. Moderator's summary of discussion [94e-08- R18- Network Energy]: RP-213488 [R]. 2021.

[作者简介]



官磊 (1982-), 男, 现就职于华为技术有限公司, 主要研究方向为 4G/5G 的物理层技术, 包括 URLLC 和网络节能等方向的标准化。

丁洋 (1993-), 男, 现就职于华为技术有限公司, 主要研究方向为 5G 的物理层技术, 包括 URLLC 和网络节能。

李锐杰 (1993-), 男, 现就职于华为技术有限公司, 主要研究方向为 5G 的物理层技术, 包括 URLLC 和网络节能等方向的预研和标准化。

苏桐 (1994-), 男, 现就职于华为技术有限公司, 主要研究方向为 5G 的物理层技术, 包括 URLLC 和网络节能等方向的预研和标准化。

胡丽洁 (1984-), 女, 中国移动通信有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为 4G/5G 的物理层信道、流程及信令设计, 如物理层初始接入、控制信道相关设计、用户节能、低能力用户、基站节能等标准化工作。

王轶 (1984-), 男, 博士, 现就职于华为技术有限公司, 主要从事 3GPP 物理层技术的标准化工作。

胡南 (1980-), 男, 博士, 中国移动通信有限公司研究院无线与终端技术研究所副所长、正高级工程师、主任研究员, 3GPP RAN 副主席, 主要从事 LTE 和 5G 演进的标准化工作。