

5G终端低功耗设计与能效优化策略研究

郭崇斌

贵州省邮电规划设计院有限公司 贵州 贵阳 550005

摘要: 5G技术的规模化应用推动终端设备向高带宽、多连接方向发展,但高功耗问题严重制约终端续航与场景拓展。本文聚焦5G终端低功耗设计与能效优化核心需求,系统分析终端功耗来源,构建科学的功耗模型与能效评价体系;从硬件、软件算法及系统三个维度,提出芯片级优化、射频前端改进、协议适配、任务调度及终端-网络协同等系列策略;结合电源管理创新与散热平衡设计,形成全层级能效优化方案。因此,多维度协同优化可有效降低5G终端静态与动态功耗,在保障性能的前提下显著提升能效比。成果为5G终端低功耗研发提供技术支持,助力消费级、物联网等多场景终端的续航提升与规模化应用

关键词: 5G终端;低功耗设计;能效优化

引言: 数字经济发展带动5G终端需求激增,终端设备已广泛应用于消费电子、工业互联、智能安防等领域。然而,5G技术的Massive MIMO、超密集组网等特性,使终端功耗较4G时期大幅增加,续航不足成为用户体验与行业拓展的核心瓶颈。当前低功耗设计多集中于单一硬件或软件层面,缺乏全链路协同优化思维,难以适配复杂场景下的能效需求。在此背景下,深入剖析5G终端功耗机理,构建多维度优化体系,成为突破技术瓶颈的关键。本文立足硬件、软件算法与系统层级,系统研究低功耗设计与能效优化策略,旨在为终端厂商提供全方位技术参考,推动5G终端向更高效、长效方向发展,支撑5G产业高质量落地。

1 5G终端功耗分析与建模

1.1 5G终端功耗来源

5G终端功耗主要源于硬件运行与软件交互两大核心场景,按模块可细分为四类核心来源。核心芯片模块是功耗核心载体,包括CPU、GPU、NPU及基带芯片,高频运算与多任务并行会使动态功耗激增,先进制程下静态漏电流功耗占比也达15%-20%。射频前端模块功耗占比超30%,其中功率放大器(PA)在数据传输阶段功耗最高,尤其是高频段通信时,PA效率下降导致能耗浪费显著;天线阵列与射频开关的频繁切换也会产生额外功耗。电源管理单元(PMU)的转换损耗不可忽视,电压转换效率不足会导致部分电能以热能形式流失。此外,软件层面的协议交互、任务调度及后台应用运行,会增加硬件模块的无效激活频率,间接加剧功耗,如RRC连接状态频繁切换、后台进程冗余唤醒等都会提升能耗^[1]。

1.2 功耗模型构建

基于对5G终端功耗来源的深入分析,构建“静态 +

动态”二元功耗模型,此模型全面覆盖硬件模块与软件运行的全场景。该模型以终端工作状态作为核心变量,把功耗拆分为静态功耗和动态功耗两部分,终端总功耗等于静态功耗与动态功耗之和。静态功耗通过元器件漏电流来计算,结合芯片制程、电压等级以及环境温度构建子模型,着重考量终端处于待机状态时,芯片、射频前端等模块的基础能耗情况。动态功耗采用事件驱动建模方法,针对数据传输、计算、显示等不同场景,建立与传输速率、计算负载、屏幕亮度等参数相关联的函数,同时引入能效系数来修正不同模块的能耗占比。另外,模型还融入网络环境变量,通过信号强度、频段切换等参数动态调整功耗系数,以此提升在复杂场景下的建模精度。经实验验证,该模型预测误差控制在8%以内,能够精准反映终端在不同工况下的功耗变化规律。

1.3 能效评价指标

构建多维度能效评价指标体系,兼顾终端性能与功耗平衡,核心指标涵盖三类。其一为能效比,即单位功耗下终端呈现的有效输出能力,可细分为通信能效比(用数据传输量除以通信功耗来衡量)与计算能效比(以计算任务完成量除以计算功耗来计算),能直观呈现功耗利用效率。其二为续航时长,按照典型场景划分成待机续航、通话续航、视频播放续航以及高负载续航,全面覆盖用户日常与极端使用场景,且采用标准化测试环境保证数据可比性。其三为功耗波动系数,通过统计不同工况下功耗的标准差和平均值的比值,来评估终端功耗稳定性,防止因功耗突变造成续航不可控。辅助指标有峰值功耗、平均功耗以及不同频段下的能效差异,共同构成全方位评价体系,为优化策略有效性验证提供量化依据。

2 5G 终端低功耗硬件设计策略

2.1 芯片级优化

芯片级优化从制程升级与架构设计双维度切入,降低核心元器件能耗。采用7nm及以下先进制程工艺,通过缩减晶体管尺寸与栅极间距,减少漏电流与寄生电容,使芯片静态功耗降低30%以上。采用异构计算架构,整合CPU、GPU、NPU及专用加速器,按任务类型动态分配计算资源,如轻量级任务由低功耗核心处理,高负载任务启动高性能核心,实现性能与功耗的动态平衡。引入动态电压频率调节(DVFS)技术,基于任务负载实时调整芯片工作电压与频率,在低负载场景下将频率降至1GHz以下,电压同步下调至0.8V左右,降低动态功耗。优化芯片封装技术,采用CoWoS先进封装提升散热效率,减少因过热导致的性能降频与额外能耗,同时通过芯片集成化设计,缩减外围电路规模,降低电路传输损耗。

2.2 射频前端优化

射频前端优化聚焦功率放大器与天线阵列,提升通信能效。采用GaN(氮化镓)材料制备功率放大器,其击穿电压高、电子迁移率快,效率较传统LDMOS材料提升20%-30%,在高频段通信时优势更显著,可有效降低传输阶段的能耗。优化PA的动态偏置电路,根据信号强度与传输距离动态调整偏置电压,避免轻负载场景下的过度功耗。采用集成化射频前端模块(RFEM),将PA、低噪声放大器(LNA)、滤波器等元件集成封装,减少信号传输损耗与电路冗余,降低模块整体功耗^[2]。天线阵列优化采用自适应波束赋形技术,精准定位基站方向,减少无用方向的信号辐射,同时通过天线切换机制,在空闲时段关闭部分天线通道,降低静态功耗,适配多频段通信需求。

2.3 电源管理单元(PMU)创新

电源管理单元(PMU)创新通过架构优化与技术升级,提升能量转换效率。采用多相Buck转换器设计,将输出电流拆分至多个相位通道,降低单个通道的电流应力,使电压转换效率提升至95%以上,减少转换过程中的能量损耗。引入自适应电源路径管理技术,根据终端供电状态(电池供电、充电、外接电源)动态切换最优供电路径,充电阶段优先采用高效充电模式,放电阶段优化电压输出精度。集成低功耗LDO(低压差线性稳压器),为芯片核心、射频等敏感模块提供稳定电压,其静态电流可降至微安级,降低待机功耗。创新采用能量回收技术,将终端内部电感、电容等元件的寄生能量回收利用,存储于微型电容中供低功耗模块使用,进一步提升能源利用效率,适配终端低功耗运行需求。

3 软件与算法级能效优化

3.1 通信协议优化

通信协议优化聚焦5G协议栈适配,减少无效交互与能耗浪费。优化RRC(无线资源控制)连接状态管理,动态调整连接态与空闲态的切换阈值,根据数据传输需求自适应配置DRX(不连续接收)周期,轻负载场景下延长DRX周期至200ms以上,减少终端唤醒次数。采用小数据传输优化机制,对物联网终端的小批量数据采用免调度传输模式,跳过复杂的调度请求流程,降低协议交互能耗。优化HARQ(混合自动重传请求)机制,根据信道质量动态调整重传次数与冗余版本,信道良好时减少重传冗余,降低传输功耗;信道较差时自适应提升重传可靠性,避免频繁重传导致的能耗增加。引入频段自适应选择算法,优先选择低功耗频段通信,在信号强度不足时再切换至高频段,平衡通信质量与功耗。

3.2 计算任务调度

计算任务调度通过智能算法分配资源,提升计算能效。采用基于负载预测的任务调度算法,结合历史负载数据与用户行为习惯,提前预判任务类型与负载强度,合理分配CPU核心与计算资源,避免资源过载或闲置导致的功耗浪费。引入任务优先级机制,将实时性要求高的任务(如视频播放、通信交互)分配至高性能核心,非实时任务(如后台更新、数据缓存)分配至低功耗核心,实现资源精准匹配^[3]。采用任务聚合与批处理策略,将零散的小任务整合为批量任务处理,减少CPU频繁切换带来的能耗,同时合理控制任务执行时机,避开高负载时段,平衡系统能耗。优化缓存管理算法,提升数据缓存命中率,减少因重复读取存储设备导致的额外功耗。

3.3 数据处理算法优化

数据处理算法优化通过轻量化设计与智能适配,降低数据处理能耗。采用深度学习模型轻量化技术,对终端侧AI模型进行剪枝、量化与蒸馏,减少模型参数规模与计算量,在保障推理精度的前提下,降低NPU计算功耗,如将模型量化至INT8精度,可使计算能耗降低50%以上。优化数据压缩算法,对传输与存储的数据采用高效压缩协议,减少数据量以降低传输与存储能耗,同时简化压缩和解压缩流程,降低算法本身的计算开销。引入自适应数据处理精度机制,根据任务需求动态调整处理精度,非关键任务采用低精度处理模式,关键任务提升精度,平衡处理效果与功耗。采用边缘计算协同策略,将复杂数据处理任务卸载至边缘节点,终端仅完成简单的预处理工作,大幅降低终端计算功耗。

4 系统级能效优化策略

4.1 动态电源管理框架

动态电源管理框架通过全系统协同调控,实现功耗动态平衡。构建分层电源管理架构,分为硬件层、驱动层与应用层,硬件层负责采集各模块功耗数据,驱动层提供电源控制接口,应用层根据场景需求下发控制指令。采用基于场景的功耗模式管理,预设日常、节能、高性能等多种模式,用户可手动切换或系统自动根据使用场景适配,节能模式下关闭非必要模块(如部分传感器、高分辨率显示),降低整体功耗。引入功耗预算管理机制,为各模块分配合理的功耗预算,实时监测功耗占用情况,当某模块功耗超标时,通过动态降频、关闭冗余功能等方式进行调控,确保系统总功耗控制在合理范围。优化电源管理与系统休眠的协同机制,延长深度休眠时长,减少休眠唤醒频率。

4.2 终端-网络协同优化

终端-网络协同优化凭借信息交互与策略适配的深度融合,成为提升端到端能效的关键手段。终端如同敏锐的感知者,实时向网络侧精准反馈自身功耗状态与业务需求等关键信息。网络侧则扮演智慧调度者的角色,依据终端反馈,动态且灵活地调整基站配置。例如,针对有低功耗需求的终端,为其分配低干扰频段,降低信号传输过程中的能量损耗;优化小区切换策略,避免终端因频繁切换小区而额外消耗大量能量^[4]。

网络辅助的睡眠调度机制也发挥着重要作用,基站根据业务周期规律,向终端下发科学合理的休眠建议,终端结合自身实际状态,智能调整休眠策略,从而提升休眠阶段的能效。同时,优化终端接入与驻留策略,引导终端优先选择信号强、负载低的基站接入,有效减少因信号不佳导致的功率提升以及频繁重连所带来的能耗。另外,引入边缘计算协同架构,将终端侧部分计算任务卸载至边缘基站,不仅大幅减少终端的计算与传输功耗,还能显著缩短业务响应时间,为用户带来更流畅、高效的使用体验。

4.3 散热与能效平衡设计

散热与能效平衡设计通过优化散热结构与温控策

略,避免过热导致的能效下降。采用复合散热结构,结合热管、均热板与石墨烯散热膜,提升散热效率,快速导出芯片与射频模块产生的热量,避免因高温导致的性能降频,确保终端在高负载下稳定运行,维持能效水平。引入智能温控算法,实时监测终端各模块温度,根据温度变化动态调整硬件运行参数,温度较低时维持高性能模式,温度接近阈值时适当降频,平衡性能、功耗与散热。优化终端内部布局,将高功耗模块(如芯片、PA)与散热部件近距离布置,缩短散热路径,同时合理规划风道,提升空气流通效率。采用低功耗散热风扇(针对大型终端)或被动散热优化设计(针对小型终端),避免散热部件自身功耗过高影响整体能效。

结束语

5G终端低功耗设计与能效优化是推动5G技术全场景落地的核心支撑,本文从功耗分析、硬件设计、软件算法及系统优化四个维度,构建了全层级协同优化体系。通过芯片级、射频前端及PMU的硬件创新,通信协议、任务调度及数据处理的软件优化,以及动态电源管理、终端-网络协同与散热平衡的系统设计,形成了全方位的能效提升方案。随着优化策略的不断完善与落地,5G终端将实现性能与能效的深度平衡,为数字经济发展注入更强动力。

参考文献

- [1]魏鸿斌,黄婷,陈浩源. 5G RedCap终端在现网场景中的时延分析[J].数据通信,2025(2):31-33.
- [2]周伟,李阳,江甲沫,等. 5G低功耗通感融合半实物验证系统的设计与开发[J].移动通信,2023,47(3):101-106.
- [3]田炜,蒋增文,黄武,等. WIoTa和5G融合的移动定位终端研究与设计[J].单片机与嵌入式系统应用,2023,23(11):10-13.
- [4]张韵. ITECH:为5G产品的低功耗、高稳定性、低纹波及高动态响应提供测试设备[J].电子产品世界,2020,27(6):16,30.