参考文献

提升降耗能力——实现 5G 无线电能效的射频系统与收发器创新

Texas Instruments

Kang Hsia, Neeraj Sharma, Dhruvil Solanki, Serkan Tokgoz, Ben Uhing

内容概览

本文概述了现代 5G 无线电网络、网络部署趋势，以及降低功耗的总体举措。阅读本文后，您将了解到：

- **5G 无线电网络中的不同类型无线电设备**：如宏基站、大规模多输入多输出 (mMIMO) 以及小蜂窝等无线电设备
- **实现节能的 5G 网络无线协议**：频分或时分双工，允许未使用的发送器或接收器信道进入空闲状态
- **实现节能的无线电组件级创新**：射频收发器及相关的数字、模拟和节能功能，例如数字预失真、未使用信道的快速唤醒空闲，以及为优化电源负载瞬态而进行的调整

命名规则

1. 3GPP：第三代合作项目
2. ACLR：相邻信道泄漏比
3. BBU：基带单元
4. CFR：波峰系数抑制
5. DPD：数字预失真
6. FDD：频分双工
7. LTE：长期演进，第四代 3GPP 标准
8. mMIMO：大规模多输入多输出无线电设备
9. 微 DTX：微不连续传输
10. 微 DRX：微不连续接收
11. NR：新空口，第五代 3GPP 标准
12. OFDM：正交频分多路复用接入
13. PA：功率放大器
14. PAR：峰均功率比
15. PCB：印刷电路板
16. PoE：以太网供电
17. PoF：光纤供电
18. RAN：无线电接入网络
19. RF：射频
20. RRU：远程无线电单元或宏单元
21. RFIC：射频集成电路
22. SSB：5G 无线电标准同步信号块
23. TDD：时分双工

简介

3GPP 5G 网络为移动通信提供更大的覆盖范围和更高的吞吐量。自 2022 年以来，视频会议、云计算、增强现实和人工智能应用的增加推动了对无线数据吞吐量的需求，促使移动运营商扩大了覆盖范围。然而，两大显著挑战可能会影响部署速

度：全球能源成本不断上升，以及 5G 无线电系统固有功耗较高。5G 标准中的 OFDM 信号会产生更高的 PAR，迫使功率放大器以较低的效率运行以容纳信号峰值。因此，电信运营商现在优先考虑降低运营电力成本，并从设备供应商处寻求创新的节能解决方案。本文介绍了降低 5G 系统功率耗散的系统级和器件级技术。

首先，作者讨论了利用 3GPP 标准定义的静默时隙进行待机操作（包括在非高峰时段禁用部分无线电设备）所带来的射频系统级节能。微 DTX 和微 DRX 操作利用了 5G NR 的精益载波设计，SSB 传输通常每 20ms 进行一次，从而允许基站在低流量期间在传输之间进入微睡眠状态。进一步聚焦于 RFIC 层面的改进：作者提出了一种方法，可实现无线电信道可编程、独立且错开的控制，从而显著降低电流转换率。通过防止所有信道同时激活或停用，作者展示了在 16 通道 RFIC 中高达 75% 的负载瞬态变化。该方法减少了导致性能下降的电压瞬态，并简化了 PCB 上的配电网络。高级实现方案包括在接收与发射模式之间采用预错开和交叠错开，策略性地以最小化负载瞬态变化为优先，从而在保持通信完整性的同时优化功耗。总体而言，通过射频系统和 RFIC 节能特性，可以降低 5G 系统的运行成本，而不会在面对较大电源瞬变时影响性能。

5G 无线电部署趋势

在无线蜂窝网络中，服务运营商设有负责网络规划的团队，用于设计典型的六边形蜂窝大小和覆盖范围。蜂窝的大小与基站射频功率和要支持的连接数量直接相关。**图 1** 突出显示 mMIMO、RRU 和小型蜂窝无线电部署的当前趋势。图中的两条轴分别突出显示了人口密度和数据流量。人口轴包含具有高层公寓和办公楼的市区、具有典型一层或两层住宅和购物广场的郊区，以及农田等农村地区。流量轴包括高、中和低流量。

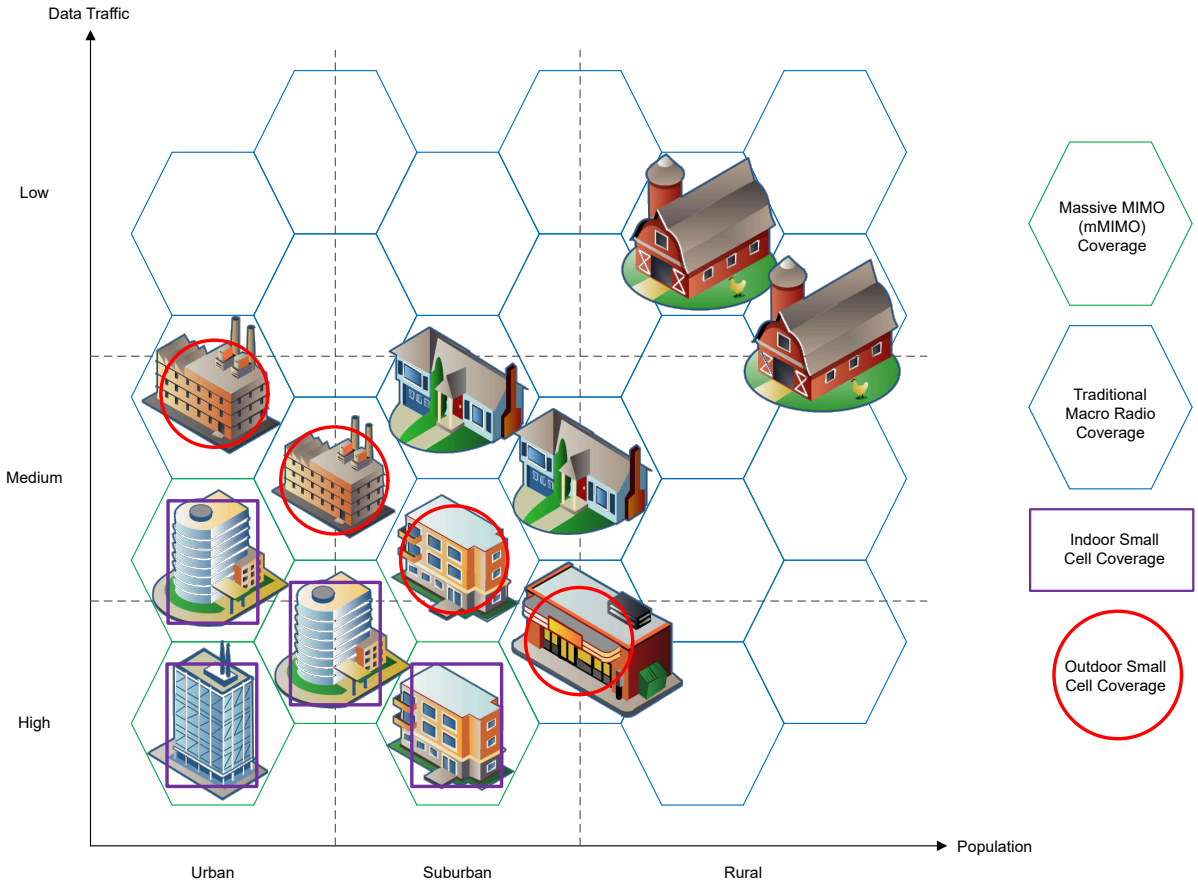


***图 1.** 5G 无线部署策略*

为了优化整体网络功耗，该行业当前的部署趋势是在城市地区使用 mMIMO，在郊区和农村地区使用 RRU，并使用小型蜂窝无线电来填补覆盖范围缺口。这一战略与目前 80% 的移动数据源自室内的趋势一致。[1][2]。服务提供商通常在城市和高流量区域部署 MIMO。该区域受益于 mMIMO 提供垂直波束赋形的能力，除了传统的水平区域覆盖外，这也是覆盖高层建筑所必需的。对于位于高楼林立的密集城区的站点，若数据流量高则采用 mMIMO，若数据流量低则采用 RRU。

MIMO 和宏 RRU 趋势

虽然 TDD 频段仍是 mMIMO 数据流量传输的主力，但基于 FDD 频段的 MIMO 无线电正作为补充路径崭露头角。由于 FDD 频段具有专用的上行链路频率，FDD mMIMO 可以提高密集区域的一般上行链路流量质量。根据**表 1**，大多数 FDD 频段低于 2.7GHz（例如 3GPP 频段 1、频段 3 和频段 7 的情况），而 TDD 频段的频率范围较高，例如 N77 和 N78 频段大于 3.3GHz。因此，由于波长的物理特性，基于 FDD 的 mMIMO 系统的天线尺寸具有一些固有限制。但是，随着 RFIC（例如 TI 的 **AFE8030**、**AFE8128** 和 **AFE8192** 系列 RFIC）在通道数密度和总体功耗方面的创新，设计人员可以缩小无线电电气元件的整体尺寸，以确保现场安装的便利性。

频带	双工	RAT	上行链路 (MHz)	下行链路 (MHz)
B1/N1	FDD	LTE/NR	1920 至 1980	2110 至 2170
B3/N3	FDD	LTE/NR	1710 至 1785	1805 至 1880
B7/N7	FDD	LTE/NR	2500 至 2570	2620 至 2690
N77	TDD	NR	3300 至 4200	
N78	TDD	NR	3300 至 3800	

***表 1.** 典型的 3GPP 频段*

小型蜂窝的崛起

传统蜂窝网络依赖于 RAN，其中基带信号处理在蜂窝天线所在的位置进行。随着流量不断增加，蜂窝尺寸正在缩小，导致蜂窝站点数量及其容量急剧增加。为了提高大量接入点的可扩展性，设备供应商和网络运营商提出了将 RRU 与 BBU 分离的方案。蜂窝规模缩小加上 RRU 与 BBU 分离的总体趋势，催生了小型蜂窝无线电设备的部署。

小型蜂窝网络传输的功率远低于传统 RRU。小型蜂窝网络的覆盖区域具有以下优点：

1. 具备足够的蜂窝规模和功率水平，以覆盖必要的室内区域或预先定义的室外区域。
2. 利用光纤网络覆盖来自 BBU 的大量数据连接。由于通过光链路传输所需的功率可能低于无线链路，因此与传统的宏蜂窝相比，小型蜂窝在给定比特率下的传输功率可以更小。
3. 不同的 RAN 选项具有不同的 BBU 功能切分方式。无论采用何种切分方式，小型蜂窝都能凭借更小的尺寸来提升频率复用率，从而提高局域容量，并通过更大限度减少信号损耗来缩小室内覆盖盲区。
4. 当多个小蜂窝无线电设备连接到同一个 BBU 时，BBU 能够跨蜂窝协调无线电资源分配和干扰管理，从而提升特定区域内的整体吞吐量和终端用户体验。
5. 服务提供商可以选择部署聚合的小蜂窝，并组合各个蜂窝的功率水平，以实现网络整体的能效。与采用大功率宏 RRU 的传统策略相比，服务提供商可以将其作为一种替代策略，以潜在地提升网络级能效。

另一方面，网络运营商在部署小蜂窝网络时确实必须谨慎行事，以避免与现有的宏蜂窝产生可能的干扰。小型蜂窝无线电的数量取决于网络覆盖范围和性能。根据估算[3]，每台无线电设备的覆盖范围在 4,000 至 10,000 平方英尺之间。此外，在射频接收效果较差的写字楼或公寓楼内，业主可以选择部署小蜂窝、直放站或分布式天线系统的组合来扩大覆盖范围。在为室内覆盖进行设计时，通常每个天线 0.25W 到 1W 的覆盖功率可能就足够了。对于中低流量的郊区等区域，拉远宏蜂窝无线电设备即可提供足够的容量和覆盖范围。在楼宇之间或体育场、购物广场等高数据流量区域，楼宇业主可以选择部署功率在 5W 至 10W 范围内的室外小蜂窝，以确保充分覆盖。

满足功率预算的无线电标准和设计技术

由于能源成本不断上升，业主通常希望将公用事业费用与租金分开，并要求服务提供商部署具备独立供电能力的无线电设备，且电源取自主电网，而不是从楼宇内部取电。独立电源需要以太网供电 (PoE) 或光纤供电 (PoF) 解决方案，而这些解决方案的传输功率有限。PoE 标准定义了多个等级，按允许的功率进行区分。无线电设计人员努力将无线电总功率保持在目标等级内，以避免升级到更高等级所带来的额外硬件和成本。因此，无线电设计人员通常会研究以下技术，以降低无线电层面的功耗。

- 3GPP 的 5G 标准在物理层包含了微睡眠功能。该功能允许无线电台在运行期间进入动态待机模式，并使无线电台能够以每个 5G 波形符号为粒度进入更细化的节能模式。微睡眠功能包括 TDD、FDD 微 DTX 状态和 FDD 微 DRX 状态。这些标准使无线电设计人员能够以特定的接收器通道和/或发送器通道为目标，以进入节能模式。

- 发送器链路效率：由于大部分功耗来自功率放大器 (PA) 导致的发送器链路，当前的趋势是通过数字预失真 (DPD) 线性化来提高功率放大器效率。过去，小型蜂窝设计人员利用线性放大器来实现线性度，但代价是 PA 效率降低 10-15%。当前行业的趋势是利用 DPD 将 PA 的电源效率提高到 30% 以上。

TI 的 RFIC（如 **AFE8128**、**AFE8192**、**AFE8030** 和 **AFE7769D** 射频收发器）使工程师能够实现这些目标：TI 的所有 RFIC 都具有快速待机/唤醒功能，以启用 3GPP 规范中的微睡眠功能。待机到唤醒的时间通常小于 2µs，[1] 以满足严格的 5G 符号级时序要求。TI 的 **AFE7769D** RFIC 具有集成 DPD，可通过独立对 PA 进行高级线性化来提高无线电系统的整体电源效率，无需在 RFIC 上游进行外部数字处理。

TI RFIC 快速待机和唤醒功能

TI 的 RFIC 具有快速待机/唤醒时间，可优化无线电系统的低功耗模式，同时在许多用例中保持 2µs 的唤醒时间。在 FDD 系统中，这主要实现微 DTX 和微 DRX，而在 TDD 系统中，这些功能可在上行链路期间实现发送器和下行链路期间接收器的最大通道禁用时间。

发送器或下行链路级待机模式可以是降低 PA 功耗的主要机制。PA 的功耗可能占无线电单元总功耗的 50% 以上，因此始终是节能的最大目标。对于 FDD 系统，5G 标准引入了微 DTX，允许在数据帧内的 OFDM 符号级停用发送器通道。因此，工程师有更多机会在未使用的插槽期间将无线电置于发送器待机状态。微 DTX 的工作原理是在空 OFDM 符号期间将功率放大器置于睡眠状态。实际实现的挑战是一个 OFDM 符号持续时间的严格唤醒时间。

参考**图 2**，在多通道无线电系统中同时唤醒所有通道可能会导致大电流瞬变，从而在 RFIC 电源轨上产生电压纹波。由于电源轨趋稳，这会影响 RFIC 初始采样性能。电源设计人员还必须考虑 TDD 保护间隔（**图 2** 中未显示）中上行链路和下行链路均被禁用的短暂间隔。当电流消耗从高消耗变为低消耗，然后又进入高消耗状态时，这种情况会产生更多瞬态。此外，电源还会具有更多的瞬态浪涌损耗，因此会影响整体系统效率。

为了缓解这些问题，TI 的 RFIC 可以针对单个通道或特定通道组以交错方式唤醒，其中每个通道组的使能信号在时间上错开 (Ts)，如**图 3** 所示。根据配置不同，RFIC 允许通过编程 GPIO 来独立控制信道使能信号，从而实现对双通道、四通道或八通道级别的灵活控制。

设计人员可将相同的待机和唤醒省电策略应用于接收器链。节能的主要关注点是接收器上行链路中的低噪声放大器 (LNA)。

[1] 待机到唤醒时间的典型测试条件。请联系 TI，根据针对应用优化的 RFIC 配置，了解特定的待机到唤醒时间。

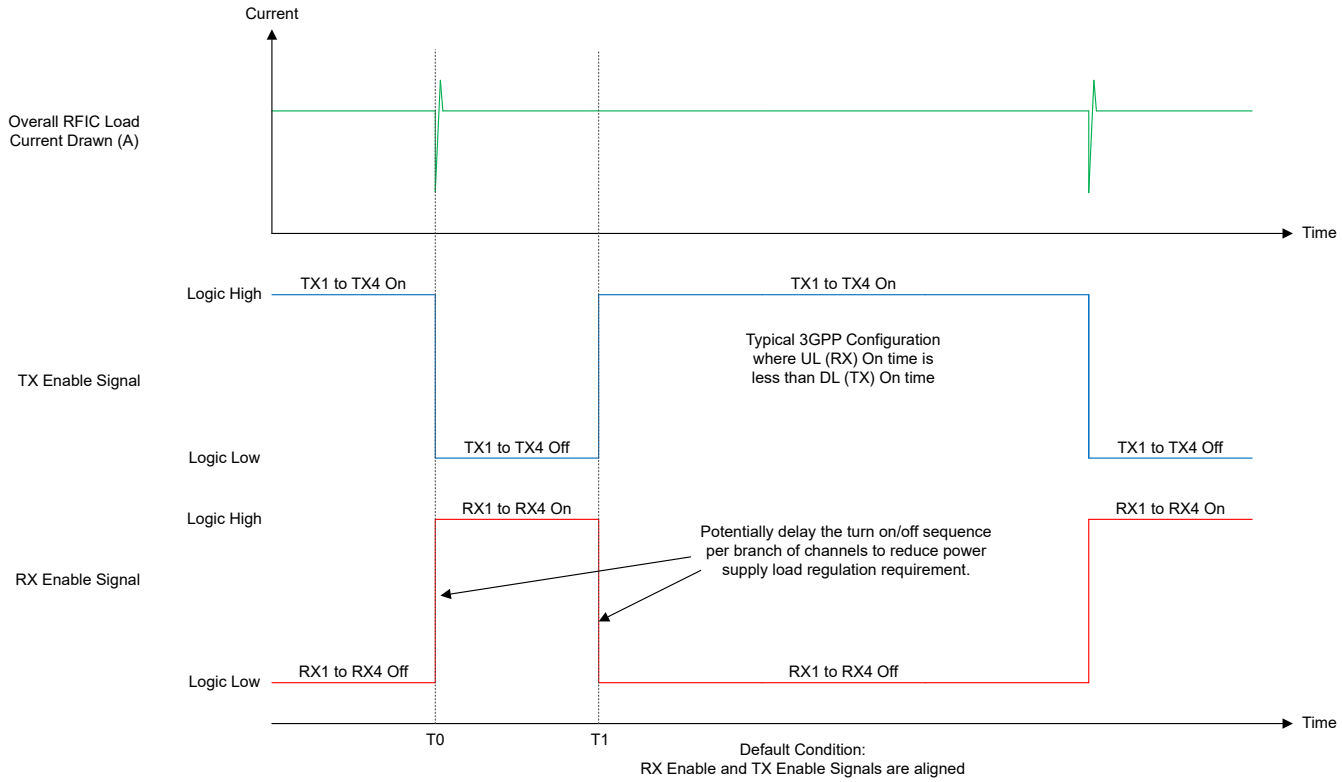


图 2. *基于 TDD 的无线电典型示例操作与信道空闲配置：错开 RFIC 信道组的唤醒时间——所有信道同时开启/关闭*

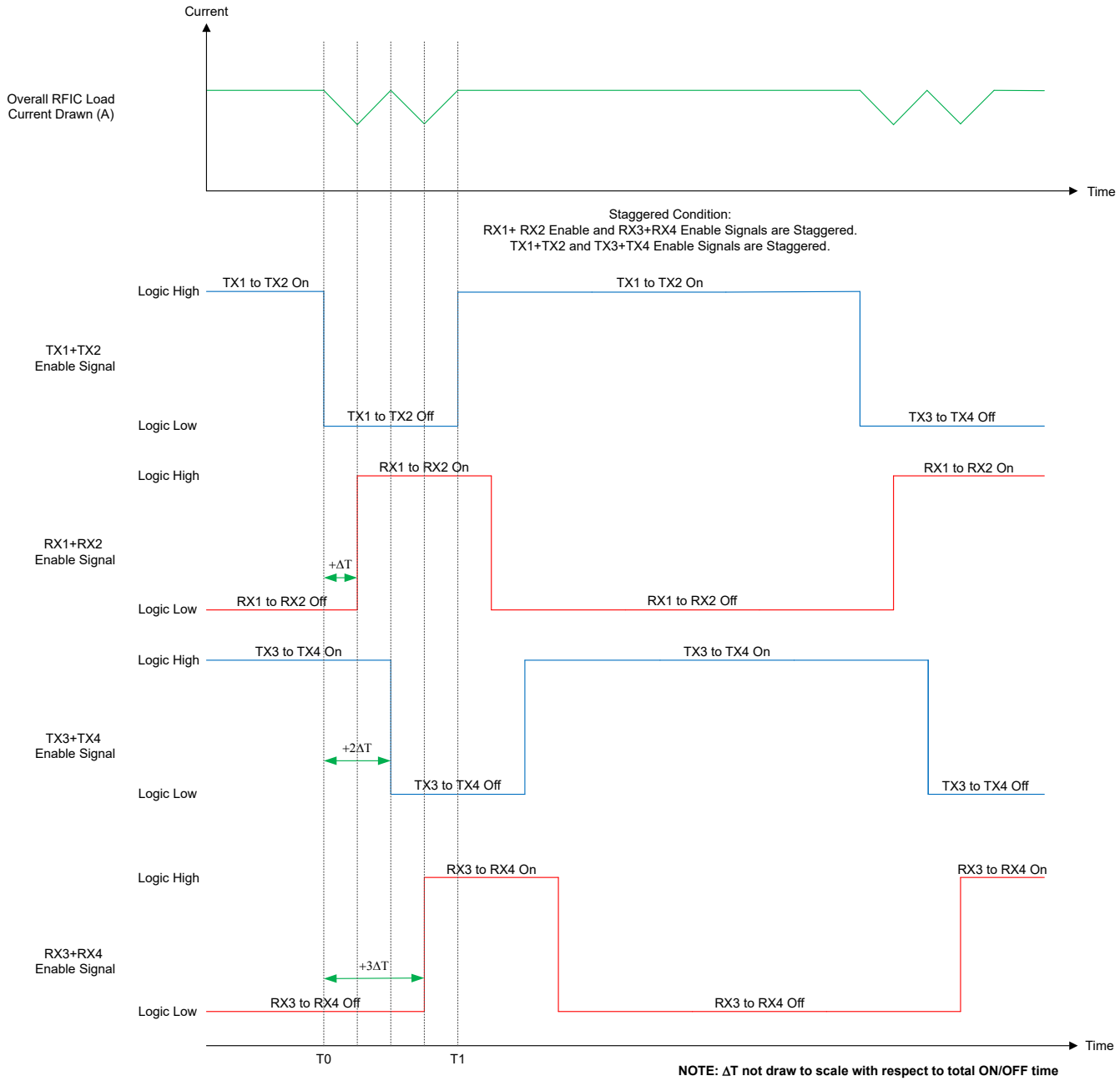


***图 3.** 基于 TDD 的无线电增强型示例操作与信道空闲配置：错开 RFIC 信道组的唤醒时间——信道在时间上错开，以更大限度地减少负载电流的浪涌*

利用 DPD 提高发送器链 PA 效率

PA 通常在高功率下驱动，以实现出色的电源效率，但需要权衡频率响应和线性性能。过去，无线电设计人员利用 DPD 来校正以高能效方式驱动大功率 PA 时所引入的非线性。MIMO 和 RRU 系统几乎普遍使用 DPD 来提高这些大功率系统的电源效率。即使在小型蜂窝系统中，设计人员也正逐渐从传统的线性放大器转向更高能效的 PA（例如 GaN），这需要利用 DPD 来满足 3GPP 的性能规范 [2]。在许多实际案例中，当 PA 在典型偏置下工作时，TI 的 DPD 性能可实现充足的 ACLR（带内和带外发射的衡量指标）裕量。例如，在典型的 N77 频段上，使用两个 100MHz 的 5G NR 载波时，TI 的 DPD 技术可以实现优于 -51dBc[3] 的相邻信道泄漏比，这比 3GPP 规范要求的 -45dBc ACLR 还有 6dB 的裕量。在这种情况下，设计人员可以考虑降低 PA 的偏置电压以提高 PA 的效率，同时让 TI 的 DPD 引擎来吸收由 PA 本身带来的 ACLR 降低。在这种情况下，在降低 PA 电压偏置并满足典型 3GPP 规格的情况下运行时，整体性能可能仍然与原始性能相似。

4T4R C 频段宏 RRU 的设计要求示例

设计参数	示例值
射频频段	3740MHz – 3940MHz
瞬时带宽	200MHz
PLL 基准时钟	491.52MHz
最大 FPGA、ASIC 串行器/解串器数据速率	10Gbps
JESD204 模式（编码）	8b/10b
PA 输出功率	47.5dBm

表 2. *4T4R C 频段宏 RRU 的设计要求示例*

关键属性	值
功率放大器	GTRB424908FC
工作频率范围	3700MHz – 3980MHz
额定输出功率	47.5dBm
PA 类型	高功率射频 GaN-on-SiC HEMT
增益	12dB
效率	40.4%
电源电压	48V_{DS}

表 3. *功率放大器规格*

参数	值
TX 接口速率	245.76MSPS
DPD 速率	737.28MSPS
CFR 目标	8dB

表 4. *TX 接口、DPD 速率和 CFR 配置*

(1) MACOM Technology Solutions Inc，***High Power RF GaN Amplifier 450 W, 48 V, 3700 - 4000 MHz***，数据表

[2] 关于示例 PA 的线性化性能，请参阅“参考资料”部分中 TI 的 DPD 测试报告
[3] 室温下的典型测量条件。

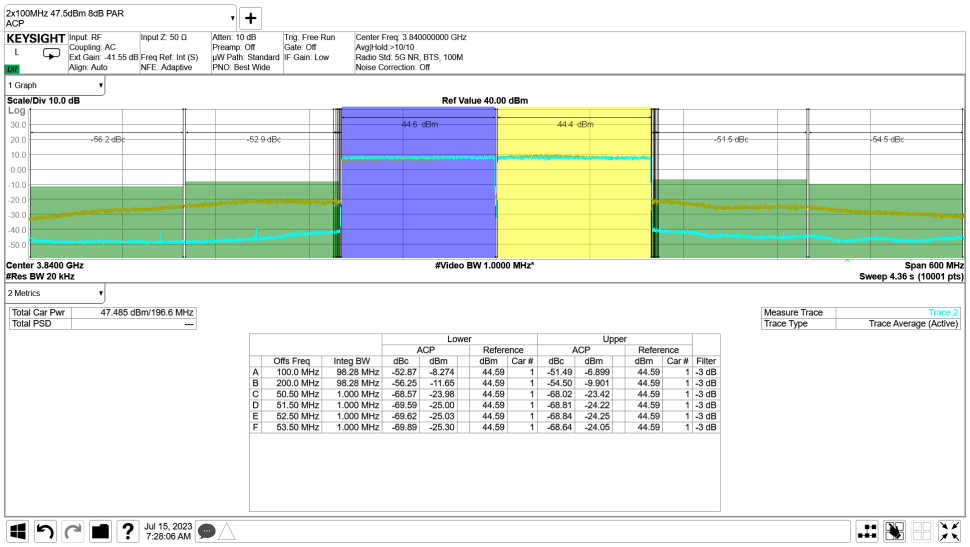


图 4. *AFE7769D 与 Macom GTRB424908FC 在 3.84GHz N77 频段、2x100MHz NR 载波、47.5dBm 输出功率及 8dB PAR 条件下的 ACLR 性能*

参数	PA 输出功率	相邻功率下限	相邻功率上限	交替功率下限	交替功率上限
没有 DPD（橙色）	47.5dBm	–30.16dBc	–32.15dBc	–35.87dBc	–36.62dBc
具有 DPD（蓝色）	47.5dBm	–52.87dBc	–51.49dBc	–56.25dBc	–54.50dBc

表 5. *ACLR 汇总*

结语

总体而言，随着 5G 的部署，运营商正在混合使用 mMIMO、RRU 和小型蜂窝无线电设备，以在网络层面优化频谱和电源效率。在无线电层面，TI 的 RFIC 使无线电设计人员能够在发送和接收空闲期间实现节能。此外，TI 的集成 DPD RFIC 解决方案允许使用具有更高电源效率的 PA，同时保持高度线性的性能。设计人员能够利用 DPD 来优化系统效率，同时遵守严格的 3GPP 规范，从而解决无线电设备中功耗最高的子系统之一的能耗问题。

参考资料

1. Ericsson, **Ericsson MIMO Handbook**
2. Ericsson, **Ericsson Mobility Report**
3. HELIOS Technologies, **Helio's Blog: What is 5G-Oriented Indoor Innovative Solutions?**
4. TI AFE7769D PA 线性化报告
   a. 德州仪器 (TI)，**DPD 测试报告：AFE77xxD 与 SKY66522-11 功率放大器配合使用**，应用简报
   b. 德州仪器 (TI)，**DPD 测试报告：AFE77xxD 与 SKY66391-12 功率放大器配合使用**，应用简报
   c. 德州仪器 (TI)，**DPD 测试报告：AFE77xxD 与 GTRB267008FC 功率放大器配合使用**，应用简报

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

© 2026 Texas Instruments Incorporated

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 销售条款)、TI 通用质量指南 或 ti.com 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。 除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月