arXiv:2611.32258v1 [cs.NI] 24 Nov 2026

UxNB能耗与性能表征：迈向人工智能驱动的非地面开放式无线接入网控制

Ali Srour、Farzad Veisi、Sami Taktak、Vania Conan*CEDRIC*实验室、*CNAM*，巴黎，法国{ali.srour, farzad.veisi-goshtab,sami.taktak, vania.conan}@cnam.fr

摘要——**无人机搭载基站（UxNB）可按需提供5G覆盖，但机载能量有限，因此功耗成为主要运行约束。人工智能驱动的开放式无线接入网控制器是一种很有前景的解决方案，但其训练几乎完全依赖解析模型和仿真，因为目前尚无公开数据集能够捕捉飞行中的5G基站（BS）的真实能耗表现。为弥补这一缺口，我们迈出了第一步，展示了一套搭载5G微微蜂窝的无人机测试平台，该平台支持20 MHz 载波，吞吐量最高可达100Mbps。测试平台测量基站系统指标，包括功耗、CPU负载和温度，同时还采集无人机飞行遥测数据以及详细的逐层虚拟无线接入网处理指标。据我们所知，这是首次展示能够联合呈现飞行中的5G基站能耗与无线接入网行为的系统，为训练和验证能效感知型人工智能控制器提供了所需的真实测量数据。**

索引词—**UxNB、无人机基站、5G、开放式无线接入网、能效、数据集**

I. 引言

搭载无线接入节点的无人驾驶航空器称为 UxNB [1], , 可在缺少、过载或受损的地面基础设施区域提供蜂窝覆盖。已有多种原型证明，完整的蜂窝协议栈可以在无人机上运行，从早期的 LTE 系统 [2] 到近期基于开源软件和商用现成硬件构建的空中5G基站 [3]。能耗是 UxNB 运行的主要障碍，因为同一块电池同时为推进系统和基站载荷供电。尽管推进系统通常占据主导地位，UxNB 载荷的能耗也不可忽略：基于商用现成硬件的空中5G分布式单元在有流量时的功率约为 28W [4], , 且其功率会随负载变化。与推进系统不同，这部分功耗可由无线接入网控制，因此自然成为智能控制的目标。

开放式无线接入网架构通过部署在其无线接入网智能控制器上的 AI 驱动 xApps 和 rApps 实现了此类控制。基于学习的控制器已经能够降低地面基站和虚拟化基站的能耗 [5], , 并且已有类似方法被提出，用于优化无人机基站的部署位置、轨迹和资源 [6]。然而，地面解决方案是为地面小区设计的，而
无人机解决方案通过基于解析功耗模型的仿真进行评估。一个限制因素是缺乏真实测量数据。虽然有公开的无人机飞行能耗轨迹，但由于机上没有基站，公开的基站功耗测量数据是在地面采集的 [7], , 而我们发现的唯一公开无人机基站功耗数据集是根据解析模型计算得出的 [8]。与此同时，UxNB 原型报告了网络性能，却没有公布 UxNB 各部分的详细能耗轨迹。这一缺口之所以重要，是因为学习型网络控制器在仿真中表现良好，却往往无法在真实系统中取得同样的提升 [9]。

作为弥合这一差距的第一步，本演示展示了一个基于无人机的5G测试床，用于对UxNB进行能耗与性能表征。该测试床搭载了一个采用20MHz载波、吞吐量最高可达100Mbps的5G微微蜂窝，由商用组件构建，并同步记录基站系统指标、无人机飞行遥测数据和无线接入网性能指标。通过并列展示这些指标，本演示提供了可用于设计和验证面向非地面开放RAN的能效感知型人工智能控制器的真实数据。

II. 测试平台与方法

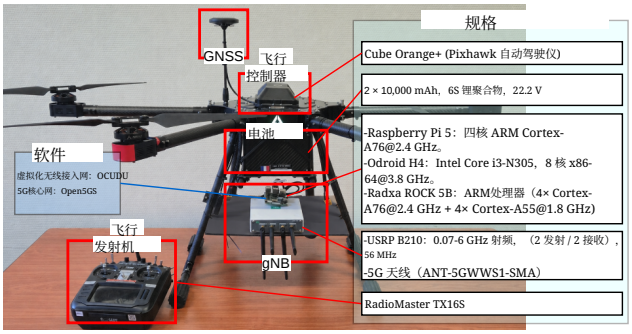


图1. UxNB测试平台硬件。

无人机平台。 UxNB基于Aurelia X6六旋翼无人机搭建，搭载运行ArduPilot自动驾驶仪的Cube Orange+飞行控制器和全球导航卫星系统（GNSS），由两块10,000 mAh 6S锂聚合物电池（22.2 V）供电，如图1所示。该平台最多可承载5 kg载荷，不搭载载荷时飞行时间约为30分钟，满载时约为13分钟。运行于另一台独立机器上的Mission Planner地面控制站负责控制飞行并接收飞行遥测数据。

gNB载荷。 该 gNB 采用图 2 所示的拆分架构：USRP B210 SDR 作为射频单元，单板计算机（SBC）则运行搭载 OCUDU虚拟化无线接入网协议栈和 Open5GS 5G核心网的基带处理。我们测试了三款 SBC：两款 ARM开发板——Raspberry Pi 5 和 Radxa ROCK 5B，以及一款 x86开发板 Odroid H4，以比较

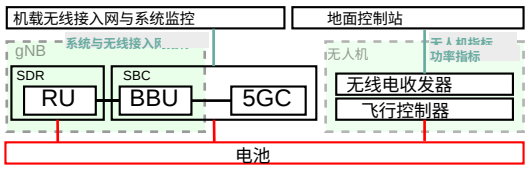


图 2. 测试床架构及监测指标组。

计算平台类型会影响能耗和性能。该小区运行在 n77 频段的 20 MHz 载波上，根据分配给 gNB 的处理资源，可为两台商用用户设备提供最高 100 Mbps 的速率。gNB 硬件重量不到 1 kg。由于 gNB 和 5G 核心网均部署在机载，UxNB 作为一体化网络运行，无需通过回传连接外部核心网 [10]。

监控系统。我们设计了一套轻量级监控系统，以极低的资源开销采集 gNB 指标，因为在受限的处理单元上，监控开销会与虚拟化无线接入网争用 CPU 时间，并可能导致处理超时和数据丢失，尤其是在物理层 [11]。功耗由无人机电源模块测量，并由飞行控制器连同飞行指标一起报告给地面站。所有指标共用一个公共时间基准；主要指标列于表 I，完整指标清单及采集脚本见 https://gitlab.roc.cnam.fr/srour/uxnb-testbed。**监测指标**。除 CPU 利用率和内存外，系统还记录上下文切换、线程数以及指令数、周期数和缓存未命中数等处理开销指标，以反映受限开发板运行虚拟化无线接入网的效率。系统还监控处理单元与 SDR 之间承载连续 I/Q 采样流的前传接口，以及承载用户流量的回传链路，因为在这类小型平台上，这些接口可能先于 CPU 成为吞吐量瓶颈。在虚拟化无线接入网内部，系统按层采集处理指标，涵盖按信道统计的物理层处理时间和任务队列深度，以及 SDAP、PDCP 和 RLC 处理的数据量，从而可以追溯流量负载、信道条件和配置的影响具体出现在哪一层。

方法。端到端下行链路和上行链路测试将 offered load 逐步提升至最大可实现吞吐量，该吞吐量受 20MHz 带宽或单板计算机的处理能力限制，因为每块板卡的 CPU 和接口能力不同，所能达到的数据速率也各不相同。测试考虑了两种场景：无人机保持静止并为两个 UE 提供服务，两个 UE 先保持静止，随后移动，同时采用不同的流量配置。首先，在 50 Mbps 下，Odroid 的 BBU 功耗达到 18W，Pi 5 为 8W，Radxa 为 7.6 W，分别比空闲状态高出 12.5%、31.2% 和 27%。

III. 演示

该演示展示了第二节所述两个无人机静止场景的录制视频，并在与视频同步的仪表板上回放录制的指标。仪表板显示系统三个部分的功耗：虚拟化无线接入网处理、射频单元和无人机。除功耗外，仪表板还显示驱动系统的系统指标和RAN指标，即CPU利用率、分配的PRB、调制与编码方案和误块率，以及端到端吞吐量，使参会者能够了解流量和UE移动性如何影响能耗和性能。最后，仪表板对比三个处理板，突出显示ARM与x86平台在功率和可实现吞吐量方面的差异。

表 I 监测指标

类别	指标
功率指标	
电池	电压、电流、功率、已消耗容量（BBU、射频单元、推进系统）
无人机指标	
飞行	位置、高度、速度、姿态、电机输出、GPS状态
系统指标	
CPU/系统	频率、利用率、常驻集大小、线程、上下文切换、周期、缓存未命中
温度	CPU/SoC 温度、热节流状态
接口	前传和回传链路数据速率
RAN指标	
物理层处理时间（物理下行共享信道、物理上行共享信道、物理下行控制信道、物理上行控制信道）每时隙时间	
缓冲区	RLC、媒体接入控制下行链路/上行链路、物理上行共享信道、物理层、FAPI、混合自动重传请求
HARQ	确认/否定确认、重传、丢弃、超时
无线电/射频	发送延迟、下溢、上溢
链路质量	信道质量指示、秩指示、调制与编码方案、误块率、信噪比、物理资源块、队列时延
端到端吞吐量下行链路/上行链路速率、吞吐量、抖动、丢包	

IV. 结论与未来工作

本演示介绍了一种基于无人机的5G测试床，可在三个处理平台上联合记录UxNB的能耗、计算资源使用情况和无线接入网行为。未来，我们将扩大测量范围，并将所收集的数据作为开放数据集发布，用于训练和验证面向能耗的AI控制器，例如用于非地面开放无线接入网的xApps和rApps。

致谢

本研究由 France 2030 IE6（6G边缘互联网；合同编号 DOS0223931）和 IPCEI ME/CT（合同编号 DOS0239248/00）项目资助。

参考文献

[1] 3GPP，《无人驾驶航空器（UAV）增强；第1阶段》，3GPP，技术报告 TR 22.829，2019。[2] A. Chakraborty 等，《SkyRAN：空中的自组织LTE RAN》，发表于 *ACM CoNEXT*，2018。[3] D. Mishra 等，《SKY5G：面向按需空中连接的5G空中基站（UAV-BS）原型开发》，发表于 *IEEE WCNC*，2024。[4] M. Duboc 等，《迈向轻量级空中5G gNB：基于商用ARM平台的可复现OAI测试床》，arXiv，2026。[5] J. A. Ayala-Romero 等，《面向虚拟化RAN的能量感知资源编排的贝叶斯在线学习》，发表于 *IEEE INFOCOM*，2021。[6] C. Pham 等，《O-RAN中的RAN智能控制器与多无人机赋能无线网络相遇》，*IEEE TCC*，2023。[7] J. A. Ayala-Romero 等，《虚拟化基站功耗的实验评估》，发表于 *IEEE ICC*，2021。[8] 6G-DATADRIVEN，《配备可再生能源系统（RES）和可重构智能表面（RIS）的多旋翼及固定翼型无人机基站功率平衡特性》，Zenodo，2024。[9] F. Y. Yan 等，《原位学习：一项关于视频流媒体的随机实验》，发表于 *USENIX NSDI*，2020。[10] M. Moradi 等，《SkyCore：将核心网移至边缘，实现无系留且可靠的基于无人机的LTE网络》，发表于 *ACM MobiCom*，2018。

[11] A. Srour 等，“ALARM：面向功率高效虚拟无线接入网的自适应层感知资源管理”，载于 *IEEEGLOBECOM*，2026年。