IEEE 无线通信杂志上发表。引用时请写作：A. S. Abdalla 和 V. Marojevic，“下一代智能低空经济部署：开放无线接入网视角”，《IEEE 无线通信杂志》，2025年12月。1

下一代智能低空经济部署：开放无线接入网视角

Aly Sabri Abdalla 和 Vuk Marojevic，密西西比州立大学电气与计算机工程系，美国。电子邮箱：{asa298;vuk.marojevic}@msstate.edu

摘要——尽管人们对低空经济（LAE）应用的兴趣日益浓厚，包括无人机物流和应急响应，但在复杂、信号受限的环境中编排此类任务仍面临根本性挑战。其中包括缺乏实时、稳健且具备环境感知能力的空中节点编排，以及针对低空经济任务的人工智能（AI）集成有限。本文提出一种由开放无线接入网（O-RAN）赋能的低空经济框架，通过解耦式无线接入网架构、开放接口与无线接入网智能控制器（RIC）之间的无缝协同，实现闭环、人工智能优化且任务关键型的低空经济运行。我们通过一个语义感知 rApp 评估所提架构的可行性与性能。该 rApp 充当地形解释器，为由强化学习驱动的 xApp 提供语义指导；后者为低空经济无人机群节点执行实时轨迹规划。我们综述了可用于低空经济研究的无人机测试平台能力，并指出关键研究挑战和标准化需求。

索引词——低空经济、开放无线接入网、无人机、轨迹优化、基于视觉的残差网络、多智能体学习、试验平台。

I. 引言

低空经济（LAE）是一种新兴范式，利用不同类型的无人驾驶航空器（UAV）和人工智能（AI），推动物流、农业、监控和公共安全等领域转型。通过提供低成本、高效率的服务，包括高精度感知、数据收集和快速配送，低空经济提升了城市和偏远地区的运营覆盖范围。与传统运输与配送方式相比，低空经济支持实时反馈并减少环境影响；同时，它扩大了应急响应、医疗服务配送和环境监测等关键服务的可访问性。尽管潜力巨大，空中服务的大规模部署仍面临诸多挑战，包括监管限制、技术限制和基础设施限制。为确保异构空域和空中平台中的安全、可扩展运营，需要建立统一框架，以提供实时感知与决策、协同多模态导航，以及自适应飞行调度和空域管理 [1]。

现有蜂窝网络和自组织网状网络在支持低空经济运行方面存在若干局限，包括：（i）在部分可观测性条件下，缺乏基于任务的编排；（ii）控制回路仅支持单一时间尺度；（iii）网络适应新服务需求的能力有限；以及（iv）三维环境下的覆盖率和通信可扩展性有限。开放无线接入网（开放无线接入网）引入了一种新的网络架构，旨在促进开放性、智能化、虚拟化和互操作性。该架构对传统无线接入网组件进行解耦，并引入开放接口，从而支持多厂商无线接入网部署、服务可扩展性，以及通过人工智能驱动的无线接入网智能控制器（无线智能控制器）[2] 实现创新。开放无线接入网的近实时和非实时无线智能控制器支持闭环、多时间尺度优化，以及对网络资源和用户服务的策略驱动编排。这与可扩展的低空经济部署需求相契合；在此类部署中，实时决策、自主协同、高效资源利用，以及空地通信的无缝共存都至关重要。

在开放无线接入网的支持下，本文提出了一种原生人工智能编排框架，该框架融合语义先验与在线指标，并通过多时间尺度控制回路，在部分可观测三维空域中稳定实时决策。相比之下，现有文献（如 [3], [4]）完全依赖链路级指标，缺乏任务条件语义和环境不确定性感知，侧重于扩大空中覆盖率，并且只是将人工智能整合到现有系统中，而非设计原生人工智能通信与控制。早期的开放无线接入网-无人机研究仅停留在架构可行性和关键绩效指标（KPI）报告层面；这类研究考虑的是单时间尺度策略控制环路，而非非实时和近实时无线智能控制器编排，也未考虑低空经济特有的任务/条件 [5], [6]。据我们所知，这是首个由开放无线接入网支持的低空经济框架，它将环境语义与面向低空经济集群、以任务为条件的双时间尺度控制相结合。

本文其余部分安排如下：第二节介绍低空经济用例及各用例的相关需求。第三节探讨开放无线接入网作为低空经济运行关键赋能技术的潜力。第四节介绍一个概念验证用例，用以验证无线智能控制器之间在低空经济集群导航中的协同作用。第五节介绍三个支持低空经济研究实验的无人机测试平台。第六节探讨扩展开放无线接入网赋能的低空经济能力所面临的关键开放问题及研发方向。第七节概述未来低空经济标准化所需的核心要素，第八节则给出总结。

表I：具有代表性的低空经济用例、性能指标及开放无线接入网赋能的功能。

应用 主题		**QoS** 需要— 部署	**Key** 约束条件	规模	能耗 消耗 **tion**	开放无线接入网无线智能控制器赋能的低空经济功能 性
城市空中交通	时延 敏感性- ity, High 移动性	端到端时延 <10 ms, 99.999% 可靠性, 抖动 <1 ms, 切换 故障 rate <0.01%, 吞吐量 >500 Mbps	三维轨迹 规划, 切换, 城市 峡谷 效应	数百 of UAVs in 密集的 城市 区域	High （连续 飞行，安全 冗余）	近实时无线智能控制器/xApp：实时波束 赋形和预测性切换，通过 信干噪比 (SINR)/多普勒反馈。 非实时 RIC/rApp：轨迹聚类和 预测、切片重新分配、无人机群 级策略泛化，以及长期 时间范围的移动性模式预测。
应急 响应 & 灾害 恢复	时延 敏感性	时延 <20 ms, 上行链路 >100 兆比特每秒、丢包 <0.01%，覆盖率 >95% 在灾 区	动态 地形, 间歇性 链路	数十个 UAVs in 受影响的 区域	中等至 High （悬停- 运营 +支付- load （运行） 作-	近实时无线智能控制器/xApp：自适应频谱- 重新分配和资源块调度 用于控制和非载荷通信- 通信（指挥与非有效载荷通信）的优先级处理，适用于分 级条件。非实时RIC/rApp: 利用灾害 拓扑进行联邦模型训练，以实现策略估计、 自主重路由， 以及故障 模式推理。
智慧城市 监控- 功能	时延 敏感性- ity, Edge 计算- ing	视频延迟 <30 毫秒，加密数据 rate >200 兆比特每秒, 上行链路 可靠性 >99%	多无人机 同步、隐私 保护	数千 任务 每日 城市- wide	中等 (持续 监视 模式)	近实时无线智能控制器/xApp：上行链路流 以及无人机间通信优先级 化和多智能体控制。非 RT RIC/rApp：事件驱动分析、 自适应异常检测和切片 流量整形，以实现服务质量（QoS）保障;
传输层 化 and 交付	高移- 动性	Path 重新校准 <500 ms，交付 准确率 < 1 m, 控制 link 可用性 >99.9%, 切换 时延 <50 毫秒	禁飞区, 有效载荷平 衡	Tens of 数千 次运 送/天	中等 （频繁 发射/ 着陆 周期）	近实时 无线接入网智能控制器/xApp: 能耗感知的 网络 切片分配和 path 更新。非实时RIC/rApp: 元- 策略学习以优化能耗- 时延权衡，并进行策略迁移 for 能耗 and 拥塞感知 路由。
基础设- ure 巡检	高移 动性	连续 视频 反馈 <100 毫秒, 控制链路延迟 <20 毫秒	连续 data 获取 大型基 础设施, 不稳定性 in 近 距离	取决于 资产的 type and 任务 紧急程度	Low to 中等 （悬停 关注 操作）	近实时 无线接入网智能控制器/xApp: 邻近性 触发 fast 切换/回退, 障碍物感知波束/零陷控制和 功率控制。非实时RIC/rApp: 数字化 twin 策略 训练 for 轨迹 规划, 切片 pre- 配置, and 异常模式 挖掘。
精准 农业- ture	Edge 计算- ing	任务到决策 延迟 <1秒，更新 rate 10–30 min, 农村 连接性 >90%, 链路余量 >10 分贝	农村覆盖- age, 电池 续航	现场级 部署- 部署	Low （间歇性 感知）	近实时 无线接入网智能控制器/xApp: 广域 按需扩展覆盖率 UAV 中继, 突发模式 上行链路 调度 for 周期性 感知。 非实时 无线接入网智能控制器/rApp: 季节感知型 任务规划与田块级深度 学习，用于作物/土壤建模和 分析。

II. 具有代表性的低空经济应用及技术要求

低空经济涵盖多个工业部门和应用，各自具有不同的运行目标、服务质量（QoS）要求和约束条件。表I列出了具有代表性的低空经济用例，以及相应的性能指标和开放无线接入网赋能功能。服务质量要求根据 3GPP 标准化工作组定义的无人机用例和应用得出 [7]。

A. 城市空中交通

城市空中交通（UAM）是要求最严苛的低空经济场景之一，要求端到端时延低于 10 毫秒 低时延和高可靠性（≥99.999%），以确保无人机能够在拥挤的多层空域中安全自主导航。这需要借助预测性移动模型，通过对无人机进行精准定位来维持通信连续性。协同轨迹优化还必须纳入动态边缘计算卸载，以支持机载路径重新计算和交通管理。大规模城市空中交通场景需要编排数百架无人机，而每架无人机的推进能耗都很高，并且需要进行上下文感知策略自适应。

B. 应急响应与灾害恢复

用于灾害响应的低空经济节点部署在基础设施匮乏的环境中，执行搜救、损害评估和必需物资运送等任务。这些任务要求空中节点能够在快速变化的条件下运行，例如网络覆盖有限、移动模式难以预测。有效的无人机辅助应急响应需要网络提供可靠的低时延通信链路、超过 100 兆比特每秒的上行带宽，以及灵活的备用策略（包括冗余无人机中继），以支持实时视频流传输和自主决策，同时最大限度减少对地面基础设施的依赖。

C. 智慧城市监控

此用例利用配备高分辨率摄像头的低空经济平台集群和边缘处理单元，实现连续城市监测、人群分析和执法支持。这些任务频繁开展，需要低延迟（<30 毫秒）以及超过 200 兆比特每秒的加密上行链路，以支持实时分布式视频处理和跨智能体同步。在人口稠密区域运行时，智慧监控无人机通常需要进行无人机间协同，以实现分布式编队控制、目标跟踪和行为预测，并运用联邦边缘分析进行人脸识别、异常检测和事件优先级排序等。遵守数据隐私策略需要采用匿名化协议、自适应比特率控制和强健加密。

D. 运输与配送

自主空中运输与配送必须满足严格的定位与跟踪约束，包括亚米级配送精度、拥塞感知路由、持续跟踪支持，以及低于 500 ms 的路径重新校准时限。考虑到配送无人机的预期高密度，避碰成为一项重大挑战。机载能耗模型必须适应动态飞行时间、载荷重量和任务紧迫性，因此需要针对每个配送节点进行功率感知策略优化。

E. 基础设施检查与维护

无人机可对输电线、管道和塔架等关键基础设施进行详细巡检。感知与控制信令必须在不确定条件下保持稳健，并采用容错分组处理机制；为确保指挥与控制（C2）可靠，时延不得超过 20 毫秒。视觉数据及其他传感器数据必须在本地或边缘进行处理，以开展结构完整性评估、缺陷标注和维护优先级排序，这需要机载计算和任务感知资源调度。

F. 精准农业

在农业和环境监测场景中，空中节点会在广阔区域开展多光谱成像、土壤湿度制图和害虫检测，并执行周期性或事件触发式感知任务。这些任务依靠边缘推理和本地化决策，减少对云连接的依赖，尤其是在连接受限的区域。这里的时延限制较为宽松，但农村覆盖可靠性应高于 90 %，能效至关重要。通常采用太阳能辅助或低占空比能量补充策略，并结合自适应飞行路径规划和数据卸载机制。

III. O-RAN赋能的LAE

开放无线接入网构建了一个解耦、模块化且智能化的无线网络。它能够在密集、移动且安全关键型LAE环境中，对频谱、移动性和计算资源进行动态编排。

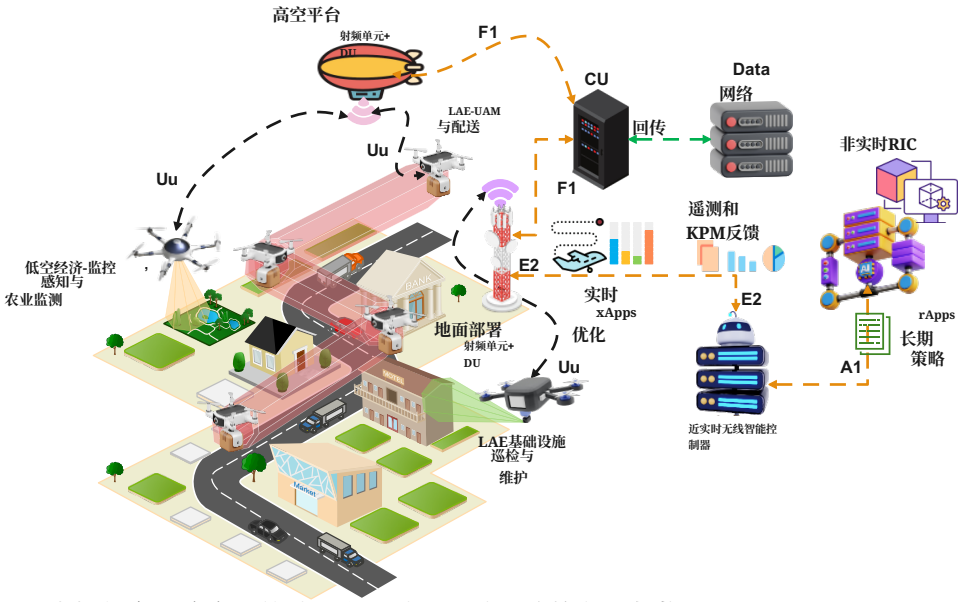


图1：支持低空经济应用的地面和非地面开放无线接入网架构。

A. 面向低空经济的解耦式 RAN 组件

开放无线接入网架构将传统的单体式无线接入网模块化为三个逻辑组件：射频单元、分布式单元和集中式单元（RU、DU、CU）。这些组件通过标准化的开放接口互联：开放前传（位于RU与DU之间）、F1接口（位于DU与CU之间）、A1（位于非实时无线智能控制器与近实时无线智能控制器之间）以及E2接口（位于近实时无线智能控制器与DU/CU之间）。

射频单元负责射频（RF）信号的发送与接收、波束成形，以及模数/数模转换。在低空经济场景中，射频单元可部署于地面基础设施和移动空中平台上，例如将系留无人机用作空中射频单元，并根据需要灵活部署，以提升重点区域的覆盖率和容量。

分布式单元与多个射频单元交互，并执行较高层级的第1层处理和部分第2层处理，以支持指挥与控制以及时间敏感型载荷传输。它执行任务关键功能，包括资源块（RB）调度、移动性管理和混合自动重传请求（HARQ）反馈处理。将分布式单元部署在地面边缘计算节点附近，可实现与人工智能推理的紧密集成。

集中式单元执行部分第2层及更高层协议操作，并管理核心网与无线接入网之间的连接。集中式单元汇总来自多个分布式单元的控制信息，并执行集中式资源编排和会话管理。集中式单元通过协调不同任务配置下的频谱和计算资源，支持低空经济部署的垂直扩展，例如高吞吐量视频监控和对时延要求严格的城市空中交通。近实时和非实时无线智能控制器中由数据驱动算法生成的策略更新和移动模式，会在集中式单元中实施，以确保符合全网服务级别协议（SLA）和空域限制。

这种模块化、基于标准的功能分离有助于网络扩展和重新配置。它还支持未来扩展，例如纳入机载射频单元或边缘计算增强型分布式单元等。

B. 用于智能空中控制的近实时与非实时无线智能控制器

低空经济需要动态的长期网络优化，以便在日益密集的空域中提供不断演进的服务。开放无线接入网智能控制器构成了智能控制与优化的大脑，能够实现先进的决策和网络可编程性。无线智能控制器在逻辑上分为近实时无线智能控制器和非实时RIC，二者分别提供各具特色又相互补充的控制功能，对于管理异构用户、服务和系统多样的服务质量需求及动态行为至关重要。

非实时RIC以秒级及以上的时间尺度运行，负责策略生成、人工智能模型训练和长期分析。非实时RIC生成的策略和模型通过A1接口分发至近实时无线智能控制器，用于近实时无线接入网控制，从而根据长期趋势和战略目标实现连续自适应。对于低空经济，非实时RIC汇总来自无人机和无线接入网的测量数据，以识别数据流量、空域利用率、干扰热点和任务需求中的模式。它执行的功能包括：

- 策略学习与编排：利用历史飞行路径数据和无线电地图生成用于切换、波束切换和移动性的预测策略。
- 模型训练：使用联邦式或集中式学习框架，训练用于轨迹预测、自适应资源块分配和节能路由的人工智能模型。
- 跨切片优化：通过智能策略调整，平衡多个无线接入网切片的全网性能，例如低时延的指挥与非有效载荷通信、高吞吐量通信和高分辨率射频感知。

近实时无线智能控制器部署在更靠近网络边缘的位置，以 10 毫秒至 1 秒为时间尺度运行，并通过 E2接口直接与无线接入网节点交互。它通过 xApps 执行对时间敏感、由状态驱动的决策；xApps 是轻量级软件代理或微服务，可实现由第三方提供的基于人工智能/机器学习的控制功能。这些 xApps 持续接收低空经济测量数据和网络关键绩效指标（例如吞吐量和分组错误率），生成控制信号，并通过 E2应用协议消息将其传送至无线接入网，再由无线接入网传送至低空经济节点，以立即执行控制。近实时无线智能控制器支持：

- 实时移动性管理：利用抗多普勒信号测量和轨迹估计器，为高速移动的无人机实现预测性切换和波束跟踪。
- 动态频谱协调：基于信道测量与反馈、高度变化和用户密度，为空中用户提供具备干扰感知能力的资源配置。
- 流量fi引导：根据优先级、服务质量和拥塞感知，平衡网络数据流。

通过实现近实时与非实时控制协同，无线智能控制器架构可支持动态无人机运行，并为表I所列的多个低空经济用例提供智能、任务自适应的服务交付。因此，开放无线接入网具备支持可扩展低空经济运行所需的灵活性、多时间尺度控制和低时延响应能力。

图1展示了所提基于开放无线接入网的架构，该架构利用高空平台站支持地面和空中部署。两种部署方案均可采用射频单元/分布式单元/集中式单元、近实时与非实时无线智能控制器，以及标准化的E2、F1和A1接口，在各种低空经济垂直行业中实现动态控制协同。

IV. 用例：具备信干噪比感知的基于O-RAN的低空经济视觉辅助路径规划

我们模拟多架无人机在复杂、信号受限且障碍物密集的地形中执行医疗物资和补给配送任务。每架无人机都必须规划一条无碰撞路径，在导航环境中伺机利用高信干噪比位置，以支持控制信令和轨迹更新，同时确保任务可靠执行 [8]。这一信干噪比引导的轨迹优化问题被建模为约束马尔可夫决策过程，其中每个无人机智能体选择一个轨迹动作向量，以最大化

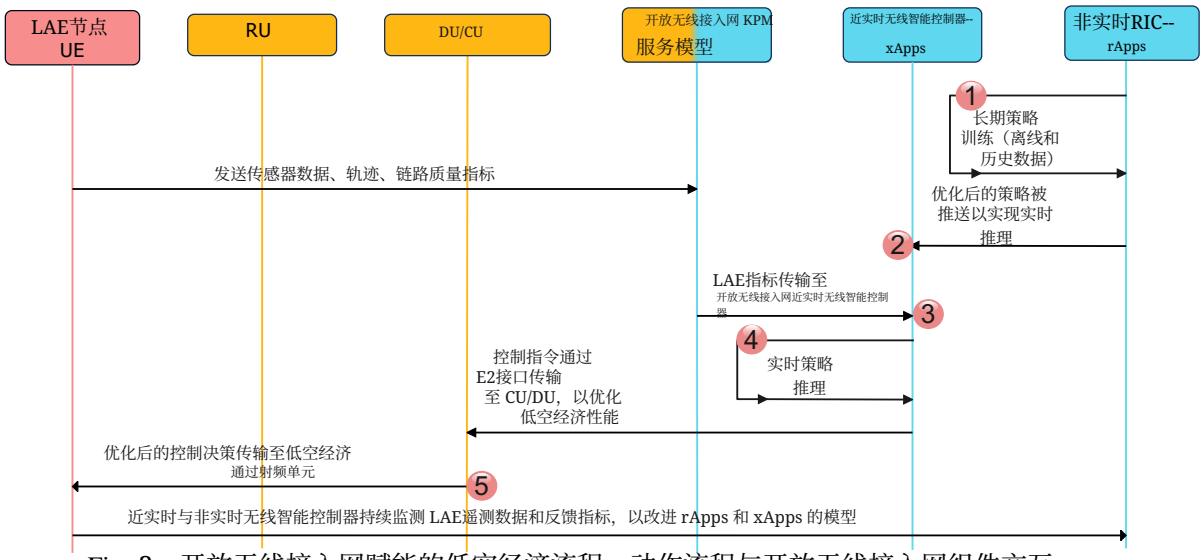


Fig. 2：开放无线接入网赋能的低空经济流程：动作流程与开放无线接入网组件交互。

长期累积奖励，同时满足避碰、服务质量（信干噪比）以及任务/区域约束。基于来自非实时无线智能控制器的语义特征输入，以及从低空经济节点获取的实时信干噪比反馈，多智能体深度确定性策略梯度（MADDPG）xApp中的集中式评论家和分散式执行者协同优化轨迹动作，从而实现无碰撞且能感知信干噪比的飞行。该案例研究展示了解耦式无线接入网与其人工智能原生控制环路之间的相互作用，如图 2 所示。

操作流程始于基于残差网络的语义特征提取 rApp，该应用使用城市环境的高分辨率离轴影像进行离线预训练，如图 3(a)-步骤 (1) 所示。借助真实世界的空中建筑场景数据集 [9]，此 rApp 执行像素级分割，以识别地形感知语义特征，例如建筑密度、城市遮挡结构和垂直障碍物。通过将低层级图像边缘细节与分层上下文编码相结合，残差网络模型可提取浅层空间纹理和深层语义抽象 [10]。这些语义表示构成一个空间知识库，并定期通过 A1接口分发至近实时无线智能控制器，为任务规划和轨迹优化器 xApp 提供信息（图 3(a)-步骤 (2)）。这些语义特征由置信度指标进行门控；如果语义置信度因分辨率低、遮挡或光照变化等因素而降低，则仅使用无线链路指标进行引导。

多智能体深度确定性策略梯度 xApp 按照图 3(b)所示进行集中式训练和分散式推理。在每个近实时区间内，每个低空经济节点的行动者都会持续收集关键性能测量报告，包括通过 E2接口传输的信干噪比和无人机位置（图 3(b)-步骤 (3)），以及通过 A1接口从 rApp 接收的置信度门控语义特征。随后，该行动者会动态优化智能体专属轨迹动作向量，调整其航向、高度和行进距离，以最大化联合奖励函数；该函数综合考虑服务质量、无人机间碰撞裕度、与目标位置的距离以及地形感知安全约束。奖励还会对不必要的高度变化、无法到达的目标目的地以及飞出任务区域的行为进行惩罚。集中式评论家通过最小化时序差分误差进行训练，并使用无人机群收集的重放轨迹训练滞后目标网络；每个样本都包含智能体观测、动作、奖励和下一观测。随后，所得梯度通过确定性策略梯度更新分散式行动者，更新后的行动者继而用于推理（图 3(b)-步骤 (4)）。优化后的控制命令通过 E2接口传送至无线接入网，再由其通过无线接入链路转发给低空经济节点（用户设备）（图 3(b)-步骤 (5)），从而完成图 2 所示的闭环决策周期。

图 3(c)展示了四个低空经济节点在建筑密集的城市区域中运行时的优化轨迹。这些节点从同一初始区域出发，任务是前往不同的目标位置执行配送任务。图中展示了四条无人机轨迹路径，并根据信干噪比以不同颜色标示，叠加在基于模拟城市无线传播模型生成的信干噪比表面图上。图 3(c)所示环境对建筑物高度和地形坡度进行建模，而信干噪比地图则反映了遮挡、距离和衰落造成的覆盖差异。多智能体深度确定性策略梯度收敛后，引导无人机沿信干噪比增强的空中走廊飞行，同时保持轨迹间距以避免碰撞。

图 4(a) 绘出了所提方法的轨迹，并与三种基线方法进行比较：最短路径、非语义强化学习（RL）和非 SINR 语义强化学习。最短路径飞行路线是起点与终点之间的直线。非语义强化学习策略利用 SINR 反馈优化轨迹，但不使用来自 rApp 的语义输入。非 SINR 语义策略利用源自 rApp 的语义信息，但缺乏对 SINR 的感知。最短路径和非语义强化学习的轨迹与障碍物相交，因而违反间隔约束并导致碰撞，而

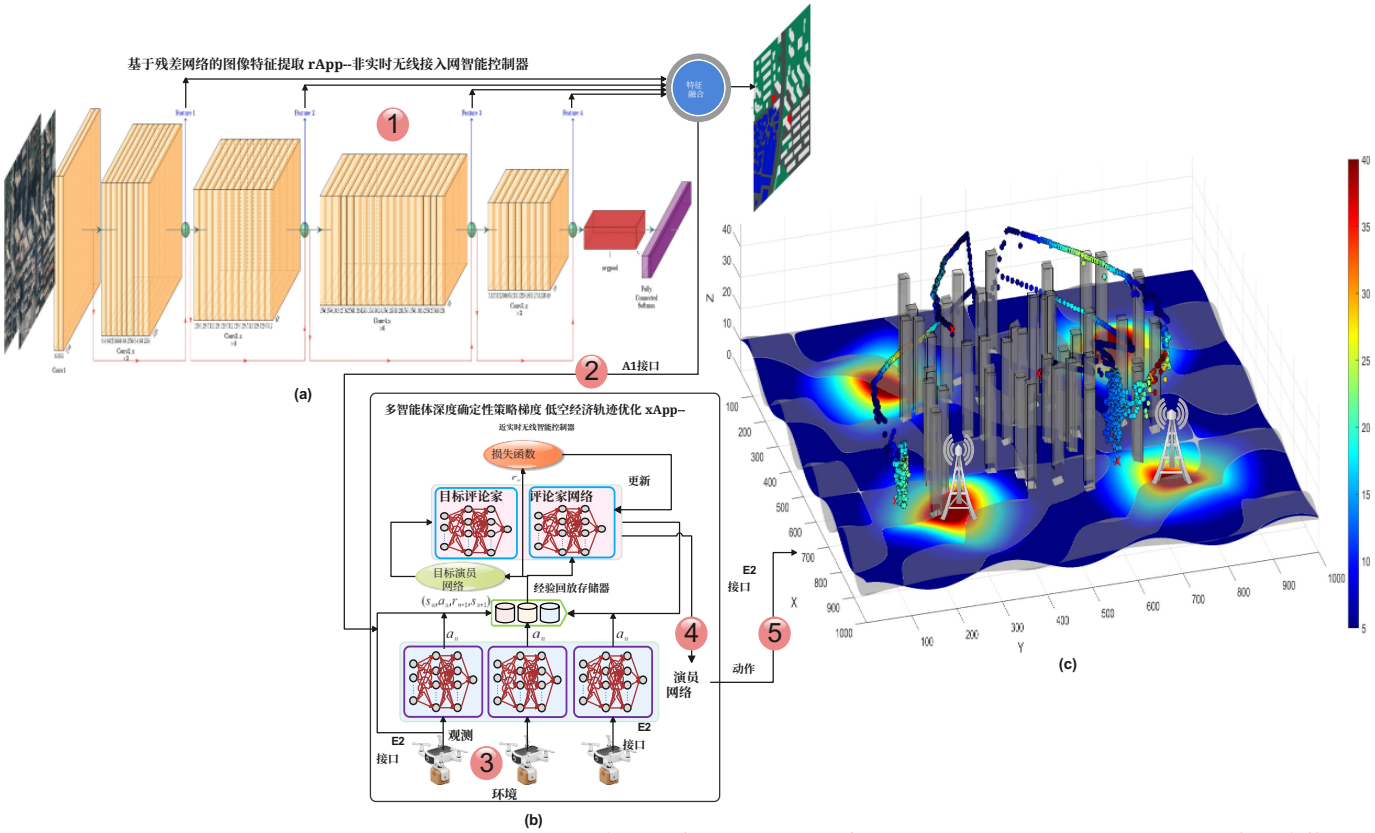
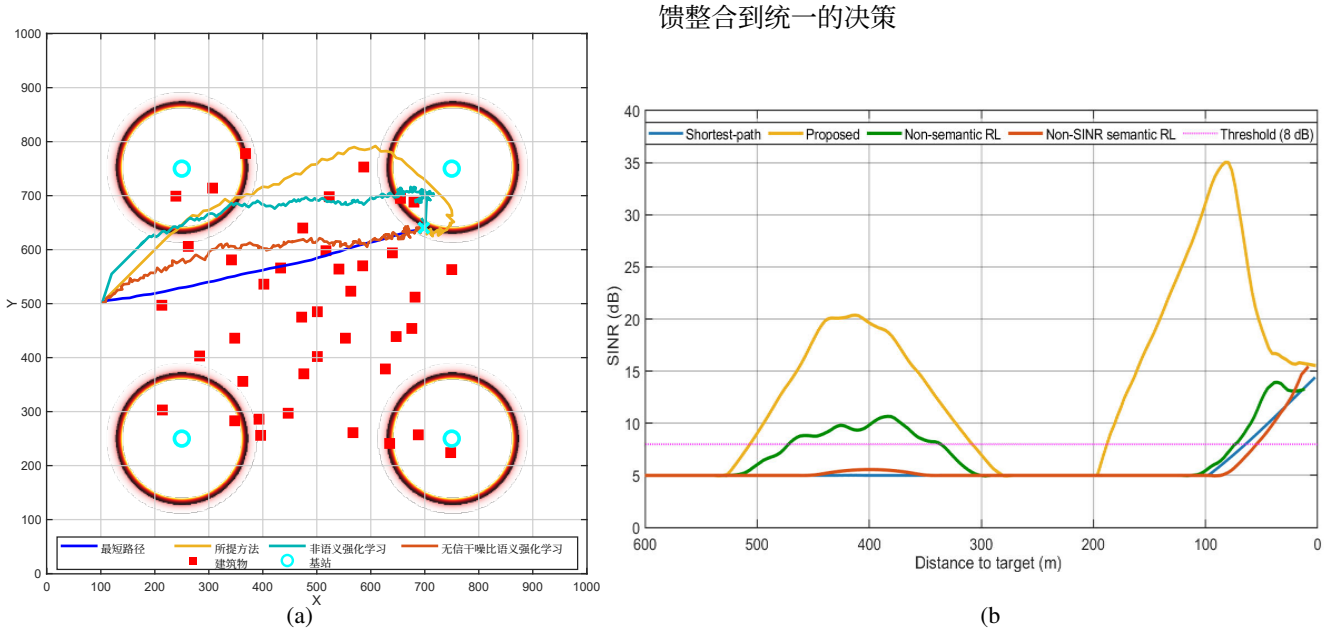


图 3：基于残差网络的语义特征提取 rApp 架构 (a)、多智能体深度确定性策略梯度轨迹优化器 xApp (b)，以及四个低空经济节点与四个蜂窝基站的无线接入网通信时的优化轨迹及沿途信干噪比 (c)。

所提路径保持无碰撞。由于缺乏链路质量感知，非 SINR 语义轨迹虽能避开障碍物，却会穿行于低 SINR 区域。图 4(b) 绘出了所提方法和三种基线方法的 SINR。与基线方法相比，所提方法在热点区域附近能够维持显著更高的 SINR，并以更少且更短的低于目标 SINR（8 dB）的时段到达目标

三种基线方法。

这些结果凸显了所提开放无线接入网赋能低空经济框架的有效性。该框架能够在密集、动态的低空无人机部署场景中，有效协调语义推理与信干噪比感知策略学习。通过将任务前语义上下文特征扩展和任务执行期间的信令反馈整合到统一的决策



）图 4：单架无人机的所提轨迹与三种基线轨迹解的对比（a），以及这些轨迹随目标距离变化的可达信干噪比（b）。

表II：用于低空经济研发的基于无人机的测试平台能力。

能力 / 特性	AERPAW	SkyRAN / SkyHAUL	EuroDRONE
通信节点	搭载 OpenAir- 的空中用户设备和 gNodeB Interface 5G独立组网 SDR 部署 ment	无人机上的完整 4G无线接入网/核心网	主要 UE / 车对万物（V2X）角色
移动性感知	实时 无人机跟踪， 切换，边缘移动性	自适应地形感知波束管理 ment	自主无人机轨迹与多链路路由
频谱 **Band**	6 GHz 以下频段、毫米波、C 波段、LoRa	4G 频段 + Sky 中的毫米波变体- HAUL	2.4 GHz / 5 GHz WiFi + 6 GHz 以下频段- GHz + 4G
数字 **Twin** 集成	射频、同相/正交和协议级仿真	纯实体无人机平台	实体无人机 + 软件规划— 设计，无协同仿真
测试平台规模	多节点，联邦航空管理局— 航空管理局（FAA）批准的飞行区域（Lake Wheeler Field Labs）	多无人机网状网络 + 地形适应（室外、地形敏感）	配备异构 无线电设备的无人机集群（城市空中走廊模拟—— tion)
潜在 LAE 应用场景	城市空中交通、无人机作为gNodeB、实时频谱共享、边缘人工智能	灾难恢复、空中无线接入网测试 自适应覆盖扩展	协同巡检、车联网 无人机走廊、人工智能规划
可访问性	面向科学家和工业界开放，远程可访问、容器化、开放源代码软件	封闭的工业界研究与开发项目，有限的公众访问权限	主要 内部 研究试验平台

闭环中，该框架能够为低空经济的多种垂直领域实现稳健的轨迹规划。尽管本文展示的用例针对无人机配送服务，但开放无线接入网赋能的框架设计也适用于基于集群的监视、空中巡检及其他低空经济任务。

V. 用于低空经济研发的无人机测试平台与实验平台

当前迫切需要全面的系统级试验平台，以涵盖低空经济运行的全部复杂性。这需要构建稳健的实验平台，整合通信、感知、计算和控制。下文将介绍三个可支持低空经济实验的大规模无人机通信测试平台。表II总结了它们的能力。

•先进无线空中实验与研究平台（AERPAW）：AERPAW 是一个与低空经济相契合的开放研究平台。它整合了可编程软件定义无线电（SDR）、基于 PX4 的无人机，以及可通过软件编程的基站和用户设备，以支持空中通信与控制系统实验 [11]。值得注意的是，它支持在受控空域中开展数字孪生和真实飞行实验，配备固定地面节点、便携式机载无线电，以及异构连接（远距离 LoRa、4G/5G、Wi-Fi）。AERPAW 已用于建模无人机到地面传播与波束赋形、分析真实世界的天气影响、研究移动基站的切换时延与可靠性、开展空中射频源定位与频谱感知以实现动态分区，以及研究由开放无线接入网支持的空中组网 [6]。这些能力使 AERPAW 成为适用于大规模实验的平台，可用于验证低空经济特有的移动性、协同和频谱优化协议。

•SkyRAN/SkyHAUL：与传统的以用户为中心的无人机测试平台不同，SkyRAN 和 SkyHAUL 平台实现了搭载于无人机上的基站功能，飞行中的节点同时充当接入点和数据聚合器。SkyRAN 系统基于软件定义无线电运行 4G 协议栈，并根据地形和用户设备移动性实时调整波束模式和功率级别 [12]。SkyHAUL 构建了自组织的千兆无线回传网络，将多架无人机整合为中继节点，每个节点都能利用预测优化模型动态调整拓扑 [13]。这些平台为在具有挑战性的环境中实现无基础设施网络覆盖提供了实验验证。

• EuroDRONE：EuroDRONE 为自主低空经济场景下的多无线电集成提供了一个极具吸引力的框架。它集成了 2.4/5 GHz Wi-Fi 和 Sub-6 GHz 4G/5G无线电，用于自主无人机集群，以支持车到基础设施和车到车通信 [14]。该平台支持面向城市空中交通走廊的基于人工智能的轨迹规划、异构耐时延通信策略以及低时延配送服务。

VI. 开放问题与未来方向

尽管开放无线接入网和所提方法为支持低空经济运行奠定了基础，但要实现低空经济任务的端到端自主性、协同与韧性，仍需解决若干技术空白。这些挑战涉及控制、数据融合、可扩展性和实时执行。

• 部分可观测条件下的多智能体协作：低空经济部署通常会受到障碍物、感知延迟或间歇性连接的影响，从而导致状态部分可观测。应探索记忆增强策略，例如长短期记忆、门控循环单元和信念状态建模，以实现协同学习。

•可扩展性与 rApp/xApp 资源竞争：随着低空经济运行扩展到数百或数千个空中节点，开放无线接入网智能控制器必须同时支持多个 xApp 实例，每个实例处理独立的数据流。目前的开放无线接入网实现尚不支持此类

多智能体协调，尤其是在空中节点需要相互重叠但又彼此不同的控制策略时，这可能导致模型竞争、时延违规以及计算/内存压力。实现可扩展的编排需要开发竞争感知调度器和接纳控制机制（具备模型成本感知能力）、策略复用，以及带有逐智能体 QoS 标签的分布式 xApp 集群与部署。满足时延预算需要对控制平面、KPM 报告采样、微批处理和紧凑的 E2 接口载荷进行跨层协同设计，并确保符合截止期限。未来工作应探索计算资源感知策略，采用共享骨干网络、轻量级适配器、量化与稀疏化、动态 KPM 窗口和批量大小。

•数字孪生赋能的 LAE 协同仿真：缺乏能够实时对飞行物理、无线传播和网络控制进行全栈协同仿真的仿真框架与数字孪生，这给低空经济的研究、开发和运营带来了挑战。我们需要面向低空经济的数字孪生，整合三维地形感知移动性、上下文感知传播和人工智能驱动的控制环，以降低飞行故障或通信中断带来的成本与风险。此类数字孪生可集成到开放无线接入网的非实时无线智能控制器中，从而在迁移至非实时和近实时无线智能控制器中的主动智能控制器之前，利用历史数据与合成数据，在真实环境中支持基于学习的策略的开发、集成和评估。

• 低时延语义推理：尽管非实时和近实时无线智能控制器无法对网络服务进行实时控制，但许多低空经济用例（例如协同集群路径规划或任务分配）要求在数秒内甚至更短时间内做出控制决策。高分辨率语义视觉及其他语义特征提取模型会带来显著的推理开销。如何部署轻量级模型，同时不牺牲空间细节、语义准确性或推理保真度，并使其能够适应动态空域场景中常见的分布偏移，仍是一个有待研究的开放课题。

VII. 低空经济标准化

随着低空经济服务从孤立的无人机任务发展为互联空中系统，应用范围涵盖城市物流、应急响应和基础设施巡检等领域，缺乏统一且可扩展的标准化框架已成为部署的一大障碍。与受益于成熟标准化机构和供应商的地面 5G 系统不同，低空经济领域在空域监管、通信、控制和应用方面仍存在碎片化问题。

未来低空经济标准化的一项核心要求，是整合涵盖空中、地面和数字服务层的跨域基础设施。这种跨域低空经济标准化应明确关键系统需求和功能，包括实体起降机制、区域及相关要求，以及配备维护设施的场所，例如充电、传感器校准、垂直起降机场站点及其规程。此外，低空经济的动态空中作业也需要在受控和非受控空域中实现标准化，包括任务驱动的授权飞行走廊、高度层和交接区。未来的低空经济标准化还需针对低空经济集群部署编排提出要求，并使用标准数据格式实现可靠的数据交换机制。最重要的是，标准化机构需要制定分类体系，将任务意图、风险模型和监管约束编码为可互操作的服务级别协议描述符，以便在不同供应商和司法管辖区之间执行。

低空经济标准化可借鉴 3GPP 目前开展的工作。3GPP 制定了无人机通过蜂窝网络进行通信的技术规范，包括无人机的远程识别与注册、蜂窝辅助的指挥与控制通信，以及基于无人机的通信与其他网络/地面网络及用户共存等内容 [7], [15]。

VIII. 结论

本文主张采用开放无线接入网来支持低空经济运行的编排与优化。我们研究了一般性的低空经济应用案例，并提出一种模块化、人工智能原生的开放式无线接入网框架。该框架利用非实时RIC中的语义视觉无线应用，以及近实时无线智能控制器中的多智能体强化学习无线应用，在城市和信号受限环境中实现对无人机集群的智能自适应控制。所提方法支持面向任务关键需求的路径规划，并综合考虑语义地形上下文、信号强度分布和多无人机避碰。该应用案例展示了基于ResNet的rApp如何从影像中提取建筑物轮廓和地形语义，为轨迹优化无线应用提供依据。数值结果表明，该框架能够在密集的城市低空经济场景中实现高信干噪比覆盖和安全导航。这说明所提基于人工智能的低空经济控制架构与开放、解耦且人工智能原生的开放无线接入网框架兼容，并展示了跨无线智能控制器协作如何实现可扩展且任务感知的控制服务。这些发现推动了对可扩展编排、稳健的人工智能模型部署以及面向下一代开放无线接入网自主系统的领域专用数字孪生集成的持续研究。所提出的研发路径以及现有实验研究平台，为面向多样化低空经济应用的语义感知无线应用和rApp的设计、部署与实验开辟了新机遇。

致谢

本研究部分由美国国家科学基金会项目（编号 2120442 和 1939334）以及美国海军研究办公室项目（编号 N00014-23-1-2808）资助。

参考文献

[1] Y. Wang 等人，《迈向低空经济网络的实现：核心架构、集成技术与未来方向》，arXiv 预印本 2504.21583，2025年。[2] A. S. Abdalla、P. S. Upadhyaya、V. K. Shah 和 V. Marojevic，《迈向下一代开放无线接入网：开放无线接入网能做什么、不能做什么！》，IEEE Network，第 1–8 页，2022年。

[3] H. Lu、Y. Zeng、S. Ma、B. Li、S. Jin 和 R. Zhang，《面向低空经济的无线通信：无人机集群赋能的双层可移动天线系统》，arXiv 预印本 arXiv:2505.22286，2025年。[4] L. Lin、Y. Liu、L. Cao、J. Gao 和 T. Jiang，《基于半监督 GCN 的航线覆盖低空通信网络规划》，IEEE Communications Letters，第 29 卷，第 9 期，第 2178–2182 页，2025年。[5] H. Li 等人，《开放无线接入网赋能的无人机辅助通信的节能部署与资源分配》，IEEE Transactions on Green Communications and Networking，第 8 卷，1140，2024 3，1128 no. pp. – 。[6] J. Moore 等人，《下一代蜂窝网络原型：面向 AERPAW 测试平台的开放无线接入网赋能无人机实验》，IEEE Communications Magazine，第 63 卷，第 2 期，第 78–84 页，2025年。[7] A. S. Abdalla 和 V. Marojevic，《无人驾驶航空器系统的通信标准：3GPP 视角与研究驱动因素》，IEEE Communications Standards Magazine，第 5 卷，77，2021 1，70no. pp. – 。[8] S. Zhao、F. Zhou 和 Q. Wu，《一种面向低空物联网、具备多目标覆盖感知能力的智能 AAV 导航方法》，IEEE Internet of Things Journal，第 12 卷，第 8 期，第 9557–9569 页，2025年。[9] J. Wang、L. Meng、W. Li、W. Yang、L. Yu 和 G.-S. Xia，《学习从离轴航空影像中提取建筑物轮廓》，arXiv 预印本 2204.13637，2022年。[10] Y. Jia、A. Tagliabue、N. D. Tehrani 和 J. P. How，《地形感知低空路径规划》，arXiv 预印本 arXiv:2505.07141，2025年。[11] A. S. Abdalla 等人，《面向研究的开源软件无线电平台

蜂窝联网无人机：它奏效了！”《IEEE Communications Magazine》，第60卷，第2期，第60–66页，2022年。[12] A. Chakraborty 等，“SkyRAN：空中的自组织LTE无线接入网”，载于《第14届新兴网络实验与技术国际会议论文集》，2018年，第280–292页。[13] R. K. Sheshadri 等，“SkyHAUL：空中的自组织千兆网络”，载于《第二十二届移动网络与移动计算理论、算法基础及协议设计国际研讨会论文集》，2021年，第101–110页。[14] V. Lappas 等，“EuroDRONE：欧洲无人机交通管理测试平台 U-Space”，载于《2020年无人驾驶航空器系统国际会议（ICUAS）》。IEEE，2020年，第1766–1774页。[15] D. He、W. Yuan、J. Wu 和 R. Liu，“泛在无人机通信赋能低空经济：应用、技术与3GPP的工作”，《IEEE Network》，第1–8页，2025年。

Aly Sabri Abdalla (asa298@msstate.edu) 是美国密西西比州斯塔克维尔密西西比州立大学电气与计算机工程系（ECE）的研究助理教授。他的研究兴趣包括无线通信与网络、软件无线电、频谱共享、无线测试平台与测试，以及无线安全，相关应用领域包括任务关键型通信、开放无线接入网、无人机和可重构智能表面。

Vuk Marojevic (vuk.marojevic@msstate.edu) 是美国密西西比州斯塔克维尔密西西比州立大学电气与计算机工程系的 Paul B. Jacob 教授。他的研究兴趣包括软件无线电、人工智能、安全、无线测试平台与测试，相关应用领域包括蜂窝通信、开放无线接入网、车联网、任务关键型网络和无人航空器系统。