

泛在安全低空数智网技术体系 白皮书

2025年4月



摘 要

低空经济将向智能化、网联化、协同化方向演进，这引发了低空的飞行安全、交通安全、公共安全等系统性运行安全问题，需要建立通信、探测、定位、管控一体的数智化低空经济运行支撑体系。白皮书针对低空经济运营过程中因系统孤立、条块分割引发的低空运行难认知、难协同、难管控等瓶颈问题，从低空空域的安全有序运行角度出发，提出感知网、定位网、通信网、管控网、业务网五网融合的低空数智网技术体系，以满足大规模无人机的有序运行和低空空域的安全使用需求。

泛在安全低空数智网作为一种具备全时空连续的感知、定位、通信、管控的新型信息通信数智底座，能够实现物理与数字空间融合，支撑大规模低空无人机的全时空信息交互与高效智能管控。白皮书分析了低空经济安全运行面临的挑战及泛在探测、跨域协同、安全管控需求，提出了低空数智网涉及的关键技术，包括多域融合网络化低空感知技术、多源联合低空高精度定位技术、空地协同智能机器通信技术、传控分离的智简管控网络技术和群体智能低空态势演化技术。低空数智网通过空间-电磁等多域融合的网络化感知实现低空环境的泛在覆盖，通过主被动多源联合实现低空环境高精度定位，通过空空直通通信与空地语义通信满足空地群体智能化协同需求，通过分离低空飞行运营与低空飞行管控网络解决低空经济不同主体的差异化需求，并通过低空飞行管控的网络化分层互操作实现跨飞行服务域的互联互通及全域智能态势演化分析，从而为低空经济的安全运行提供数智化、网络化支撑能力，为低空经济的发展提供了创新思路，为未来标准制定与产业融合提供了技术支撑。

目 录

摘 要	1
1. 前言	1
2. 低空经济安全运行挑战及管控需求.....	1
3. 泛在安全低空数智网络体系.....	7
4. 泛在安全低空数智网络关键技术.....	11
4.1 多域融合网络化低空感知技术.....	11
4.1.1 通信感知一体化技术.....	12
4.1.2 低空电磁环境感知技术.....	14
4.2 多源联合低空高精度定位技术.....	16
4.2.1 蜂窝网络载波相位定位技术.....	17
4.2.2 多站主被动协作定位技术.....	18
4.3 空地协同智能机器通信技术.....	19
4.3.1 低空空地通信技术.....	19
4.3.2 低空直通通信技术.....	21
4.4 传控分离的智简管控网络技术.....	23
4.4.1 低空飞行管控网络技术.....	24
4.4.2 算网一体资源管控技术.....	27
4.5 群体智能低空态势演化技术.....	29
5. 低空空域运行管控场景与控制模式.....	31
5.1 低空空域态势认知.....	31
5.2 低空飞行情报与飞行服务.....	32
5.3 低空飞行管控.....	34
5.4 跨域低空飞行服务移交.....	36
5.5 跨省低空飞行服务移交.....	37
6. 总结与展望.....	38
致 谢	41

1. 前言

2023 年中央经济工作会议中明确提出要将“低空经济”作为战略性新兴产业进行打造，广泛应用数智技术加快传统产业转型升级。2024 年国务院政府工作报告中也指出，要完善产业生态，拓展应用场景，将“低空经济”作为新增长引擎，促进战略性新兴产业融合集群发展。中央经济会议和政府工作报告均明确强调将“低空经济”作为战略性新兴产业，为国家布局低空经济指明了方向。

随着人工智能技术、无人机技术、无线通信技术的发展，低空经济也将向智能化、网联化、协同化方向演进，并与地面智能交通系统融合，形成“空地一体”的智慧交通体系，共同推动交通领域的变革与创新。但这一新兴产业除了面临传统信息安全、通信安全、隐私安全等传统意义上的安全问题，还将面临飞行安全、交通安全、公共安全等系统运行所需解决的安全问题。由于低空经济的预期飞行主体种类多、规模大、飞行能力和智能能力差异显著，同时低空经济的地域性特征明显，不同区域的政策体制、服务能力、控制需求等差异显著，针对民航通航的管控体系已经无法满足低空经济安全运行需求。因此，需要建立低空经济的数智化网络，实现泛在安全的低空经济运行管控体系，通过分层组网模式，一方面满足区域内的管控体系差异，另一方面又能在飞行器跨区域飞行过程中提供持续的安全运行管控服务，解决低空经济运营过程中存在的系统孤立、条块分割等问题。

本白皮书针对低空经济运营过程中存在的运行安全风险，从低空经济运行过程中的泛在探测、跨域协同、安全管控需求出发，构建面向泛在运行安全的低空经济数智网技术体系，解决孤立系统和条块分割导致的难认知、难协同、难管控技术问题，为低空经济的泛在安全运行提供网络化支撑。期望能够为低空经济的安全运行保障提供可参考的技术方向，推动业界对构建可互操作的低空飞行管控网达成共识，保障低空经济的安全健康可持续发展。

2. 低空经济安全运行挑战及管控需求

2024 年《民用航空使用空域办法》和 2023 年《国家空域基础分类方法》中都明确规定，将平均海拔高度 300 米以下空域作为非管制空域，在这一空域中飞行不对航空器提供空中交通管制服务。这一举措为开放低空空域提供了基础，但也带来了低空空域到底应该由谁来管理的问题。在无人机成熟之前，非管制的低空空域主要用于直升机旅游、运动滑翔伞、农用飞机等场景，其数量少使用范围受限，对低空飞行安全和公共安全等基本没有影响。但随着无人机的兴起，大量的

多旋翼大载重无人机进入市场，并开始广泛应用在巡线巡检、物流运输、安防监测等等场景，已经突破了传统边远地区、旅游景区等局限空域，向城市中心区渗透。同时，飞行汽车 eVTOL 概念的推出，将交通从地面延伸到了低空，促使低空空域如何分配空路、如何使用空路、如何监测和控制空路使用成为亟需解决的问题。2024 年《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》规定了 120 米以下为无人机适飞空域，120 米到 300 米空域，无人机的飞行需要受到管制，这也明确提出了面向低空空域的飞行交通管制服务需求，如考虑在 120 米到 300 米之间的低空空域规划公共航路和临时航线，并在飞行过程中动态规划避撞航迹，从而保障低空飞行安全。目前，已经有多个城市开展低空经济试点，2024 年底有消息称中央空管委将在合肥、杭州、深圳、苏州、成都、重庆六大城市开展 eVTOL 试点，对 600 米以下空域授权地方政府管理，以试点探索低空空域的有效使用，促进低空经济的安全发展。

目前国内各行业都提出了低空认知和数字化的思路，以支持低空无人机飞行管控。例如从低空通信覆盖的角度，电信运营商提出采用 5G-A 完成低空空域探测和空地通信，以实现低空通感广域覆盖；从低空定位的角度，智能交通和测绘等领域提出采用 RTK 卫星差分定位技术进行目标的高精度定位，以满足低空定位覆盖；从低空目标检测的角度，民航空军等提出采用相控阵雷达网络提供低空目标探测，以兼容空管体系；从低空管控的角度，航管和无人机运营商等提出采用空域网格方式完成空域的阻塞管控，以满足低空交通指挥调度需求。在此基础上，一些低空智能管理的思路被提出，比如低空物联网提出建立一个空天地一体的通信导航一体化网络，实现大范围的泛在连接，以支持应用层面的飞行管理与应用。也有机构提出将低空空域划分为设施网、航路网、空联网、服务网，实现一个智能融合的低空系统。目前提出的各种方案各有侧重，主要目标集中在如何构建一个低空环境可观测、低空态势可管理、低空运行可控制的低空运行服务系统，但尚未有一种方案能够结合低空经济的技术发展趋势有针对性的解决低空经济发展面临的“难感知”、“难协同”、“难管控”核心问题。

1、难感知：虽然国家空管委、中国民航局规定了 120 米以下的 W 类空域是无人机适飞空域，但无人机在 120 米以上到 300 米以下的 G 类空域飞行是需要受到管制的。由于无人机飞行主要采用遥控或自控方式，没有机上驾驶员在飞行过程中进行周边观察以发现碰撞和规避，需要无人机远程驾驶员或无人机控制器完成飞控，这意味着需要对低空空域进行准确的环境认知，以避免低空复杂飞行环境导致的安全风险。由于小型无人机的目标小，城市低空地形遮挡等环境复杂，导致低空雷达的探测距离、覆盖范围等受到局限，空地通信覆盖和卫星定位精度也会受到影响，导致单纯依赖空地探测和合作式无人机主动上报 BRID（Broadcast Remote ID）很难对低空环境进行全面感知，难以准确掌握低空飞行态势以支持规划决策。

2、难协同：虽然中国民航局已经制定了城市场景轻小型无人驾驶航空器物流航线划设规范，规定了无人机物流航线划定、起降区划定规则等，但是由于无人机种类多能力差异大，简单采用航线式阻塞管理会浪费无人机的机动能力，导致空域利用率不足。而如果采用非航线式的自由飞模式或动态规划航线模式，则对无人机态势感知能力和协同能力提出很高要求。目前无人机系统是孤立系统，虽然业界提出采用广播飞行状态信息（BRID）方式提供无人机防撞支持，但目前A2X体系尚未有明确的标准，也没有给出在A2X模式支持下的多机协同模式和机制。在地面无人机控制器控制下完成规避，又对低空态势感知提出更高要求，目前的低空感知覆盖难以为无人机提供泛在安全的航迹引导建议。

3、难管控：虽然国务院和中央军委发布的无人驾驶航空器飞行管理暂行条例明确规定了无人机与无人机飞手的认证、飞行计划的备案等低空无人飞行管理机制，但由于目前的备案式管理体制与低空运行管控机制是分离的，且无人机飞行计划备案尚未能做到对机动飞行的临时航线进行动态管理，因此备案机制不足以支持对低空无人机的精细化管控。同时，由于遥控无人机主要采用专用数传链路由飞控属地控制，而低空空域则由空域属地管理，如果有临时空域管控、航线冲突等潜在风险，空域属地无法对无人机进行实时管控，这就导致低空空域的飞行管控仍然是粗放式的，对无人机仍处于无法实质性管控的状态，无法做到对黑飞、违飞的有效判断和及时处置，难以满足未来大规模低空经济发展需求。

低空经济的未来技术发展趋势包括智能化、网联化、协同化三个方向。

1、智能化：虽然目前遥控无人机仍然处于主流地位，但是由于遥控无人机面临的飞手感知与控制能力有限、感知控制反馈时间长、管控复杂等问题，遥控无人机并不适合长距离巡检、物流等具有更广泛应用需求的低空经济场景。随着人工智能技术的逐步突破，基于轻量级人工智能模型的自动驾驶技术已经开始从概念走向产业化应用，人工智能赋能低空经济将成为未来发展方向。智能化不但体现在机载飞控从单纯的无人机姿态控制向具备完整“感知-认知-决策-控制”闭环的具身智能演进，也体现在低空空管基础设施从人工决策向人工智能辅助决策的具身智能演进。低空无人机的具身智能化将有效增强单机的感知能力和决策能力，支持自主避撞和主动任务规划；低空管控基础设施的具身智能化将有效增强对低空空域的态势感知能力和低空态势演化分析能力，为低空环境的全面感知和可控运行提供支撑。在人工智能加持下，未来的低空经济将从人工遥控运行逐步演进为自动运行，再进一步发展为自主运行。

2、网联化：目前专用数传链路仍占据无人机控制的主流，但由于专用数传链路的控制和回传距离有限，难以执行远距离飞行任务。随着5G-A技术演进，以5G Redcap为代表的专用物联网链路使得利用公众移动通信网完成远距离、低功耗、大带宽的低空覆盖已经成为可能。同时，通过

边缘计算和网络切片技术构建起算网一体的网络支撑体系，能够将机载受限的智能计算需求卸载到边缘计算，从而为无人机提供伴随式的智能计算支持。网联化不但针对空中的无人机，也针对地面的探测、管控等主体。目前的低空空域管控沿用民航和通航的空域属地管控方式，而无人机操控则采用无人机控制器属地飞控方式，两种方式在目前的小规模示范飞行时是重合的，尚未遇到管控问题。但在无人机物流、巡检等需要跨空域飞行时，由于空域的属地与无人机控制器的属地不同，低空飞行服务域难以与无人机控制器建立起直接管控通道，低空空域有监无控，影响低空空域使用效率。因此有必要分离无人机的空地管控链路和无人机数传链路，建立管控链路在低空空域的锚点，让低空飞行服务域有直接与无人机互操作的通道，从而保障低空空域的有效管理。在网联化的支持下，无人机不但能够实现空-地-云的业务运营一体化，还能实现空域管理的一体化，将无人机的运行范围从视距延伸到网络支撑下的超视距范围，满足低空经济的泛在安全运行需求。

3、协同化：考虑到低空空域感知的非全面性和无人机及其控制器的非受控状态，目前主要采用基于飞行计划的预先航线规划、空域占用阻塞等方式，降低无人机异常接近的概率，以预防空中险情。但是这种预先规划方式需要预留较大的安全距离以应对因天气、异常等因素导致的偏航，导致低空本就拥挤的空间难以高效利用。随着无人机的智能水平提升，无人机间自主协同避撞将是低空飞行安全和低空空域高效利用的必然选择。利用 A2X 技术实现无人机之间、无人机与地面系统之间的直通通信，合作式无人机能够实时感知周边飞行环境态势，并协同决策完成飞行任务或空中规避。同时可以通过地面飞行服务实时提供低空空域的飞行环境态势及飞行情报，完成对空中异常空情的规避，保障飞行安全。空域数字化与无人机协同技术结合，能够将低空空域的管理从静态规划运行推进到多机/空地协同规划运行，在保障飞行安全同时，最大化提高低空空域利用效率。同时，由于地面交通已经将 4G/5G 技术为基础的 C-V2X 体制确立为车车车路协同通信标准，低空采用与 V2X 技术一致 A2X 体系将能够与地面交通系统有效整合，从而建立起空地一体的交通体系。

结合低空经济的未来技术发展趋势和目前面临的主要问题，低空经济的有效推广需要一个支持泛在安全的数智化底座，来完成无人机和无人机飞手，无人机运营商，空军、民航、公安等飞行管制与公共安全责任方，及低空空域运营服务方之间的衔接。低空经济中的各不同参与方需要一个低空环境可观测、低空态势可管理、低空运行可控制的低空经济运行服务系统，来保证低空空域的有序运行。

低空经济的泛在安全所需的不仅仅是信息安全，更重要的是运行安全、交通安全、公共安全。低空经济一直存在“看不到”、“连不上”、“控不住”的问题，主要原因是没有一套完整的认知和管

全，需对低空空域飞行态势进行认知，发现潜在的影响运行安全的风险，如气象变化、限飞区变化、业务操作建议等，并对无人机或飞手提供区域飞行性能建议。针对低空公共安全，需在低空空域飞行态势认知基础上，接受空军、民航、公安等飞行管制和公共安全限制，对飞行中的无人机进行飞行限制和操作限制。针对未来人工智能赋能的自主化无人机飞行需求，需提供低空飞行情报及飞行服务，能够接受无人机的飞行状态和操作意图，并根据低空空域态势，为机载人工智能提供自动化的气象、性能、管控、情报建议，为机载智能提供风险避免建议航迹。针对无人机跨域飞行，低空飞行监管与服务平台需支持跨域组网，能够打通空域的属地管理与无人机的注册地管理，实现空地一体运行管控服务。

低空飞行监管与服务平台需要服务大规模无人机和无人机驾驶员/控制站，需要提供空域属地管控和无人机注册地协同，需要完成低空空域服务与公共安全管理等不同体系多系统的协调，是一个需要处理多模态数据、支持大规模连接、满足不同领域不同用户需求的平台。这一服务平台不仅仅是一个传统部署在云端的服务，还需要一个支持泛在安全的低空经济数智网络，来支撑低空空域中的大规模无人机运行态势的准确感知，对大范围超视距运行无人机和控制站的持续通达，及在面临运行安全与公共安全的时候能够对低空异常风险进行有效管控。对支持低空经济的泛在安全数智网络的需求主要体现在三方面：

1、感知需求：低空空域与地面临近，地面的复杂地形、建筑等环境导致低空电磁信号种类繁多，通信、感知、导航多种信号干扰复杂。不但复杂的地形会导致低空目标探测和卫星定位易受遮挡，复杂的信号干扰也会导致雷达等低空目标探测手段精度难以保障。因此，低空空域的感知不但需要涵盖低空物理空间的感知，还需要涵盖低空电磁空间的感知，通过多源异构融合的探测、通信、定位一体化感知与测量新技术，解决低空飞行目标的准确探测问题和空地干扰源的准确定位问题。同时，针对低空广域覆盖需求，需要通过多节点网络化协同感知提高探测的精度，提高感知的连续性，从而保障对低空的全域持续感知。

2、通信需求：低空经济的智能化、网联化、协同化发展趋势对空地和空空通信能力提出更高要求，但目前专用空地数传直通通信方式无法支撑低空广域覆盖，基于 WiFi 和蓝牙的 RemoteID 广播也无法支撑未来无人机的智能化协同化发展趋势。低空经济的广域覆盖需要借鉴公众移动通信网的构建模式，在低空经济发展密集空域，通过统一的空地通信网络覆盖降低有限频率资源冲突，提升通信频率利用率，并通过通感一体机制实现更高的带宽、更低的时延和更可靠的通信能力，通过通算一体机制支持智能计算的空地卸载，实现更快的响应时间和更高的数据回传压缩率。甚至可以通过语义通信机制，在有限带宽条件下支持更高质量的内容回传。同时通过与空地通信一致的 A2X 通信技术支持无人机间直接通信，在满足无人机自主协同的同时，支持空地一体化运

行。

3、管控需求：低空经济规模化推广的最大痛点在于对低空空域的有效管控。目前低空空域飞行尚处于粗放式发展阶段，未能建立起完整衔接感知、通信、识别、管控的闭环体系，导致对非合作式无人机无法实现有效的探测和监控，对合作式无人机也仅能获得滞后的位置信息，且难以对其汇报位置校验真伪，也没有手段将管控指令快速下达给无人机或其飞手。低空经济迫切需要在无人机与飞手之间的直通通信链路之外，增加飞行管控链路，通过将低空飞行管控网络与低空运营服务网络分离，提供面向低空空域运行安全的服务能力，将运行安全管理插入到低空的无人机、飞手和无人机运营商之间，为低空经济提供对无人机或飞手的超控机制，一方面降低空域管控过程对无人机制造商和无人机运营商的依赖，另一方面压缩空域管控反应时间，提高低空空域运行的安全性。

3. 泛在安全低空数智网络体系

泛在安全低空数智网络是一种同时具备全时空连续的感知、定位、通信、管控的新型信息通信数智底座，实现物理与数字空间融合，支撑大规模低空无人机的全时空信息交互与高效智能管控。泛在安全低空数智网作为信息通信技术底座，与设施网、航路网、服务网一起，共同构成了低空经济的基础支撑底座。泛在安全低空数智网的层次结构如图 2 所示。

泛在安全低空数智网划分为五层，分别为感知网、定位网、通信网、管控网、业务网，由这五个层次共同组成完整的低空空域的感知、通信、认知、决策、控制闭环，并为无人机运营服务和公共安全服务等提供完整的低空空域运行管理服务支撑能力。

1、感知网：覆盖低空空域的雷达感知、电磁感知、红外视觉等感知能力共同构成了多域融合感知网络，对低空空域的物理空间、电磁空间、数字空间形成跨域空间联合覆盖，保证低空环境感知的全面性。低空空域探测除了雷达技术，还包括通感一体技术。通感一体是一种将感知能力与通信能力融合的 6G 技术，可以通过共享频谱和硬件资源，实现高效的信息传输和环境感知。通感一体通过先进的信号处理算法分离通信和感知信号，一方面利用 MIMO 和波束成形技术通过感知结果提高通信性能，另一方面则利用通信的频谱资源和多站广域覆盖能力，提升对低空的探测覆盖面积和探测精度，从而形成一张通信和探测一体化的泛在覆盖的通感一体主动感知网络，弥补雷达对低空的探测盲区和覆盖不足。除了对低空的目标进行感知探测，感知网还需对低空的电磁环境进行感知，以尽可能全面准确的刻画低空电磁环境状态，发现低空电磁干扰，为低空的探测、定位、通信质量提供优化建议，并在低空飞行过程中发现电磁干扰的时候，完成电磁干扰源

定位，保障低空飞行安全。

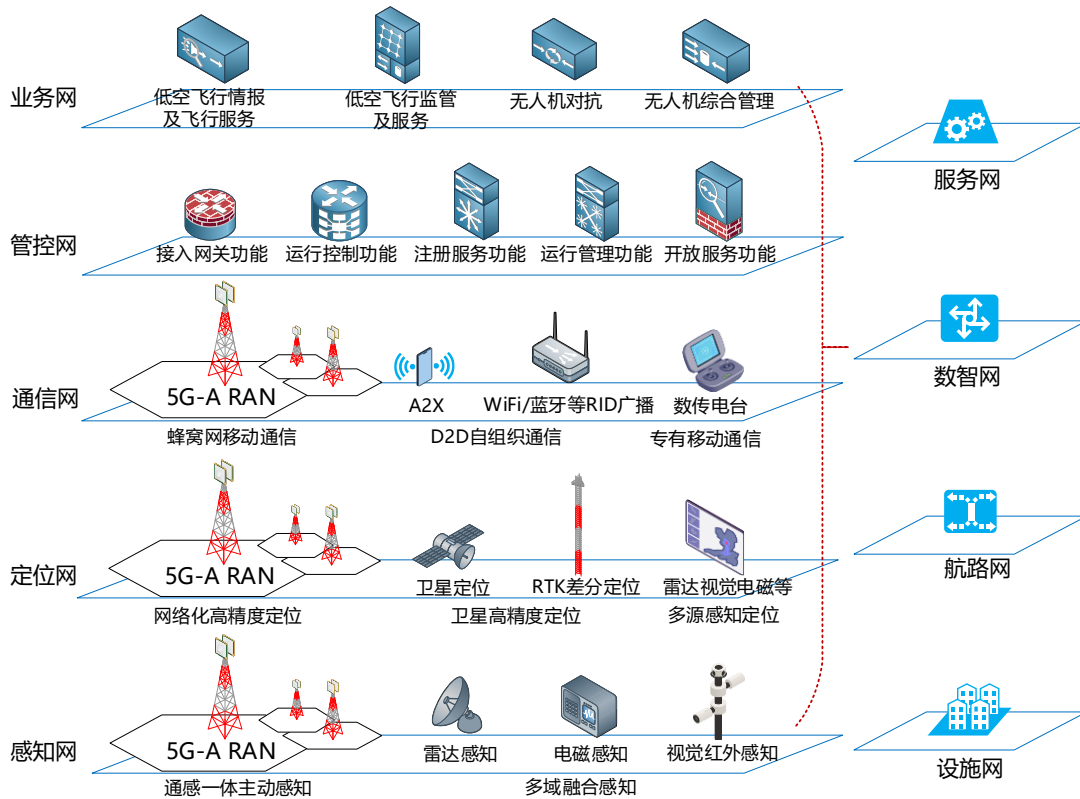


图 2 泛在安全低空数智网络层次

2、定位网：根据不同的低空环境，定位网可以充分利用卫星定位、RTK 差分定位、网络化高精度载波相位定位，实现全域全场景覆盖的低空定位，为低空无人机提供可靠的定位导航服务。载波相位定位是一种利用蜂窝网络中的载波相位信息进行高精度定位的技术，相比传统基于信号强度或到达时间的定位方法，载波相位定位能提供更高的精度。载波相位定位利用多个基站的相位信息，通过精确测量接收信号的载波相位计算目标位置，实现网络化高精度定位，定位精度最高可达到厘米级，且可以在室内、隧道等无卫星信号的空间完成定位。除了基于卫星和通信网络的高精度定位，低空环境中还可以利用雷达、视觉、电磁等多源感知结果，对目标所处的空域位置进行粗粒度定位，并利用多源轨迹融合等方式为服务目标提供自身所处位置的指引，与感知网一起共同为低空环境的全面刻画提供技术支撑。

3、通信网：目前无人机主要使用专用数传电台完成空地通信，提供飞控、数传图传等能力。同时，考虑到低空管控对合作式无人机的位置发现需求，无人机也开始配置基于 WiFi 或蓝牙技术的 RemoteID 广播模块，提供无人机当前位置和运动速度方向的广播。但总的看，当前并没有一种通用的泛在覆盖的通信技术来支持空地通信和空空通信，也没有针对低空无人机的运行管控提供

专用的通信体制。RedCap (Reduced Capability) 是 3GPP 在 Release 17 中引入的一项技术,旨在为中低复杂度物联网设备提供中速物联网应用需求。其简化了射频和基带设计,引入了节能机制,在支持了 5G NR 的低时延、高可靠和网络切片功能同时,降低了芯片和模组成本,是一种比较合适的低空广域覆盖空地通信技术。A2X (Aircraft-to-Everything) 是 3GPP 在 Release 18 中引入的一项技术,旨在使用蜂窝网络支持无人机的低空飞行,并与现有 5G NR 网络集成。A2X 与地面交通环境中的 V2X (Vehicle-to-Everything) 技术同源,主要提供了 PC5 接口用于支持车与车之间或无人机与无人机之间的直通通信,从而降低无人机之间的通信时延,提高无人机对周边态势感知能力。A2X 与 RedCap 可以共同组成蜂窝移动通信网解决低空空域覆盖与多模式通信问题,并通过与地面的边缘计算、网络切片技术融合,形成通算一体的低空通信网网络质量保障体系,解决无人机超视距控制与业务操作需求。

4、管控网:目前并没有独立的管控网络来完成低空空域中的感知网、定位网、无人机系统、无人机控制器等的接入和管控。当前部署的无人机云服务,由无人机运营商完成航线和飞行计划申请,由无人机和飞手进行飞行报备,即完成了身份信息和飞行信息的收集工作。但在整个低空飞行过程中,无人机云服务无法对飞行状态、飞行异常进行实时认知,也无法对飞行过程、业务操作权限进行审计管控,从而导致在出现黑飞、违飞的时候,即便定位了无人机,也无法对无人机归属和无人机飞手位置进行准确排查,更无法对无人机进行超控。因此,有必要建立独立的飞行管控网络,建立无人机、飞手、飞行监管三方的沟通渠道,避免无人机分散孤立的飞控模式导致的“看不见”、“连不上”、“控不住”问题。管控网将完成低空空域中的无人机运营服务与无人机飞行管控服务的分离。一方面低空飞行监管及服务使用独立于移动互联网的飞行管控网,能够有效将低空运行管控这种带有安全和强制性需求的行为与无人机运营这种公众化行为分离,保障低空运行管控过程的安全。另一方面,低空飞行监管与无人机运营也具有不同的服务保障需求,有利于通信网络采用不同的服务质量保障策略。管控网通过接入网关提供无人机和无人机控制器的飞行监管服务能力接入,并通过注册服务、运行控制,完成跨低空管理域的信息共享、控制协同的功能,并通过运行管理完成感知网、定位网的信息融合,建立低空空域实时态势,并为业务网提供感知-认知-控制能力,保证业务网只需要制定决策策略,即可完成管控闭环。管控网还提供开放服务功能,面向民航、空军、公安等管制中心提供低空态势认知和管控执行能力,实现低空空域管理与交通管理系统、公共安全管理系统等其他系统的互操作。

5、业务网:目前各低空经济示范区正在尝试建立低空飞行监管及服务系统,为低空空域管理提供低空态势呈现、异常事件检测、控制指令发布等监管及相关服务能力。同时无人机综合管理提供了无人机与飞手的资格认证,飞行航线的审批,飞行计划的报备等基本功能。无人机综合管

理和低空飞行监管相结合，能够完成飞行区域内的基本信息管理功能。但是，随着低空无人机规模的扩大和跨域飞行的出现，低空飞行监管服务需要分级部署，才能解决属地飞行区域管控的实时性与跨域飞行信息的全面性之间的矛盾。因此，业务网将基于管控网构建多层级管控服务网络，实现低空飞行服务域的域内自治和跨飞行服务域的域间互通。针对未来无人机智能化的发展趋势，智能无人机需要更丰富的实时飞行情报和飞行服务支持，包括低空空域态势和电磁环境态势认知、无人机群体最佳规避航迹引导等。而针对黑飞、违飞的无人机，需要调度综合反制手段进行劝返、迫降等操作，对于完全不合作的无人机，则需要使用软杀伤甚至硬杀伤对抗手段对无人机进行迫降直至摧毁。这一系列服务或对抗手段需要与管控网协调共同完成各系统的协调和同步

泛在安全低空数智网的五层架构在具体部署中可参考图 3 的端到端架构实施。

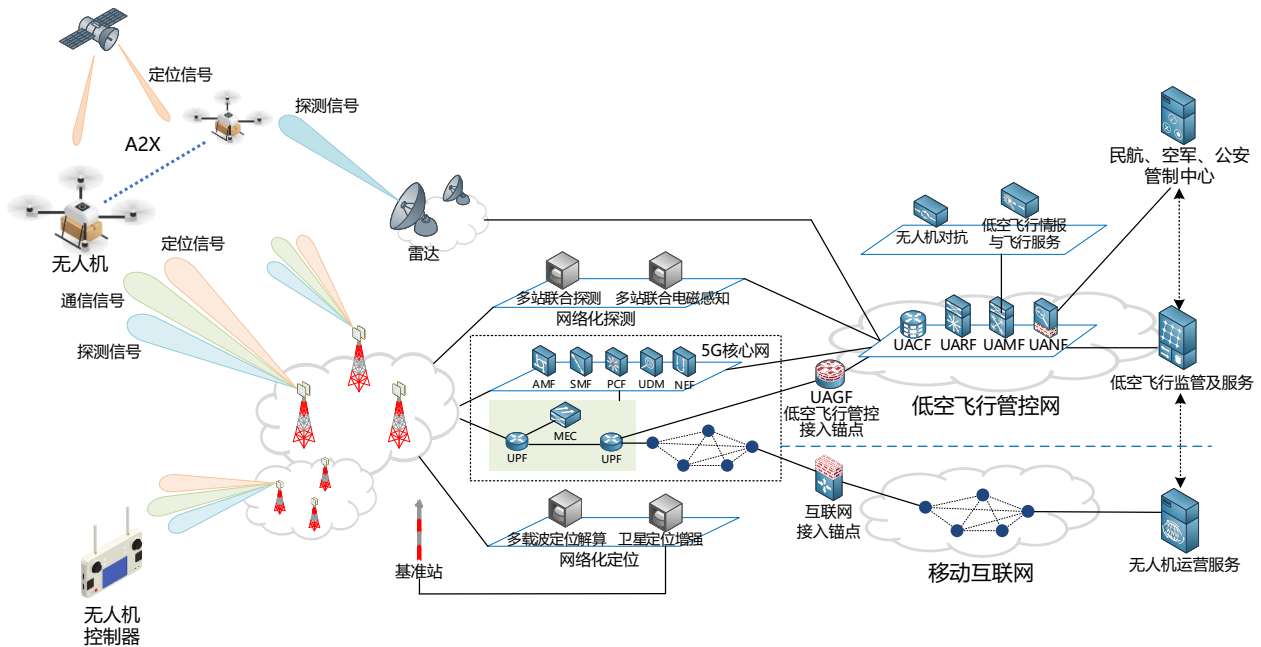


图 3 泛在安全低空数智网络端到端架构

空空/空地无线接入层面可以采用基于公众移动通信网的空地通信和 A2X 通信，通过通信信号、探测信号、定位信号的联合优化，实现多地面基站的联合组网泛在覆盖，降低低空空域的感知、定位、通信盲区，降低感通定位信号的相互干扰，提高低空感通定位质量，保障无人机在城市等飞行安全和公共安全影响较大的空域安全运行。在接入公众移动通信网的时候，无人机将使用不同的网络接入点分别接入移动互联网和低空飞行管控网。移动互联网接入点可以为无人机提供空地数传通信接入；低空飞行管控接入点则为无人机提供低空空域管控通信接入，用以提供无人机空地飞控链路的转接和审计，并支持向无人机和飞手下达飞行限制、业务操作限制等指令，保障低空飞行安全。无人机与控制器之间也可以使用专用数传链路完成飞控和数传，但仍需要提

供飞行管控用的空空/空地通信链路，以满足最低限度的空中飞行态势感知和地空飞行限制、业务操作限制指令控制能力。

在通信网层面，无人机的空地接入会在 5G UPF 进行检测和分流，低空飞行管控接入点的数据流会被分流到低空飞行管控接入锚点，移动互联网接入点的数据流会被分流到互联网接入锚点，从而在通信网络实现低空业务负载与飞行管控负载的分离，并提供差异化的通信质量保障。考虑到低空飞行管控的实时性要求，通信网会在最接近网络边缘的 UPF 完成空地管控负载的分流，保证低空飞行管控过程中的实时性。无人机运营服务则根据最终用户需求，按照业务签约完成空地数据回传。

网络化定位可以部署基于卫星信号的基准站，通过提供 RTK 高精度差分定位辅助能力，为无人机提供高精度卫星定位增强服务。同时，在地面网络部署较密集的地域和低下、隧道等无卫星空间，可提供基于基站网络提供多载波定位解算的高精度定位服务支持，为合作式无人机提供不依赖卫星的快速高精度定位能力。

网络化感知可以提供基于通感一体的低空探测能力，在地面网络部署较密集的地域，可提供基于通感信号的多站联合目标探测能力，同时，与重点区域、偏远区域的低空雷达探测一起，共同组成对低空的连续覆盖探测网络。在感知低空目标之外，网络化感知还可以通过在基站侧部署宽频带电磁感知模块，实现多站联合电磁环境感知，一方面实现对低空电磁环境的认知，服务通感定位信号优化，另一方面可以对低空电磁干扰进行定位，辅助保障低空安全。

低空飞行管控网为无人机的运行管控提供了无人机和无人机控制器的汇接能力，在互联网之外单独建立一个无人机/无人机控制器与飞行管控网之间的安全链路，同时，建立起一个独立于无人机业务运营的低空空域管控网络，这一网络完成低空空域各个相关使用方、监管方、服务提供方的互联互通，并通过端到端的安全保障，避免无人机管控过程中的安全问题。通过低空飞行管控网为低空飞行情报及服务、低空飞行监管及服务、无人机对抗等空域管控、飞行服务相关系统，提供所负责的低空空域无人机属性管理、移动管理等能力，支持无人机跨空域飞行的管控互操作能力，避免空域管控权属与注册地数据信息权属的冲突，实现跨飞行服务域的飞行监管及服务。

4. 泛在安全低空数智网络关键技术

4.1 多域融合网络化低空感知技术

低空经济需要对低空空间进行全面感知，传统主要针对低空目标的运动状态、低空气象状态

进行探测，但由于低空电磁环境复杂，不但空地通、感、导信号相互干扰，地面城市生产生活环境的电磁信号也会对低空产生干扰，因此，低空环境需要引入空间、电磁等多域探测手段，不但通过雷达或光学传感器对目标的空间位置进行探测，还需要通过低空电磁探测实现基于电磁感知的目标识别和电磁干扰认知与干扰源定位。同时，利用时-频-码-空多域通感导一体化空口波形与信号处理方法，解决通感信号结构本质差异化、多源信息异质难融合等问题，保障通信-感知-定位等的性能，提高无线资源的利用率，实现全天候、全域感知。

4.1.1 通信感知一体化技术

随着 6G 移动通信的提出，民用无线通信的频点也已经从 20GHz 向 60~80GHz 迈进，更高的频段（毫米波乃至太赫兹）、更宽的带宽、更大规模天线阵列使高精度、高分辨感知成为可能，从而可以在一个系统中实现通信感知一体化（ISAC: Integrated Sensing and Communication），让通信与感知功能相辅相成。一方面，感知所提供的高精度定位、成像和环境重构能力可以帮助提升通信性能，例如波束赋形更准确、波束失败恢复更迅速、终端信道状态信息（CSI: Channel State Information）追踪的开销更低，从而实现“感知辅助通信”。另一方面，通感一体化装置也可以成为一个传感器，网元发送和接收无线信号，利用无线电波的传输、反射和散射，从无线信号中获取距离、速度、角度信息，从而辅助完成物理世界的感知能力，实现“网络即传感器”（Network as a Sensor）。通感一体化控制模型提供感知与通信分离（带外感知）和感知与通信耦合（带内感知）两种模式，如图 4 所示。

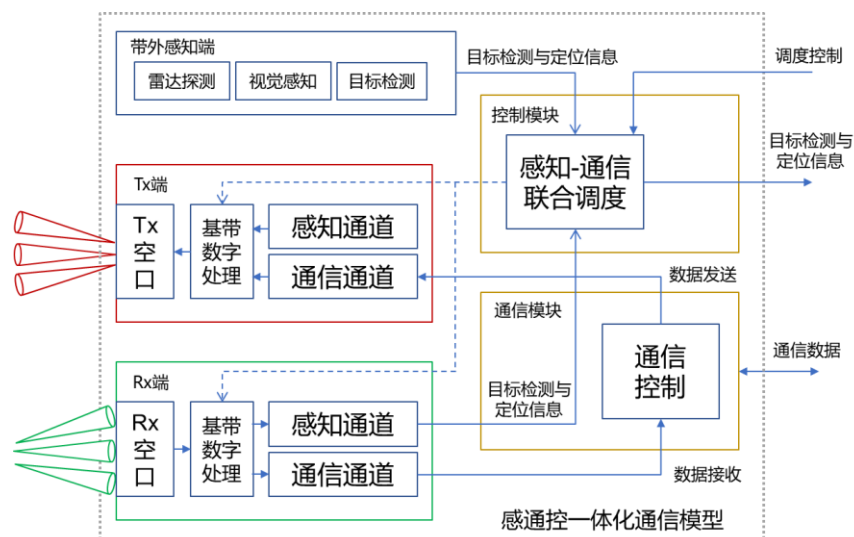


图 4 通感控一体化通信模型

感知与通信耦合模式中，感知通道和通信通道分别完成探测能力和通信能力的调制解调、编解码和信号估计等能力，并通过基带数字处理完成射频信号处理，包括信号波形创建与解析、探测信号与通信信号的分离等，通过 Tx 空口和 Rx 空口完成无线信号收发。感知通道检测到的目标与定位信息将提供给控制模块的感知-通信联合调度功能，完成无线通信资源的调度能力。

感知与通信分离的带外感知模式主要利用基站的站址，并对无线信号干扰进行一定优化，其并不能从根本上解决通信与探测的融合问题。感知与通信耦合的带内感知模式能够实现通信与感知的基带、射频和天线等硬件资源共享，利用 5G NR 的帧结构实现通信与感知符号时分排布，从而扩大探测信号带宽提高探测性能，同时自适应的根据目标探测结果增强通信传输性能。从低空飞行安全、交通安全、公共安全等角度出发，感知与通信耦合的带内感知模式更有利于刚刚起步的低空经济，能够更好的实现感知与通信的相互增强。

在具体实现过程中，5G NR 帧结构中的控制位参考信号和数据位有效负载可以用作主动感知。控制位中的大多数具有梳状结构，并针对不同的用户采用正交码，可以在时域和频域中可灵活配置以支持不同的需求。其中，以 DMRS 为例，可通过配置附加 DMRS 灵活调整时域密度，模糊函数尖峰随密度增加而更加尖锐，如图 5 所示。(1)表示前置 DMRS，(2)-(4)分别表示附加 1-3 组 DMRS。

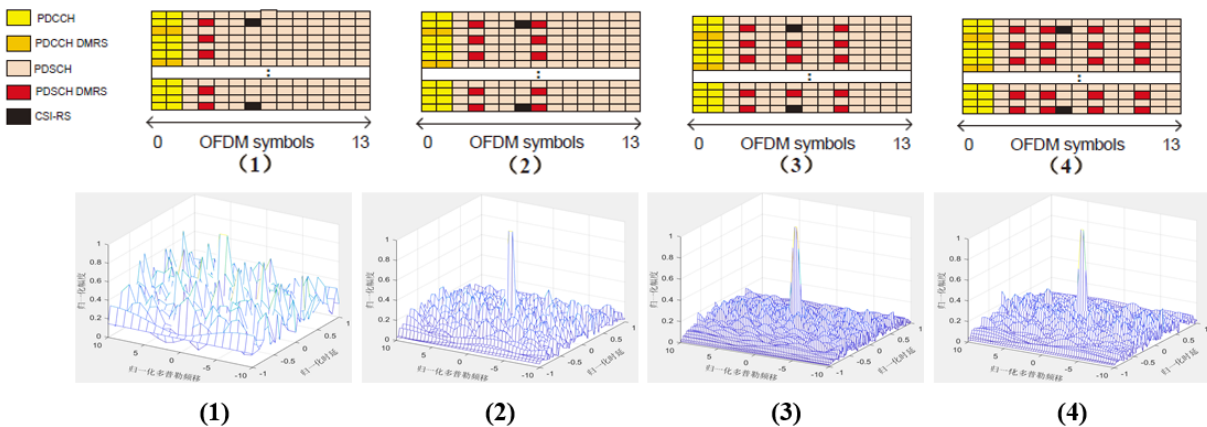


图 5 通感一体化信号

为了保障通信传输速率，通信导频在帧结构中的占比有限，为满足高精度探测性能，可建立基于时分的灵活可重构通信感知一体化帧结构，通过改变帧结构中通信与感知信号的比例，实现通信与感知功能的灵活调控。联合考虑通信性能的损失，以及距离、速度感知精度需求，可以选择在每个 0.2 ms 时隙末尾插入一个自定义雷达符号，如图 6 所示。

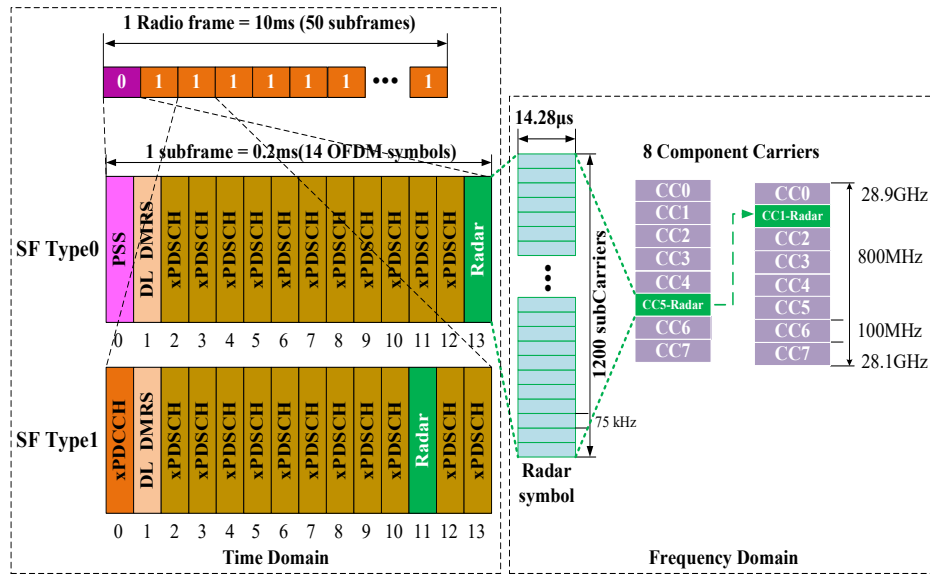


图 6 通感一体化帧结构

在 28GHz 频点，总带宽为 800 MHz 用于通信，100 MHz 用于传感的测试环境进行验证表明，感知与通信耦合的带内感知模式能够达到空口时延 15ms，传输速率大于 2Gbps，测距分辨率达到 1.5m。在 3.5GHz 频段下感知距离能够达到 1.6km。在 3.5 GHz 和 26 GHz 联合探测环境下，能够实现对 $RCS \leq 0.1$ 平米无人机目标的连续探测。

4.1.2 低空电磁环境感知技术

低空电磁环境复杂，为保障低空无人机电磁频谱安全，需发现信号在时-频-空-变换等多域特征及变化规律，实现低空大规模无人机复杂环境混杂快变信号的解析，不但完成低空无人机的泛在安全接入，还能解决低空干扰源的快速发现与定位。低空的电磁环境感知主要技术包括信号调制识别、辐射源识别、协议盲解析等。

1、信号调制是无线通信系统中的一个重要过程，只有信号接收器正确解调信号，信号传输才能顺利进行，因此信号调制可用于识别低空无人机的飞控信号类型。随着无线通信技术的快速发展和更加高端的需求，无线通信系统中使用的调制方法和参数的数量正在迅速增加，如何准确识别调制方式变得更具挑战性。自适应调制识别（AMC: Automatic Modulation Classification）技术可以根据通信的具体要求和信道状态，识别信号类别并选择合适的调制和解调方式，实现传输可靠性和数据传输速率最优化，同时提高频谱的利用率。

2、辐射源信号具有多域特征，这些多域属性包括但不限于时域、频域、空域、变换域与参数域等，可基于多维度的深度频谱认知构建泛用信号特征数据，通过泛用信号特征库以实现低空无

人机的本征属性认知。

3、协议解析是不依赖先验知识，以分析系统行为、数据片段特点为方法对捕获的信号数据进行深入分析，获取协议字段边界与语义的过程，以识别和理解其中的协议信息，包括识别信号的调制类型、编码方式、工作模式及其它相关参数，如频率、波特率和帧结构等。协议解析能够为信号分析、辐射源识别、优化频谱管理、确保低空安全提供重要信息。在频谱多维属性深度认知基础上，信号的协议盲解析能够提高低空无人机辐射源目标识别准确率与效率。

由于低空无线信号参数灵活变化，可在信号调制识别、辐射源识别、协议盲解析基础上，从信号多维特征与个体本征属性双重维度解决基于信号特征的辐射源识别问题。辐射源目标的全面认知方案如图 7 所示。

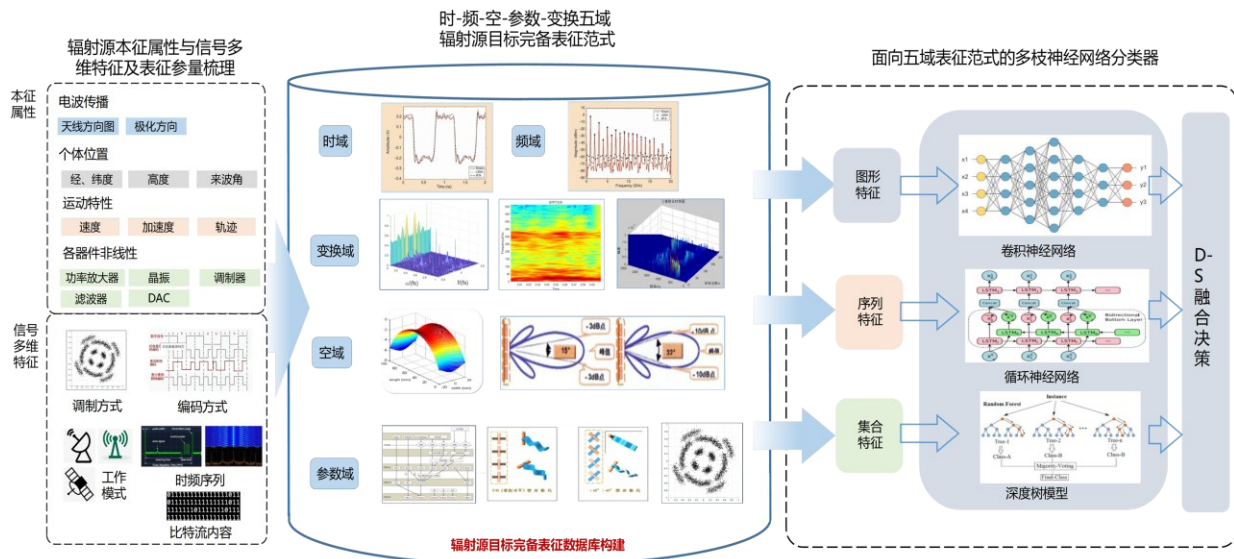


图 7 低空电磁环境感知框架

首先，根据获取的各类辐射源个体辐射数据，构建辐射源目标本征属性与多维信号原始参数集合以及其表征参量，可基于生成对抗网络建立辐射源个体非线性表征方法；其次，构建时-频-空-参数-变换五域辐射源目标完备表征范式，实现对辐射源目标信号特征与个体本征属性双维度完备表征，构建起泛用辐射源目标时-频-空-参数-变换五域表征数据库；最后，建立面向五域表征范式的多枝神经网络分类器，针对辐射源目标多域维度之间的关联性与差异性进行分析，完成对辐射源目标五域表征特征的动态排序、高效选择以及分类决策。

基于辐射源识别可对非授权的 4G/5G 移动通信系统控制无人机进行识别。基站发送给无人机的下行数据进入该识别系统后，先对其进行配置搜索，如果该数据属于上一个曾经解析过的小区，那么在配置信息库中应该保存了其配置信息，那么只需要从数据库中调取配置信息进行应用即可。

如果这是一个全新的数据，从库中找不到任何数据与之匹配，那么需要重新进行解析。下行数据信号经过信号同步、信号解调、协议解析、业务数据跟踪，通过业务评估完成协议级指标与业务级指标的提取。

针对基于 LTE 系统的无人机飞控信号协议栈解析流程如图 8 所示。

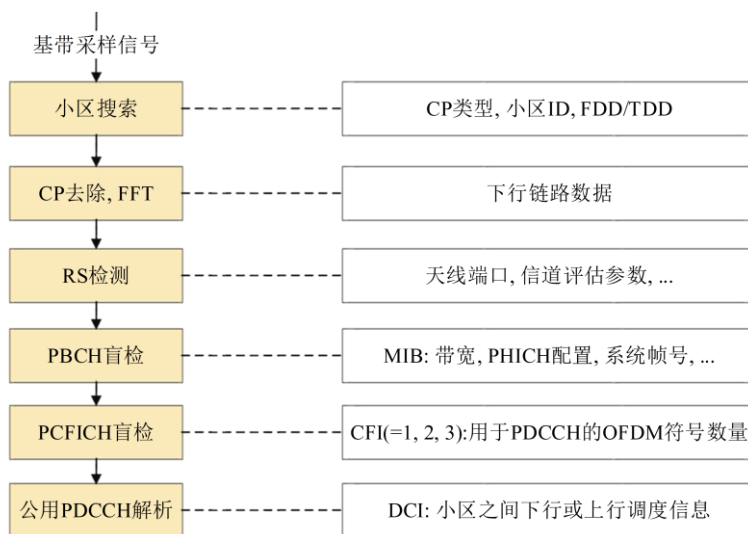


图 8 无人机飞控信号协议栈解析流程

其中，协议解析的组成结构基带采样信号经过小区搜索、PBCH 解析、PCFICH 解析以及公用 PDCCH 解析等过程获取协议级指标参数。在 5G 系统环境下，可以对整个基站小区的分析拆分为对空间中波束的分析，对于监测设备所在空间位置的波束，在完成小区搜索与公共系统参数获取后，通过基于非合作条件下的 PDCCH 解码算法，获取波束内所有用户的 C-RNTI 与 DCI，以此统计波束内用户数，从而推算小区内用户数。之后基于 DCI 解析结果以及共享信道 DMRS 映射位置，计算目标用户共享信道数据块中承载着业务数据的 RE 数量，结合其 MCS 计算 TBS，估计用户用频时长以及物理层上下行吞吐率，进而推测用户用频意图、感知用户用频行为。对用频行为异常的用户可以通过网络流量识别等方式进一步识别或封禁用户异常行为。

4.2 多源联合低空高精度定位技术

城市低空环境复杂，楼宇、隧道等处卫星信道遮挡，导致无法单一依靠卫星完成定位导航授时实现全域定位，且地下停车场、管线等空间无法直接获得卫星信号，难以依赖卫星定位。为满足低空经济在城市复杂低空环境下对低空无人机的精准定位跟踪需求，一般采用卫星定位、基于地面基准站的卫星高精度差分定位、基于室分的伪卫星定位和地面移动通信网络定位相融合的方

式，实现多源联合的高精度定位。卫星定位和地面基准站/室分定位基本能做到米级，但基于移动通信网络的定位由于基站数量、基于时间到达的多点定位测量准确度等问题尚不能做到高精度定位。随着大带宽毫米波通信、大规模阵列天线的应用，以及蜂窝网络载波相位定位等新技术的突破，无线测距及测角精度得到有效提升，具备实现厘米级定位的重大潜力，为多源联合高精度定位提供有效手段。

4.2.1 蜂窝网络载波相位定位技术

相较于传统的基于到达时间、到达角测量的定位技术，蜂窝网络载波相位定位技术基于相位测距实现高精度定位，通过提炼捕获 OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing，正交频分复用）多载波信号中的载波相位成分，并根据信号波长将相位转化为距离，以表征收发两端之间的距离信息，即信号收发两端的距离约为整数倍的波长与载波相位观测值所折算距离之和，其中未知的非时变整数称为整周模糊度。相比于传统测距类定位技术，蜂窝网络载波相位定位所提取的相位值与中心载频关联而不再与子载波频率间隔关联，因此摆脱了传统定位精度受制于带宽大小的瓶颈问题，其测距精度可达到信号波长（如 3.5GHz 载频对应波长约为 8.6 厘米）的百分之一到十分之一。在高精度相位测距能力的基础之上，结合地面多个移动通信基站与低空无人机节点载波相位观测结果，通过多个基站间观测结果的差分处理，消去观测量中包含有的误差成分，根据差分后的观测结果可实现对低空无人机节点的位置信息解算，其定位精度预期可达分米级甚至厘米级。

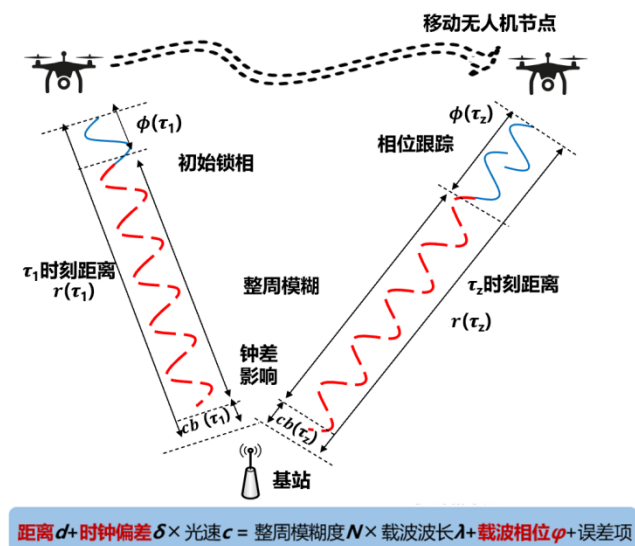


图9 载波相位测距原理图

在定位系统实际部署中，根据位置解算单元的部署不同，可分别制定集中式与分布式定位解算方案。针对集中式的定位解算方式，各低空无人机与多个地面基站的无线测量结果汇聚至地面网络化定位节点，其位置解算单元完成对各个无人机位置信息的计算，并提供给无人机或地面飞行监视系统获取使用。考虑到无人机通过网络获取其高精度位置信息的延迟风险，还可以进行分布式部署，即位置解算单元部署在无人机机载设备上，机载设备收集无线测量信息并完成位置解算。分布式部署方式需要无人机节点预先能够获得准确的地面基站坐标信息与解算信息，对无人机的机载计算与存储能力提出一定要求，但随着机载算力的提升和定位计算芯片的发展，未来通过蜂窝网络分布式部署方式能够有效提高低空无人机自主定位的精度和速度，有效提高城市遮挡环境下的定位覆盖能力。

4.2.2 多站主被动协作定位技术

虽然通感一体技术能够利用通信基站进行低空目标探测，但其精度存在诸多限制，第一是发射信号形式需要兼顾通信需求，不能直接使用雷达信号且不能根据具体情况灵活变化；第二是受基站发射功率限制不能实现大范围探测；第三是基站点位受限天线固定限制了感知范围。因此，通信网基于通感一体技术进行低空探测需要解决多站协作探测问题，以提升探测精度。

由于单站探测结果精度不足，多站协同探测不能基于后融合方法，而应该充分利用多站信号间的相关性实现不同信号数据信息相互支撑，从而提升感知精度。但多站协同探测面临的各基站接收信号的时延与多普勒相互独立导致的信号间缺乏相关性问题，仅基于各站探测结果使用偏差累积的思想进行多信号数据融合的效果提升并不明显。考虑到更普遍的情况下各基站除了能够接收本基站发射信号的回波外，还可以接收到其他基站信号的回波，且部分信号间具有强相关性，从而使得可利用这一相关性实现信号融合。

多站协同探测时的信号相关性体现在两方面，首先，一组收发基站各自的主动感知信号时延之和与被动信号时延存在比例关系，从而能够利用主动信号数据构造与被动信号数据相关联的信息；其次，对于收发基站互易的一对被动信号，其时延应当相同，即两信号具有强相关性，可以直接进行融合。

基于主被动协作的高精度定位技术可从以下三方面提高精度，其一是新信号所提取距离特征矢量相位校准方法，目的是使得多信号数据同相叠加以获得最大信噪比，保证感知结果的精度。其二是基于主动信号数据的被动信号数据构造方法，即将主动信号信息与被动信号信息进行融合以降低噪声干扰。其三是基于距离特征矢量首尾元素相位估计的序列连接、延长方法，通过序列

延长以提升感知结果的分辨率。多站主被动协作定位原理如图 10 所示。

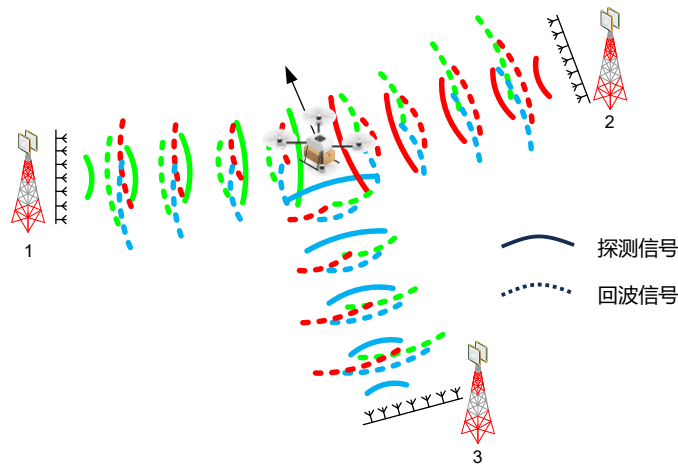


图 10 多站主被动协作定位原理

主被动协作定位技术使得通感一体基站能够充分发挥网络化部署优势，能够有效提高低空探测精度，满足对低空目标的主动探测定位需求。

4.3 空地协同智能机器通信技术

传统无人机主要采用专用数传链路完成无人机与无人机控制器之间的直连通信，2024 年 1 月工业和信息化部印发的《民用无人驾驶航空器无线电管理暂行办法》中明确指出，无人机主要使用 2400-2476MHz 和 5725-5829MHz 两个开放频段完成遥控、遥测、信息传输等直连通信。由于低空空间临近地面，2.4 和 5.8 两个开放频段非常拥挤，虽然采用改进的信道选择与抗干扰技术可以提高数据传输性能，但随着低空经济的推广，开放频段的信道拥挤状况只会愈加严重。考虑到低空经济的持续发展，已有大量无人机采用公众移动通信网完成信息传输任务，以利用公众移动通信网的丰富频率资源和成熟的生态环境。随着低空终端数量的增长，地面的公众移动通信网可以通过适当调整天线角度等方式，对低空空域进行更完整的覆盖，同时随着 5G-A 通感一体技术的发展，低空空地通信与感知的需求将进一步促进地面公众移动通信网络的覆盖优化，满足低空更大范围更高性能的通信需求。

4.3.1 低空空地通信技术

虽然 5G NR 能够提供高可靠、低延迟、大带宽的通信能力，但 5G NR 需要消耗大量资源，且

典型基站覆盖范围在 300~500 米。由于无人机飞行速度较快，较小的基站覆盖范围会导致无人机在飞行过程中存在快速切换问题，影响空地通信效率，同时高性能通信带来的高功耗也对无人机的机载供电提出挑战。考虑到并不是所有的无人机在执行任务中都需要超宽带传输，可以提供一种新的通信技术，在性能和效率之间取得平衡。

在 3GPP R17 中引入了 NR RedCap (Reduced Capability) 技术，针对数据传输速率、电池供电、通信模组复杂性等进行优化，在与现有 5G 基础设施兼容的同时，简化了终端设备的需求并优化功耗，为中等速率的空地通信提供了理想解决方案。2024 年 3GPP R18 版本发布，NR Redcap 技术进一步成熟。在 R18 版本中，最大传输带宽缩减至 20MHz，单用户最大峰值速率从 R17 的百兆以上降为 10Mbps，通过降低收发天线数目（最低 1T1R）及最大调制阶数（如 64QAM），极大降低了终端复杂度（终端成本降低约 60%），并在继承大带宽、低时延等 5G 特征的同时，降低了终端的功耗、尺寸和成本。由于 NR RedCap 继承了 5G 网络的低时延、高可靠特性，并能够通过网络切片技术实现网络回传质量保障及边缘计算接入，非常适合作为低空无人机的飞控链路和中等带宽图传链路，完成典型飞行任务的空地通信。

而对于需要高清图传的飞行场景，可以引入语义通信技术，在较低带宽条件下完成高质量数据传输。语义通信与传统通信的最大区别在于语义通信改变了信源编码和信道编码分离的系统架构，通过信源信道联合处理，提升传输的有效性。另一方面，语义通信有存在于发送端和接收端的共享知识，发送端基于共享知识从信源信息中提取语义信息，接收端基于共享知识根据语义信息进行信息重建，从而减少需要传输的信息量，降低对信道带宽的要求。语义通信的基本模型如图 11 所示。

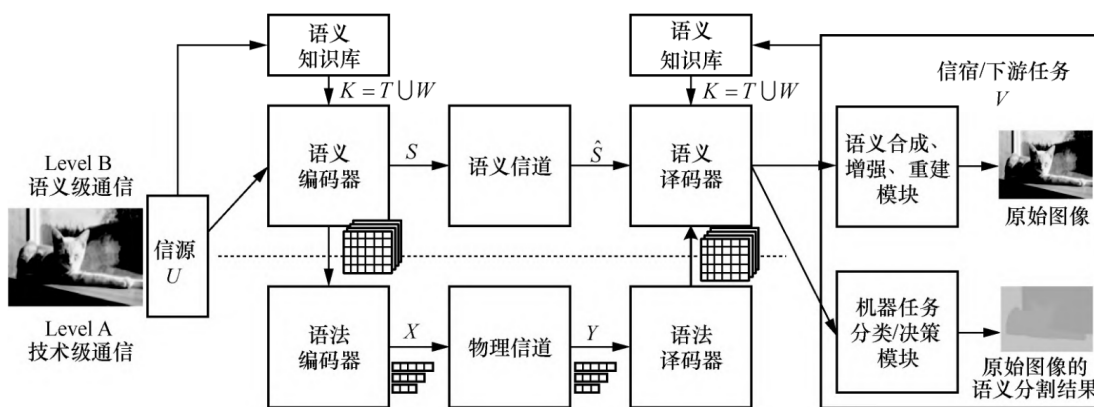


图 11 语义通信架构

例如对于低空无人机的实时高清视频回传需求，可以通过在发送端使用语义通信的预训练模型对视频数据进行语义编码，通过保留对 QoE 至关重要的特征信息最大限度减少冗余信息，而在

接收端通过使用语义通信的预训练模型对语义特征进行恢复，最大限度复原原始视频。通过实时的语义信息提取、编码及传输技术，在满足所需的视频接收质量条件下，相较传统通信的传输数据量最高可降低 60%，可以提高低空环境中无人机通信及抗干扰能力。虽然语义通信增加了计算量，但随着轻量级人工智能模型和人工智能算力芯片的发展，通过语义通信平衡机载计算和通信需求，已经成为未来最有潜力的空地通信技术发展方向。

4.3.2 低空直通通信技术

无人机的飞控和图传等主要采用专用空地直连通信链路完成，为了突破视距局限，还需要 5G 蜂窝通信技术提供泛在覆盖的通用空地通信实现远距离飞控和图传。虽然专用空地直连通信和通用 5G 蜂窝通信能够有效覆盖低空无人机，但从飞行安全的角度，仍需提供空空直连通信技术，支持低空无人机之间的避撞，甚至通过建立多无人机自组织网络，完成多无人机之间的态势共享、无人机编队控制等能力，实现无人机集群协作。

目前无人机空空直连通信标准尚未完全统一，已有的一些协议实践包括 ASTM 国际标准化组织制定的 F3411-22a 标准，可以通过蓝牙或 WiFi 支持无人机广播身份与位置信息；而基于 IEEE 802.11s 的无人机自组织网（Mesh 组网）协议，则用于完成多无人机间组件多跳中继通信网。由于蓝牙或 WiFi 使用公共频点，作用距离近，低空空直连通信受地面干扰较大。IEEE 802.11s 主要采用 LoRa（Long Range Radio）通信技术实现。LoRa 基于线性调频扩频调制（CSS）技术产生 Chirp 信号（“啁啾”信号），使载波频率随时间线性变化，具有穿透力强、抗多径衰落的特点，在 -20dB 信噪比下仍能保持通信，但缺点是带宽低，最大下行速率只有约 50kbps，且通信延迟比较大，并不适合随机交互的多机安全管控。

针对空空直连通信目前存在的空白，3GPP 于 2024 年推出 R18 版本，其中引入了 A2X（Aircraft-to-Everything）技术，用来解决无人机与地面站之间的通信和无人机之间的直连通信。A2X 技术并不是独立发展的，而是基于 V2X（Vehicle-to-Everything）技术延伸而来。支持 V2X 的直通通信技术（LTE-V2X）于 2017 年 3GPP R14 版本中正式发布，支持 5G 新空口的 NR-V2X 则在 2020 年发布的 3GPP R16 版本中得到标准化。LTE-V2X 和 NR-V2X 合并称为蜂窝直连通信（C-V2X: Cellular V2X）。C-V2X 明确采用 PC5 接口提供 D2D 直连通信，采用 Uu 接口提供蜂窝通信，并保证 PC5 接口和 Uu 接口的共存。其中 LTE-V2X 主要采用广播模式支持 PC5 接口，而 NR-V2X 的 PC5 接口则进一步支持单播、组播和广播三种模式。LTE-V2X 的 PC5 接口直通通信时延低于 20ms，支持的车辆相对速度小于 250 km/h，峰值传输速率小于 10Mbps。NR-V2X 的 PC5 接口

直通通信时延更是低于 3ms，支持的车辆相对速度小于 500km/h，峰值传输速率小于 1000Mbps（采用毫米波频段）。PC5 接口的有效通信距离在城市环境约为 300~500m，在开阔环境约为 1km，能够提供大于 90%的数据包传输成功率。由于 C-V2X 技术性能更好，且与移动通信网络具有更好的兼容性，2023年美国联邦通信委员会（FCC）宣布在美国 14 个州部署基于 5.9G 频段的 C-V2X，2024 年 FCC 通过了 5.9G 频段智能交通系统向 C-V2X 技术过渡的最终规则，为 C-V2X 提供了 30MHz 带宽，至此，使用 C-V2X 作为车辆之间和车路之间的直通通信技术成为地面交通的主要技术路线。

在地面交通的车路协同智能驾驶实践过程中，C-V2X 技术面临的主要问题是地面交通系统中现存的大量有人驾驶车辆能够自行完成驾驶环境态势感知，高等级自动驾驶车辆也可以依赖丰富的车载传感器进行驾驶环境态势感知，对广播的基本安全信息（BSM）依赖度较低。而在低空环境中，远程遥控无人机的飞手对空几乎无感知能力，而无人机自身由于载重等原因难以配置高等级的传感器及算力，机载设备对空感知能力也较低，迫切需要基于空空直通通信和地空直通通信的实时飞行情报和飞行服务，以保障飞行安全。

基于 A2X 的空空、空地协同的逻辑架构如图 12 所示，无人机（UE）之间可以通过 PC5 直通通信接口完成机载 A2X 应用的直接交互（A2X5 接口），并通过 Uu 蜂窝通信接口完成机载 A2X 应用与地面 A2X 服务之间的交互（A2X1 接口）。地面的无人机控制器（UAV-C）可以通过多种通信方式通过 A2X1 接口接入 A2X 服务，从而完成多无人机与无人机控制器之间的协同。

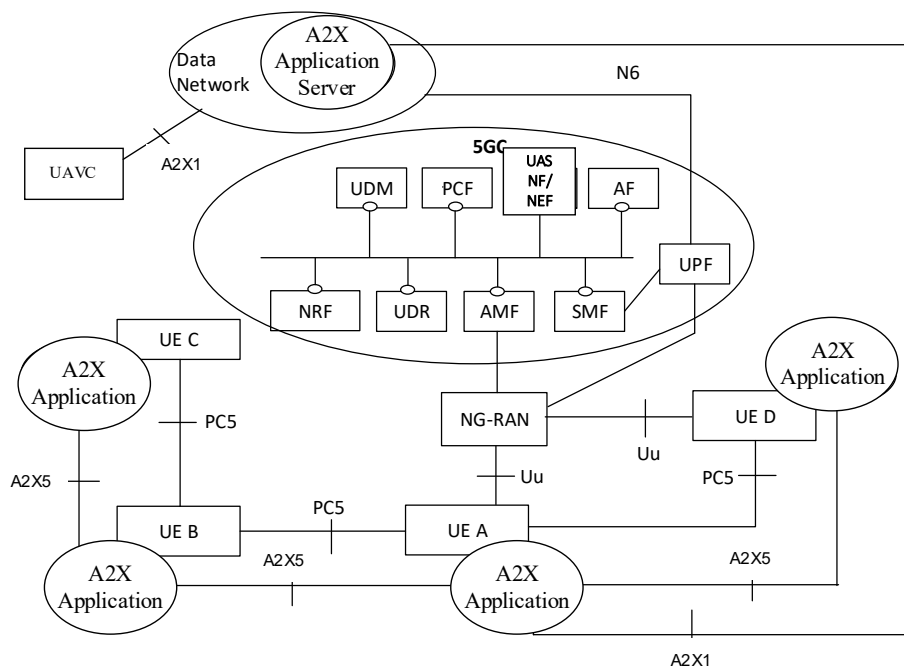


图 12 A2X 功能架构

当通过 A2X 支持低空飞行管控，区域空域管理者（AAM: Area Airspace Manager）可以通过在地面设置支持 PC5 直通通信的接收站、无人机基于 Uu 蜂窝通信回传和无人机控制器通过直通通信收集信息回传等三种方式，实现对低空无人机广播的身份信息（BRID: Broadcast Remote Identification）、直接探测与避让信息（DDAA: Direct Detect And Avoid）等的获取，并完成对低空空域飞行态势的掌控和服务。

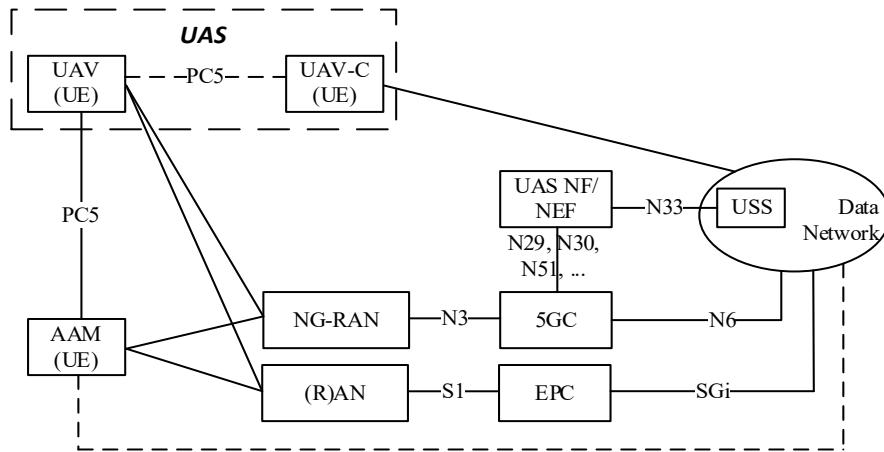


图 13 A2X 与低空空域管理之间关系

A2X 通信技术在无人机与无人机控制器之间的专有直通通信之外，提供了基于公众移动通信网的超视距通信支持和与 4G/5G 通信技术兼容的直通通信支持。A2X 不但可以提供无人机之间自主协商通信支持，还能够通过地面基站协调实现多无人机直通通信资源调度，从而提高直通通信效率，为未来自主式无人机之间的感知共享、决策协同等无人机群体智能运行提供了技术支持。进一步可以通过 A2X 技术建设独立于无人机与无人机控制器之间直通通信的低空空域管控网络，将低空飞行管控与无人机运营分离，从而在保证无人机群体运行安全的基础上，实现低空空地自主协同的安全运行保障。

4.4 传控分离的智简管控网络技术

航空系统主要使用航空电信网（ATN: Aeronautical Telecommunication Network）完成空空和空地组网，通过引入 VDL、AeroMACS 等无线通信技术和 ATN/IPS 数据组网技术完成组网，提供空中交通管制（ATC）等服务。但是由于低空空间与地面公众通信空间重叠，且低空空域并不纳入航空管制范围，低空无人机无法直接接入航空电信网，也不会直接使用航空电信网提供的空中

交通管制服务，因此，需要单独建立支撑低空经济的服务网络。同时考虑到低空业务运营过程中需要的实时管控需求、实时多媒体回传需求等的差异，低空飞行管控业务与低空经济运营业务用同一张网络支撑会面临业务质量保障差异大，安全性要求差异大等问题，有必要借鉴航空电信网，建立独立于互联网之外的低空飞行管控网络，为未来大规模低空飞行提供运行支撑。

4.4.1 低空飞行管控网络技术

目前无人机单机的飞行航迹规划主要由无人机控制器（UAV-C）完成，或通过预先设置规划好的航线，由无人机机载飞控通过路径跟随（Path Following）和航迹跟踪（Trajectory Tracking）完成飞行控制。未来随着低空经济的发展，大规模无人机在有限的空域中运行，将存在大量的冲突避免需求，就需要通过低空飞行管控服务完成无冲突航迹规划，并在飞行过程中实时监测飞行过程，并及时提供冲突风险等飞行情报服务及冲突避免服务。由于低空飞行管控服务对低空安全的重要性，需要建设专用的低空飞行管控网络，为无人机飞行管控提供低时延、高可靠、高安全性保障。低空飞行管控网络的结构如图 14 所示：

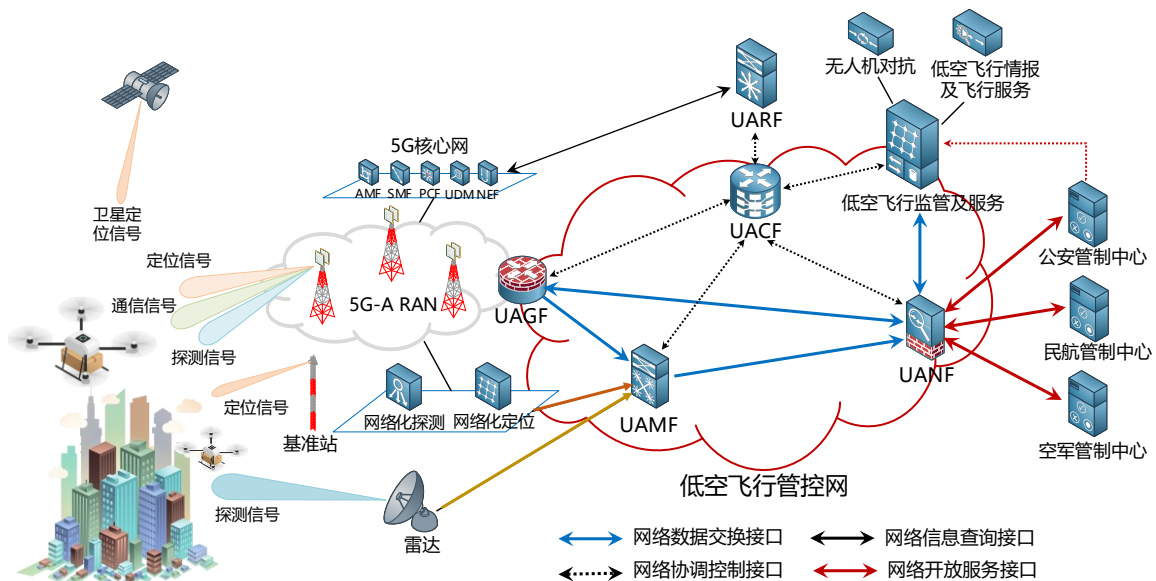


图 14 低空飞行管控网络架构

低空飞行管控网能够解决以下几方面问题：

1、多制式空地通信接入：无人机空地通信可以采用 A2X 体制的 Uu 蜂窝通信接入或 A2X 体制的 PC5 直通通信接入，也可以采用专用空地直通通信接入。由于存在多电信运营商和不同无人机制造商的不同专用空地直通通信体制，低空飞行管控网络需要支持多通信制式和多接口机制的

就近接入，并通过无人系统网关功能（UAGF）完成专用接口向飞行管控统一接口的接入适配，解决无人机在整个飞行过程中的发现、寻址、交互问题。

2、无人机大范围低空飞行过程中的移动性管理：由于低空飞行服务域采用属地管理方式，在无人机跨域飞行过程中，会存在无人机注册地、起飞地和目的地三地不一致的情况。传统飞行服务云集中管理方式无法满足属地管理需求，也难以满足低空飞行管控的实时性要求，需要将低空飞行服务下沉到区一级。为此，低空飞行管控网络需要提供无人系统控制功能（UACF）完成飞行服务域内的无人机接入 UAGF 寻址、无人机与无人机控制器接续，跨飞行服务域的控制权移交、数据分发订购等功能。同时提供无人系统注册功能（UARF）完成所管辖的飞行服务域注册的无人机和无人机控制器属性管理，并在无人机飞行过程中完成接入飞行服务域管理与跨服务域飞行的管治权移交协调功能。

3、低空飞行态势汇聚与按需开放：低空飞行服务域需接入 5G 网络化感知、雷达网络感知、合作式无人机上报 BRID 等多种异构方式的低空飞行状态感知信息，需接入电磁干扰感知与定位等多种体制方式的低空飞行环境感知信息，并融合为低空飞行环境态势，提供给低空飞行监管及服务使用。低空飞行服务域需要向公安、民航、空军等管制中心共享低空飞行态势。当无人机跨低空飞行服务域飞行的时候，无人机起飞域也有必要全程监视无人机及其周边空域态势。飞行服务域内的感知融合通过无人系统管理功能（UAMF）提供，域内和跨飞行服务域的内容开放由无人系统网络服务功能（UANF）完成，UANF 在 UACF 的协调控制下向订购指定无人机、低空空域飞行态势的相关方进行开放，而不是由各个相关方直接访问飞行服务域内的服务系统，以保证低空飞行服务域的安全。

4、超视距飞控接续与超控控制：针对超视距远控需求，可通过低空飞行管控网提供飞控接续能力，通过 UAGF 在无线网络边缘接入，并在 UACF 控制下实现无人机接入 UAGF 与无人机控制器接入 UAGF 之间的直通通信，降低回传云端的时延，保障无人机与无人机控制器之间飞控交互和飞行态势认知的实时性和可靠性，同时通过专用飞行管控网提供接入与接续也能避免在互联网上交互存在的风险。针对超视距远程控制存在的公共安全风险，一方面可通过 UAGF 将空地飞控过程进行旁路，以支持飞行过程审计，另一方面也可以通过 UAGF 向无人机下达飞行超控指令，由低空飞行监管与服务系统根据安全管控需求向无人机下达悬停、降落、返航等紧急超控，从而在紧急情况下实现对低空无人机的有效控制。

与空中交通管控的分层体系对应，低空空域的管理体系也分为三层，分别为区级飞行服务域、省级飞行服务域和国家级飞行信息管理域，其中区级飞行服务域完成具体的空域管理、飞行安全与公共安全管控等工作；省级飞行服务域完成全省信息汇聚，以掌握全省的飞行信息，完成跨区

级飞行服务域和跨省级飞行服务域的协调，为省低空经济发展提供决策支持；国家级飞行信息管理域则汇聚全国低空经济发展状况，为国家级政策、标准制定提供支持。基于这三级体系，低空飞行管控网络的分层架构如图 15 所示。

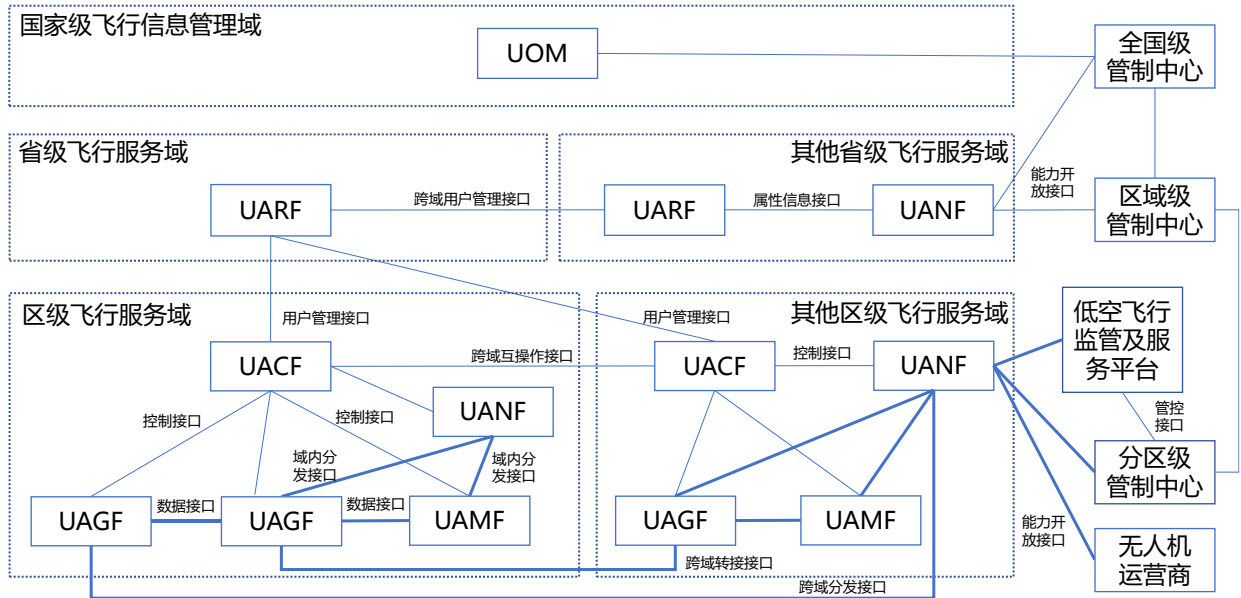


图 15 低空飞行管控网分层架构

在低空飞行管控网络支持下，每个区级飞行服务域都成为一个可自主运行自治管理的低空空域管理区域，并通过低空飞行管控网络完成各个区级飞行服务域之间的互联互通，形成跨区级飞行服务域和跨省级飞行服务域的平面网络，保证了域内的自治性和域间的互操作性。低空飞行管控网络的跨域互操作结构如图 16 所示。

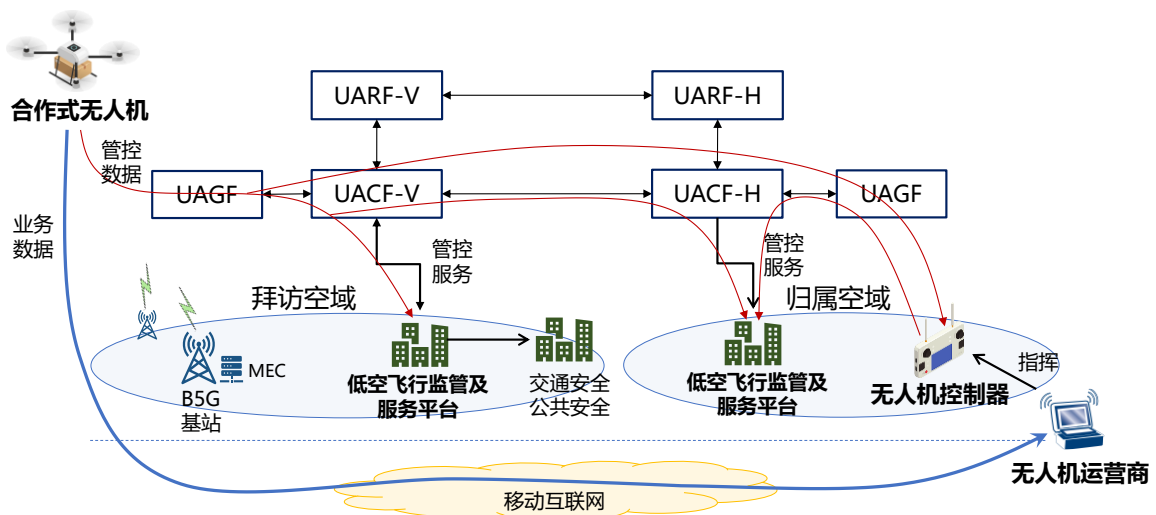


图 16 低空飞行管控网跨域互操作架构

低空飞行管控网针对低空空域属地管控与无人机跨域飞行的矛盾，提供了跨低空飞行服务域

的无人机系统身份信息管理、订购分发管理与移动性管理，实现了飞行服务域之间的网络化组织与交互访问控制，既保证了飞行服务域的独立性和安全性，又保证了飞行服务域之间的互操作性，并通过低空飞行管控网为无人机飞行审计和超控提供了可行的手段。

4.4.2 算网一体资源管控技术

公众移动通信网已经广泛采用控制和用户平面分离（CUPS：Control and User Plane Separation）的策略，在这一策略中，控制指令与用户数据采用不同的网络架构和服务保障方式，以完成最佳的网络控制效果和用户数据传输效率。通过将低空飞行管控网络与低空业务运营网络分离，网络运营商可以根据低空飞行监管与低空业务运营的差异化需求分别进行优化以保障业务服务质量。低空算网一体的网络部署架构如图 17 所示。

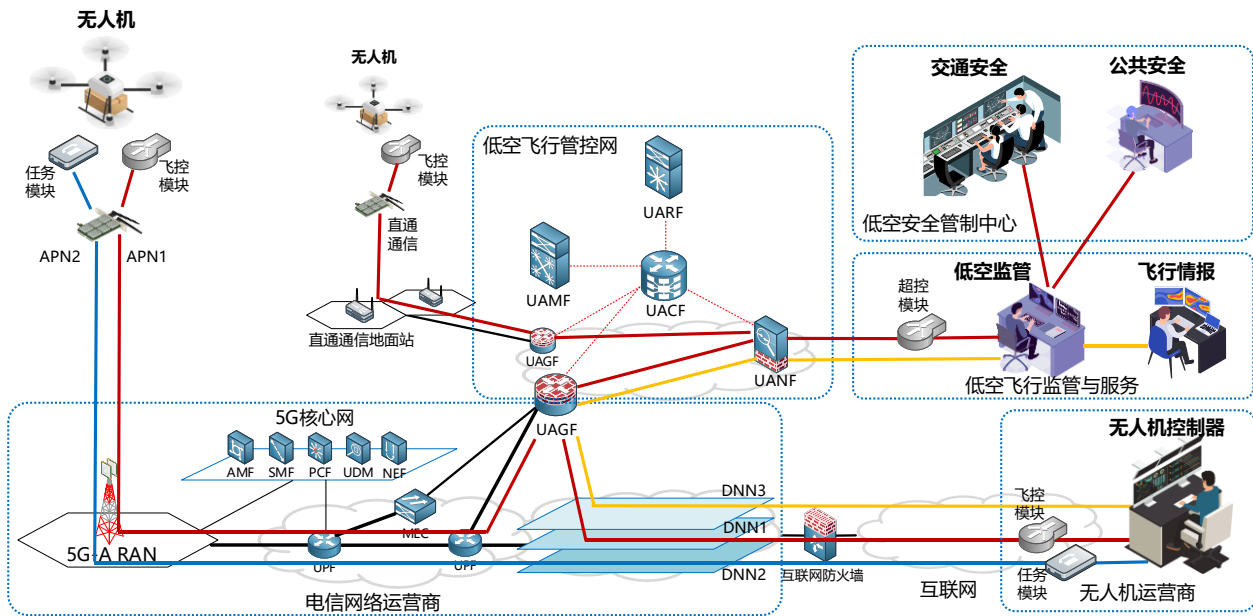


图 17 低空算网一体网络部署

移动网络接入可以通过接入点名称（APN：Access Point Name）来区分移动终端所连接的网络标识，并将终端接入由 APN 标识的内网，从而支持将接入访问与公网隔离，保证移动终端的网络接入安全性与可靠性。对 APN 的描述、定义和使用同样适用于 5G 网络的网络切片选择。5G 网络的数据网络名称（DNN：Data Network Name）支持基于用户面功能（UPF：User Plane Function）的网络“切片”传输，从而保障具有指定 DNN 标识的终端能够接入具有指定 SLA 保障和安全隔离的端到端逻辑网络。在低空飞行服务的实践中，可以通过在终端侧设置不同的 APN，分别用于支持低空飞行管控网络的接入和面向低空业务的移动互联网接入，从而保证通过统一的 5G-A/A2X

网络体系提供相互隔离的差异化网络能力和网络服务质量（QoS: Quality of Service）支持，并将低空飞行控制专网与公网隔离，从而确保网络访问的安全性及数据传输的私密性。在网络侧，可以通过 UPF 将承载的数据流按照指定 APN/DNN、源端 IP、目的端 IP 等规则，将数据分流到边缘计算（MEC），从而保证了终端回传数据能够尽快抵达计算节点，完成数据处理，并低延迟的完成地空响应。还可以通过 DNN 选择不同的网络切片，从而保障低空飞行管控与低空运营业务分别遵从不同的业务质量等级完成端到端数据交互。

在实际部署过程中，无人机的飞控模块和任务模块将分别通过不同的 APN 完成空地通信接入，飞控的空地通信会在网络边缘侧直接接入低空飞行管控网络的 UAGF，从而保证低空飞行管控网络的接入实时性和可靠性。无人机的机载任务可以根据需要配置是否将任务数据卸载到边缘计算，是否通过网络切片实现大带宽或低时延的空地业务数据传输等，从而保障了低空飞行管控的安全性、实时性服务，及低空经济业务负载的大带宽低时延服务。

随着无人机技术的飞速发展及其应用场景的不断拓展，未来低空无人机也将从人控走向智控，从单机运行向多机协同运行。这些目标对无人机的环境感知、数据处理和通信能力带来了多样化且复杂的挑战。由于机载能力限制，无人机必将会把大量的感知内容卸载到边缘计算实现实时计算，以降低无人机功耗延长巡航时间。而随着低空无人机数量的急剧增加，服务于低空的空地通信资源和边缘计算资源会产生竞争，影响空空/空地协同效率。因此，需要根据低空无人机的业务需求，考虑无人机空间位置关系、多无人机相互影响，对空地通信网络资源和算力资源进行联合调度优化，实现空间-通信-计算资源的一体化按需调度。根据低空任务的实时性、复杂度和能耗需求，低空计算任务可以分为三类：机载执行的实时决策类任务；可卸载至边缘节点的准实时复杂计算类任务；需传输回云端的非实时大规模计算与存储类任务。通过分层计算架构，可以根据无人机飞行计划、无人机运营的计算任务、无人机空地通信签约等，动态调整飞行规划和计算资源分配，从而在飞行任务目标、计算性能和飞行能耗之间实现最优平衡。

算网一体资源管控需要对无人机运营的任务需求进行深度整合，而目前大量孤立的无人机系统运行导致对无人机的任务需求难以全面认知，也难以平衡任务的安全性和算网资源调度有效性之间的关系。低空飞行管控网络一方面可以完成飞行安全、公共安全管控问题，另一方面低空飞行管控网络在进行低空大规模无人机飞行规划过程中，可以接入通信网络的网络通信资源态势和网络计算资源态势，并结合空域资源态势和多无人机任务规划，完成物理-通信-计算资源的联合规划，一方面引导无人机航迹规划，另一方面向运营商反馈通信和计算资源调度需求。由此建立起的一体化低空算网资源调度框架，不仅能够提升无人机群的运行效率，还能增强其在复杂环境下的适应性和鲁棒性。

4.5 群体智能低空态势演化技术

为了维持低空空域的安全和交通秩序，低空空域会被划分出航路供无人机按飞行计划通行。随着低空经济发展，无人机数量会越来越多，单纯依赖航线预规划难以解决低空航路面临的日益严重的拥堵问题。疏导交通拥堵主要包括交通态势预测和交通态势推演两大类方法。交通态势预测通过历史数据学习交通态势的演变，但目前低空空域尚无大量累积数据，无法通过数据规律挖掘提供交通态势预测。如果通过交通态势推演进行无人机航迹规划，由于无人机之间的航迹规划相互影响，系统对全体无人机进行路径规划会出现指数级的搜索空间和状态空间，导致复杂度过高，无法在有效时间内完成搜索。目前可选的另一种方法是采用强化学习，通过长时间的空中交通态势遍历来学习应对策略。但由于真实的低空运行环境中，不但无人机运动比地面车辆高了一个维度，空路也从地面道路的二维变为三维，这都导致大规模强化学习代价太大，且难以要求所有的无人机都具备相同的规划模型。

与地面交通类似，低空无人机群体的联合航迹规划主要面临一下三个问题：

1、难以平衡用户均衡与系统最优：Wardrop 平衡原理由用户均衡（第一平衡原理）和系统最优（第二平衡原理）组成，平衡用户均衡和系统最优是协同路径规划问题中最基本的问题。用户均衡更注重用户之间的公平，每个用户选择对自己最合适的路径。系统最优更注重整体效率，在整个系统范围内最小化总的通行时间。然而当满足用户均衡时，总的通行时间并非最小，同样总的通行时间最小时，各用户之间可能不再公平。

2、多机协同下为无人机规划路径复杂度过高：假设有 n 架无人机在同一时间规划飞行路径，并且所有的起点到终点之间可能有 k 条潜在的路径，那么一共存在 k^n 种匹配的可能性。虽然可以使用剪枝技术来降低复杂性，但如果低空存在上千架无人机同时进行航迹规划，那么这一复杂性仍然会导致无法实时路线规划。

3、交通环境具有时空相关性：从空间角度来看，采用单一共享航路模式可以将路线规划复杂性降低为固定空域占用规划，但这种模式会降低空域利用率，进而导致交通拥堵。同时，交通网络拓扑的各个节点是相互影响的，单点的交通拥堵也会在交通网中持续扩散。从时间角度来看，不同时间之间的拥堵是变化和发展的，某空路的交通状态不止与当前状态有关，还与该空域的未来趋势有关。

针对用户均衡与系统最优难以平衡的问题，可以通过基于演化博弈的交通态势选路算法完成区域中的所有无人机的选路规划。针对多机联合规划复杂度过高的问题，及演化博弈的参与方规模限制，无法直接基于演化博弈提供全局端到端路线规划。考虑到交通环境具有的时空相关性，

可以将低空空域分解为多个局部空域，局部空域内通过满足用户均衡的博弈算法完成多无人机航迹联合规划，并形成局部空域交通态势；局部空域间则通过区域状态组合为全局空间状态，并进行区域状态推演。在全局推演中，可通过蒙特卡洛树搜索的方法，对多个不同的低空交通态势组合进行推演，寻找最优的低空交通态势演化方向，并反馈引导局部空域内的多无人机演化博弈方向。如图 18 所示，通过反复的推演过程，最终得到无人机的最优飞行路线决策。

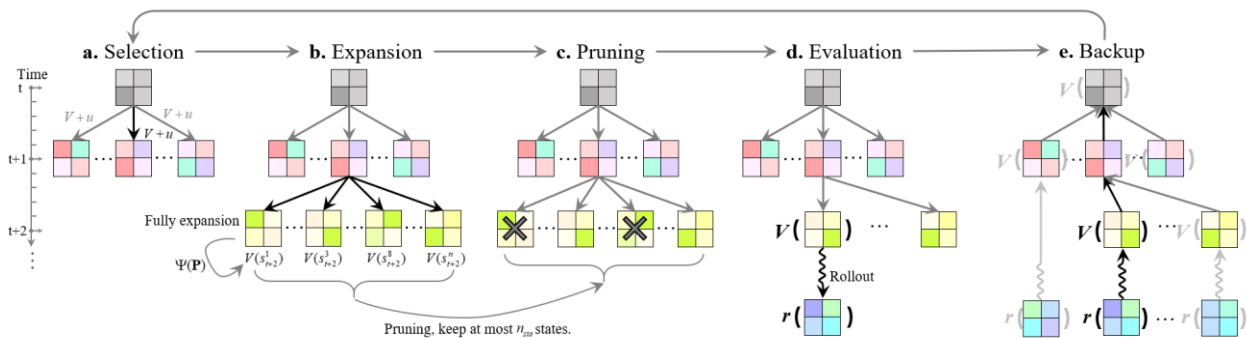


图 18 基于蒙特卡洛树搜索的交通态势推演过程

(1) 选择：选择过程由父节点选择合适的子节点，目的是选择值函数比较好的状态作为下一状态，在前期遍历次数较少时，有的节点虽然状态评价不是很好，但该节点的访问次数也会很小，因此会增加该节点被遍历到的概率，即前期会有更多的探索过程。

(2) 扩展：扩展过程由一个叶节点扩展出多个新的叶节点，每当一个叶节点的访问次数超过阈值时，该叶节点将会被扩展。扩展的过程是区域规划者规划策略的过程，即迭代每个区域规划者生成的所有可能的策略组合。

(3) 剪枝：扩展过程会产生指数级的新状态，需要剪枝细化。对于每个状态，可以使用评估函数来提前拒绝一部分状态，计算方法可以包括位置分布均衡度、距目的地距离、距目的地的最短理想时间、交通态势均衡度等。

(4) 评估：评估过程是采用模拟仿真的方法，来评估一个叶节点的价值。评估价值的策略包括当前叶节点状态中各个无人机已经规划好的路径，并模拟仿真到最终状态（到达终点），奖励就是到达最终状态花费的时间。

(5) 反向传播：反向传播过程是将叶节点评估完的值函数通过反向迭代传播给它的父节点。当叶节点的仿真结束后，会将最终消耗的时间反向传播给该路径中其他节点。

基于分层的全局交通态势推演算法，能够有效解决低空多无人机联合规划面临的规模大、收敛慢、群体时空相关等问题，为多无人机联合运行管控提供有效支持。

5. 低空空域运行管控场景与控制模式

5.1 低空空域态势认知

在城市低空飞行场景中，由于建筑物密集地面杂波严重，导航定位卫星信号遮挡严重，地空雷达的探测距离受限，且需要重新建设基础设施，更多部署在要地完成低空覆盖，此时可通过城市环境中比较完善的公众移动通信网基础设施，选择适当的基站站址，将基站升级为基于 5G-A 通感一体的低空探测与通信基站，利用探测信号与通信信号的融合完成低空的网络化探测覆盖能力。同时，利用城市基站密集的特点，在低空覆盖基站中部署网络定位能力，利用定位信号与通信信号的融合，服务于低空的高精度定位，并与卫星定位和卫星定位差分站一起，构成低空完整的网络化定位覆盖能力。

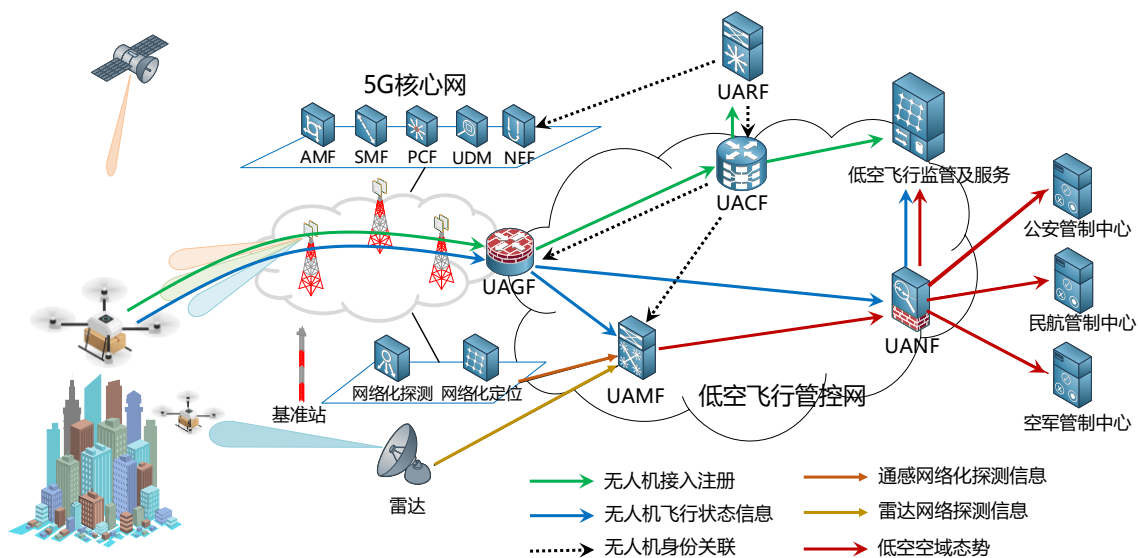


图 19 低空空域态势认知示意图

合作式无人机基于低空定位网络完成自身高精度定位，并向低空飞行管控网发起无人机接入注册（含 BRID、ICAO 代码、注册地、飞行计划等信息），并高频率回传无人机飞行状态信息（含 BRID、飞行速度方向、位置坐标等信息）。UAGF 完成无人机管控连接接入，并由 UACF 判断无人机注册地，向 UARF 进行无人机管控信息注册。UARF 接受注册后，会通过 5G 核心网请求无人机通信网属性，判定接入无人机的通信网接入合法性，并设置该无人机的飞行管控接入链路质量等级。UARF 完成无人机接入身份认证后，会将无人机身份关联信息更新给 UACF、UAGF、UAMF，保障无人机接入的身份授权和主被动探测结果的关联。之后，通感一体网络化探测的低

空目标和雷达探测的低空目标会融合为低空综合态势，并与合作式无人机上报的飞行状态信息融合，形成低空空域态势，通过 UANF 发布给订购了低空空域态势的各个飞行管控相关方，保障各个相关方所看到低空空情的一致性。

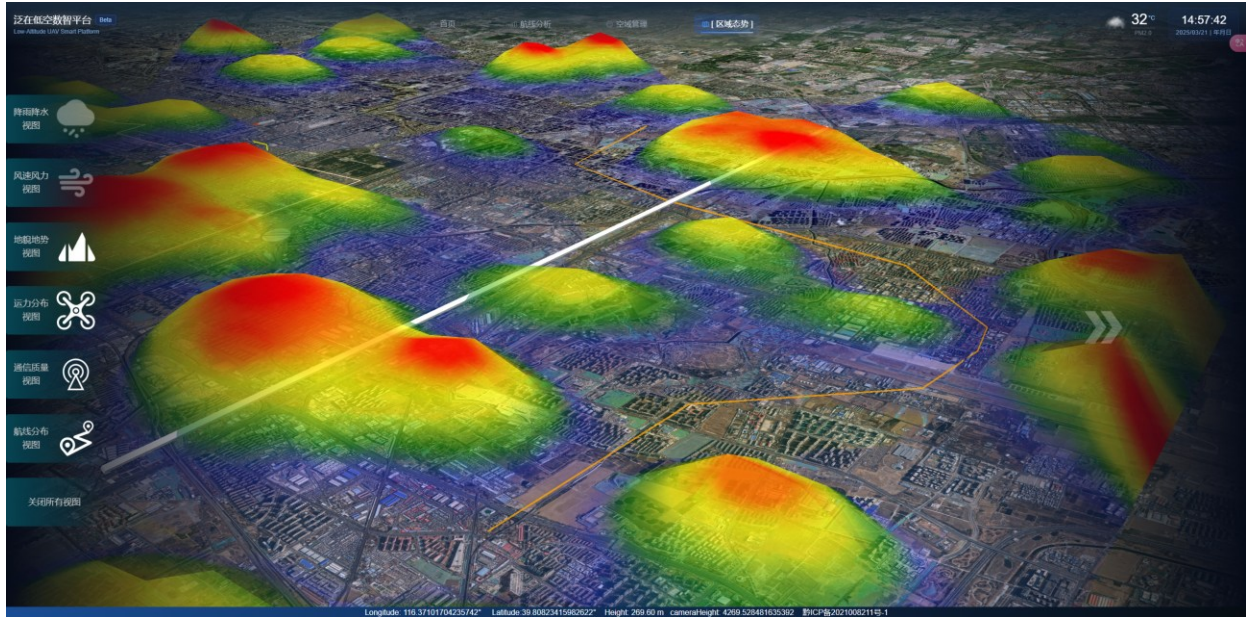


图 20 低空空域态势服务界面

如图 20 所示，在低空飞行管控网支持下，低空飞行监管及服务平台能够获得所属低空空域的飞行态势、电磁环境态势，再结合气象、地形等信息，可以进行全面的低空航线评估、低空飞行风险评估，并辅助空域管理人员和无人机运营商进行飞行航线、飞行计划的规划和审批。

5.2 低空飞行情报与飞行服务

无人机与无人机控制器之间可以采用专用直通数传链路完成飞控和数传，但无人机与无人机控制器也需要提供通信链路接入低空飞行管控网，由低空飞行管控网提供飞行情报及飞行服务，并对低空飞行行为进行监管。针对飞手遥控无人机，飞行情报及飞行服务主要针对飞手，提供气象（适飞空域）、限飞（临时航路调整、临时空域管制）、空域态势（航路交通状态、异常空情）等等飞行情报，辅助飞手判断飞行环境，实现低空安全飞行。针对自动驾驶无人机，飞行情报机飞行服务主要针对机载飞控能够理解的气象、限飞、空域态势等飞行情报信息，辅助实现低空安全高效飞行，并根据需要提供飞行航迹规划引导、避撞航迹规划引导等高级飞行服务。

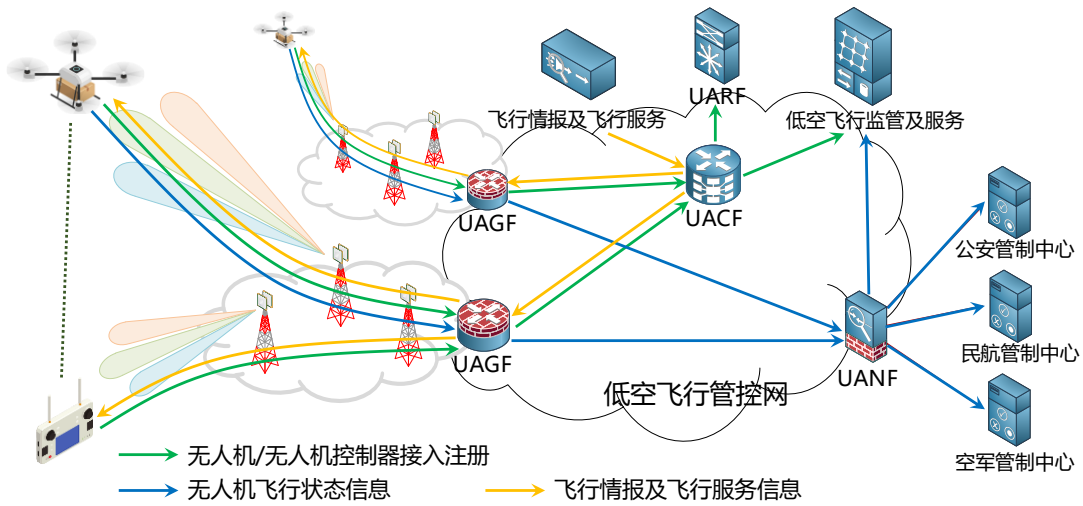


图 21 低空飞行服务示意图

在无人机和无人机控制器完成接入注册后，UACF 会根据无人机类型建立服务合约，该服务合约维护无人机接入的 UAGF 和服务订购方（无人机还是飞手），并维持订购关系直到无人机或飞手降落注销。该订购关系会同步到 UAGF，并伴随无人机接入不同的 UAGF 而在 UAGF 之间移动，从而保障无人机能够实时接收到所需的飞行情报与飞行服务，如气象风险、碰撞风险、安全风险、路线规划引导等。

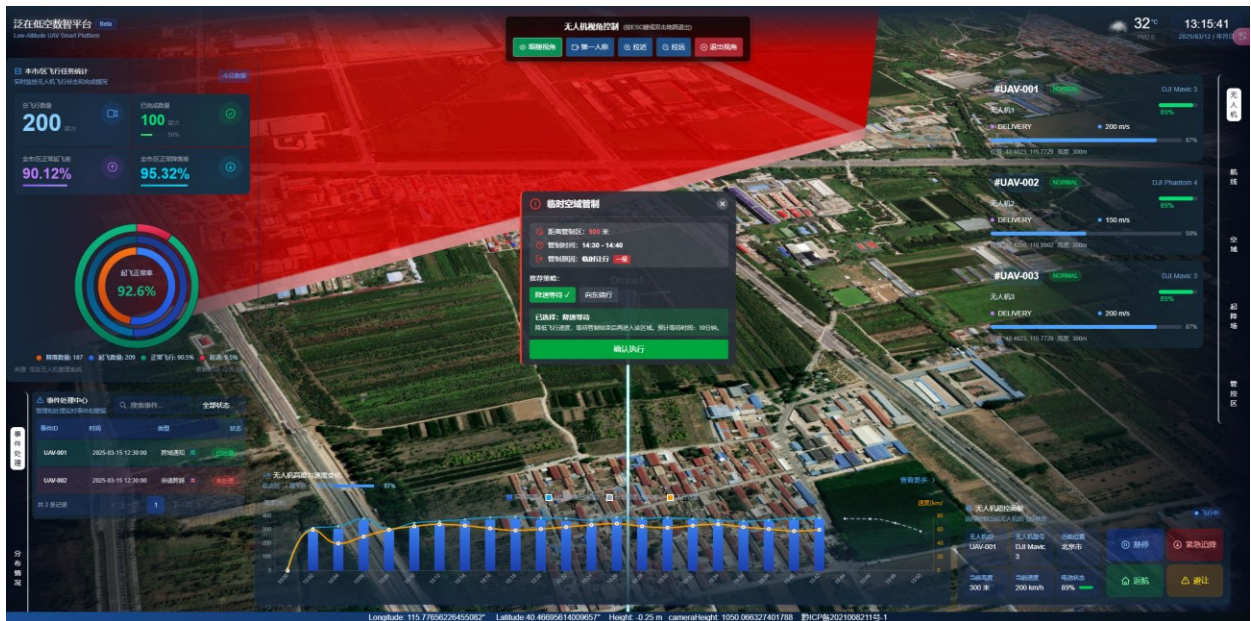


图 22 低空飞行情报与服务界面

如图 22 所示，当低空空域由于活动、烟雾遮挡、强风等原因临时进行管控，影响飞行中的无人机时，会向无人机及飞手出现无法通行的时候，会向正在飞行的无人机发送临时空域管控的飞

通过无人机管控指令向接入的无人机下达悬停、降落、返航、规避等指令，并根据指令的执行情况判断是否进一步执行无人机对抗操作。

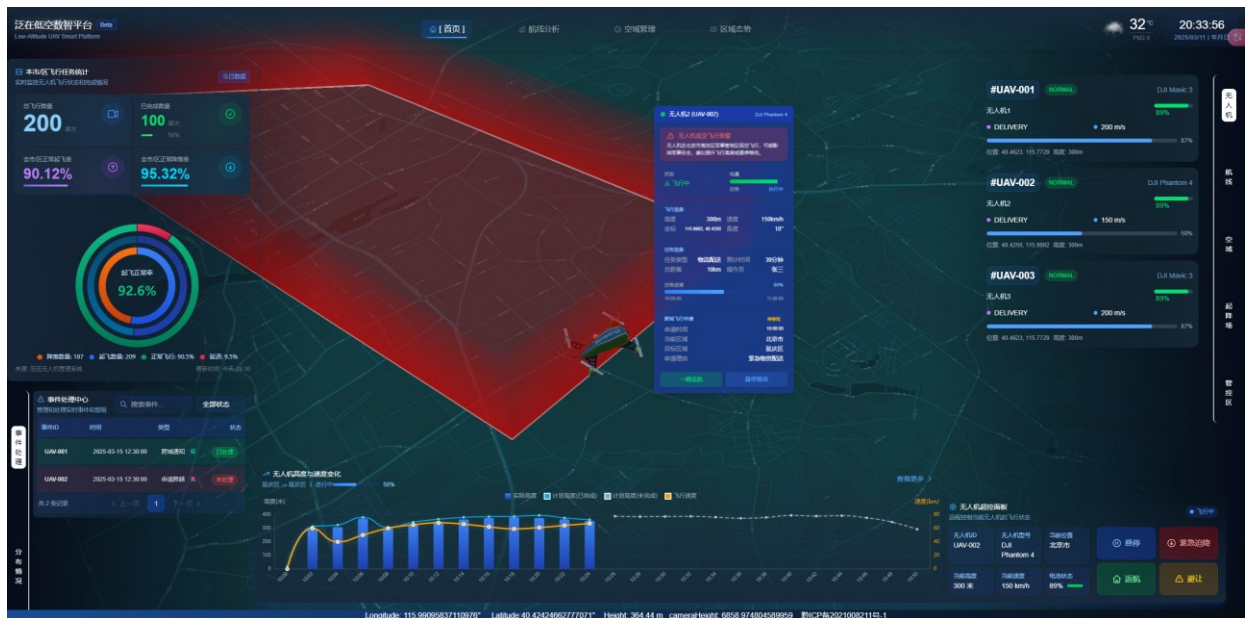


图 24 低空飞行管控界面

如图 24 所示，在无人机收到临时飞行管控的飞行情报后未能做出正确响应，进入限制飞行的区域，低空飞行监管及服务系统会检测到异常事件，并提醒执行超控策略。监管人员确认超控策略，并附加原因后，向无人机发送超控指令，如要求悬停、降落或返航等。

5.4 跨域低空飞行服务移交

低空空域采用属地化服务方式，由区级飞行服务域中的低空飞行监管与服务平台完成所属空域的运行管控和服务。在无人机执行跨飞行服务域飞行的时候，由于飞行距离远在视距之外，无人机的飞控需要通过低空飞行管控网提供空地链路完成接续，归属地的低空飞行监管及服务平台，也可以看到由本飞行服务域起飞的无人机当前在其他飞行服务域的飞行状况，以更好的实现跨飞行服务域联动。考虑到低空经济一般划分为区级飞行服务域、省级飞行服务域、国家级飞行信息管理域三级模式，可以将低空飞行监管及服务平台部署在区级，将 UARF 部署在省级，从而聚合全省合作式无人机飞行属性和状态，进行集约化管理。

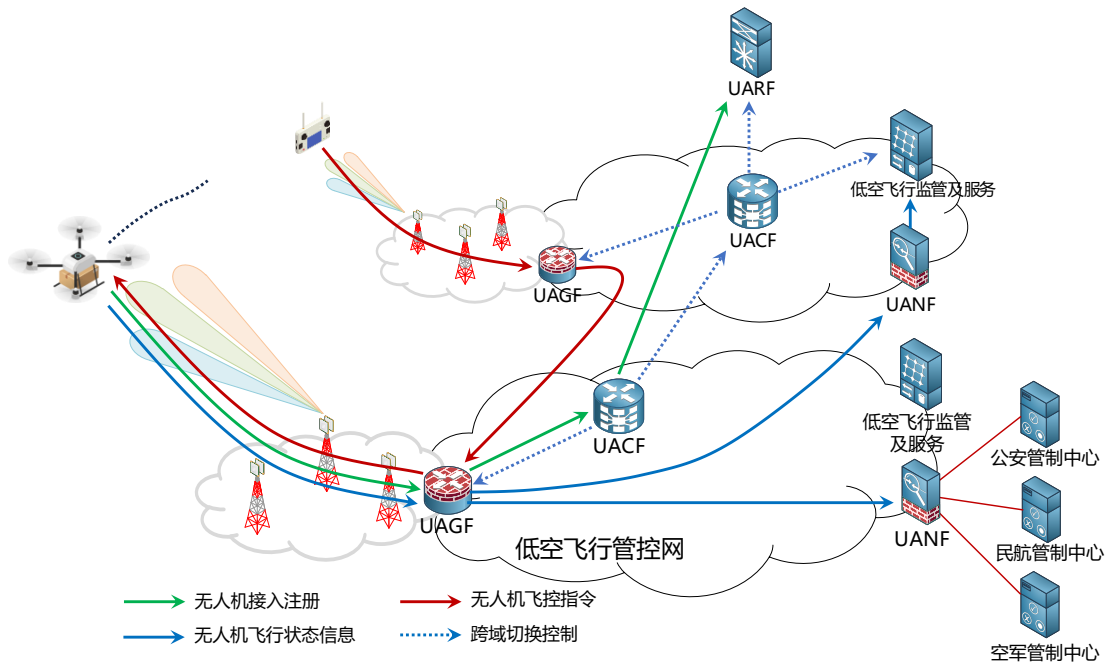


图 25 跨域飞行服务示意图

无人机进入新的飞行服务域范围，会接入当地低空基站，并通过接入点策略将空地飞行管制链路锚定到新飞行服务域的 UAGF，此时无人机会通过新飞行服务域的 UAGF 完成无人机接入注册。在向 UARF 注册过程中，会触发无人机跨域切换策略，切入的低空飞行管控网 UACF（UACF-V：拜访地 UACF）与切出的低空飞行管控网 UACF（UACF-H：归属地 UACF）进行切换协商，向切出域的 UAGF 更新无人机在切入域的接入点，向切入域的 UAGF 更新无人机控制器在起飞地的接入点，从而完成无人机跨域飞行过程中的空地链路维持。同时，跨域切换会同时更新切入域的无人机飞行状态订购策略，将指定无人机的飞行状态信息推送给起飞域的 UANF，以保证起飞域低空飞行监管对由其服务域飞出的无人机也能持续获取运行状态。

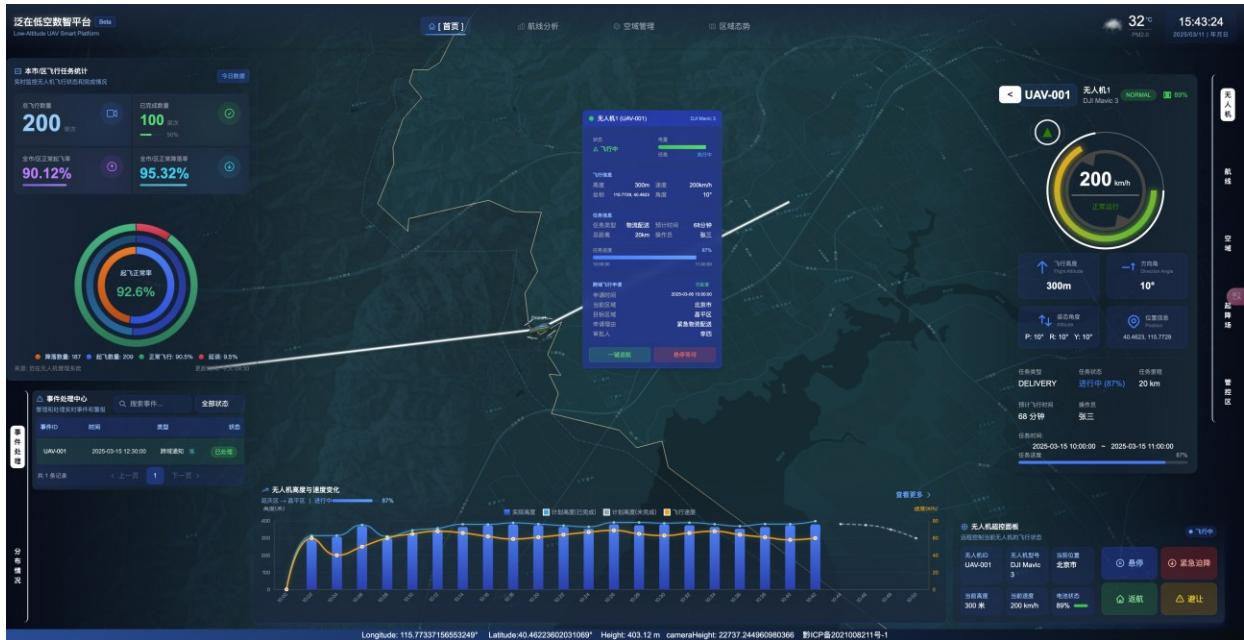


图 26 跨域飞行服务界面

如图 26 所示，当无人机航线跨越不同飞行服务域，航线穿越的飞行服务域低空飞行监管及服务平台会通过低空飞行管控网订购该无人机飞行状况，之后起飞地飞行服务域会将该无人机监视信息共享给本飞行服务域，从而实现对无人机飞行全过程的监视。当无人机进入本飞行服务域的时候，会产生跨域事件通知，飞入的飞行服务域低空飞行监管及服务平台会获得对该无人机进行超控的权限。

5.5 跨省低空飞行服务移交

由于省域之间的飞行信息管理、飞行政策等是不同的，如果需要完成跨省飞行服务域低空飞行，低空飞行管控网需要完成跨省域的互联互通，保障低空飞行的持续性和安全性。

无人机进入新的飞行服务域并完成无人机接入注册过程中，拜访地的省域 UARF 会发现该无人机非本域注册，并通过无人机信息获取其注册地，通过与注册地 UARF 交互获取无人机授权信息，并获取无人机起飞域，再通过与起飞域 UARF 协调，完成后继无人机跨域切换过程，从而保障起飞域地面控制站与飞入无人机之间的空地飞控链路通畅，维持其实时性，同时将指定无人机的飞行状态信息推送给起飞域的 UANF，以保证起飞域低空飞行监管对由其服务域飞出的无人机也能持续获取运行状态。

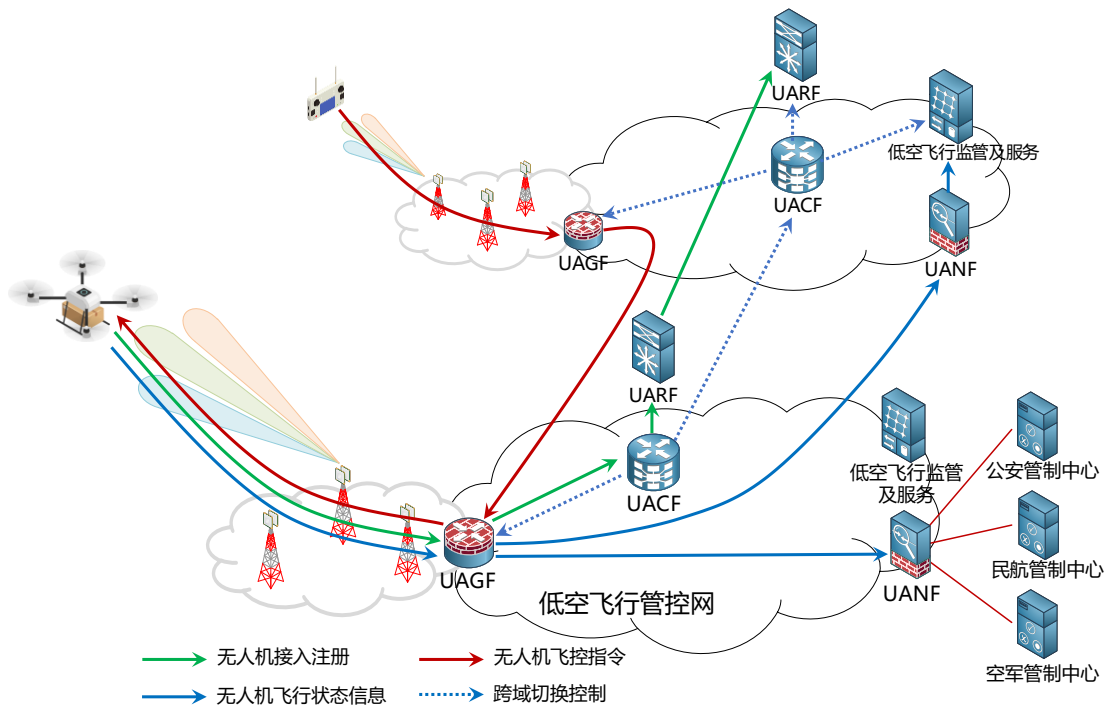


图 27 跨省飞行服务意图

6. 总结与展望

低空经济涉及通信技术、导航定位技术、人工智能技术、空域管理技术、飞行器技术、安全隐私保护技术等多种关键技术，面向低空物流配送、应急救援、运动文旅、农林环保、消费娱乐、低空交通等多种应用场景，有可能实现空地一体多层次的立体交通革命，促进无人机、eVTOL、空地通信等新型产业的崛起，并改变人们的出行方式和社会服务方式。但由于低空空域面临的无人机技术先于低空交通管控技术发展的现状，导致低空环境中的无人机技术、空地通信技术、探测技术等体制差异大，各自发展各自为政。同时由于低空环境复杂，不但地形、气象环境复杂，通信、探测、定位信号干扰导致电磁环境也很复杂，尚未有一种技术能够全面解决低空的通信、探测、定位问题，进一步导致低空监管面临困境。

由于飞行安全和公共安全是低空经济能否真正推广的关键问题，而低空飞行监管是否能全面掌握低空飞行态势，能否快速识别低空目标的身份和属性，能否在纷杂的无人机飞控体系中建立一套能够直接触达无人机的管控指令发布体系，解决地面目标的全面感知、快速认知识别、有效管控问题，是保障低空经济有效运行的关键技术。针对以上目标，本白皮书提出建立泛在安全的低空数智网络，通过通感导一体化的 5G-A 基站网络建立低空泛在感知、精确定位、高效空地通

信体系，实现对低空空域目标和电磁空间的持续监测，并满足低空电磁干扰定位需求。同时，将无人机的飞行监管作为必备的适飞要求搭载在机载设备中，通过建立专用飞行管控接入点，实现无人机接入专用飞行管控网络，解决低空飞行监管无法直接影响无人机运行的现状，避免通过各种无人机云或无人机系统管控无人机导致的延迟大、难以准确定位、安全性难以保障等问题。通过将低空飞行监管与无人机运营服务分离，可以为低空飞行管控网络提供高等级的安全和服务质量保障，并通过飞行监管平台组网完成跨域跨省的飞行管制权移交、超视距空地飞控通信等问题，保障低空空地飞控和管控的实时性和安全性。通过低空飞行管控网络的建立，能够将低空空域管控和低空运营服务分离，避免低空无人机运营的复杂性给低空空域管控带来的飞行安全问题和公共安全问题，实现空中交通与地面交通的一体化。

本白皮书在第四章简述了泛在低空数智网的网络化感知、多源高精度定位、空地协同通信、低空飞行管控网络、低空态势演化等关键技术，提出了基于通感导一体化技术的低空空域感知与定位，提出了飞行管控网络与业务运营网络分离的网络架构，并定义了关键功能实体与实体之间的交互关系，为低空空域安全高效运行管控系统提供了可参考的模型。本白皮书在第五章简述了低空空域运行管控场景，示例了空域态势认知、低空飞行服务过程和管控过程、并提供了跨域跨省飞行的建议交互流程，进一步明确了各个功能实体之间的功能和职责范畴。希望这一网络体系架构能够为低空经济的发展提供创新思路，为低空经济的合作共赢打下基础，建立健康发展的低空经济生态圈。

参考文献

- [1]. 通感一体低空网络白皮书，2024年2月，中国电信集团有限公司等
- [2]. 5G RedCap 技术与实践白皮书，2024年，中兴通讯股份有限公司
- [3]. 语义通信技术研究报告，2023年，IMT2030（6G）推进组
- [4]. 张平, 牛凯, 姚圣时, 等. 面向未来的语义通信：基本原理与实现方法[J]. 通信学报, 2023, 44(5): 1-14.
- [5]. Support of Uncrewed Aerial Systems (UAS) connectivity, identification and tracking (Stage 2), 2024年12月, 3GPP TS 23.256 V19.1.0
- [6]. Aircraft-to-Everything (A2X) services in 5G System (5GS); Protocol aspects; (Stage 3), 2024年9月, 3GPP TS 24.577 V19.0.0
- [7]. 场景定制化的6G分布式网络架构及技术研究，2024年，IMT2030（6G）推进组

致 谢

白皮书由北京邮电大学牵头完成，在白皮书的撰写过程中，得到了多家单位、专家及相关团队的大力支持与专业指导，在此谨致以诚挚的感谢。

白皮书的核心技术由北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室、泛网无线通信教育部重点实验室、教育部信息网络工程研究中心提供探索和验证，相关实验室在 B5G/6G 网络通感导控一体化技术、智能机器通信技术和智简网络技术、低空管控网络与服务架构、低空态势演化等方面的前沿探索，为白皮书的技术可行性分析与创新方案设计奠定了坚实基础。白皮书的场景化应用有中天华航、中国电信研究院等公司专家参与研讨，其低空空管建设和低空空域管理的长期经验支撑了本白皮书提出的低空飞行管控架构设计。

最后，谨向所有关注低空经济发展与技术创新实践的同行致谢。期待以本白皮书为纽带，与学界、产业界及管理机构深化合作，共同推动低空经济的高质量发展，助力低空经济生态体系的构建。

责任编辑：

北京邮电大学：李静林

核心贡献单位与人员：

北京邮电大学：张平，冯志勇，杨放春，李静林，黄赛，张奇勋，袁泉，罗贵阳，姜蔚蔚，马丁友，范绍帅，马楠，张海滨，林荣恒，徐小珑

北京中天华航航空科技有限公司：周琦，颜晓东，史赵锋