

低空经济频率研究白皮书

2025.4

内容摘要

数字经济是全球经济发展的支柱，也是中国经济发展的重点之一。低空经济以低空网络为依托，以无人驾驶航空器（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）产业为核心，构建综合涵盖 城市管理、快递物流、地理测绘、农林植保、应急救援等领域的经济体系。在政策、监管、市场以及技术的全方位推动下，低空经济有望成为全球经济新的重要增长点，为千行百业带来创新变革、效率提升和新的商业机会。

随着低空经济的发展，基于通感一体的蜂窝网络覆盖已经成为低空网络发展的主要方向之一，无线电频谱资源作为支撑通感一体技术发展的战略性稀缺资源，对推动无线电频谱赋能低空经济、服务经济社会高质量发展意义重大。本白皮书深入研究低空经济频率，重点关注 3.4-3.6GHz、4.9GHz 和毫米波频段，研究了国内外频率政策以及低空经济相关技术发展和产业情况。接着关注了低空经济频率需求，针对不同频段下低空网络会与同邻频其他业务系统产生的干扰，进行了兼容性分析研究。最后基于研究结果，给出了低空经济无线电频率使用建议。

知识星球 全球资讯精读

每月持续更新5000+行业研究报告，价值研究体系帮助投资决策。
覆盖全行业，上万份行业研究报告展现、解决细分行业知识空白。

知识星球 全球资讯精读

实时精选全球最新财经资讯，多角度解读热门事件内容观点。
挖掘国际财经内幕，探究全球重点事件，深度聚焦一二级资本市场。
涉及私募股权、创投、金融、投行、并购、投资、法律、企管等领域。
提供研报专业定制服务。

 全球资讯精读

入宝藏群请加
quanqizixun8

全球资讯精读



知识星球

（免责声明：报告收集整理于网络，仅限于群友学习交流，请勿他用）

目录

1. 前言	4
2. 国内外频率政策研究	5
2.1 国内频率政策	5
2.2 国外频率政策	6
3. 低空经济相关技术发展和产业情况	11
3.1 通感一体技术发展情况	11
3.2 低空经济产业标准情况	15
3.3 低空经济应用和发展情况	23
4. 低空经济频率需求	28
4.1 3.4-3.6GHz 频段	28
4.2 4.9GHz 频段	29
4.3 毫米波频段	30
5. 低空无人机电磁兼容性分析初探	31
5.1 3.4-3.6GHz 电磁兼容性共存研究	31
5.2 4.9GHz 电磁兼容性共存研究	33
5.3 毫米波电磁兼容性共存研究	36
6. 建议	38
参考文献	38
致谢	39
附件一：CEPT 国家无人机、空中 UE 相关频谱法规情况	40

1. 前言

低空经济是以各种有人驾驶和无人驾驶航空器的各类低空飞行活动为牵引，辐射带动相关领域融合发展的综合性经济形态。发展低空经济对于激活立体空间资源、提供高效公共服务、改变生产生活方式、催生跨界融合新生态、打造经济增长新引擎、加快形成新质生产力具有重要意义。

在各种驱动力的推动下，低空经济已处于迅速发展期的前夜，无人机不仅在军事领域具有重要价值，在商业应用领域也将大有可为。在全球疫情之后，迅速发展经济成为各个国家的重要任务。从各行各业来看，全球低空经济处于蓄势待发且即将快速发展阶段，世界各国均已意识到无人机的应用潜力和前景及对经济增长的拉动作用。目前市场与技术已成为低空经济的“动力源”。低空经济在经历消费市场的培育后，加速向各类行业市场拓展。政策与监管是低空经济发展的“助推器”。通过开放空域促进民用市场活跃，低空经济有望成为经济发展的新引擎。2023 年中央经济工作会议将低空经济确立为战略性新兴产业，随后 2024 年全国两会把“低空经济”写入政府工作报告，低空经济迎来了前所未有的爆发式增长，预计将在未来 6 年内实现万亿级市场规模。

随着我国低空空域管理改革不断深化，低空空域资源得以进一步释放，航空器不断增多，当前低空经济产业面临通信、感知、导航等保障能力不足，主要表现在：一是低空通信，低空飞行器智能化水平高，高带宽需求以保障对飞行数据提供支持；二是低空感知，城市中存在建筑遮挡，卫星导航信号不稳，传统雷达地面部署成本高，将通信基站业务拓展至感知，并作为基础设施可以有效提高感知定位精度；三是低空导航，低空活动频次高，高密度飞行，导航模式需要更加数字化、精细化，需要通信设施支持。上述情况导致低空空域难以实现有效的管控和服务，无法有效释放低空经济潜能，是当前低空经济产业面临的主要问题。

通感一体技术可有效强化低空空域监管手段，赋能产业发展。如通感一体基站发挥通信基站的广覆盖的优势，能够实现低空感知网络的快速、低成本部署，同步将数据传送至管理平台，用于飞行安全、调度管理，为低空经济的空域飞行提供了基础数字化保障，可有效提高低空空域资源的利用效率。无线电频谱资源作为支撑通感一体技术发展的战略性稀缺资源，对推动无线电频谱赋能低空经济、服务经济社会高质量发展意义重大，因此有必要对通感一体技术频率使用开展研究，支撑低空经济产业做大做强。

2. 国内外频率政策研究

2.1 国内频率政策

5G-A 技术基于 5G 技术，其现有频率使用主要基于我国对 5G 的频率规划和管理要求。自 2017 年以来，工业和信息化部陆续发布一系列管理文件，对 5G 的频段规划和技术要求予以明确，如表 1 所示。

表 1. 我国 5G 无线电政策情况

文件名称	主要内容
《工业和信息化部关于加强 5G 公众移动通信系统无线电频率共享管理有关事项的通知》工信部无函〔2021〕331 号	进一步规范了企业在 5G 频率共享时需要履行的相关许可变更手续，明确了无需办理许可变更事项的情形，充分保障企业在 5G 共建共享中依法合规使用频率资源，进一步提高频率使用效率和综合效益；
《工业和信息化部无线电管理局关于发布<2100MHz 频段 5G 移动通信系统基站射频技术要求（试行）>的通知》工无函〔2021〕126 号	明确了 2100MHz 频段 5G 移动通信系统基站射频技术要求；
《工业和信息化部无线电管理局关于 5G 直放站射频技术要求的通知》工无函〔2021〕50 号	明确了 2600MHz、3300MHz、3500MHz 和 4900MHz 频段 5G 直放站的射频技术要求；
《工业和信息化部关于发布中低频段 5G 系统设备射频技术要求的通知》工信部无〔2020〕87 号	明确了 700MHz、2600MHz、3300MHz、3500MHz 和 4900MHz 频段 5G 基站和终端射频技术要求；
《工业和信息化部关于印发<3000—5000MHz 频段第五代移动通信基站与卫星地球站等无线电台（站）干扰协调管理办法>的通知》	明确了 5G 基站与卫星地球站等其他无线电台（站）的干扰协调管理办法，优化 5G 基站设置审批程序；
《工业和信息化部关于第五代移动通信系统使用 3300-3600MHz 和 4800-5000MHz 频段相关事宜的通知》工信部无〔2017〕276 号	规划 3300-3600MHz、4800-5000MHz 频段作为 5G 系统的工作频段及上述频段的许可要求；
《工业和信息化部关于印发<民用无人驾驶航空器无线电管理暂行办法>的通知》工信部无〔2023〕252 号	明确了通过地面国际移动通信（International Mobile Telecommunication, IMT）系统频率实现遥控、遥测、信息传输功能的民用无人驾驶航空器，应当依法使用允许在我国境内提供服务的地面 IMT 系统及专用于民用无人驾驶航空器的用户识别卡（SIM 卡），设备射频技术指标要求按照地面 IMT 系统终端技术指标要求执行。

根据上表可得，国家无线电管理机构为 5G 技术规划了 700MHz、2100MHz、2600MHz、3300MHz、3500MHz 和 4900MHz 频段。此外，我国已发布 26GHz 毫米波频段用于 5G 相关使用指南、并在未来拟发 26GHz 毫米波频段用于移动通信技术的频谱规划。

此外，工信部也颁布了《民用无人驾驶航空器无线电管理暂行办法》。

2.2 国外频率政策

2.2.1 美国

美国作为全球无人机技术的领先者，其联邦航空管理局（Federal Aviation Administration, FAA）和联邦通信委员会（Federal Communications Commission, FCC）在低空频谱研究工作方面取得了显著进展。

2.2.1.1 FAA 的研究进展

FAA 在规划未来的频率使用时，充分考虑了无人机系统等新兴技术的需求。2024 年，FAA 组建了 5030-5091MHz 频率研究工作组，旨在深入研究和评估该频段在无线通信技术中的潜在应用。5030-5091MHz 频段作为关键的频谱资源之一，对于支持高速数据传输、低延迟通信以及大规模设备连接等特性具有重大意义。

2.2.1.2 FCC 的监管措施

应航空工业协会（Aerospace Industries Association, AIA）请求，FCC 在 2023 年 1 月发出“用于无人航空系统的频率规则和政策”的拟定法规预先通知（Notice of Proposed Rulemaking, NPRM）。征询包括如下三点的反馈：

1. 研究为无人机控制开放新频率。容许无人机运营商使用 5030-5091MHz 传输无人机安全相关的信号，并定义业务使用规则。指挥与非有效载荷通信（Command and Non-Payload Communication, CNPC）信号是指用于航空管理和导航的话音通信，是与安全紧密相关的信号。无人机的载荷通信主要指与安全飞行无关的数据，这类数据仅和无人机飞行任务相关，例如视频信息。

2. 研究运营商使用地面频率进行无人机通信。针对 Verizon 和 AT&T 等运营商考虑使用自有频率进行无人机通信，征求是否会引起共存问题，并研究是否需要修改无线电规则。

3. 研究使用无人机中继转发空管信号。117.975 -137 MHz 是空中交通管制（Air Traffic Control, ATC）频率，为了通信覆盖范围，管制机构会使用无人机中继转发空管信号，这种操作被称为 ATC 中继。FCC 建议运营商为 ATC 中继的地面控制站申请许可，并研究是否会造成空管信号被来自中继的无人机阻塞。

2024 年 8 月，FCC 基于反馈和研究，针对使用 5040-5050MHz 传输 CNPC 信号制定了业务规则，在通信法规（Title 47 of the Code of Federal Regulations (CFR)）中新增了第 88

部分。

法规规定，5040-5050MHz 用于无人机运营商的地面基站和无人机之间，且仅用于 CNPC 传输。由于这段频率有其他航空类业务，法规引入了动态频率管理系统（Dynamic Frequency Management System，DFMS），由专门的机构负责管理。无人机运营商在使用频率前需要先向注册的 DFMS 提交频率使用申请，申请需要包括使用时间和地理范围。获得批准后，运营商获得一个临时许可，并按照 DFMS 管理机构的规定使用。相应的 DFMS 管理机构需要能及时更新频率使用情况，并在短时间内响应运营商的频率使用请求。此外，DFMS 还需要存储国家无线电静区的信息，避免无人机在此区域内发射。

新法规还规定射频指标（发送功率、发射带宽、带外发射限值和时分双工要求等）遵循 RTCA 的标准 DO-362A。

法规定义了过渡期（具体时间待定），过渡期内运营商可以使用 5040-5060MHz。

在 FCC 的报告和命令（report and order）中指出，除了上述的 DFMS 之外，目前还在研究使用无人机直接通信避免碰撞的技术，未来可能会被采纳。

3GPP 在 Rel-18 中制定了基于 NR 的无人机控制、航迹报告和碰撞规避等功能，Verizon 等运营商正在进行测试。FCC 也在文件中有所关注和涉及。

对于 NPRM 的第二和第三项，FCC 还在评估各方的反馈并进行研究，预计未来会公布相关的规定。

2.2.2 欧洲和部分 CEPT 国家

欧洲在低空经济频率分配方面的考虑，反映了其对无人机系统（Unmanned Aerial System，UAS）及其相关技术发展的高度重视，旨在确保安全、高效的空中交通管理和促进新兴产业的增长。欧洲各个国家对于低空经济频谱的分配采取了积极的态度，并且正在逐步制定和调整相关的技术和操作条件，以确保无人机和其他低空飞行器的安全和有效运行。各国的具体措施和进度有所不同，反映了不同国家基于自身需求和技术发展的考量。

欧洲在低空经济频率分配方面的考虑，反映了其对无人机系统（Unmanned Aerial System，UAS）及其相关技术发展的高度重视，旨在确保安全、高效的空中交通管理和促进新兴产业的增长。

CEPT Decision (22) 07

- 出台 ECC Decision (22)07，规定了基于 LTE 和 5G NR 在 703 - 733 MHz、832 -

862 MHz、880 - 915 MHz、1710 - 1785 MHz、1920 - 1980 MHz、2500 - 2570 MHz 和 2570 - 2620 MHz 频带内使用空中 UE 进行通信的协调技术条件。部分频带需对空中 UE 进行 OOB 限制，国家层面也规定不同频段操作条件，为保护其他业务提供额外措施限制。

- 20 个 CEPT 国家表示打算实施该决议，同时 ECC 向 ETSI 发联络函，请求提供实施标准支持，ETSI 标准计划 2026 年发布，相关标准已联络 3GPP，在 3GPP RAN4 标准里规定了空中 UE 类型。

各国具体情况见附件一

2.2.3 日本

日本在发展低空经济上做了以下重要工作：

日本总务省（Ministry of Internal Affairs and Communications, MIC）于 2024 年 12 月 13 日发布《频率重组行动计划》，明确了七个重点领域，其中包括无人机空中频率使用，但未明确具体为低空经济分配的频谱。

另一方面，日本移动运营商考虑在 800 MHz、900 MHz、1.7 GHz 和 2 GHz 频带中使用 LTE/NR 空中 UE，符合包括实施功率控制技术在内的要求。在日本，移动网络运营商提供无人机服务套餐，包括培训、数据处理支持和路线规划等。

对于日本总务省（MIC）负责管理的 920MHz 频段，被专门划分为射频识别（Radio Frequency Identification, RFID）无线电发射设备的频段，并自 2012 年 7 月起也被开放用于特定的小功率无线通信应用，输出功率最大可达 250mW，实现长达 1 公里的长距离传输。对于使用该频段的设备，有明确的技术指标要求，如发射功率和占用带宽等，且必须确保不对其他无线电台站造成干扰。设备需通过 MIC 认可的注册认证机构进行型号核准才能在日本市场销售或使用。920MHz 频段的应用领域广泛，包括智能家居、智能电网、工业自动化等，并被认为是低空经济活动的理想选择之一，如无人机物流配送、城市空中交通管理等。然而，使用时还需考虑环境保护和公共安全，避免对生物医学遥测设备等产生干扰，并确保低空空域的安全有序运营。总之，日本对 920MHz 频段的管理旨在促进技术创新的同时，保障频谱资源的有效利用和社会公共利益。

2.2.4 韩国

5030-5091MHz 频段作为 2012 年世界无线电通信大会通过的地面控制无人机专用频段，韩国分配此段频率，确保与国际上其他国家和地区的低空经济业务进行交流与合作。

2.2.5 澳大利亚

澳大利亚在低空经济频率分配方面的考虑体现了其对无人机技术和低空飞行器发展的前瞻性规划，旨在确保频谱资源的有效利用与管理，同时支持技术创新和行业发展。

- **顺应技术发展趋势：**澳大利亚通信和媒体管理局（Australian Communications and Media Authority, ACMA）预计无人机将更多转向移动（包括 5G）网络，澳大利亚在频率分配上会考虑这一趋势，既不阻止移动网络运营商将频谱用于无人机，以满足未来低空经济中无人机通信对移动网络的需求，也为低空经济与通信技术的融合发展创造条件。
- **兼顾不同类型无人机需求：**针对商业或军事目的的大型无人机对专用航空频谱的需求，澳大利亚重视如 5030-5091MHz 等专用频谱的作用，同时于 2022 年 8 月发布临时 RALI，为视线遥控飞机系统控制和非有效载荷通信链路提供 5055-5065MHz 的接入，以满足不同类型无人机在不同应用场景下的通信需求。
- **参考国际规划：**澳大利亚在进行低空经济频率分配时，会参考 ITU-R 关于频带规划的相关工作，其临时安排也是在等待 ITU-R 最终确定期间作出的，以此确保本国频率分配与国际标准和规范相协调，便于开展国际合作与交流，提升低空经济的国际化发展水平。

2.2.6 阿联酋和沙特

阿联酋和沙特在低空经济频率分配方面有以下考虑：

- 满足无人机应用需求
- 无人机在物流运输、城市空中出行、应急救援、石油管线巡检等诸多领域应用广泛，使用许可的 IMT 频谱，能够满足不同类型无人机在不同场景下的通信和数据传输需求，保障无人机系统的稳定运行和高效作业。
- 促进技术创新与合作

- 两国积极与相关企业合作，如阿联酋哈伊马角酋长访问亿航智能等，允许使用 IMT 频谱，有助于吸引更多高科技企业参与低空经济建设，促进无人机技术创新，推动低空经济全生态系统的构建和发展。
- 提升基础设施建设
- 频谱资源的合理分配，有利于促进无人机相关基础设施建设，如阿联酋的微型机场建设、沙特的 NEOM 新城低空飞行设施建设等，为低空经济的发展提供更好的基础条件，推动低空经济与城市建设、交通等领域的融合发展。

2.2.7 总结与建议

2.2.7.1 总结

根据对全球主要国家和地区在低空经济频率分配方面的考察，我们可以观察到无人机技术和低空经济在全球范围内得到了显著的发展和重视。各国纷纷采取措施，确保频谱资源得到高效利用，同时支持技术创新和行业发展。

其中，美国、欧洲和日本等地在低空经济频谱规划方面表现出显著的前瞻性和创新性。例如，美国 FAA 和 FCC 针对无人机通信制定了具体的频率使用规则和业务规则，引入了动态频率管理系统（Dynamic Frequency Management System, DFMS），确保无人机与地面基站之间的安全通信。欧洲则通过《欧洲无人机战略 2.0》强调人工智能、机器人技术和移动通信等关键技术的应用，同时积极参与全球统一的频段规划。日本也积极推动技术研发与应用，加强基础设施建设，并为无人机空中频率使用制定战略规划。

澳大利亚、韩国以及阿联酋和沙特等地同样重视低空经济的发展，并采取措施支持无人机技术的创新和应用。这些国家既顺应技术发展趋势，也参考国际规划，确保本国频率分配与国际标准和规范相协调。

从全球范围来看，使用 IMT（国际移动通信）频率实现低空通信是一个主要方向。IMT 频率不仅能够满足无人机通信和数据传输的需求，还能够促进低空经济与通信技术的融合发展，为低空经济的发展提供更好的基础条件。

2.2.7.2 建议

对于中国相关机构而言，以下是关于使用 IMT 频率实现低空通信的主要建议：

制定战略规划：借鉴全球经验，制定符合中国国情的低空经济频谱战略规划，明确 IMT 频率在低空通信中的应用方向和重点任务。

加强技术研发与创新：鼓励和支持企业、高校和研究机构开展 IMT 频率在低空通信中

的技术研发与创新，提高通信技术的可靠性和安全性。

完善法律法规：建立健全低空经济相关法律法规，明确 IMT 频率使用的合法性和规范性，为低空通信提供法律保障。

推动基础设施建设：加快低空经济相关基础设施建设，如通用机场、通信基站等，为 IMT 频率在低空通信中的应用提供物理基础。

加强国际合作与交流：积极参与国际组织和合作项目的活动，借鉴国际先进经验和科技成果，推动中国低空经济与国际接轨，提升国际竞争力。

通过以上措施，中国可以更有效地利用 IMT 频率实现低空通信，推动低空经济的健康发展，为经济增长和社会进步做出积极贡献。

3. 低空经济相关技术发展和产业情况

3.1 通感一体技术发展情况

3.1.1 通感一体空口关键技术

在 5G-Advanced 阶段，通感一体空口关键技术包括感知工作模式、一体化波形设计、一体化感知信号设计等。

1) 感知工作模式：根据参与感知的设备的不同（可以是基站或终端），感知信号收发方是否为同一设备，以及感知者本身是否发送感知信号，可将感知分为主动感知和被动感知。这里的感知者为感知基站，按照主动和被动发射信号用于感知，可以分为三种典型的感知工作模式：基站自发自收感知、基站间协作（基站 A 发 B 收）感知和终端发基站收感知。

模式 1：基站自发自收感知，基站使用自己传输的通信信号的反射/衍射信号进行感知。这是感知接收器与发射器联合部署在同一位置的系统中考虑的典型情况，由于发射器和接收器在同一个平台上，它们可以很容易地在时钟层面上同步，而且感知结果可以由该单基站节点清楚地解析，而不需要外部设备的协助。



图 1. 基站自发自收感知

模式 2：基站间协作（基站 A 发 B 收）感知，基站间协作感知是指一个基站使用从其他基站接收的下行链路通信信号进行感知的情况。在感知方面，这相当于双站和多站雷达的设置，其中发射器和接收器在空间上分离，但它们的时钟要求是同步的。



图 2. 基站间协作感知

模式 3：终端发基站收感知，终端发基站收感知利用了从终端发射器发送的上行链路通信信号。它类似于基站间收发感知，发射器和接收器在空间上是分开的，但是是非同步的。由于在终端发基站收感知中，接收器完全了解系统协议、信号结构和感知信号发送时间，因此上行感知可以直接实现，不需要改变硬件和网络设置，也不需要全双工操作。



图 3. 终端发基站收感知

2) 一体化波形：设计适合的波形是保障通信感知一体化在通信和感知方面的性能的关键技术之一，波形需要既能携带通信信息，又能用于目标感知。现阶段主流的设计思路可以是重用已有通信波形或感知波形，采取时分、频分、空分的方式实现通信和感知波形的

分集发送。

通信感知一体化波形的设计理念主要分为基于雷达的线性调频（Linear Frequency Modulation, LFM）波形和脉冲（Pulse Width, PW）波形，和基于 5G 通信系统的正交频分复用（Orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM）波形。不同波形的优缺点总结如下表所示。

表 2. 不同波形的优缺点

波形	优点	缺点
LFM 连续波	1) 峰均比低（2.658），感知距离远； 2) 自发自收硬件难度低 LFM 连续波； 3) 对多普勒扩展不敏感,在高速目标测量上，实现更好的性能； 4) 模糊函数具有“山脊”形，测距和测速分辨性能好；	1) 承载数据的能力差； 2) 采用线性调频波形时，需要增加处理线性调频波的硬件链路。
LFM 脉冲波	1) 可以提高雷达的分辨率和灵敏度； 2) 可以减少雷达的干扰和杂波； 3) 可以适应多种目标和环境；	1) 其随机性降低了通信感知的精度和可靠性，且影响通信感知的实时性和灵敏度； 2) 其脉冲数量和持续时间受到硬件限制，不能无限增加，这会限制通信感知的覆盖范围和分辨率。
OFDM 连续波	1) 通信设备硬件影响小，兼容性高； 2) 模糊函数具有“图钉”形状，测距和测速分辨性能好。	1) 峰均比高（OFDM-ZC 序列 2.946，OFDM-Gold 序列 11.87），感知距离受限； 2) 自发自收硬件难度高，低频通感挑战大。

根据对不同感知波形的优缺点分析，LFM 波形的模糊函数存在较高的旁瓣（LFM 的旁瓣水平为-42.64），与 OFDM-Gold 波形的旁瓣水平相当，这会导致距离和速度的测量误差和目标的混淆，且其频谱利用率较低，不能有效地适应频谱拥挤和动态变化的环境，另外，LFM 波形的灵活性较差，难以根据不同的应用场景和性能要求进行优化设计。对于 OFDM 波形，一方面，该波形可以利用导频符号进行雷达处理和信道估计，实现精确的距离和速度感知。另一方面，该波形可以通过调整子载波的分配和调制方式，灵活地设计联合通信和雷达系统的性能指标。此外，OFDM 波形对现有 5G 通信系统发射机和接收机的硬件更加友好，无需新增处理 LFM 波形的硬件电路。因此从一体化的角度，在通信感知系统中，推荐采用更先进的 OFDM 波形技术或在此波形的基础上对其进行优化，可有效地抵抗频率选择性衰落和符号间干扰，提高通信的可靠性和频谱利用率。

3) 一体化感知参考信号：目前 5G 通信系统中感知参考信号主要有 Gold 序列和 ZC 序列两种。在基站自发自收和基站 A 发 B 收的感知模式下，考虑 5G 系统下采用的感知参考

信号序列有：Gold 序列，ZC 序列。其中，Gold 序列和 ZC 序列均具有良好的自相关性质和较低的互相关水平，使 Gold 序列与 ZC 序列具有类似的测距测速能力和较低的序列间干扰。但是，考虑到采用 Gold 序列有更好的 5G 系统复用度，且自身有更强的复用能力，可以以较低的开销适用于 5G 组网场景。因此，建议采用 Gold 序列作为感知参考信号优选。此外，由于 Gold 序列的峰值平均比率（Peak to Average Power Ratio, PAPR）较高，后续需要进一步考虑降低 PAPR 的增强技术。

3.1.2 通感一体网络架构

通感一体网络架构将感知能力的接口和处理放在接入网侧的 BBU 侧，业务侧通过感知网元 SF 获取收集到的最终感知结果，并对接到用户的数据应用平台，提供数据信息服务，实现商业价值的兑现，整体网络架构如图 4 所示。

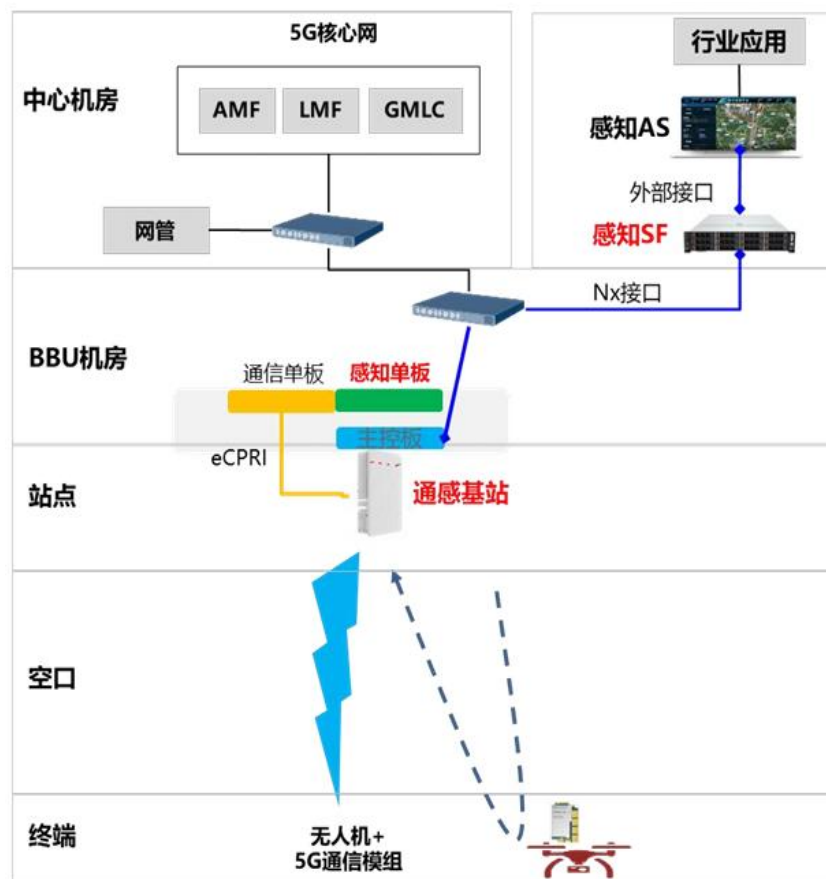


图 4. 通感一体网络架构

通感一体网络架构涉及感知应用服务器（Application Server, AS）、感知传感功能（Sensing Function, SF）、通感基带处理单元（Building Base band Unit, BBU）、通感基站、

空口、终端等核心网元，各网元的功能如表 3 所示。

表 3. 通感一体网络架构各网元及功能

网元类型	功能
感知 AS	对接数据应用平台（如深圳 SILAS 系统/空管部门/海洋监管等），提供数据信息服务，实现商业价值兑现；
感知 SF	感知独立网元，提供传输网关、感知业务控制、数据汇聚转发；
通感 BBU	负责基站通信和感知信号的处理和转发，包括基带板、主控板和感知板三大部件；
基带板	通信基带处理、转发感知数据给感知板；
主控板	传统小区管理 + 感知数据传输；
感知板	感知信号处理（L1）+ 感知数据处理（L2），输出结构化的感知目标结果；
通感基站	负责通信和感知信号的发送和接收，并设置通感波形、帧结构和组网配置；
终端	包含感知需求的无人机、车辆，以及通信需求的通信模组、终端。

3.2 低空经济产业标准情况

3.2.1 美国

美国在低空经济领域发展较早，其低空空域主要由通用航空和无人机使用。其中，美国通用航空发展已有 100 多年的历史，其对通用航空管理的法律、法规、规章及标准涵盖广，涉及条款详细，政府的民航行政管理比较规范、成熟，

在政策支持下，已拥有成熟的通航产业；自无人机应用以来，美国逐步制定了一系列无人机监管规则，并根据无人机活动的发展和监管需求持续完善其无人机相关立法。美国无人机立法当前处于不断调整变化的动态发展阶段，近年来在联邦层面提出了数量众多的无人机法案、制定了范围广泛的无人机监管法规、管理文件等，就无人机监管做出了创新规定。通用航空及无人机产业有关政策见表 4 和表 5。

表 4. 美国通用航空政策

时间	政策	相关内容
1970 年	《机场和航线发展法》	明确美国联邦航空局（FAA）拥有通用机场专门的建设资金，明确固定基地经营者（FBO）和飞行服务站（FSS）为通航企业提供保障服务。
1978 年	《航空公司放松管制法》	航空公司无需政府批准便可自行选择、决定航线、航班，极大地促进了通用航空企业以及个人的热情。
1979 年	《统一产品责任法案》	要求通航飞机制造商对产品负有终身责任（约 40 年），导致制造商面临大量安全诉讼和高额赔偿。
1994 年	《通用航空复兴法案》	将制造商对其生产的飞机和零部件应承担的法定产品责任年限下调至 18 年，规避了飞机事故对制造商提起的诉

		讼风险，激励了通航制造业。
1999 年	《FAA 战略发展计划》	目标是建立一个先进、集成和安全的空域结构，并具备安全、易行、灵活、前瞻、高能、高效、保密等七项性能。
2013 年	《小型飞机振兴法案》	对轻型飞机的认证标准和认证程序进行调整和简化，从而降低飞机及相关设备的升级改造成本和新飞机价格，并且鼓励技术创新。
2020 年	《城市空中交通运行概念 1.0》白皮书	描述支持城市地区及其周边飞行业务预期增长的设想运行环境。
2021 年	《航空运输安全与系统稳定法》	完善了通航安全保障体系建设。
2022 年	《先进空中交通协调和领导法案》	旨在设立一个跨部门的协调部门以推动先进空中交通领域的发展，在“基础设施、物理安全、网络安全和联邦投资方面进行合作，以加强 AAM 生态系统建设。
2023 年	《城市空中交通运行概念 2.0》白皮书	设计了 UAM（城市空中交通）管理体系架构，迎合低空经济发展需求。
2023 年	《先进空中交通实施计划 1.0》	旨在开发一种在受控和非受控空域使用具有先进技术的飞机（包括电动飞机或 eVTOL）在美国两点之间空运人员和财产的运输系统。

表 5. 美国无人机政策

时间	政策	相关内容
2012 年	《联邦航空管理局现代化与改革法》	明确规定将无人机纳入国家空域系统(National Airspace System), 以实现对无人机和有人驾驶航空器的统一协调管理。
2013 年	《无人机系统整合到国家空域系统的路线》	设置了无人机进入空域的六个目标，规定不同类别的无人机分阶段进入空域，显示了国家空域系统中分阶段进行无人机融合的方法。
2016 年	《联邦航空管理局扩张、安全和安保法》	主要关注民航信息系统、空中交通管理系统及国家空域系统的安全问题。
2016 年	《小型无人机监管规则》	该规则采用开放级别监管政策，围绕运行限制、责任遥控驾驶员的认证和职责、对小型无人机的要求、模型飞机的法规适用性等 4 个方面给出了交通管理法规。
2018 年	《联邦航空局法案》	规定联邦航空管理局在授予无人机运行许可时需遵循特定的风险控制规则，进行系统性的风险评估，并为该风险评估机制确定了八个较为明确的许可标准。

在上述政策基础上，美国当前在低空空域大力发展先进空中交通（Advanced Air Mobility, AAM）。根据 FAA 相关文件 AAM 主要包含城市空中交通（UAM）、小型无人驾驶飞机系统（Small Unmanned Aircraft Systems，sUAS）、区域空中交通（Regional Air Mobility, RAM）三部分内容，具体如表 6 所示。

表 6. 美国 AAM 主要内容

序号	主要内容	应用特点
1	UAM	- 在大都市周围 75 英里范围内执行“本地”任务； - 大型新颖的“垂直运输”基础设施； - eVTOL，潜在的 eSTOL 或 eCTOL； - 可承载 1-6 名乘客或同等重量的货物；

2	sUAS	- 在本地开展空中作业或小型货物运送（如食品、小包裹）； - 起飞/着陆所需的基础设施，范围从无到专用； - 具有垂直起降能力的飞机；
3	RAM	- 开展 500 英里范围内的区域任务； - 主要利用现有（较小）机场； - eCTOL 和 eSTOL 飞机； - 最多可承载 19 名乘客或同等重量的货物。

美国民航涉及无线电相关标准的标准化组织有美国航空无线电通信公司（Aeronautical Radio Inc., ARINC）和航空无线电技术委员会（Radio Technical Commission for Aeronautics, RTCA）。ARINC 负责“独立于政府之外唯一协调管理和认证航空公司的无线电通信工作”。ARINC 标准具体分为 ARINC 性能规范、ARINC 标准规范、ARINC 报告三种类型。ARINC 性能规范由 ARINC 下属航空电子工程委员会制定，详细说明了航空电子设备的构成、装配和功能，旨在建立共识技术标准，开发共享技术解决方案。其中，ARINC-700 系列性能规范详细定义了机载气象雷达、DME、ILS、机载选择呼叫系统等机载数字系统与电子设备的性能标准。RTCA 作为独立、非营利性的标准开发组织，主要解决有关航空通信导航监视业务和空中交通管理问题，其下设的委员会为航空电子系统制订最低运行性能标准。其中，RTCA-DO 系列标准是 FAA 技术标准指令和其它航空监管机构管理的指导文件。

3.2.2 欧洲

欧洲在低空空域主要发展 UAM（如 eVTOL）和无人机产业，欧洲航空安全局（EASA）正致力于制定适用于 UAM 和无人机的监管框架，以确保低空空域的安全和高效利用。欧洲各国政府和私营企业正在合作开发低空经济的各个方面，包括无人机物流、农业喷洒和环境监测等，相关政策如表 7 所示。

表 7. 欧洲低空经济相关政策

时间	政策	相关内容
2002 年	欧洲联合航空局和欧洲空中航行安全组织联合成立了无人机特别工作组	旨在通过制定民用无人机法规指导概念，将无人机安全融入到欧洲空域，消除在每个成员国或缔约国内引用单独法规的必要性。
2008 年	EASA 成立	继承了欧洲联合航空局的任务，为制定欧洲的无人机政策发布了各种文件
2008 年	第（EU）216/2008 号基本法规	旨在欧洲建立并维持高度统一的民用航空安全水平
2012 年	第（EU）748/2012 号基	制定航空器及相关产品、零部件、设备适航、环境认

	本法规	证以及设计、生产机构认证实施规则
2015 年	《关于无人机的里加宣言：构筑航空业的未来》	提出尽量减少限制，采用与风险相适应的规则进行监管
2015 年	《无人机运行概念：一种基于风险的无人机监管路径》	建议根据运行风险设定相应的分类监管框架，并采取开放类、特定类和认证类的分类方式
2015 年	《关于修订无人机运行监管框架的 2015-10 号建议预通知》 (A-NPA 2015-10)	制定无人机操作监管框架以及低风险无人机操作监管措施；且该监管框架将包括适用于所有重量级无人机的欧洲规则
2017 年	《无人机运行监管框架：开放和特定类的无人机运行》	对开放类和特定类的调整进行了说明，将开放类进行了进一步细分
2018 年	第 (EU) 2018/1139 号基本法规	将欧盟管理权限扩展至除国家航空器以外的所有的无人机，而不仅限于最大起飞重量大于 150 千克的无人机，是无人机法律法规制定的上位法
2019 年	《第 (EU) 2019/945 号和 2019/947 号授权法案》	延续了“开放类、特定类、认证类”的三分框架
2019 年	《空中交通管理总体规划》	提出了欧洲数字天空转型目标，同时增加了无人机交通管理规划以及有人/无人融合运行场景
2021 年	第 (EU) 2021/664 号基本法规	规定了无人机系统在 U-space 空域安全运行、无人机系统安全融入航空系统以及提供 U-space 服务的规则和程序。
2022 年	无人机 2.0 战略	在无人机技术安全框架内推动大规模商用无人机业务
2022 年	第 (EU) 2022/425 号基本法规	推迟使用“开放”类别中某些无人驾驶航空器系统的过渡日期，以及在视线内或视线外执行操作的标准情景的适用日期。
2023 年	第 (EU) 2023/203 号基本法规	对组织和主管当局管理可能影响航空安全的信息安全风险制定了要求。
2024 年	第 (EU) 2024/1111 号基本法规	制定了一套针对有人驾驶的垂直起降飞机运行的全面要求，涵盖空中运营、飞行机组人员执照、标准化欧洲空中规则和空中交通管理等领域，还制定了无人机认证和维护的标准和流程。

欧盟航空无线电业务的主要管理机构及组织为欧洲邮电管理委员会（CEPT）、欧洲航空安全局（EASA）和欧洲航空安全组织（Eurocontrol）。Eurocontrol 作为负责欧洲空域交通管制的政府组织，通过与 ICAO 及各国的国家频率管理机构合作，建立了一种新的频谱管理机制，有效保障各成员国航空通信和导航系统的频率要求，推动航空系统发展。欧洲议会和理事会发布的第 2014/53/EU 号指令，即《无线电设备指令》，为包括航空无线电设备在内的无线电设备的上市和投入建立了监管框架。

在技术标准方面，涉及航空无线电的欧洲标准化组织是欧洲民航设备组织（European Organization for Civil Aviation Equipment，EUROCAE）。EUROCAE 是专门制定民用航空电

子设备技术规范的国际非营利组织，发布了很多有关航空性能指标和文件，作为欧洲技术标准说明（Technical Standard Order，TSO）和其它规章文件的指导文件。EUROCAE 制定的 ED 系列标准对标美国 RTCA-DO 系列，标准中部分内容相一致。

3.2.3 日本

在日本，低空领域的发展方向为下一代空中交通，该项目主要聚焦于无人机和飞行汽车的技术开发。2020 年日本《增长战略跟进计划》计划首次将无人机和飞行汽车纳入国家层面战略规划，预计 2022 年之后，在包括城市在内的地区实现并发展无人机物流服务，到 2023 年实现农村地区的载人飞行，并逐步将载人飞行业务扩展到城市；2022 年，在经济产业省和新能源产业技术综合开发机构（New Energy and Industrial Technology Development Organization，NEDO）发布的“实现下一代交通方式的社会应用”中提出：在 5 年内，通过技术开发和实证，进一步扩大无人机的应用；力争在 2025 年大阪关西世博会上实现飞行汽车的应用和商业化。

在上述政策背景下，有关机构就无人机产业及有人飞行器发展开展相关研究。在无人机方面，2022 年 8 月，“小型无人飞机相关环境整備官民协议会”汇总了“面向空中产业革命的 2022 路线图”，提出分阶段将“载人区目视外飞行（等级 4）”扩大到人口密度高的区域。日本政府于 2022 年 12 月颁布了《民用航空法修订版》，进一步推进无人机从“无人区目视外飞行（等级 3）”向“载人区目视外飞行（等级 4）”的验证试验；在有人飞行器方面，飞行汽车作为新一代空中移动工具被寄予厚望，它主要应用在城市区域的短距离低空领域，通常被称为先进空中交通或都市空中交通。2022 年 3 月，“空中交通革命路线图”的修订版中，要求在 2025 年大阪关西世博会上实现飞行汽车的商业运营，并开发相关系统技术。

日本《无线电台许可证程序规则》第二条规定飞机场、无线电导航台、用作发射机的飞机地球站等航空无线电台均应作为传输设备，向总务省（MIC）申请无线电台执照，由 MIC 负责航空台站的审批和监督检查。同时，航空无线电相关设备应满足《无线电设备条例》第四章第 3 节中规定的技术要求，并遵守《无线电波法执行条例》第 11-4 条规定，向 MIC 申请型号核准，即强制性认证，具体的测试规范则遵守 MIC 的 Notice No.88 法规。此外，《无线电台操作规则》第七章列出了航空移动业务、航空移动卫星业务和航空无线电导航业务的电台操作规定，第三章第三节规定了与抢险、应急通信的相关要求。

在标准方面，主要依据日本无线电工业与商业协会（ARIB）发布的航空相关技术标准。

3.2.4 韩国

2022 年 9 月韩国国土交通部发布出席过创新路线图，包括城市空中交通（UAM）尽早商用的愿景，计划韩国首都圈主城区至机场等个别线路最早将在 2025 年实现城市空中交通的双向运行；到 2030 年，空交服务将推广到各地方行政区；到 2035 年，空交系统与自动驾驶、公交系统实现一体化。

2023 年 6 月，韩国发布城市空中交通示范计划，明确了韩国首尔 2024-2025 年 UAM 示范飞行路线，第一阶段 2023 年 8 月至 2024 年底，载客无人机在偏远地区进行飞行测试；第二阶段 2024 年 7 月至 2025 年 6 月升级为办城市或城市飞行测试。

2024 年 4 月 25 日，韩国《城市空中交通法》生效，旨在支持现行航空法律法规规定之外的免费试飞，并为此提供了广泛的示范试点区域内的监管特殊规定已具备基础，并包括了建立创建初始产业生态系统所需概念及指定垂直起降机场开发项目和业务运营商的基础。

2024 年 4 月韩国科学技术信息通信部宣布成立“AI 在战略最高理事会”，并制定了最新的“AI 及数字化创新增长战略”，该战略包括了推动城市空中运输（UAM）等发展。

3.2.5 中国

国家层面，2021 年 2 月，中共中央、国务院印发的《国家综合立体交通网规划纲要》提出，发展交通运输平台经济、枢纽经济、通道经济、低空经济，这是“低空经济”概念首次被写入国家规划。2023 年 12 月，中央经济工作会议提出，打造生物制造、商业航天、低空经济等若干战略性新兴产业，产业定位大幅提升。2024 年 1 月 1 日起，《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》正式施行，标志着我国无人机产业将进入“有法可依”的发展新阶段。2024 年 3 月，“低空经济”首次被写入政府工作报告。随后，工业和信息化部、科学技术部、财政部、中国民用航空局印发《通用航空装备创新应用实施方案（2024—2030 年）》（以下简称《方案》），提出“到 2030 年，推动低空经济形成万亿级市场规模”。

表 8. 国家层面低空经济相关政策

时间	政策	相关内容
2021.02	《国家综合立体交通网规划	提出发展交通运输平台经济、枢纽经济、通道经

	纲要》	济、低空经济
2021.12	《“十四五”民用航空发展规划》	提出多元化的航空服务体系更加完善，鼓励无人机应用拓展，支持无人机在邮政快递物流、城市公共服务、应急救援、公共卫生等领域服务
2022.01	《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》	提出探索通用航空与低空旅游、应急救援、医疗救护、警务航空等融合发展
2023.06	《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》	将真高 120 米以上空域，空中禁区、空中限制区以及周边空域，军用航空超低空飞行空域等空域划设为管制空域，自 2024 年 1 月 1 日起正式生效
2023.10	《绿色航空制造业发展纲要(2023-2035 年)》	力争到 2025 年电动通航飞机投入商业应用，电动垂直起降航空器(eVTOL)实现试点运行
2023.12	中央经济工作会议	将低空经济列为战略性新兴产业
2023.12	《国家空域基础分类方法》正式发布	将空域划分为 A、B、C、D、E、G、W 等 7 类，其中，A、B、C、D、E 类为管制空域，G、W 类为非管制空域
2024.01	《民用无人驾驶航空器运行安全管理规则》	规范民用无人驾驶航空器的运行安全管理工作；明确无人驾驶航空器操控员和安全操控要求、登记、适航、空中交通、运行与经营等管理要求；规范无人机的产品分类等
2024.03	《政府工作报告》	巩固扩大智能网联新能源汽车等产业领先优势，加快前沿新兴氢能、新材料、创新药等产业发展，积极打造生物制造、商业航天、低空经济等新增长引擎。
2024.03	《通用航空装备创新应用实施方案（2024—2030 年）》	通用航空装备全面融入人民生产生活各领域，成为低空经济增长的强大推动力，形成万亿级市场规模。

地方层面，为积极响应号召，各地政府根据当地实际情况制定了相应的政策规划以推动低空经济的发展。全国多个省级地区颁布相关政策，并将低空经济写入了地方政府工作报告，包括北京、广东、福建、河南、湖南、山东、安徽、上海、浙江、四川、重庆、黑龙江、新疆、海南、江苏、江西、辽宁、山西、陕西、云南、内蒙古等地区。其中，在 2021 至 2024 年间，深圳、广州、苏州、无锡、合肥、芜湖、成都、武汉、福州等多个地市积极推出了针对低空经济发展的具体执行政策及细则，明确了各自的发展目标和详细规划。政策主要涵盖基建、应用场景拓展、产业链培育和项目投资补助，助力低空经济快速发展，如云南省因地制宜致力于打造“通航+旅游”的低空经济形态；四川在产学研结合、拉动无人机产业投资等多维度发力，推进通航产业快速步入低空经济产业发展轨道；深圳市作为低空经济发展的先行者，实施了全国首部关于低空经济的地方专项法规《深圳经济特区低空经济产业促进条例》，为低空经济的发展提供了法律支持和保障。

表 9. 地方层面低空经济相关政策

时间	省、自治区、直辖市	政策	主要内容
----	-----------	----	------

2022.09	上海	《上海打造未来产业创新高地发展壮大未来产业集群行动方案》	突破倾转旋翼、复合翼、智能飞行等技术，研制载人电动垂直起降飞行器，探索空中交通新模式。聚焦智能机载、复合材料、新能源动力创新，研制超音速、翼身融合等新一代商用飞机，推动氢电池、氢涡扇等氢能飞机技术验证示范。
2023.11	海南	《海南省无人驾驶航空器适飞空域图》	全国首张省域无人驾驶航空器适飞空域图。
2023.12	深圳	《深圳市支持低空经济高质量发展发展的若干措施》	围绕引培低空经济链上企业、扩大低空飞行应用场景提出 20 余项具体措施，包括对 eVTOL 企业及项目给予补助、建设无人驾驶航空器公共测试场和 eVTOL 及大中型无人驾驶航空器枢纽起降场等
2024.01	深圳	《深圳经济特区低空经济产业促进条例》	在地方权限范围内明确低空经济产业发展协调机制和低空飞行协同管理机制，对低空飞行基础设施建设、低空空域协同管理、低空飞行服务、产业支持、技术创新、安全管理等方面予以规范
	北京	《2024 年北京市人民政府工作报告》	促进新能源、新材料、商业航天、低空经济等战略性新兴产业发展，开辟量子、生命科学、6G 等未来产业新赛道
	广东	《2024 年广东省人民政府工作报告》	发展低空经济，创新城市空运、应急救援、物流运输等应用场景加快建设低空无人感知产业体系，推进低空飞行服务保障体系建设支持深圳、广州、珠海建设通用航空产业综合示范区
	安徽	《2024 年安徽省人民政府工作报告》	加快合肥、芜湖低空经济产业高地建设，拓展低空产品和服务应用场景
	四川	《2024 年四川省人民政府工作报告》	加快发展低空经济，支持有人机无人机、军用民用、国企民企一起上，支持成都、自贡等做大无人机产业集群，布局发展电动垂直起降飞行器
	湖南	《2024 年湖南省人民政府工作报告》	用好全域低空空域管理改革成果，发展壮大低空经济
	江西	《江西省制造业重点产业链现代化建设“1269”行动计划（2023-2026 年）》	国家布局方面，以南昌高新技术产业开发区、景德镇高新技术产业开发区为核心，重点支持发展各类巡防、侦查等无人机产品。市场化运作方面，建成以南昌、景德镇、赣州、吉安为核心，多地市为支撑的“4+N”产业布局，重点发展农林植保、物流、应急救援、消防等工业级无人机，加快布局发展垂直起

			降无人飞行器、飞行汽车等无人机新赛道。以无人机整机带动零部件配套、运营服务在江西各地集聚发展
	江苏	《2024 年江苏省人民政府工作报告》	大力发展生物制造、智能电网、新能源、低空经济等新兴产业
	陕西	《2024 年陕西省人民政府工作报告》	培育壮大战略性新兴产业，打造氢能、光子、低空经济、机器人等新增增长点，前瞻布局人工智能、量子信息、生命科学等未来产业
	重庆	《2024 年重庆市人民政府工作报告》	加快开辟低空经济、生物制造等新领域新赛道，不断塑造发展新动能新优势
	云南	《2024 年云南省人民政府工作报告》	布局发展人工智能、生物制造、卫星应用、低空经济、氢能及储能等未来产业，形成新质生产力
	山东	《2024 年山东省人民政府工作报告》	围绕新一代信息技术、高端装备、新能源新材料、现代医药、商业航天、低空经济等领域，新培育 10 个左右省级新兴产业集群
	河南	《2024 年河南省人民政府工作报告》	拓展商业航天、低空经济、氢能储能、量子科技、生命科学等领域
	山西	《2024 年山西省人民政府工作报告》	积极发展低空经济，建设通航机场，组建发展通航机队，拓展应用场景，推动通航全产业链发展，加快通航示范省建设
	内蒙古	《2024 年内蒙古自治区人民政府工作报告》	稳步推进乌拉盖等通用机场建设，深入推进新材料、现代装备制造、生物医药、商业航天、低空经济等新兴产业
	辽宁	《2024 年辽宁省人民政府工作报告》	着力推进新材料、航空航天、低空经济、机器人、生物医药和医疗装备、新能源汽车、集成电路装备等战略性新兴产业融合集群发展
	福建	《2024 年福建省人民政府工作报告》	培育壮大新一代信息技术、新能源、新材料、生物医药、低空经济等战略性新兴产业
	吉林	《2024 年吉林省人民政府工作报告》	全产业链发展卫星制造及数据处理、无人机制造及低空服务产业
	西藏	《2024 年西藏自治区人民政府工作报告》	落实中央政府投资 800 亿元，新开工建设 10 个通用机场和 47 个临时起降点

3.3 低空经济应用和发展情况

无人机产业是低空经济产业的重要支柱，当前低空经济对通感一体技术的应用需求主要集中在无人机产业。由于无人机飞行对地理信息有着高精度和高动态更新的要求，传统

的依靠部门统计报送获取地理信息手段满足不了这一需求，可对航路的信息动态提取与深化处理的实时感知技术呈现出良好的应用前景。同时，无人机运营管理在通信需求上同时需求广覆盖、低时延和大带宽的可靠网络。从民用无人机在各大行业应用的成熟度及市场空间看，娱乐消费级市场发展已过巅峰时刻，市场增长趋缓；农林植保、测绘与地理信息市场当前已初具规模、产品相对成熟，未来市场保持稳定增长；伴随中国智慧城市建设进程的加快，城市管理、交通、能源等场景下，无人机安防、巡检、救援、无人值守等应用将成为重要增长极；快递物流市场潜力巨大，但当前仍处于特定场景的小规模商用，在突破技术、商用模式、安全等瓶颈后，未来市场潜力有望实现快速增长。

行业无人机主要可用于农业、测绘、城市管理(含应急)、物流等场景。综合 Grand View Research、Technavio 机构数据，预判至 2030 年，全球范围内，无人机应用市场规模相对较大的为地理测绘、城市管理、能源巡检三大场景，分别为 375 亿、330 亿、300 亿美元；农业稳定发展，规模约为 225 亿美元；物流类应用，规模约 150 亿美元。根据摩根斯坦利数据，载人无人机在 2030 年尚处培育期，预计 2040 年市场规模将达万亿美元。

3.3.1 快递物流

快递物流场景目前还处于早期探索阶段，受到公众安全、空域开放、隐私等方面的掣肘，应用成熟度低，未来有望高速增长成为规模较大的市场。通过突破物流公众安全、空域授权等瓶颈后，无人机快递物流将是低空经济的主要应用之一。快递物流无人机主要应用集中在以下两方面。

其一，外卖即时配送。深圳、上海等地已落地了 15 条无人机外卖配送航线，累计完成订单超过 16.7 万单。截至 2023 年 6 月，中国网上外卖用户规模达 5.35 亿人。2022 年中国外卖市场规模达到 1.1 万亿元 (1570 亿美元)。配送订单超 400 亿件。据艾瑞咨询预测，预计 2026 年即时配送行业订单规模将达到 957.8 亿单，上述配送业务可在空域环境具备的情况下，通过无人机方式实现。

其二，快递物流配送。2022 年中国快递配送订单超 1106 亿件,其中针对紧急件派送等小批量、高频次重量轻的配送件，也适合无人机传递。长远来看，无人机在快递物流场景的市场潜力巨大，有望在中国创造万亿级人民币市场。

3.3.2 地理测绘

测绘与地理信息是工业级无人机较早实现规模化商业价值的场景之一，目前已经进入成熟阶段，市场规模较大，考虑在土地调查应用中的行业周期变化，未来发展空间将螺旋式增长。测绘和地理信息行业的无人机应用场景主要集中在以下三方面。

其一，建筑领域的堆体测量。通过采集堆体数据生成三维模型，并据此进行体积或重量的测算，2022年全球建筑无人机市场规模达到53.35亿美元。

其二，国土规划领域的交通和城市建设规划。2023年全球城市规划软件和服务市场规模达到802.5亿美元，无人机未来可凭借厘米级精度测绘，协助建设人员以全局视角进行城市绘制、道路三维模型的搭建。

其三，土地确权、不动产登记。通过测绘无人机对农村集体土地进行数据采集、影像拍摄，获取高精度的地表三维数据，协助农村集体土地所有权确权登记发证工作，相较传统测绘成本下降90%，效率提升2倍，预计无人机将凭借上述优势，在全球建筑市场、房地产市场的带动下，复合增长率为24%，未来有望在全球创造超百亿美元的市场空间。中国的复合增长率也将超15%左右，打造超百亿级人民币的应用市场。

3.3.3 交通巡检

交通巡检无人机市场已进入快速增长阶段，具有一定市场空间。交通道路建设是支撑工业和经济发展的重要基础设施。无人机以灵活性强、执法效率高、巡查视野广、受环境及地形影响较小等优势，在交通巡检领域具有广阔的市场空间。交通巡检无人机应用场景主要集中在两方面。

其一，道路设施异常巡检。无人机可对公路路基病害等危害道路交通安全的各种隐患进行实时预警；对道路交通设施标志的完好程度进行巡查；对铁路隧道口状态、弯道状态、桥梁安全状态进行监测等，消除了盲区。

其二，交通疏导及指挥。无人机可对交通事故或交通拥堵精准定位、寻找拥堵点；对交通事故现场勘察取证，实时回传相关信息帮助交警快速掌握现场情况；对高危或恶劣环境进行远程喊话指挥，实现全地形覆盖，多视角、整体直观地交通状况展示。以中国为例，2022年中国公路里程为535万公里；铁路营运里程为15.5万公里，庞大的公路和铁路网络，对交通巡检提出刚性要求，未来复合增长率有望超30%。预计可打造超百亿级人民币的市

场规模。

3.3.4 城市管理

近年来，智慧城市在全球纵深发展，预计 2027 年全球智慧城市市场规模将从 2022 年的 5116 亿美元增长至 10244 亿美元，近五年复合增长率达到 14.9%。无人机凭借无视野盲区、机动灵活、可快速部署等特性，成为城市管理智慧化的重要工具，未来具有较大应用潜力。城市管理领域无人机应用场景主要集中在以下四方面。

其一，城市重大活动、赛事巡逻安保。在重大体育比赛、会展活动举办期间，无人机可对场馆周边的交通、人流、车流进行实时监测，快速交通疏导、防止踩踏事故。根据咨询机构沙利文的预测，预计 2024 年中国安防领域无人机市场规模将超过 198 亿元人民币。

其二，城市重点区域巡逻。无人机可按计划的时间和航线自动执行对闹市区、边境地区、景区、高速公路出入口等重点区域进行实时安防巡逻及异常事件实时预警(如非法越境、人群冲突、交通事故及其它可疑或非法行为)。

其三，违建及施工现场巡查。通过利用无人机对城市建筑、房屋屋顶、施工工地的巡查，可以快速准确识别城市违建、施工扬尘及其它涉及城市建设的违法行为。

其四，刑事侦查。利用热成像仪和红外设备对目标地区进行拍摄，可获得地形信息并追踪锁定不法分子和犯罪嫌疑人的行踪，维护城市安全。中国智慧城市以及安防监控需求旺盛，以 50%左右的复合增长率进行增长，可在中国打造近千亿级人民币的应用市场。

3.3.5 应急救援

无人机凭借响应迅速、机动灵活等优势被广泛应用于应急救援任务中。应急救援领域无人机应用场景主要集中在以下三方面。

其一，灾情勘察。无人机搭载高清摄像头能够对灾区进行全面巡查并实时回传灾情状况，便于指挥中心及时掌握灾情并进行指挥调度。

其二，紧急救援。在灾害或事故发生时，无人机可通过三维建模技术构建数字化救援沙盘，为救援决策提供精准的信息支撑，并能够携带物资快速到达救援现场，为灾区或事故现场提供资源补给。

其三，应急通信。无人机可作为临时基站，在通信中断区域快速搭建应急通信网络，为灾区救援提供临时通信保障。2022 年中国应急救援无人机占比 15%，市场保有量为 13

万架，市场规模达 87 亿人民币。未来无人机将作为应急救援的重要手段，复合增长率超 30%，在中国打造超百亿级人民币的应用市场。

3.3.6 能源巡检

能源巡检场景是发展增速最快，市场空间较高的场景。无人机在能源检测领域的应用主要集中在三个方面。

其一，输/配电设备过热监测。无人机可进行全局测温巡检，及时发现线路、线夹、刀闸等设备的异常发热问题，其效率是人工巡检的 7 倍。

其二，变电设施全局建模巡检。变电站中变压器、断路器、母线等设备复杂、改造频繁且多为镂空结构，需要全局建模检查设施的全貌与细节，无人机巡检可降低工作成本，一台轻型变电站巡检无人机的年均成本仅为 1 万元/年（1430 美元/年）。

其三，清洁能源发电设施管理。光伏电站、风电厂等占地广且分布稀疏，不利于集中管理，无人机有助于及时发现暴露的细微损伤，为风电场的稳定运行提供有力保障。

据 Drone Industry Insights 数据显示，目前全球无人机应用最大的场景为能源巡检。2022 年中国巡检无人机（含能源和交通）占比 12%，市场保有量为 7.7 万架，市场规模达 78 亿人民币。未来将在飞控平台、5G 联网等技术的加持下，复合增长率超 30%，在中国打造超百亿级人民币的市场规模。

3.3.7 农林植保

农业植保是工业级无人机最早实现规模化商业价值的场景，目前已经进入成熟阶段，是规模较大的市场，未来仍将保持稳定增长。农业无人机可以应用于种植、喷洒、植保、植检、测量等多个领域，具有高效、精准、节约的特点，受到广泛关注和应用。农林植保领域下的无人机应用场景主要集中在以下四方面。

其一，农田灌溉。精准投放种子、花粉等，并根据农作物的生长、病虫害情况等精准施肥施药，效率较传统方式提升 100 倍。

其二，农田监测。对农田中的作物生长情况、土壤情况、病虫害发生情况等信息进行实时监测，及时采取措施，保护农作物的健康生长。中国的耕地面积有 19 亿亩，目前农业植保无人机覆盖率不足 10%，未来市场潜力巨大。

其三，农林巡护。可以检查林区中各种动态信息，排查火险、防盗等隐患。

其四，农作物搬运。将农产品收获物搬运至收集站等。自 2019 年以来，中国农业无人机产业链发展趋于完善，约有 400 家从事农业无人机研发、生产、销售的企业，截至 2022 年中国农林植保无人机市场保有量为 22 万架，覆盖 1.7 万公顷播种面积。综合各机构预测数据，初步认为农林植保无人机市场在中国将以 20% 的复合增长率进行增长，预计可打造数百亿级人民币的市场规模。

3.3.8 载人无人机

自主飞行器（Autonomous Aerial Vehicle, AAV）载人场景目前处于测试和探索阶段，面向实际运行场景的电动垂直起降飞行器（eVTOL）还面临空域管理规划、基础设施、法规与标准等方面的挑战。载人无人机应用场景主要包括以下三个方面。

其一，城市空中交通，提供城市内部或城市之间的快速交通服务，替代地面交通，是载人无人机最重要的应用场景。我国亿航 EH216-S 成为全球首个获得适航证的载人无人机。

其二，应急救援服务，载人无人机具备高效的人员运送能力，是空中救援最理想的解决方案，可迅速提供医疗救援，有效执行消防和救灾任务，保障人员生命安全。

其三，观光旅游，为游客提供全新的探索和体验方式，游览以前难以达到的地区。2023 年 7 月，中国亿航智能已在深圳推出载人无人机的空中旅游观光体验服务。预期 eVTOL 将率先在空中游览、医疗转运领域实现商用，后续逐步向“空中出租车”、“空中巴士”模式拓展，走进公众消费市场。目前全球载人无人机还处于非常初级的阶段，市场价值不到 10 亿美元，预计未来随着设备成本的降低、基础设施的完善、技术的进步，有望在全球打造超 4 万亿美元的市场。

4. 低空经济频率需求

4.1 3.4-3.6GHz 频段

电信、联通综合考虑划分和频率使用许可情况，将主要使用 3.4-3.6GHz 频段开展通感一体业务。其所涉及的同邻频无线电业务包括 2.9-3.4GHz 无线电定位业务、3.26-3.267GHz、3.332-3.339GHz、3.3458—3.3525GHz 射电天文业务、3.4-4.2GHz 卫星固定业务以及 ATG 业务。

表 10. 3.4-3.6GHz 频段频率划分表

中华人民共和国无线电频率划分			国际电联3区无线电频率划分
中国内地	中国香港	中国澳门	
2900-3100 无线电导航 5.426 无线电定位 5.425 5.427	2900-3300 无线电定位	2900-3100 无线电导航 无线电定位	2900-3100 无线电导航 5.426 无线电定位 5.424A 5.425 5.427
3100-3300 无线电定位 [卫星地球探测（有源）] [空间研究（有源）] 5.149 CHN12		3100-3300 无线电定位 [卫星地球探测（有源）] [空间研究（有源）] （有源）]	3100-3300 无线电定位 [卫星地球探测（有源）] [空间研究（有源）] 5.149 5.428
3300-3400 无线电定位 固定 移动 CHN34 [业余] 5.149 CHN12	3300-3400 无线电定位	3300-3400 固定 移动 无线电定位 [业余]	3300-3400 无线电定位 [业余] 5.149 5.429 5.429E 5.429F
3400-3500 固定 卫星固定（空对地） [业余] 移动 5.432 5.432B 5.282 CHN18	3400-3700 卫星固定（空对地）	3400-3500 移动（航空移动除外） 固定 卫星固定（空对地） [业余] [航空移动] [无线电定位]	3400-3500 固定 卫星固定（空对地） [业余] [移动] 5.432 5.432B [无线电定位] 5.433 5.282 5.432A
3500-3700 固定 卫星固定（空对地） 移动（航空移动除外） 5.433A 5.433 CHN18 CHN21		3500-3700 固定 卫星固定（空对地） 移动（航空移动除外） [无线电定位]	3500-3600 固定 卫星固定（空对地） 移动（航空移动除外） 5.433A [无线电定位] 5.433 3600-3700 固定 卫星固定（空对地） 移动（航空移动除外） [无线电定位] 5.435

4.2 4.9GHz 频段

综合考虑划分和频率使用许可情况，将主要使用 4.9GHz 频段开展通感一体业务。其所涉及的同邻频无线电业务包括 4.5-4.8GHz、4.8-4.99GHz 固定业务（Fixed Service，FS）、4.8-4.99GHz 射电天文业务（Radio Astronomy Service，RAS）以及 4.5-4.8GHz 卫星固定业务（Fixed Satellite Service，FSS）。

表 11. 4.9GHz 频段频率划分表

中华人民共和国无线电频率划分			国际电联 3 区无线电频率划分
中国内地	中国香港	中国澳门	
4500-4800 固定 卫星固定（空对地） 5.441 移动 CHN21	4500-4800 固定	4500-4800 固定 卫星固定 （空对地）移动	4500-4800 固定 卫星固定（空对地） 5.441 移动 5.440A
4800-4990 固定 移动 5.442 CHN37 [射电天文] 5.149 5.339 CHN12 CHN21	4800-4940 固定	4800-4990 固定 移动 [射电天文]	4800-4990 固定 移动 5.440A 5.441A 5.441B 5.442 [射电天文] 5.149 5.339 5.443
	4940-4990 固定 移动		

4.3 毫米波频段

为支持低空经济发展，主要考虑在 24.75-27.5GHz 毫米波频段开展 5G-A 通感一体业务。所涉及的同邻频业务包括射电天文业务（RAS）、卫星地球探测业务（Earth Exploration Satellite Service, EESS）、空间研究业务（Space Research Service, SRS）、卫星间业务（Inter-Satellite Service, ISS）、卫星固定业务（FSS，地对空）。

表 12. 26GHz 频段频率划分表

中华人民共和国无线电频率划分			国际电联 3 区无线电频率划分
中国内地	中国香港	中国澳门	
24.75-25.25 固定 卫星固定（地对空） 5.535 移动 5.532AB 5.338A CHN46	24.75-25.25 固定 卫星固定（地对空） 移动	24.75-25.25 固定 卫星固定（地对空） 移动	24.75-25.25 固定 卫星固定（地对空） 5.535 移动 5.532AB 5.338A
25.25-25.5 固定 卫星间 5.536 移动 5.532AB 5.338A CHN46 [卫星标准频率和时间信号 （地对空）]	25.25-27 固定 移动	25.25-25.5 固定 卫星间 移动 [卫星标准频率和时间 信号（地对空）]	25.25-25.5 固定 5.534A 卫星间 5.536 移动 5.532AB 5.338A [卫星标准频率和时间信号 （地对空）]
25.5-27 卫星地球探测（空对地） 固定 卫星间 5.536 移动 5.532AB 5.338A CHN46 空间研究（空对地） [卫星标准频率和时间信号 （地对空）]		25.5-27 卫星地球探测（空对地） 固定 卫星间 移动 空间研究（空对地） [卫星标准频率和时间 信号（地对空）]	25.5-27 卫星地球探测（空对地） 5.536B 固定 5.534A 卫星间 5.536 移动 5.532AB 5.338A 空间研究（空对地） 5.536C [卫星标准频率和时间信号

5.536A CHN33 CHN41			(地对空)]
27-27.5 固定 卫星固定 (地对空) 卫星间 5.536 5.537 移动 5.532AB 5.338A CHN46	27-28.35 固定 卫星固定 (地对空) 移动	27-27.5 固定 卫星固定 (地对空) 卫星间 移动	27-27.5 固定 5.534A 卫星固定 (地对空) 卫星间 5.536 5.537 移动 5.532AB 5.338A

5. 低空无人机电磁兼容性分析初探

5.1 3.4-3.6GHz 电磁兼容性共存研究

5.1.1 干扰系统及参数

本小节主要分析了 3.5GHz 频段用于 5G 低空通信及感知业务时，与该频段在用的同/邻频业务的兼容性分析，主要聚焦于以下六个方面：（1）5G-A 通感一体系统对邻频 2.9-3.4GHz 无线电定位业务干扰分析；（2）5G-A 通感一体系统对邻频 3.26-3.267GHz、3.332-3.339GHz、3.3458-3.3525GHz 射电天文（主要业务）干扰分析；（3）5G-A 通感一体系统对同频 3.4-3.6GHz 卫星固定业务干扰分析；（4）5G 通感一体系统对邻频 3.6-4.2GHz 卫星固定业务干扰分析；（5）5G-A 通感一体系统基站对邻频 4.2-4.4GHz 航空无线电高度表系统干扰分析。（6）5G-A 通感一体系统系统对同频及邻频 ATG 系统干扰分析。

5.1.1.1 通感一体系统参数

通感一体基站载波带宽 100MHz，发射功率 53dBm，带外无用发射<-47dBm/MHz。通感一体终端载波带宽 100MHz，最大发射功率 23dBm，全向天线增益 0dBi，飞行高度 120m 和 300m 和 1000 米，带外无用发射指标参考 3GPP TS 38.101 取 -8.77dBm/MHz、-10dBm/MHz、-13dBm/MHz 和 -25dBm/MHz。

5.1.1.2 同邻频系统参数

此频段主要考虑与同频卫星固定业务的兼容共存，与邻频无线电定位业务、射电天文业务、卫星固定业务、航空无线电高度表的兼容共存。

无线电定位业务（Radio Location Service，RLS）的接收范围为 2900-3400MHz，RLS 系统指标参考 ITU-R Rec. M.1464-2 和 ITU-R Rec. M.1465-3，I 型雷达保护门限为 -118dBm/MHz，L-D 型雷达保护门限为 -116dBm/MHz。

射电天文业务（RAS）的接受范围为 3260-3267MHz、3332-3339MHz、3345.8-

3352.5MHz，RAS 系统指标限参考 ITU-R Rec. RA.769，取连续观测允许干扰 220dBW/20kHz 作为干扰门限。

卫星固定业务（FSS）的接收范围为 3400-4200MHz，FSS 系统指标由国家无线电监测中心牵头的《3400-3600MHz 和 4800-5000MHz 频段 5G 系统与卫星固定业务兼容性分析研究报告》，以及工信部发布的《3000-5000MHz 频段第五代移动通信基站与卫星地球站等无线电台（站）干扰协调管理办法》（工信部无〔2018〕266 号），取-130.8 dBm / MHz 作为干扰门限。

航空无线电高度表的接收范围为 4200-4400MHz，系统指标参考 RTCA 报告、ITU-R M.2319 及 ITU-R M.2059，取最严格的保护标准，接收机前端过载-56dBm，接收机灵敏度降低-114dBm/MHz，错误高度报告-103dBm/MHz 作为干扰门限。

ATG 机载终端的接收天线增益为 15dBi，噪声系数 9dB，I/N=-6dB 保护准则。

5.1.2 仿真结果及结论

根据上述指标和保护门限，得到以下结果：

（1）3400-3500MHz 频段通感一体系统终端与邻频 2900-3400MHz RLS 系统，考虑 RLS 系统取峰值增益时，直线隔离距离为 1.1-2.9km；考虑 RLS 系统增益为 0dBi 时，直线隔离距离为 0.1-0.16km。3500-3600MHz 频段通感一体系统终端与上述 RAS 系统，考虑 RLS 系统取峰值增益时，直线隔离距离为 0.4-0.6km；考虑 RLS 系统增益为 0dBi 时，直线隔离距离为 0.1km。

（2）3400-3500MHz 频段通感一体系统终端与邻频 3260-3267MHz、3332-3339MHz、3345.8-3352.5MHz RAS 系统，若工作在传播模型时间概率取 2%时直线隔离距离为 15km；传播模型时间概率取 50%时水平隔离距离为 11km。3500-3600MHz 频段通感一体系统终端与上述 RAS 系统，传播模型时间概率取 2%时直线隔离距离为 3km；传播模型时间概率取 50%时水平隔离距离为 2.7km。

（3）3400-3600MHz 频段通感一体系统终端与同邻频 3400-4200MHz FSS 系统，对于同频干扰，直线隔离距离为 0.4-1km；对于邻频干扰，直线隔离距离为 0.18-0.67km。

（4）通感一体基站天线“抬头”（机械角上扬）对空中的无人机终端进行增强空域覆盖时，对于地面上的无线电定位业务、射电天文、卫星固定业务干扰风险要远小于基站“低头”服务地面公众移动通信用户对无线电定位业务、射电天文、卫星固定业务的干扰

风险。考虑现网服务地面公众移动通信用户的基站与无线电定位业务、射电天文、卫星固定业务的共存情况良好，不存在干扰风险，故此类 3.5GHz 频段通感一体基站对无线电定位业务、射电天文、卫星固定业务不需要设置额外保护要求。

（5）3400-3600MHz 频段通感一体系统基站“抬头”（机械角上扬）对邻频 4200-4400MHz 航空无线电高度表，在飞机平稳飞行场景不会有影响，且有 20-40dB 的保护余量；对于飞机起降场景，在考虑接收机的 FDR 最差情况时，在飞机跑道周围设置距跑道末端水平距离 3400 米，距跑道中线延长线垂直距离 300 米的矩形机场保护区可实现对高度表的保护。

（6）3400-3600MHz 频段电联通感一体系统基站“抬头”（机械角上扬）与电联 ATG 系统的共存场景，由于电联 ATG 解决方案仅考虑使用 3.5GHz 用于地对空链路，因此干扰场景仅涉及通感一体基站对 ATG 飞机机载终端的干扰。因为 ATG 系统仅覆盖飞机航线区域，而非全部空域，所以考虑两系统同域覆盖时分频使用，两系统同频使用时分域覆盖。

考虑实际应用中，通感一体终端位置更随机、发射功率更低等因素，实际隔离距离可以进一步缩减。通感一体基站天线“抬头”（机械角上扬）对空中的无人机终端进行增强空域覆盖时，对于无线电定位业务、射电天文、卫星固定业务干扰风险要远小于基站“低头”服务地面公众移动通信用户对无线电定位业务、射电天文、卫星固定业务的干扰风险，与飞机高度表共存可设置机场保护区，与 ATG 系统共存可通过企业内部协调分频或分域使用。

因此，建议放松对于 3.5GHz 频段基站天线部署方式的要求，允许部分场景通感一体的基站设置机械上倾角。

5.2 4.9GHz 电磁兼容性共存研究

5.2.1 干扰系统及参数

本小节主要分析了 4.9GHz 频段用于 5G 低空通信及感知业务时，与同邻频固定业务（FS）系统、射电天文业务（RAS）系统、卫星固定业务（FSS）系统和机载无线电高度表的兼容共存情况。

5.2.1.1 通感一体系统参数

5G 通感一体低空无人机终端载波带宽 100MHz，最大发射功率 23dBm，全向天线增益 0dBi，飞行高度 120m 和 300m 和 1000m，带外无用发射指标参考 3GPP TS 38.101 取 -8.77dBm/MHz、-10dBm/MHz、-13dBm/MHz 和 -25dBm/MHz。

5G 通感一体基站载波带宽 100MHz，通信模式发射功率 53dBm，连续波感知模式发射功率 35dBm，脉冲波感知模式发射功率 58dBm，但仅 3%时间发射（每个符号内仅 1us），时域平均后的发射功率为 43dBm。5G 通感一体基站的天线阵列设计与通信基站相同，最大天线增益 27dBi。

5.2.1.2 同邻频系统参数

此频段主要考虑与同频固定业务、射电天文业务的兼容共存，与邻频固定业务、卫星固定（空对地）业务、航空无线电高度表的兼容共存。

固定业务（FS）的工作频段为 4400-5000MHz，系统指标参考 ITU-R F.758 建议书，基准辐射方向图可参考 ITU-R F.699，干扰保护准则 I/N 为-10dB。

射电天文业务（RAS）的接收范围为 4825-4835MHz，RAS 系统指标参考 ITU-R Rec. RA.769 建议书，采用连续观测的保护要求-207dBW/10MHz 作为干扰门限。

卫星固定（空对地）业务（FSS）的工作频段为 4500-4800MHz，根据国家无线电监测中心牵头撰写的《3400-3600MHz 和 4800-5000MHz 频段 5G 系统与卫星固定业务兼容性分析研究报告》，以及工信部发布的《3000-5000MHz 频段第五代移动通信基站与卫星地球站等无线电台（站）干扰协调管理办法》（工信部无〔2018〕266 号），取-130.8dBm/MHz 作为干扰门限。

航空无线电高度表的接收范围为 4200-4400MHz，系统指标参考 RTCA 报告、ITU-R M.2319 及 ITU-R M.2059，取最严格的保护标准，接收机前端过载-56dBm，接收机灵敏度降低-114dBm/MHz，错误高度报告-103dBm/MHz 作为干扰门限。

5.2.2 仿真结果及结论

根据上述指标和保护门限，得到以下结果：

（1）当 5G 基站的覆盖方式由传统的对地覆盖变为对空覆盖时，因其主瓣上倾、高于水平线，故干扰路径从主瓣对准变为旁瓣对准，干扰强度显著降低。因此，当 5G 基站用于低空通信时，与 FS、RAS、FSS 系统的干扰共存要求不强于 5G 基站用于地面通信场景，故不需要针对低空通信 5G 基站设置额外的保护要求。

（2）当 5G 基站对地覆盖时，在飞机平稳飞行状态下，5G 基站对高度表的接收机前端过载和灵敏度降低两方面均无有害干扰，且干扰余量均超过 30dB。因此，当 5G 基站覆盖低空时，虽然主瓣上倾，但天线主瓣与旁瓣的增益差值仅为 12dB，远小于干扰余量，因

此 5G 基站对高度表的接收机前端过载和灵敏度降低两方面仍然均无干扰。面向起飞降落场景，当 5G 基站覆盖低空时，不存在 5G 基站对高度表接收机造成灵敏度降低的风险。当高度表前端过载抗干扰力差（FDR=9dB）时，在跑道延长线上距离飞机触地点 2800-3100m 内的 5G 基站可能会对高度表造成有害干扰。如果降低机场跑道沿线周边 5G 基站发射功率 5-15dBm，从而进一步减小 5G 基站禁设区域长度范围至 1980-970m。如高度表能有较好的前端过载抗干扰能力（FDR=40dB），结合民航对机场净空区的有关规定和标准，机场跑道延长线以外宽度至少 150m、长度 774m 范围内不允许建设 25m 高度 5G 基站，则不存在 5G 基站造成高度表接收机前端过载的场景。

（3）针对 4.9GHz 频段 4.8-4.9GHz 共计 100MHz 载波带宽，通信模式下的发射功率为 53dBm，连续波感知模式下的发射功率为 35dBm，脉冲波感知模式下的发射功率为 58dBm，但由于仅有 3%的时间在发射，时域平均后的发射功率降低为 43dBm。可见，两种感知工作模式下的发射功率均显著低于通信模式，因此在 5G 通信基站与异系统可以兼容共存的前提下，感知模式也可实现共存。

（4）4.9GHz 频段通感一体基站“抬头”（机械角上扬）与同频段 ATG 系统的干扰共存，由于目前 ATG 系统需求和建设方案仍在研究中，且 ATG 系统仅覆盖飞机航线而非全部空域，所以建议两系统由企业内部统筹，分时、分频、分域协同使用，以保证两系统间的兼容共存。

（5）4.8-4.9GHz 频段 5G 无人机对卫星固定（空对地）业务的隔离要求，按照 3GPP 中规定的 5G 终端带外发射限值-13dBm/MHz 计算，隔离距离为 0.1km~0.6km，因此与卫星固定（空对地）系统的兼容较容易实现。4.8-4.9GHz 频段 5G 无人机与射电天文台站之间的共存，若为邻频干扰，按照 3GPP 中规定的 5G 终端带外发射限值-13dBm/MHz 计算，则当无人机高度在 120m 到 300m 之间时，干扰隔离距离均为 29km；若无人机带外发射达到-30dBm/MHz，则当无人机高度在 120m 到 300m 之间时，干扰隔离距离均为 4.1km；若为同频干扰，则当无人机高度在 120m 到 300m 之间时，隔离距离为 71km~96km。实际应用中，可考虑通过 4.9GHz 基站灵活调度的方法，在射电天文台站周边特定区域内规避使用 4.825-4.835GHz 的同频频段，则可以显著降低与射电天文台站之间的共存难度。另外，随着 5G 无人机终端的带外发射指标逐渐优化，无人机与射电天文台站之间的隔离距离也将进一步缩减。而当 5G 无人机飞行高度由 300m 继续增加至 1000m 时，考虑到干扰传播距离更远，因此所需的隔离距离应更短、共存难度应更低。

综上所述，当 5G 基站用于低空通信时，与 FS、RAS、FSS 系统的干扰共存要求不强

于 5G 基站用于地面通信场景，与无线电高度表的干扰共存要求同 5G 基站用于地面通信场景，与 ATG 系统共存可通过企业内部协调分时、分频、分域使用。当 5G 基站开展感知业务时，与同邻频异系统的干扰共存要求同 5G 基站开展通信业务场景。5G 无人机与其它系统可通过距离隔离、灵活调度等方法实现兼容共存。因此，建议放松于 4.9GHz 频段基站天线部署方式的要求，允许部分场景通感一体的基站设置机械上倾角。

5.3 毫米波电磁兼容性共存研究

研究涉及 26GHz 毫米波与 26GHz 同邻频业务射电天文（RAS），卫星地球探测业务（EESS）/空间研究业务（SRS），卫星间业务（ISS），固定卫星业务（FSS）（地对空）间的兼容性分析。

5.3.1 干扰系统及参数

本小节主要分析了 26GHz 毫米波频段支持无人机场景下，与同邻频业务 RAS，EESS/SRS，ISS，FSS（地对空）间的兼容性情况。

在本分析中，IMT 系统普通通信参数根据 ITU-R WP5D 确定，邻频仿真设置根据 ITU-R M.2101 确定。

5.3.1.1 IMT 系统参数

通感基站的上半球 TRP 为变量（分别考虑了 25/30/35/38dBm/200MHz），无人机高度为 120-600m 内随机，通感基站间距为 1km，机械下倾角为 0° ，机械倾角上扬形成天线波束最大俯仰角分别为 0° 、 30° 、 60° ，其他参数与普通通信一致。

通感基站数量占比分别考虑了 4%，5%，7%，10%，20%和 30%多种情况。根据仿真参数 $R_b=5\%$ ，我国全国在 26GHz 频段同频的总室外基站数量 = 960 万 $\times (0.07 \times 0.05 \times 30 + 0.03 \times 0.05 \times 10) \approx 115.2$ 万。同时 ISS 仿真全球 26GHz 情况，同步给出全球 26GHz 基站数量计算。其中($R_b=5\%$ ， $R_{a_urban}=7\%$ ， $R_{a_suburban}=3\%$)。

表 13. 26GHz 通感基站数量评估

全国国土面积 960 万平方公里		
全国城区基站数量		1008000
全国郊区基站数量		144000
全国总室外基站数量		1152000
通感基站数量	4%	46080

	5%	57600
	7%	80640
	10%	115200
	20%	230400
全球陆地面积（去掉南极洲）约为 1.37 亿平方公里		
全球城区基站数量		14344050
全球郊区基站数量		2049150
全球总室外基站数量		16393200

5.3.1.2 同邻频系统参数

23.6-24GHz 频段射电天文业务干扰保护门限（IMT 系统为干扰源）为 -195dBW/400MHz，即-191 dBm/MHz。

26GHz 频段 EESS 中 Non-GSO 卫星地球站长期干扰标准（时间百分比不超过 20%）为 -140 dBW/10 MHz；短期干扰标准(时间百分比不超过 0.0125 %) 为 -116 dBW/10 MHz；GSO 卫星地球站长期干扰标准（时间百分比不超过 20%）为 -144.6dBW/10 MHz；短期干扰标准(时间百分比不超过 0.25 %)为 -133 dBW/10MHz。

24.25-27.5GHz 频段的 FSS（地对空）卫星轨位 59E，113E，167E，干扰保护准则 I/N 为-10.5dB。

25.25-27.5GHz 频段星间业务系统选择 10.6°，77° 和 171° 星为代表评估国内 ISS 业务受干扰情况，选择 9° 星为代表评估欧洲 ISS 业务受干扰情况；干扰保护准则 I/N 为-10dB。

5.3.2 仿真结果及结论

（1）根据仿真结果可得，在 26GHz 基站功率基于上半球 TRP 25dBm/200MHz 时，基站天线波束往下、基站机械倾角上扬支持波束往上打为 30 度和 60 度时，均能满足 RAS，EESS/SRS, ISS, FSS（地对空）的保护准则，并且有较大保护余量。因此，在 24.25-27.5 GHz 频段，IMT（考虑通感场景）和 RAS，EESS/SRS, ISS, FSS（地对空）均可以共存，且支持基站波束基于水平面上仰 30° 和 60°（机械倾角上扬）。

（2）在支持通感 26GHz 基站的功率调整时，当通感基站功率上半球 TRP 从 30dBm/200MHz 增大至 38dBm/200MHz 时，均能满足 FSS（地对空）及 ISS 空间站的保护准则，且具有一定保护余量。当所有基站（包括通感基站和地面基站）上半球 TRP 功率从 30dBm/200MHz 提升至和 35dBm/200MHz 时，所有通感基站比例下均满足 FSS（地对空）和 ISS 空间站的保护准则且具有一定保护余量，当所有基站上半球 TRP 调整为 38dBm/MHz

时，无人机比例为 4%、5%、7%、10%时，满足 FSS（地对空）和 ISS 空间站的保护准则且有一定保护余量。

综上所述，26GHz 毫米波频段用于无人机通感业务时，支持毫米波通感基站机械倾角上扬时波束水平向上最大扫描到 60 度，提高毫米波基站尤其是通感基站的上半球 TRP 功率值（通感基站上半球 TRP 功率值可提升至 38dBm/200MHz），能满足其同邻频的 FSS（地对空）和 ISS 空间站的保护准则且有一定保护余量。

6. 建议

参数设置等方面

关于 3.4-3.6GHz 频段建议：建议放松对基站天线部署方式的要求，允许基站设置机械上倾角，形成更好的空域覆盖能力。

关于 4.9GHz 频段建议：建议 5G 基站可以通过主瓣上倾方式用于低空通感一体业务，并放松对 5G 基站天线部署方式的要求，允许基站设置机械上倾角，形成更强的低空通感一体覆盖能力。

关于 26GHz 频段建议：建议允许支持毫米波通感一体基站设置机械上倾角、波束水平向上最大扫描到 60°，提高毫米波基站尤其是通感基站的上半球 TRP 功率值，形成更好的空域覆盖能力。

参考文献

- [1] Australian Communications and Media Authority (ACMA). (2024). *Draft five-year spectrum outlook 2024–29 and 2025–26 work program*.
- [2] Asia-Pacific Telecommunity (APT). (2022, September). *APT report on the use of cellular networks for unmanned aircraft system operations* (Report No. APT/AWG/REP-123).
- [3] Belgian Institute for Postal Services and Telecommunications (BIPT). (2023, December). *Decision on radio interfaces related to wireless microphones, outside broadcast links, DECT equipment, satellite earth stations and remote controls of professional drones*.
- [4] Belgian Institute for Postal Services and Telecommunications (BIPT). (2023, December 19). *Interface specifications: Remote controls of professional drones* (L01-01 - V1.1).
- [5] Electronic Communications Committee (ECC). (2022, November). *ECC Decision (22)07: Harmonised technical conditions for the usage of aerial UE for communications based on

LTE and 5G NR in the bands 703-733 MHz, 832-862MHz, 880-915 MHz, 1710-1785 MHz, 1920-1980 MHz, 2500-2570 MHz and 2570-2620 MHz harmonised for MFCN*.

- [6] European Commission. (2024, January). *Mandate to CEPT to develop harmonised technical conditions for the usage of aerial terminal stations (ATS) in EU-harmonised frequency bands for terrestrial systems capable of providing electronic communications services.*
- [7] Federal Communications Commission (FCC). (2024, August 29). *Report and order in the matter of spectrum rules and policies for the operation of unmanned aircraft systems (WT Docket No. 22-323).*
- [8] International Telecommunication Union (ITU). (2023). *Radio regulations.*
- [9] International Telecommunication Union (ITU). (2023). **World Radiocommunication Conference 2023 (WRC-23), final acts*.*
- [10] Office of Communications (Ofcom), UK. (n.d.). *Unmanned aircraft system (UAS) operator radio licence.*
- [11] Swedish Post and Telecom Authority (PTS). (2023). *Spectrum license for drone operators in UK (BNEW-23:000188 Uen).*
- [12] Telecommunications and Digital Government Regulatory Authority (TDRA), UAE. (2022, December 28). *Regulations, unmanned aircraft radio systems (Version 2.0).*

致 谢

核心贡献单位:

中国电信: 孟溪、柴宇晴、杨洋、王洁、屠丹、刘蕾、齐飞
国家无线电监测中心: 丁鲜花、刘玉佩
南京航空航天大学: 朱秋明
中国联通: 周瑶
中国移动: 刘娜、王宝聪
高通: 曹一卿
诺基亚: 刘荐桦
爱立信: 王卫
三星: 金亦然
北京邮电大学: 张洪铭

附件一：CEPT 国家无人机、空中 UE 相关频谱法规情况

国家	频谱法规情况
比利时	运营商可按与地面相同规则，为无人机/空中 UE/ATS 使用移动频谱（700 MHz、800 MHz、900 MHz、1800 MHz、2100 MHz 和 3600 MHz），监管机构知晓但运营商无通知义务，还发布了 5000 - 5030 MHz 频段专业无人机遥控无线电接口，不过 MNO 频谱无人机用例和专业频谱无人机使用用例区别不明
丹麦	允许在移动频谱中使用无人机/空中 UE/ATS，空中 UE 不单独处理，频段在 2022 年 5 月 25 日丹麦第 740 号行政命令附件 5 第 2 节列出
芬兰	一般不允许在移动频谱中使用，可申请短期（不到一年）测试许可证，如电力公司、大学等使用，地理操作区域有限，许可证是次要业务许可，一旦有干扰须停止活动，监管机构已考虑实施 ECC 第（22）07 号决定，但因空中 UE 未普及，运营商不愿而未实施
法国	尚未实施 ECC 第（22）07 号决定，无移动频谱用于无人机/空中 UE/ATS 的法规规定，但可通过实验框架试验，试验请求由 Arcep 处理，法国正在 ECC PT1 中推动 CEPT 报告
芬兰	一般不允许在移动频谱中使用，可申请短期（不到一年）测试许可证，如电力公司、大学等使用，地理操作区域有限，许可证是次要业务许可，一旦有干扰须停止活动，监管机构已考虑实施 ECC 第（22）07 号决定，但因空中 UE 未普及，运营商不愿而未实施
法国	尚未实施 ECC 第（22）07 号决定，无移动频谱用于无人机/空中 UE/ATS 的法规规定，但可通过实验框架试验，试验请求由 Arcep 处理，法国正在 ECC PT1 中推动 CEPT 报告
德国	正在对 ECC 第 22（07）号决议实施，尚未执行该决定，将频段用于无人机和类似系统的最终授权未确定，存在无传输区等问题，认为频带重新分配可能影响民航和移动通信行业频率利用
以色列	不允许在移动频谱中使用空中 UE，频谱监管机构因多种原因不想允许，包括基站工作负载、国际电联规定、多普勒效应、蜂窝网络设计等，但仍有用户未经同意使用
挪威	法规不禁止运营商在网络中使用空中 UE，但监管机构指出使用运营商空中 UE 的法规和 ECC 第（22）07 号决定可能存在差异
瑞士	移动频谱不允许使用无人机/空中 UE/ATS，ECC 第 22（07）号决定主要问题是可能市场扭曲，监管机构正在调查其对特许权持有人影响
瑞典	分配给移动宽带的频带虽限于地面使用，但许可条件无高度限制，因国际电联 RR 相关修正案在空域使用有限制，瑞典无计划执行 ECC 第 22（07）号决定，相关频段已分配，许可证条件变更无法实施，3 年后审查被视为进一步考虑机会
英国	2023 年初，通过 Ofcom 向无人机运营商发放无人机系统运营商无线电许可证，提供移动频谱，包含频段为 700 MHz、800 MHz、900 MHz、1800 MHz、2100 MHz、2.3GHz、3.4 - 3.8 GHz 频段，2500 至 2690（2.6GHz）被禁止使用

知识星球 全球资讯精读

每月持续更新5000+行业研究报告，价值研究体系帮助投资决策。
覆盖全行业，上万份行业研究报告展现、解决细分行业知识空白。

知识星球 全球资讯精读

实时精选全球最新财经资讯，多角度解读热门事件内容观点。
挖掘国际财经内幕，探究全球重点事件，深度聚焦一二级市场。
涉及私募股权、创投、金融、投行、并购、投资、法律、企管等领域。
提供研报专业定制服务。

全球资讯精读

入宝藏群请加
quanqizixun8

全球资讯精读

知识星球