

通感一体低空网络白皮书

The Low-Altitude Network by
Integrated Sensing and Communication

中国电信集团有限公司
爱立信, 诺基亚, 华为, 中兴, 中信科移动
OPPO, 小米, vivo, 联想
高通, 联发科, 紫光展锐

2024-02



目录



01 摘要

03

02 引言

04

03 低空经济及行业驱动力

- 3.1 市场驱动:全球无人机民用市场将达万亿规模 04
- 3.2 技术驱动:信息技术浇筑低空经济发展的坚实基础 05
- 3.3 政策驱动:多国十余年政策酝酿,促进低空经济商业化 05
- 3.4 监管驱动:规范行业发展与风险管控的需求迫切 06

04 典型应用场景

- 4.1 快递物流 08
- 4.2 地理测绘 09
- 4.3 城市管理 10
- 4.4 应急救援 11
- 4.5 能源巡检 12
- 4.6 交通巡检 13
- 4.7 农林植保 14
- 4.8 载人无人机 15

05 主要技术挑战

- 5.1 低空飞行监控的挑战 16
- 5.2 低空网络能力的挑战 16





目录



06 低空网络系统

6.1 总体架构	18
6.2 通信功能	19
6.3 感知功能	20
6.4 智算功能	20

07 关键技术

7.1 通感一体的信道模型	22
7.2 通感一体波形和帧结构设计	23
7.3 低空感知模式	24
7.4 组网的感知干扰分析	26
7.5 组网下高可靠目标检测	27
7.6 精准目标识别	29
7.7 空地网络协同	30
7.8 低空网络的通信保障	32
7.9 空联网技术	33
7.10 无人机防撞系统	35
7.11 低空航控平台	36

08 展望 39

09 总结 39

缩略语 41

参考文献 44





01 摘要



随着5G网络在全球范围内迅速推广,人们的目光都聚焦在可能出现的新应用上,期待这些应用能通过新技术来使移动网络运营商摆脱目前业务饱和的状态。尽管通信感知一体化 (ISAC) 概念是6G愿景之一,但本文将揭示, ISAC技术有望在5G时代启动,以顺应无人机行业的快速增长,并有以下观点:

01> 尽管最近全球范围内的地区间冲突使无人机威力成为新闻焦点,但真正的全球无人机产业链增长机会,将出现在具有明显市场驱动的商业领域。多家知名咨询公司已经预测,无人机行业的市场价值将达到数千亿美元。

02> 预期无人机行业的快速增长将推动农业、能源、采矿、环境、智慧城市、旅游和3D制图等众多领域的数字经济健康增长。其中许多应用需要视频回传功能,这意味着无人机行业的兴起,将有望为运营商带来高端物联网 (IoT) 应用,以及相对高的每用户平均收入 (ARPU)。

03> 除视频回传外,无人机网络服务的另一主要应用场景是通过低空蜂窝覆盖来实现无人机的网联,使得无人机能实现自主飞行。据分析,预计对运营商来说,这类应用的市场规模将与各个垂直领域的视频回传规模相当。

04> 目前,中国无人机数量已达数百万架。随着该行业的爆发性增长,预计这一数字将增长到数千万级别。考虑到更高的ARPU预期,该领域的发展有望为运营商带来超百分之十的两位数收入增长。

05> 为支持无人机行业服务,运营商需要具备通信、感知和计算的网络架构,并将其覆盖范围从当前的地面扩展到低空。本文深入讨论了信道模型、波形设计、感知、干扰管理、无人机检测与识别、可靠性、无人机碰撞控制以及无人机导航平台等技术。

尽管移动网络覆盖扩展至低空空域尚处于起步阶段,但运营商、设备商、终端制造商和芯片供应商均寄予厚望。随着低空领域快速发展,有望在推动无人机行业发展的同时,促进移动产业实现新增长,并将全球数字经济推向新的阶段。





02 引言



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(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。

中国电信正协同产业伙伴,通过通信感知一体化技术,致力于构建基于蜂窝移动网络的低空覆盖,旨在实现“泛在连接、全域感知、智能计算”的目标。通信感知一体化低空网络,将为监管部门提供便利、全面、智能的低空空域管理解决方案,引导设备制造商与服务提供商形成低空无人机行业的全球产业链,为行业提供智能化、多样化的低空体验,助力新兴低空经济快速发展。

03 低空经济及行业驱动力



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。

3.1 市场驱动

未来无人机广泛应用于消费娱乐、物流交通、农业气象、工业生产、地理能源、智慧城市等多个民用领域。随着无人机不断融入到传统产业的一些重要生产运行环节,将表现出提高效率、降低成本、降低风险等优势。低空经济在民用领域除了带动无人机设备市场价值增加,作为新型基础设施的重要部分,也在反哺传统产业的全面发展。“无人机+农业”、“无人机+医疗”、“无人机+物流”等新兴商业模式加速传统产业转型。未来,在5G/6G、人工智能等众多技术的发展下,低空经济将为各行业带来新的增长。





从目前趋势来看,2030年全球无人机市场规模将达7000-10000亿元人民币(1000-1400亿美元),其中中国市场预计占比50%^[10]。据摩根斯坦利预测,2040年全球城市空中交通(UAM)产值可达7万亿人民币左右(1万亿美元),到2050年可达64万亿人民币左右(9万亿美元)^[24]。其中,行业应用作为最大的板块,占比将高达52%。

结合其他咨询机构数据,全球无人机市场2025年行业规模的预测区间集中在3000-5000亿元人民币(430-710亿美元),2030年将达到5000-8000亿元人民币(710-1150亿美元)。例如,Drone Industry Insights预测^[1],到2030年全球无人机硬件市场规模将达3900亿元人民币左右(550亿美元),复合年均增长率(CAGR)为7.7%,应用及服务市场规模达3980亿元人民币左右(560亿美元)^[2],CAGR为7.4%。

3.2 技术驱动

低空经济的健康发展,离不开科技的创新驱动。近年来,随着无人机技术的迅猛发展,无人机数目急剧增加,无人机任务也日益复杂。此时,少数无人机往往难以满足人们的作业需求,无人机集群技术应运而生。同时,低空信息网络技术的长足进步,网联无人机产业也浇筑了无人机集群管理和低空经济发展的坚实基础。

一是高可靠低延时通信技术为无人机集群控制提供基础通信保障。高可靠低延时通信技术可以满足低空无人机接收飞行控制信令、上报航控数据以及机间通信的基本需求,为进一步实现无人机集

群的精准控制提供基础保障。

二是基于终端和无线接入网络的通信感知一体化技术将健全无人机监管手段,赋能产业发展。通感一体化技术可以在满足低空无人机通信需求的同时,实现对低空无人机的感知。同时,借助移动通信网络的组网能力,迅速扩大低空信息网络的服务范围,甚至实现关键低空领域的无缝覆盖。

三是低空航控平台为无人机统一管理提供新契机。该平台与低空信息网络相结合,提供气象处理、空域处理、情报处理、飞行计划处理、监视信息处理和综合计算等服务,达到无人机可视化、可调度、可监控的管理目标。

四是人工智能技术与算力的发展丰富了低空无人机检测、跟踪能力。人工智能技术进一步赋予了低空信息网络分辨不同类别目标的能力,可以第一时间发现“乱飞”、“黑飞”等不合理、不合法行为,优化无人机防撞系统能力和低空航控平台设计,从而为低空无人机提供高效、安全、可控的飞行管理与控制的解决方案,为低空无人机筑牢安全飞行的基础。

3.3 政策驱动

以美国、欧盟为代表的主要国家和地区经过十余年的政策酝酿,力促低空经济的商业化。这些国家于2013年前后开始对低空领域出台管理规则,开启试点项目,支持无人机的商业应用,大力推动低空经济发展。中国同样高度重视低空经济的发展,





出台了一系列支持和鼓励政策。

美国持续推动无人机在商业领域应用,并以载人级无人机的商用为最终目标。2013年,美国联邦航空管理局 (FAA) 在《FAA现代化与改革法案》提出将无人机融入美国国家空域系统 (NAS), 开启了民用无人机商业化的时代,为基于无人机的低空经济发展奠定了重要的法律和政策基础。FAA于2017年启动无人机整合试点计划 (IPP), 鼓励地方政府、私营部门与联邦政府合作, 共同探索无人机技术的安全性和实用性, 加速无人机技术在交通、公共安全、农业等领域的应用。美国国家航空航天局 (NASA) 在2018年提出由无人机系统交通管理 (UTM) 到城市空中交通、再到先进空中交通 (AAM) 的演进路线, 进一步推动无人机行业的创新发展^[19]。

欧盟从监管和技术同时出发, 积极探索先进的空域管理系统, 推动无人机商业化发展。2014年, 启动《欧洲无人机战略1.0》, 建立了基础的无人机运行框架, 推动无人机技术在民用领域的应用。2017年, 提出U-Space计划, 建立一个支持大规模无人机运营的空域管理系统。2022年, 欧洲委员会通过了《欧洲无人机战略2.0》, 提出更加先进的安全框架和技术要求, 借助人工智能、机器人和移动通信等关键技术, 打造一个创新且竞争力强的无人机行业^[3]。

中国自2013年开始对低空经济全面布局, 先后颁发多项政策支持无人机行业发展。2016年, 国务院颁布的《“十三五”国家战略新兴产业发展规划》中明确无人机作为发展重点之一。2019年, 民航局发

布《促进民用无人驾驶航空发展的指导意见》为促进无人驾驶航空健康发展, 提升民用无人驾驶航空管理与服务质量。2022年, 《“十四五”民用航空发展规划》中提出要大力引导无人机创新发展, 积极拓展服务领域, 完善法规标准等。以江苏、浙江、广东为代表, 地方政府积极响应国家政策, 推动无人机在各个行业的应用。进入2024年, 工信部关于支持低空经济的一系列频谱及产业发展政策也将陆续出台。

3.4 监管驱动

低空经济的进一步发展和规模扩大, 必将引发飞行风险不断上升。无人机运行风险主要分为: 撞击位于地面的第三方、碰撞处于空中的第三方、碰撞关键设施三种类型^[4]。此外, 无人机在飞行过程中还可能涉及到隐私泄露、数据窃取、网络劫持等方面的风险。面对无人机运行过程中的多样化风险, 无人机监管力度逐渐加强已成为规范低空经济发展的主要趋势之一。

国际组织及各国对无人机领域都采用适航管理与运行风险相结合的监管思路, 健全监管体系、研发飞控平台, 多措并举推动行业规范发展。国际无人机规章制定联合体 (JARUS) 将无人机运行分为开放类、特定类和审定类进行管理, 并明确采用特定运行风险评估 (SORA) 方法对无人机运行进行评估和监管^[4]。欧洲航空安全局 (EASA) 根据无人机的运行风险进行分类注册监管, 对不同级别的无人机重量、飞行授权、驾驶员资格等作出规定, 并推出U-space数字化服务、监管平台^[20]。



美国FAA针对运行用途将无人机进行分类管理,发布管制空域、适航审定规则等规范无人机飞行管理,同时通过法案授权对无人机采取行动检测、识别、监控等手段以减轻无人机对某些设施或资产带来的风险^[21]。

中国国务院、中央军委发布《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》,对无人机生产制造、管控空域、驾

驶资质、监管信息平台、飞行计划申请等内容作出规定^[22]。日本、澳大利亚等国也针对无人机监管作出相关规定和指引^[23]。国际组织及各国的监管逐渐从概念框架向规范细则演进,关注无人机安全问题,建立无人机制造、注册、运行全周期监管体系,均需要数字化的监管平台或手段支持,推动行业迈入更安全、有序、规范、完善的新发展阶段。





04

典型应用场景



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^{[5][6]},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^[24],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。

4.1 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。在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^[25](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^[26],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(如图1所示)。2022年中国快递配送订单超1106亿件^[27],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^[28]。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的市场^[29]。



图1-无人机在快递物流的应用





4.2 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^[30]。

其一，建筑领域的堆体测量（如图2所示）。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^[7]。

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^[8]，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^[7]，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，以24%的复合增长率进行增长，未来有望在全球创造超百亿美元的市场空间^[9]。中国也将以超15%左右的复合增长率进行增长^[6]，打造超百亿级人民币的应用市场。



图2-无人机建筑测量



4.3 城市管理

近年来,智慧城市在全球纵深发展,根据Markets and markets的预测,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%^[10]。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^[31]。

其二,城市重点区域巡逻(如图3所示)。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。通过对目标地区利用热成像仪、红外设备拍摄,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^{[31][5]},可在中国打造近千亿级人民币的应用市场。



图3-无人机城市重点区域巡逻



4.4 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(如图4所示)。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^[29]。未来无人机将作为应急救援的重要手段，以超30%的复合增长率进行增长^[31]，在中国打造超百亿级人民币的应用市场。



图4-无人机应急救援应用



4.5 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(如图5所示)。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^[2]。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^[29]。未来将在飞控平台、5G联网等技术的加持下,以超30%的复合增长率进行增长^[31],在中国打造超百亿级人民币的市场规模。



图5-无人机能源巡检





4.6 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,弥补了传统视频监控存在的盲区。

其二,交通疏导及指挥(如图6所示)。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^[32],庞大的公路和铁路网络,对交通巡检提出刚性要求,未来有望以超30%的复合增长率进行增长^[31],预计可打造超百亿级人民币的市场规模。



图6-无人机交通巡检应用



4.7 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^[35]。

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^[31]。

其二,农田监测(如图7所示)。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^[33],目前农业植保无人机覆盖率不足10%^[34],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^[36]。

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^[34],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^[29]。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^{[5][6][9]},预计可打造数百亿级人民币的市场规模。



图7-无人机农业巡检





4.8 载人无人机

自主飞行器(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^{[25][37]}。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^[38]。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^[9],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^[24]。





05 主要技术挑战



支撑商业无人机行业的低空网络覆盖是一个全新的方向。因此,其起步及发展面临不少挑战。

5.1 低空飞行监控的挑战

为了实现低空经济规模化、高质量、安全可控的发展,需要凭借高效、完备、科学的低空飞行监管技术对大密度、高频次、多类型的低空飞行活动进行监控,及时识别与管控不合理和不合法的飞行行为。然而,对于传统的雷达技术而言,其单站监控方式能力有限,难以发现和应对在雷达显示器上时隐时现、忽明忽暗的“低慢小”目标;而多站组网费用高昂,难以满足规模化的低空飞行活动监控需求。而对于摄像监控技术而言,其监控范围有限,且受光照条件影响,难以满足远距离、全天候的监控需求。

当前,由于缺乏高效的技术监控手段,政府监管部门难以第一时间发现低空空域中“乱飞”、“黑飞”等不合理和不合法的行为,企业也难以保证其飞行任务的安全性和可靠性。因此,低空经济的发展只能采取“试错尝试”的方法,严重阻碍了低空经济规模化的步伐。因而,高精度、低时延、全天候的感知技术和支撑无人机与无人机、无人机与地面之间通信的蜂窝技术是实现有效、便捷监控和飞行任务管理的基础,也是亟需突破的主要技术挑战。

此外,由于缺乏统一的低空飞行监控技术标准,各

个地区各自探索本地的低空空域开放措施和监管方案。在此过程中,各地容易形成不同的低空空域技术监控体系,给未来各地低空飞行监控技术的互联互通埋下隐患。因此,亟需研究高效、完备、科学的技术监控体系,建立统一的低空监控平台与完备的信息化服务基础设施,从而为采集和分析低空数据,构建规模化、高质量、安全的低空经济提供技术支撑。

5.2 低空网络能力的挑战

传统无线网络以地面覆盖为主要目标,而低空信息网络则需实现对空立体覆盖。随着低空经济的快速发展,无人机应用对于低空网络的广域连续覆盖提出了更高的要求。大量的试验结果表明,尽管当前对地覆盖的无线网络利用天线旁瓣对空中有一定的信号覆盖,但是由于天线旁瓣较多且杂乱、信噪比普遍较差且起伏不定、天线辐射存在零陷无信号区域等因素,较难保障无人机全路程连续业务服务和不中断飞行操控。因此,构建一张低空立体连续覆盖的无线网络是低空经济高质量发展的基础,也是亟需攻克的关键技术挑战。

未来,越来越多的低空无人机业务将普遍要求有视频或图片回传,甚至是高清视频回传,上行速率普遍要求在每秒几十到几百兆速率,而对于下行速率要求通常不高,因此无人机业务具有明显的上





下行不对称的特性。而传统对地覆盖的移动网络则主要服务于人，以下行业务为主，移动通信领域以往更多聚焦在提升网络的下行链路容量。因此，如何基于蜂窝移动网络技术来保障未来大量无人机的大上行、低时延业务需求是将要面临的较大挑战。

此外，不同于传统航空运输服务，低空经济活动更会呈现出“数字化”和“信息化”的特征。此时，低空信息网络安全问题也是保障低空经济活动所要解决的关键挑战。由于低空经济活动复杂，其安全挑战并不局限于硬件、软件、通信链路和网络本身，还包括了飞行器入侵破坏等方面。因此，为了满足低空经济活动的需求，需要多方联合，共同设计更加灵活、智能、安全的信息化服务系统。





06

低空网络系统



随着无人机数量的快速增加和其广泛的应用需求,以及对网络容量的不断增长需求,基于通感一体的蜂窝网络覆盖已成为低空网络系统发展的主要方向之一。本章将聚焦以蜂窝网络为基础的网络架构和技术。

6.1 总体架构

低空网络系统依托蜂窝移动通信网络、物联网、云计算等基础设施,形成通信、感知、计算一体化的智能互联低空数字化服务体系。低空网络以实现“泛在连接、全域感知、智能计算”为目标,为监管部门提供便利的、全面的、智能的低空空域管理解决方案,引导设备制造商与服务提供商对低空无人机设备进行合法化生产与运营管理,为低空行业用户提供智能化、多样化的低空体验,赋能新型低空应用。

低空网络系统包含通信、感知、智算三个主要功能。根

据不同的应用领域和性能要求,为应用层提供多样化的通信能力、感知能力和智算能力。通信能力旨在满足低空无人机多样化通信功能需求,在基本通信能力的基础上增加身份标识认证等能力。感知能力需要对无人机等目标进行感知识别,使得低空网络具有对目标的测距、测角、测速、定位、追踪等能力;并针对不同的低空场景满足不同的置信度、精度、分辨率、时延、刷新率、漏检率和虚警率等指标要求。智算能力需要网络具备全面的数据处理和计算能力,从而实现低空网络系统智能化。

低空网络的功能架构主要包含应用层和功能层。应用层直接为涉及应急救援、农林植保、快递物流、城市管理、地理测绘等众多领域的第三方行业用户提供低空服务。功能层基于网络资源、存储资源以及算力资源为应用层提供多样化的通信能力、感知能力和智算能力。低空网络功能架构如图8所示。



图8-低空网络功能架构





基于移动蜂窝网络的低空网络系统由航控系统、业务系统、感知系统三个逻辑系统组成。其中，航控系统负责无人机飞行控制，包括无人机身份信息、飞行位置信息上报，以及传输平台控制指令等；业务系统主要负责无人机相关业务数据传输，比如视频回传等；感知系统负责无人机位置、状态等信息的感知，可对无人机“黑飞”等行为进行有效监

测。航控、业务、感知三个逻辑系统可承载在相同或不同的基站上，而且可承载在相同基站的不同频率或系统制式上，每个逻辑系统的空域覆盖与组网方式可根据实际环境与需求灵活调整与设置，系统示意图如图9所示。对于通感一体化系统，三个无线逻辑系统将共享物理资源。

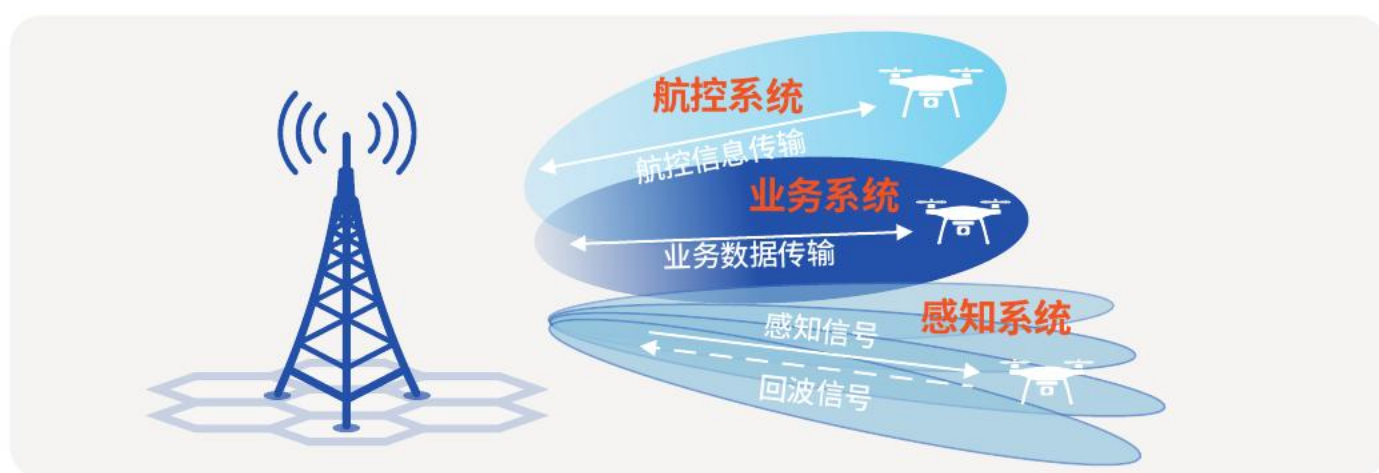


图9-低空网络系统逻辑示意图

6.2 通信功能

通信能力旨在满足低空网联无人机多样化通信功能，包含基础的接入、数据/指令转发、信息上报、身份标识认证等。对于网联无人机的身份认证尤为重要，是无人机有效监管的基石。针对网联无人机，需要提供数据传输和控制指令传输等基础通信能力保障。无人机载荷采集的图像和视频数据、无人机全球定位系统 (GPS) 及传感器获得的位置信息、姿态信息可以按周期或实时上报给各个低空业务平台和低空管控平台。

飞控系统能够将对无人机的控制指令精准传送给

无人机，指导其按要求行驶或应对紧急情况。无人机通信方式可能包括5G/4G和其他宽带/窄带无线通信方式。根据业务场景的具体需求，无人机可以配置不同的通信方式。对于应急通信、航道控制等要求高可靠、低时延场景和对于高清 (HD) 视频传输、巡检监控等大带宽场景，5G技术在速率、时延、覆盖等方面具有明显优势，可实现网联无人机高效可靠的通信保障。

根据3GPP TS22.125^[11]无人机应用的性能需求，对于8K视频直播，要求达到上行100Mbps数据速率，端





到端时延200ms;下行600Kbps数据速率,端到端时延20ms。对于4×4K 人工智能(AI)监控,要求达到上行120Mbps数据速率,端到端时延20ms;下行50Mbps数据速率,端到端时延20ms。对于通过高清视频的远程无人机控制,要求达到上行25Mbps数据速率,端到端时延100ms;下行300Kbps数据速率,端到端时延20ms。对于无人机的命令和控制通信,针对“Steer to waypoints”控制模式,所需传输的数据的上行速率要求约为0.672Kbps-1.12Kbps,下行速率要求约为0.8Kbps;针对“Automatic flight on UTM”自动飞行控制模式,所需传输的数据的上行速率要求约为2.4Kbps,下行速率要求约为16Kbps。

6.3 感知功能

感知能力旨在利用无线信号实现对目标无人机或环境的主动感知功能。通过有效提取无人机等动态目标以及环境等静态目标对无线信号特征的影响,低空网络能够实现对低空飞行目标的测距、测角、测速、定位、追踪等功能。这些信息可辅助实现无人机的入侵检测和碰撞规避,对无人机进行路径追踪,进而实现远程监控等。

对于具备飞行资质的合法无人机,网联无人机将按照监控要求通过通信网络定期上报位置、状态等飞行信息。非网联无人机信息则可从航线申报信息系统获取飞行路线和无人机型号参数。低空网络的感知功能将通过无线感知技术判断每一架可识别无人机位置和轨迹数据,并与前述无人机预知信息进行比对和联合分析,则可有效侦测不具

备飞行资质的非法无人机,进而实施有效驱离,以保证低空空域安全。

根据3GPP TR22.837^[12]性能需求,对于无人机入侵检测,要求达到5-10m定位精度,感知时延小于1000ms,不超过5%的漏检率和虚警率。对于无人机防撞,要求达到1m水平定位精度,感知时延小于500ms。对于无人机飞行路径跟踪,要求达到1-10m的距离分辨率和1-10m/s的速度分辨率。感知功能的实现是基于网络物理资源。在通感一体化系统中,感知功能与通信功能共享物理资源,可根据业务场景需求进行时域、频域、空域的资源动态管理和多维度复用。低空网络需要具备灵活的资源配置能力,考虑不同应用场景的业务指标进行通信和感知资源分配,实现感知和通信资源的协同优化,从而提高频谱资源的利用效率,在保证通信性能的同时最大程度提升感知性能。

6.4 智算功能

智算能力旨在为低空网络提供可靠的智能计算功能,实现基于图像、声音及相关数据的智能处理,以支持低空系统中业务预测、故障诊断和飞行决策等功能。针对无人机获得的传感器数据、视频数据进行智能计算和分析,提供无人机状态异常检测、非法入侵监测等多样化低空业务保障能力。通过对无人机等目标的特征提取与分析,实现目标种类的识别。通过对无人机的位置跟踪以及其历史运动轨迹的分析,预测其未来的轨迹及可能驻留的小区。





低空网络集成了无人机及用户的基础数据、无人机采集上报的数据、第三方服务数据等信息,要求网络具备全面、高效、智能的数据处理和计算能力。智算功能的实现是基于算力资源,这很大程度上决定低空网络服务的性能和效率。算力资源的分布和协同也将对低空网络系统的时延产生决定性影响。因此,需要灵活调度计算资源、存储资源以及网络资源,实现云、边、端协同的低空信息网络。



07 关键技术



7.1 通感一体的信道模型

通信感知一体化作为通信网络连接物理世界和数字世界的新通道,促使通信网络进一步深入低空经济、智慧交通、智能工厂等垂直行业。3GPP于2023年12月成立感知信道模型和网络架构研究项目(RP-234069,SP-231754)。其中,RAN1在2024年2月开始无人机、车、自动导向车(AGV)、道路入侵者等感知目标的可行性分析课题研究。

通感一体的信道模型是研究通感技术的基础,现有的信道模型主要面向通信系统设计,还无法满足感知技术的研究需求。例如3GPP TR 38.901中定义的0.5-100GHz频段信道模型和TR 36.777中定义的低空场景的信道模型都仅定义了通信信道,没有考虑感知信道的建模特点,如自发自收信道模型、

目标特性建模、通感信道相关性等。因此,需要面向通感一体化场景设计通感信道模型,以满足感知传播信道的需求。

为了与5G信道模型保持更好的连续性,通感一体化的信道模型可以在3GPP的统计性信道模型基础上进行增强。例如,通过引入确定性信道多径分量,提出一种基于混合方法的通感一体化信道模型。这种模型将感知信道分为目标信道和背景信道两部分,其中目标信道为传播环境中与目标相关联的多径信道,可通过确定性方法建模;而背景信道为传播环境中与目标非相关联的多径信道,可通过统计性方法建模。

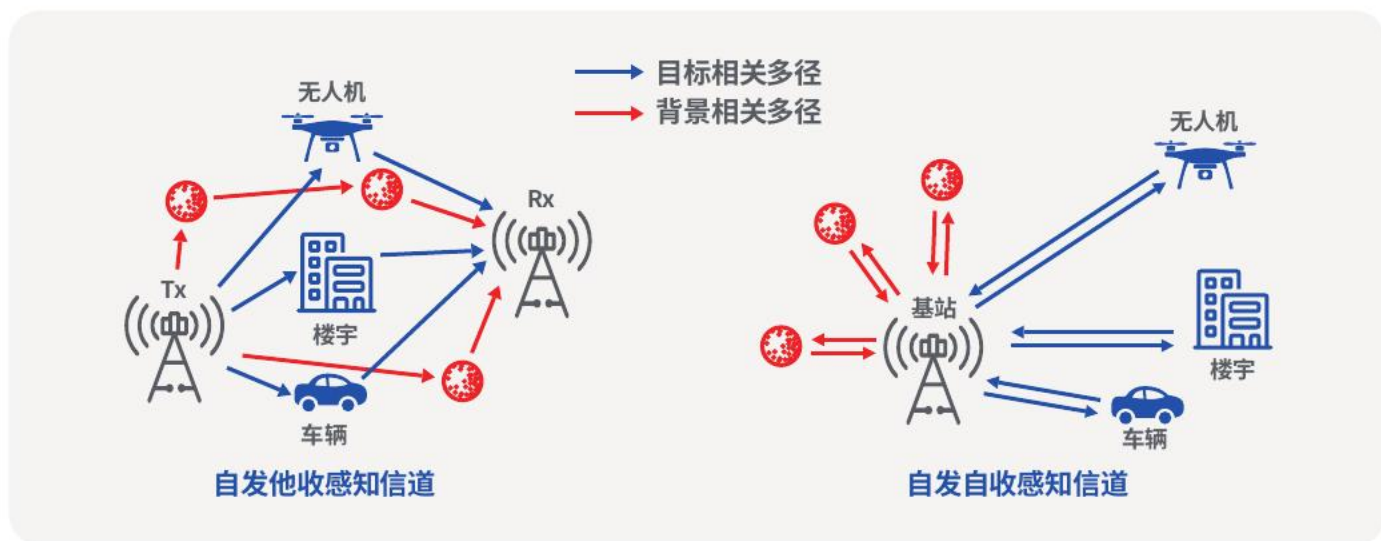


图10-通感一体化混合信道架构





在通感一体化信道建模过程中,感知目标的散射特性建模是关键步骤之一。基于雷达散射理论,目标总散射响应可看成若干局部等效散射源响应的相干叠加,这些等效散射源称为目标的散射中心。然而,面向不同的通信感知一体化应用场景,其感知的目标类型也不尽相同。因此,在针对通感目标散射特性建模之前,需首先对感知目标进行特征归类。考虑到信道模型的复杂度,建议感知目标可基于应用场景进行归类。同时,考虑到实际场景需求和仿真复杂度,不同目标的多散射中心建模参数可依据应用场景确定。例如,在低空无人机探测场景中,当无人机的尺寸较小且距离基站较远时,可以将多散射中心模型退化为理想单点模型,而当无人机的尺寸较大且距离基站较近时,则

需根据无人机的大小分别建模各散射中心的散射点数目。

7.2 通感一体波形和帧结构设计

通感波形的设计需要同时考虑通信性能和感知性能,合适的波形设计能够提高感知的精度和通信的效率。一种简单的通感波形发送方式是采取时分、频分、空分等方式实现通信和感知波形的分集发送。但这种方式资源利用效率较低。为了提高资源利用率,可以将通信和感知功能集成到同一种波形中。此时大致包括两类设计思路,分别是基于现有波形的通感一体化波形改进和新型通感一体化波形设计。

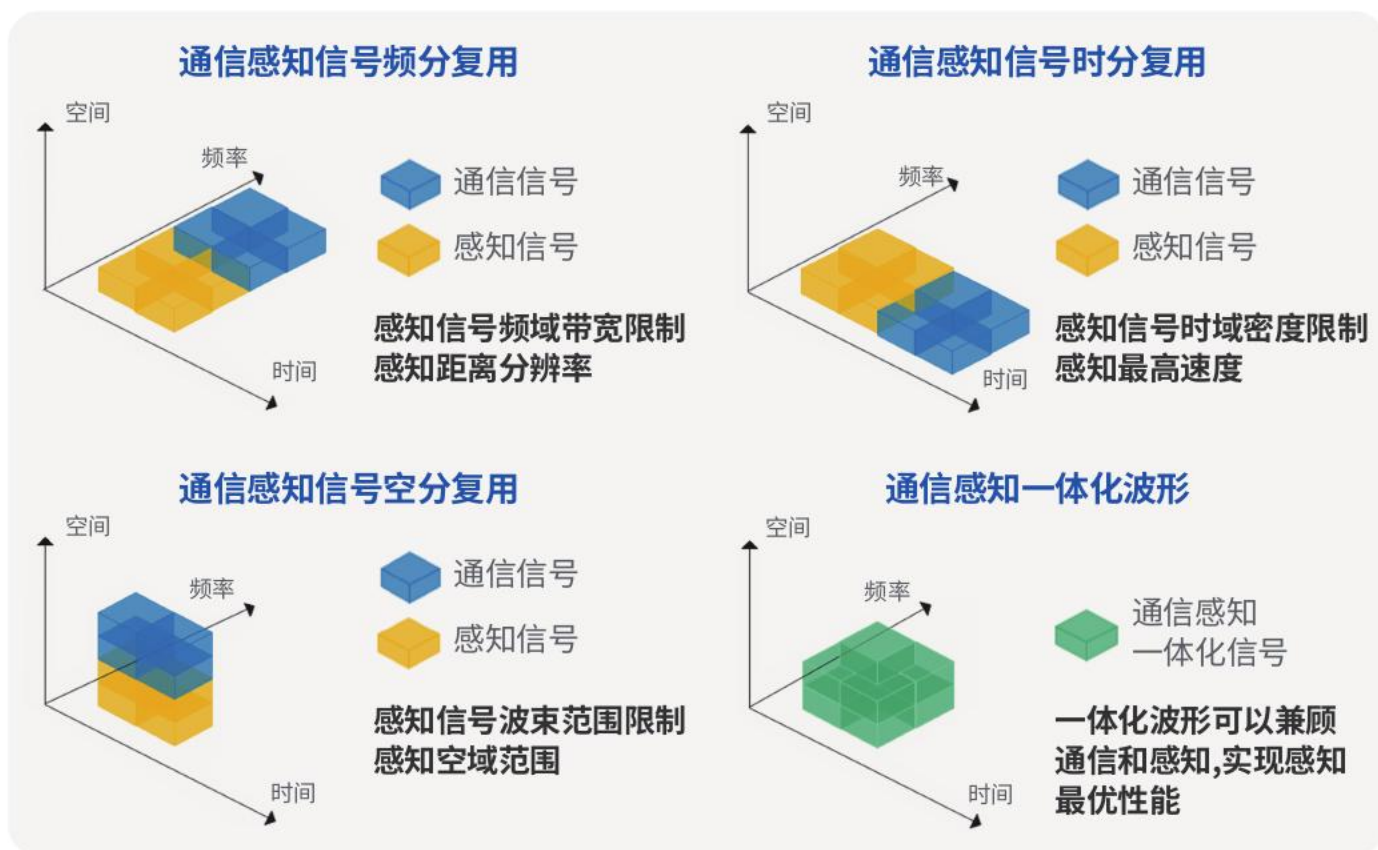


图11-通感波形设计





基于现有波形的一体化波形设计思路是通过分析现有通信和感知波形的性能,形成单一波形或复合波形。这一设计可进一步细分为以通信性能为主和以感知性能为主的两类波形设计。以通信性能为主的波形设计一般采用正交频分复用波形(OFDM),OFDM作为4G/5G的通信波形,具有抗衰落能力强、频谱利用率高、抗码间干扰能力强等优势,可保证良好的通信速率传输。同时,作为感知波形,OFDM可实现测距、测速、测角等基本感知能力。以感知性能为主的波形设计一般采用线性调频波形(LFM),LFM是雷达中常用的脉冲压缩波形,通过在雷达波形中嵌入通信信息来实现通信能力。此时,基于该机制的可达通信速率与感知性能的折中关系需要进一步研究。

新型通感一体化波形设计需要综合考虑通信和感知性能,即需要根据通信与感知的基础理论形成通感一体化设计准则,并设计相应的新型波形。基于这种方式,新型波形可以达到通信和感知性能的折中。但是,这种波形设计优化的复杂度高、与现有硬件适配难度大,在实际应用时仍面临较大挑战。

此外,通信感知一体化需要对现有通信帧结构进行重新设计。目前,新空口(NR)帧结构配置主要考虑信息传输需求,包含上行传输、下行传输和灵活传输三种传输模式。然而,随着通信感知一体化技术的发展与新兴业务的不断涌现,感知能力将逐渐成为移动通信系统的内生能力。因此,新的通感一体帧结构设计需要综合考虑通信性能与感知性能的需求,特别是感知频段、感知业务场景、感知精

度、及时性、干扰及设备能力等特点。例如,对于低空探测等高精度需求业务场景,现有帧结构中导频符号的配置可能无法满足业务需求,需要在帧结构设计时考虑引入可灵活配置的新感知符号。同时,还需要结合业务需求和性能要求,进一步探索感知功率、感知波形或上下行切换等差异化要求^[39]。

7.3 低空感知模式

低空感知模式可分为单站感知模式、双站感知模式和端网协作感知模式。

01 单站感知模式:

低空感知系统可以采用单站感知模式,即单站自发自收全双工感知模式。在这种自发自收的模式下,发射的信号会直接泄漏到感知接收机,形成自干扰,导致射频前端饱和而无法检测到远距离微弱信号。因此,在单站感知模式下,基站需要克服自干扰问题。由于自干扰信号通常与目标回波信号高度相关,使其难以通过信号相干处理技术完全消除,需要在模拟域采用收发天线隔离、射频干扰消除等技术,配合数字域的自干扰消除技术来消除基站自干扰,从而实现单站低空感知功能。

02 双站感知模式:

低空感知系统还可以采用双站感知模式,即基站A发基站B收的感知模式。这种感知模式的优势在于无需基站实现全双工功能,避免了基站自干扰处理的复杂性,但需要基站A和基站B之间实现严格的时间同步和频率同步。基站间的时间同步误差会对





高精度测距性能造成影响, 现有3GPP NR协议TS 38.133规定, 如果基站间同步精度误差在正负1.5微秒, 可造成约450米的距离测量偏差, 无法满足高精度业务需求。为了实现时间同步, 可以通过对基站A发基站B收与基站B发基站A收两个链路的传播时延取平均来消除同步误差的影响, 也可以通过测量多径时间差来消除同步误差的影响。对于频率同步, 由于频率偏差主要源于基站发射机和基站接收机晶体振荡器的频率偏移, 以及移动的感知目标在发射机与接收机之间引起的相对运动和物体运动引起的信号多普勒频移, 因此可以采用经典的Schmidl&Cox (S&C)算法进行频率同步。单站感知和双站感知都属于网络感知, 无需终端参与感知过程, 也无需对终端进行升级换代, 对终端有较好的兼容性, 降低了感知系统部署的复杂性, 提高了系统的可扩展性。

03 端网感知模式:

基站感知通常需要基站与无人机等被感知物体同时具备直射径 (LOS) 才能获得理想的感知性能; 而

在通信网络规划时, 却往往要尽量降低小区间的重叠覆盖。另外, 如果叠加上密集城区的复杂性以及干扰等因素, 会对感知信号在LOS环境下的接收带来很大难度。如果此时将用户设备 (UE) 作为感知辅助节点部署在网络中, 通过终端辅助感知或终端与基站协同感知, 可以有效缓解非直射径 (NLOS) 和干扰等问题, 在不影响通信性能的同时提升感知性能。基于基站发终端收感知信号或者终端发基站收感知信号的端网感知可以复用现有帧结构和现有信号, 通过选择合适的终端 (例如距离感知目标较近的终端) 参与感知来提升感知覆盖性能。将UE作为辅助感知节点接收感知信号时, 感知UE无需与基站存在视距连接, 仅与被感知物体保持视距即可。当基站间或基站与感知物体间无直射径时, 端网感知可拓展感知距离和覆盖范围, 而无需建设新的通感一体化基站。但它带来的挑战在于需要精心挑选与感知物体接近的UE, 或者设计新型UE, 使它更偏重感知性能, 并且感知UE和被感知物体的相对位置和信道变化也会给端网感知引入额外的感知误差。

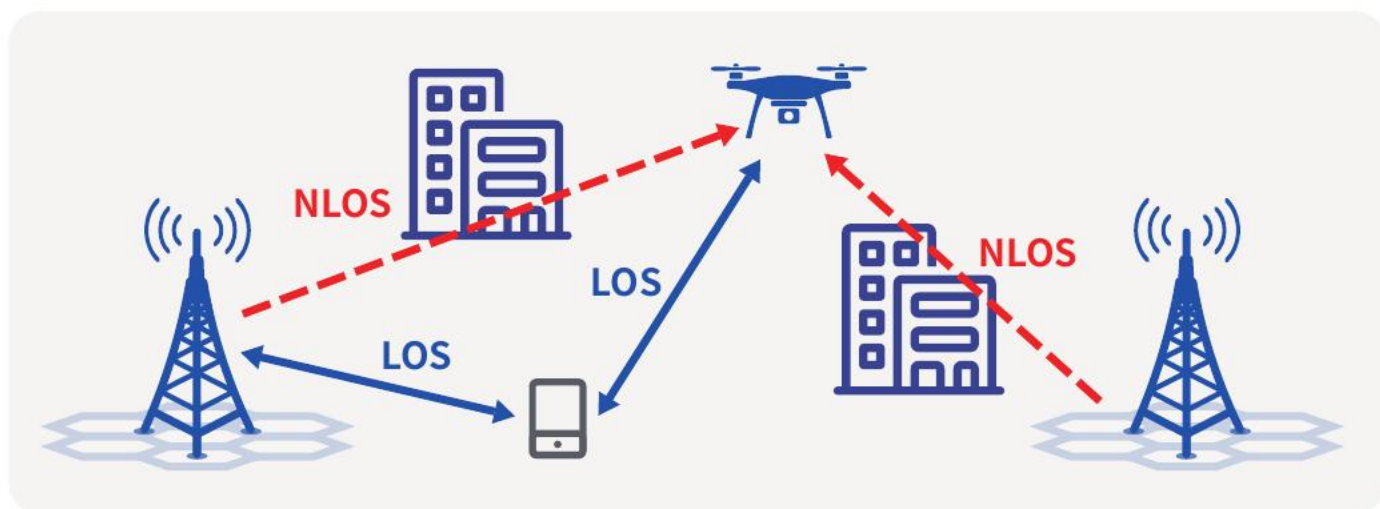


图12-UE作为通感节点用于辅助感知





因此,端网协作感知需要对感知终端的部署进行良好的规划,同时优化感知算法来降低误差影响。首先,确保感知终端与目标感知区域保持视距,以最小化感知误差的影响。其次,考虑感知终端的不确定性以及感知终端、被感知物体和基站的相对位置对感知误差影响的不同,需要优化算法来进行补偿和纠错。为了最大化提升感知精度,可设计特定的感知锚点终端,并通过精细的规划部署锚点终端与基站位置,从而最大化提升感知性能。

7.4 组网的感知干扰分析

在低空组网环境下,感知接收机会受到多种类型的站间干扰影响,如下图所示。具体来说,相邻基站发送的通信信号或感知信号会对感知回波信号造成干扰;非单站组网模式下,感知接收节点还会受到来自感知发射节点的直射径链路干扰。双站模式对现有通信网络的上下行分配与动态切换影响较大,会额外引入站间交叉链路干扰。为有效减少组网下站间干扰,通常需要采用时频域资源划分、智能天线波束调控、功率控制、相干处理、上行用户调度等软硬件结合干扰消除策略。

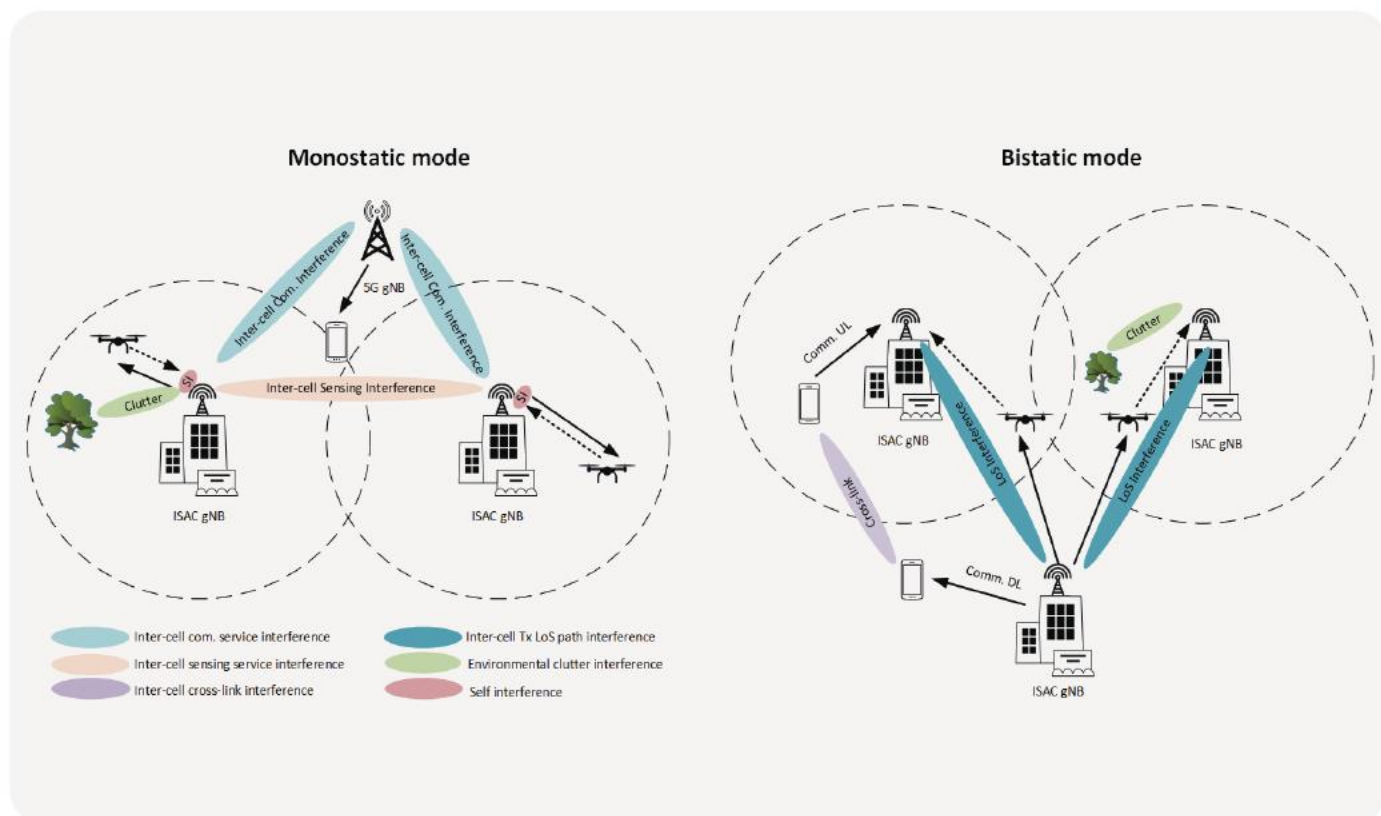


图13-组网通感一体化系统干扰示意图

由于低空信息网络通常部署在楼宇密集的环境,感知信号和通信信号都容易受到丰富的杂波干扰。针对环境杂波消除,可以通过批处理消除算法和串行

消除算法提取环境中的静态物体回波,通过子空间映射和最小二乘等算法进行杂波信号消除^[13]。对于移动目标,可采用二级杂波消除,消除虚假目标。在





感知目标静止的条件下,通过消除环境杂波可以消除直射径和环境反射径的干扰,使信杂比提高约

20dB,从而改善目标检测性能,如下图所示。

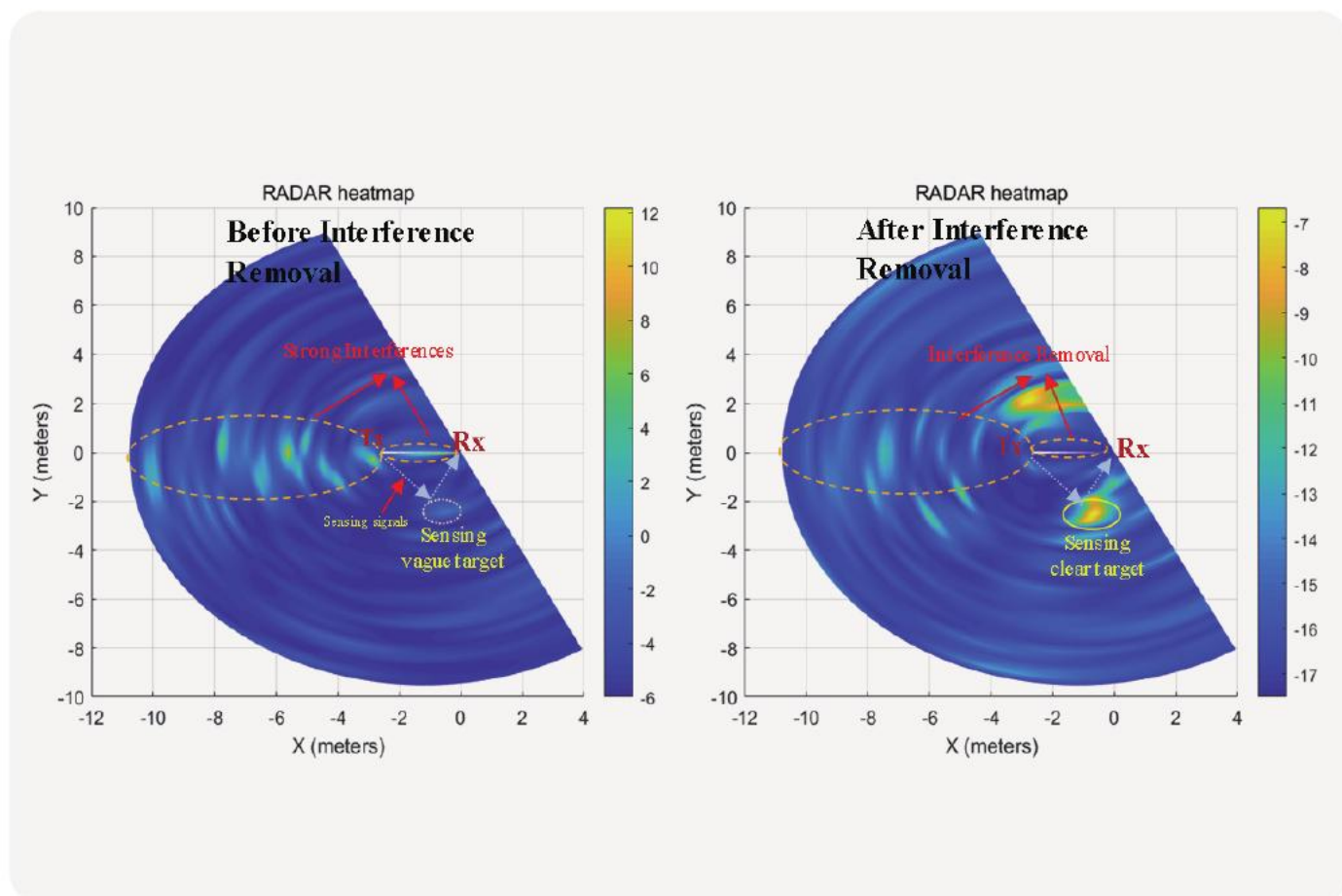


图14-双站模式下环境杂波消除的实测结果

总的来说,要做到组网下通感一体化系统的干扰消除,需要综合分析不同类型站间干扰和环境杂波干扰对系统性能的影响。目前,采用所述技术手段能够明显降低干扰水平对感知目标准确检测的不利影响。

7.5 组网下高可靠目标检测

通感系统的一大优势,是充分利用蜂窝网络的规模组网能力,达成感知的广覆盖和高检测率。下图

为一个简单的通感一体组网场景,在组网环境下,为达成最大化的基站感知能力及性能,需要采取有效的信息处理方式,对多个基站的感知结果进行关联及合并,从而突破单基站探测距离、感知精度、响应速度的瓶颈,弥补单站的覆盖盲区和覆盖空洞,实现高可靠的目标检测。



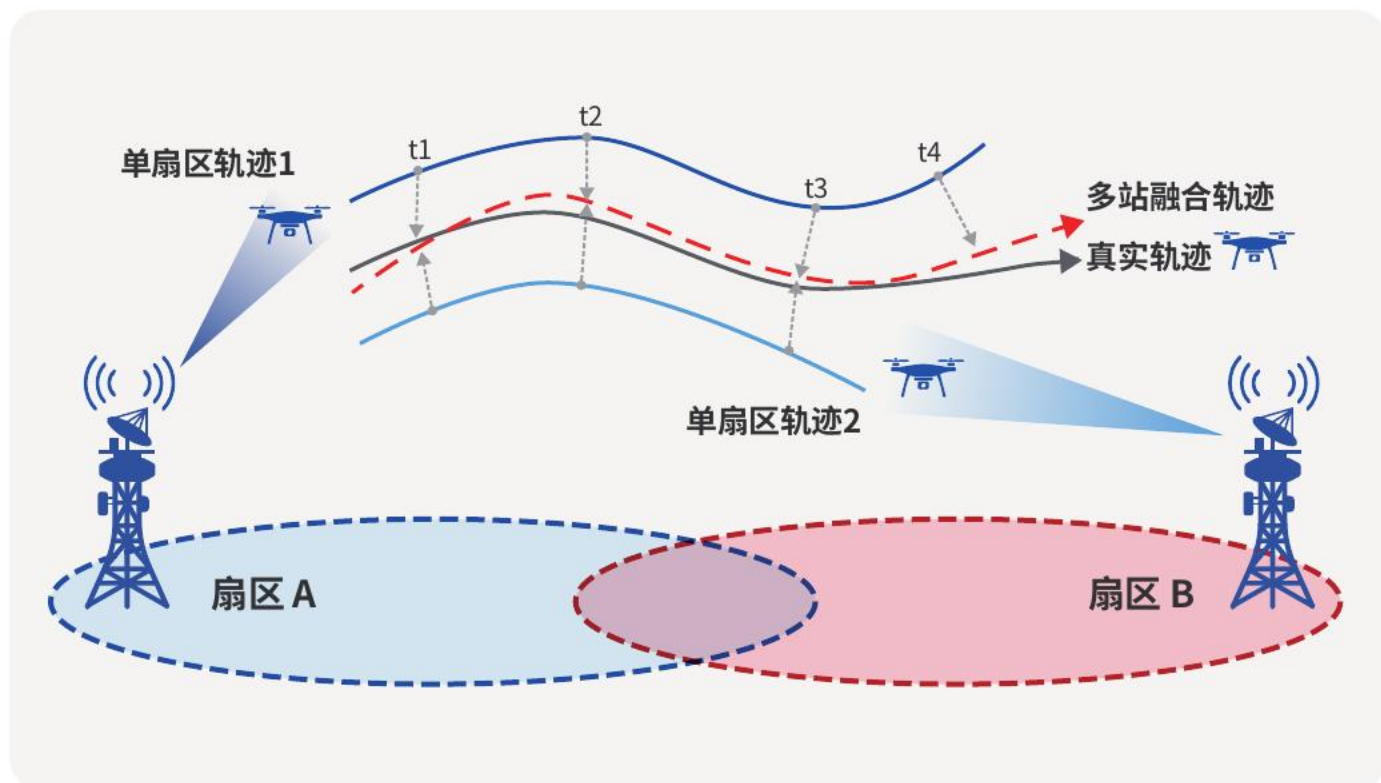


图15-通感组网目标检测场景示意图

组网环境下的联合感知可以通过下述方法实现高可靠目标检测：

01> 多扇区航迹的关联和融合：

通过将单扇区目标跟踪的结果进行坐标转换、时空对准及航迹关联处理，并将关联成功（即来自同一目标）的航迹进行融合得到最终航迹，可以获得对目标检测率的分集收益，实现目标检测率提升到90~95%以上^[40]；

02> 多站联合坐标解算：

通过多个基站感知信息进行联合解算，提高感知目标的等效信干噪比（SINR）。利用多个感知节点的信息完成联合坐标解算，可以提升感知目标检测与跟踪的性能；

03> 跨站目标移动性管理：

通过通信连片组网能力实现感知的连续覆盖，以提升运动目标检测的连续性和完整度。各感知小区本质是大规模分布式组网架构，通过研究有效的分布式信息交互方式，实现对运动目标在不同扇区的航迹进行关联匹配，从而完成同一运动目标的航迹接续和跨扇区软切换，避免单扇区覆盖受限导致的目标丢失、虚警和闪烁等现象，使得目标跨站切换时的航迹完整度提升至大于90~95%^[40]；

通感一体系统最核心的任务即为对目标的准确检测；但在实际的应用中，由于时频资源不足、覆盖能力受限、随机杂波及干扰情况复杂，单节点感知的精度和可靠性往往面临挑战。为达成高精度、高可靠的目标检测，需要充分利用基站的组网覆盖能





力,采用基站间协作的方式完成目标感知。基站作为感知系统的最小单元和底层节点,需要具备类似无线通信系统的多站协作能力,通过多视角检测结果的关联及融合、多站联合坐标解算以及目标跨区域移动性管理等技术,联合多基站的信号、数据处理能力和相应结果,提高感知基站目标检测的检测率、可靠性和准确度,并大幅降低环境杂波和干扰造成的影响,有效提升通感系统对低可视度目标、复杂运动路径、多环境杂波干扰场景的检测能力,从而极大扩展通感一体系统的商业应用范围。

7.6 精准目标识别

目标识别在目标检测、目标跟踪等功能的基础上进一步赋予了基站分辨不同类别目标的能力,为目标应对措施的实施提供重要参考。随着感知场景向低空、道路、海洋等场景不断扩展,国土安全、航线保障、城市安防等场景对目标识别的需求日渐增加,目标种类的多样性、部署环境的复杂性也给目标识别带来了日趋严峻的挑战。下图为感知系统目标识别技术路径示意图。

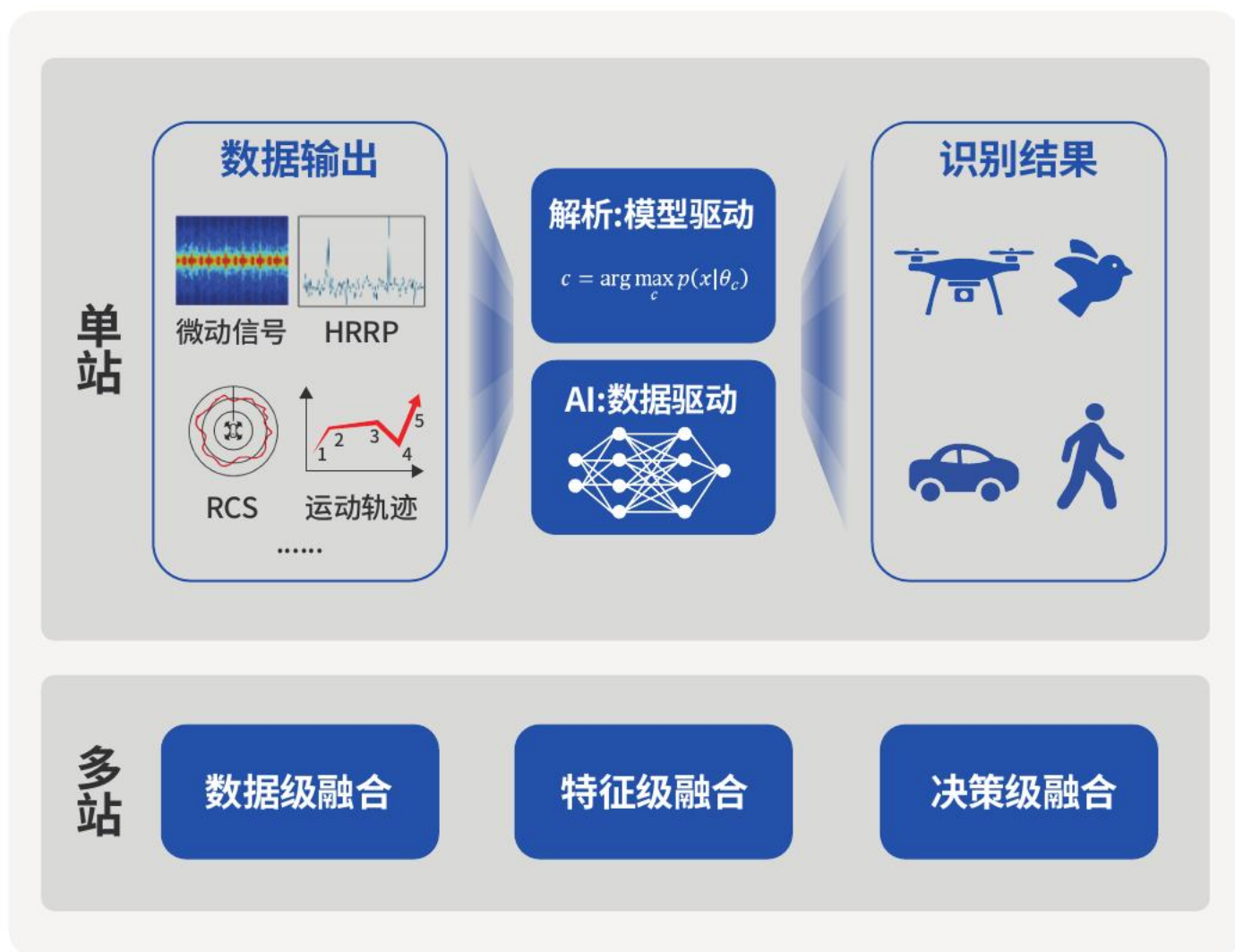


图16-感知系统目标识别技术路径示意图



为实现高精度目标识别,潜在的技术路径包括:

01 > 挖掘有效的目标特征:

不同种类的目标在材质、结构、运动方式等方面存在差异,对雷达回波产生不同影响,为精准目标识别提供了可能。目标特征按雷达分辨率可分为低分辨率特征和高分辨率特征,其中低分辨率雷达特征包括雷达截面积(RCS)、运动轨迹等,而高分辨率特征包括微多普勒谱、高分辨距离像(HRRP)等。综合低分辨率、高分辨率雷达信息,可充分挖掘目标独有的特征,为识别算法提供高质量数据输入。

02 > 模型与数据双驱动:

主流的目标识别算法可分为模型驱动的解析类方法和数据驱动的AI类方法。其中,解析方法依赖基于领域知识进行建模,并进行特征提取,对训练数据要求较低甚至无要求,较为适合训练数据采集困难、标记困难的场景,但同时性能也受限于特征建模的精度。而AI方法基于数据驱动,无需基于领域知识进行建模并提取特征,在数据集完备的情况下具备显著的性能优势。为适应不同场景下不同的数据集完备程度,可以通过解析方法和AI方法的自适应融合,在鲁棒性和性能之间取得平衡,提升单站目标识别准确率。

03 > 多站融合目标识别:

利用基站天然组网的优势,从不同地理位置对目标进行感知,最大化提升目标特征感知质量。根据多站信息融合在目标识别中的不同阶段,可分为数据级融合、特征级融合、决策级融合等不同融合策略^[14]。进一步地,可根据部署环境、回波质量等参

数,自适应选取最佳的融合策略,在多站联合感知场景下提升目标识别准确率。

相较于传统雷达,通感一体下的目标识别因为感知资源受限、杂波干扰复杂等因素变得充满挑战。与此同时,智能算法、多站组网协同也为目标识别带来了新的机遇。其中,以深度神经网络为代表的智能化方法可以充分挖掘多源数据的多维特征,通常能够取得比传统模型驱动的解析方法更好的性能。但考虑到深度学习对数据的高要求以及雷达数据难采集、难标记的客观事实,实际应用中也需结合模型驱动的解析方法作为基础性能保障。多站组网则在单站的基础上进一步拓宽了目标特征信息来源,降低了单站因遮挡、瞬时干扰等因素导致识别失败的概率。综上所述,通感一体中的目标识别需要充分利用智能化算法和多站协同感知的优势,有望达到甚至超越传统雷达的目标识别性能。

7.7 空地网络协同

低空信息网络与地面通信网络预计会同站部署,地面通信网络由于地面建筑物阻隔,基站部署相对密集,从而保证连续覆盖,低空信息网络由于对空域覆盖,建筑物阻隔相对较少,对空基站稀疏分布就可保证连续覆盖。但是由于地面网络和对空网络存在相互交叠区域,因此需要对空和对地两张网络间协同,尽可能减少两张网络间相互干扰。

低空覆盖网络可以采用空地异频部署方案,或者空地同频部署方案。如果空地同频部署,则同频网络以覆盖地面为主,空域更多是旁瓣覆盖,高度有限,





且信号较为杂乱,越区覆盖严重,上下行干扰都较大,对地面用户体验有影响,邻区关系和互操作策略配置复杂,网优相对困难;如果空地异频部署,对空覆盖可以灵活调整天线倾角,覆盖更高的空域范围,干扰易控,邻区关系和互操作策略相对简单。

空地协同网络应能够区分无人机终端,为其配置合适的移动性策略和多频协同迁移/驻留策略,以保障每个无人机终端的业务体验和整网的资源利用效率。无人机终端的识别方法和标识可以考虑使用:

无线接入技术/频率选择优先级 (RAT/ RFSP) / 服务配置文件标识符 (SPID)、5G服务质量标识 (5QI) / 服务质量类别标识 (QCI)、切片、国际移动台设备识别软件版本 (IMEISV) 等。

低空场景由于旁瓣覆盖,信号杂乱的原因,可能会导致频繁切换和乒乓切换现象。因此需要在识别无人机终端的基础上,为其配置合适的移动性策略,比如:切换事件、门限、迟滞等参数,如图17所示。

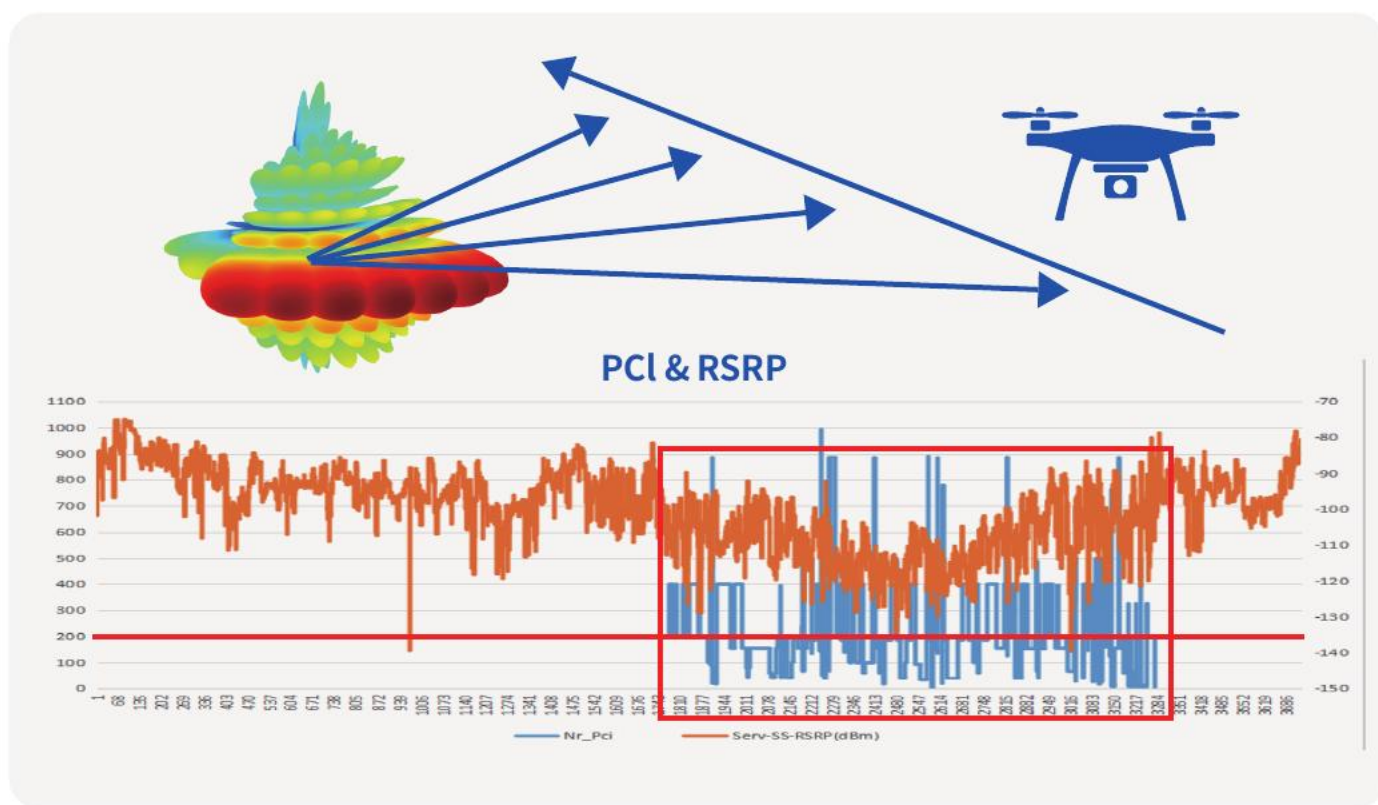


图17-低空场景信号变化剧烈

如果部署低空专网,则需要有合适的公/专网之间的迁移和驻留策略。对于公网普通终端,禁止迁移到低空专网小区。对于无人机终端,起飞阶段需采用定向切换,将无人机终端尽快迁移到低空专网小

区;在飞行阶段优先使用同频切换,尽量使无人机终端保持在专网小区;降落阶段基于覆盖切换,当专网覆盖变差时才迁移到地面公网小区,如图18所示。



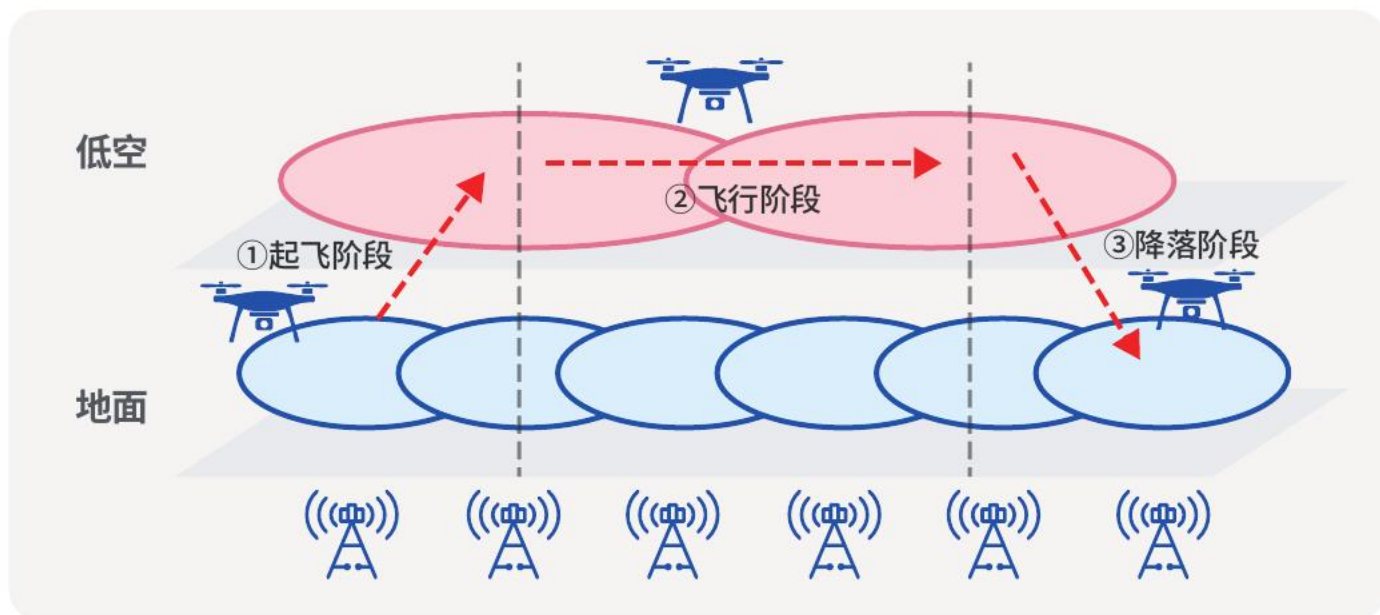


图18-低空专网协同移动性策略

7.8 低空网络的通信保障

低空信息网络包含通信管理和感知管理两部分内容，通信管理是通过低空信息网络给无人机发送控制指令，接收无人机上报信息等，是低空信息网络的重要组成部分。因此，无线通信网络的性能和可靠性对无人机业务的安全和效率至关重要。同时，不同的低空通信业务有着不同的速率、时延、抖动和可靠性要求。为了进一步提高无线通信网络的性能和可靠性，就需要精准识别低空通信业务，并提供精细化和差异化的业务保障能力。

01 低空通信业务精准识别

无线通信网络需要具备对无人机业务的智能识别能力，基于对业务流特征分析和业务画像模型推理，实现对无人机业务的精准识别，如无人机实时控制、紧急指令和高清视频等；同时，需要针对识别出的不同业务流，实施差异化的无线空口调度策略，满足不

同业务的体验需求，实现业务体验及网络资源效率双优。

无线通信网络需要建立无人机业务端对端的质量评估体系，如无人机指令时延、视频播放缓冲时长和卡顿等，通过实时的业务质量评估和反馈，指导无线空口调度策略的精细化闭环调整，以满足在无人机移动过程中的确定性保障效果。

02 低空通信业务保障

低空覆盖移动性和干扰协同是组网场景下的关键挑战，传统地面站天线通常是向下倾斜，天线主瓣指向地面用户，从而提供通信服务，而低空无人机主要由基站天线的旁瓣提供服务，由此存在两个挑战：(1) 天线波束的上旁瓣覆盖，容易导致严重的越区覆盖，如果旁瓣碎片化产生严重的越区覆盖，



容易引起误切换；(2) 空中信号传播以直射径(LOS)为主, 易收到多个小区的通信信号, 造成严重干扰, 如图19所示。

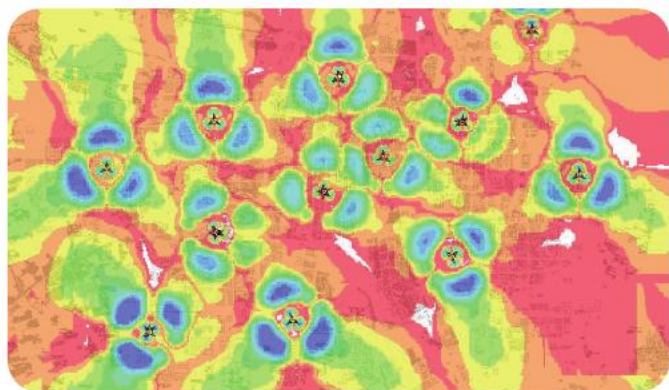


图19-低空覆盖干扰明显

基于上述考虑, 为了保证低空通信业务可靠和高速率, 应优先采用低空覆盖和地面覆盖异频组网, 同时低空覆盖频点可以兼顾地面热点区域覆盖。对于同频组网下, 低空网络干扰影响用户通信问题, 可以考虑在空域引入簇(Cluster)的理念, 簇内联合调度资源, 簇内基站天线同步联合进行多天线收发, 从而降低低空干扰, 同时可以提升联合收发收益, 如下图所示。

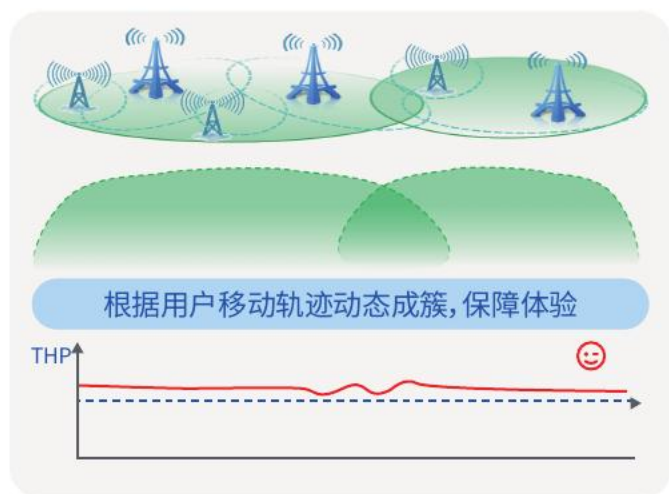


图20-基于簇的用户业务服务架构

03 低空网络的站址密度

低空立体覆盖环境, 基站到无人机基本为直射径, 其信号传输损耗相比同距离的地面传输损耗小^[15], 因此低空覆盖的小区半径相比地面覆盖小区半径更大。低空网络和地面网络小区半径比1:N, 其中, N的取值与地面环境、载波频点、覆盖高度等有关。地面环境建筑物越多、载波频点越高, 其穿透损耗、折射绕射损耗越大, 地面覆盖路损越大, 则N的取值越大; 覆盖高度越高, 波束高度角越大、低空网络小区水平投影半径越小, 则N的取值越小。结合链路预算和实际评估, 农村场景中, 小区半径比N取值范围约为2~3; 一般城区场景中, 小区半径比N取值范围约为5-6; 密集城区场景中, 小区半径比N取值范围6-8。另考虑到高楼遮挡和覆盖空洞, 城区场景可能需要适当加密低空站点, 以保证低空网络通信质量。

7.9 空联网技术

无人机主动避障能力在低空场景中非常重要, 特别是在城市空域中密集飞行时更为关键。空联网(A2X)可允许无人机设备之间、或无人机与其它设备之间进行直接通信, 而无需通过蜂窝网络进行通信连接。这种直接通信功能可提供低延迟通信, 以支持无人机在任何可能飞行的地方以及在蜂窝基站的通信质量下降或无网络覆盖的情况下避免碰撞。A2X的方案已经在3GPP开展标准化工作, 其目标是提供有效的空中冲突检测和消除技术, 它是网络支持的飞行控制命令、传感技术的备份和补充。A2X是一项独立功能, 具有强大的QoS保证机制, 确保通信高效可靠, 无论在飞行命令和控制链路连通





还是中断时,它仍然发挥作用,特别适用于对安全敏感和关键性的UAV操作任务。

A2X技术包括UAV到UAV通信(A2A),以进行无人机侦测(使用来自无人机的广播信息)和无人机避障(使用已检测到飞行冲突的无人机之间的单播通信)。此外,当无人机配备DAA自主避障逻辑时,机载传感器和计算技术可以利用此类通信来检测潜在飞行冲突并执行规避操作。A2X还包括无人机对地通信(A2G),通过将检测与避障(DAA)信息传输到授权的地面接收器,并支持无人机从授权的地面发射器接收信息(例如,用于飞行冲突检测)。利用A2X技术,可以通过移动网络使用蜂窝连接来实现无人机远程驾驶系统(RPS)通信,以报告检测到的冲突并与RPS通信和接收规避信息。

通过A2X技术在无人机操作环境中的应用,可以实现无人机之间的信息共享,防止无人机与障碍物的碰撞,以及防止与启用A2X的地面运动障碍物之间的碰撞。该标准支持的通信距离约为2至3公里,可以使无人机和其他飞行器(例如直升机)相互识别,从而同时保障有人和无人飞机的飞行安全。例如,A2X可以支持识别不同制造商生产的无人机同时在大片农田上执行喷洒农药飞行,或者多架无人机同时飞越目标火区。与用于无人机识别的笨重且昂贵的雷达设备相比,A2X的制造成本相对较低(这一点在蜂窝车联网(C-V2X)市场已经证明),使其更加适合无人机的DAA解决方案。

A2X技术还可以实现自主避障、非法无人机检测、移动障碍物识别以及与起飞和着陆点的通信,因此

可作为综合通信平台为UAV提供服务。例如,A2X可通过检测地图上未显示的支持A2X的移动障碍物来为无人机自主飞行提供支持。A2X还支持与无人机出租车起飞和着陆点直接通信等服务,以及在执行基础设施监视、维护或测量建筑物时,使用动态地理围栏提供飞行优先级等服务。

由于操作员可以根据需要定义无人机通信中的“消息”,为了确保这些消息的安全,无人机行业需要定义消息传送的安全标准,例如支持身份验证、授权、完整性保护等的消息传送机制。A2X支持强大的安全功能,包括基于加密凭证的解决方案。利用正在开发的安全框架,无人机可传输数字签名信息,使接收器即使在离线状态下也可以对来自发送设备的内容进行身份验证和授权。

使用为无人机A2X应用分配的专用频谱部署的A2X解决方案将可以支持没有蜂窝连接能力或使用不同载波频谱的设备。全球范围内正在为此类场景提供频谱支持,并且非常有必要为A2X技术分配专用频谱。为确保更安全、更高效的无人机飞行和通过DAA通信避免碰撞,非授权的频谱并不是合适的候选方案,因为它缺乏干扰保护,并且可能会在无人机操作密集的人口稠密地区遭受高强度的无法预测和无法控制的噪音干扰。仿真表明20 MHz信道足以安全支持关键性的、经过身份验证的远距离通信,以支持可靠、安全 and 高速的UAS飞行,实现无人机在城区环境和其它区域密集飞行环境下可靠的DAA功能。





7.10 无人机防撞系统

无人机防碰撞是一整套基于空域资源栅格化和综合飞行资讯整合的泛低空领域的无人驾驶航空器防碰撞系统,集飞航安全感知、碰撞预警、飞行告警、智能路线规划等功能于一体的泛低空无人驾驶航空器的防碰撞系统。该系统在空域栅格化、精细化运营的基础上进行建设,综合利用广播式自动相关监视(ADS-B)、无人机综合飞行数据上报、低空侦测雷达等泛低空飞行感知手段,结合深度学习技术和强大的运算能力,最终实现无人机防碰撞。

无人机防碰撞系统的主要功能包括:

- 01 **空域栅格化^[41]**:空域栅格化是无人机防碰撞系统的基础,是在三维地理坐标信息的基础上,按照特定长宽高的小方格将空域资源预先切分,并逐一进行标记;
- 02 **飞航安全感知**:飞航安全感知是在空域栅格化的基础上,将气象(微气象)^[42]等标记到空域栅格中,为飞行安全提供持续的保障;
- 03 **通过空联网技术进行主动通信**:空联网技术可基于无人机之间的直接通信实现无人机的态势感知,并基于无人机的机对地蜂窝通信实现无人机的网络感知;
- 04 **碰撞预警^[16]**:碰撞预警是将待进行的飞行活动,结合飞行器的飞行速度、人员/设备的反应时间、气象条件等因素对飞行的影响以及安

全方面的要素,在无人机的物理边缘预留一定空间作为虚拟缓冲区,这样将无人机凸化为一个特定长宽高的立方体再栅格化,在此基础上评估飞行活动的碰撞风险;

- 05 **飞行告警**:飞行告警时将实时获取的综合飞行信息转换为空域栅格,通过深度学习判断预测其四维的飞行轨迹以及相关的飞行安全评估;
- 06 **智能路线规划^[17]**:智能路线规划是给定起飞点和降落点后,依据实时的空域流量、气象条件、服务保障条件,结合规划路径长度成本、安全和可行性成本、飞行高度成本以及路径平滑成本等要素,规划出三维的飞行路线。





图21-无人机缓冲区碰撞效果

7.11 低空航控平台

低空无人机监管、服务平台是一种专为低空无人机飞行管理与控制而设计的综合平台,旨在实现对无人机的可视化、可调度、可监控的管理目标。该平台包括气象处理服务、空域处理服务、情报处理服务、飞行计划处理服务、监视信息处理服务和综合计算服务等模块,具备以下特征:

01 气象处理服务:通过整合专业的第三方气象预报数据和气象实时数据,为无人机提供全面的飞行前和飞行中气象信息和天气状况服务,确保飞行安全性。

02 空域处理服务:利用北斗网格位置码、城市信息模型(CIM)以及地理高程数据等技术为低空空域资源规划提供精准的管理服务,构建可管理的空域数字底座,提高空域资源的利用效率。

03 情报处理服务:为无人机用户提供详尽的飞行前情报信息服务,包括适飞区、管制区、禁飞区等,以及其他用户申报的临时隔离空域和通告,从而确保飞行在法定规定的范围内进行。





04 飞行计划处理服务:管理无人机用户注册及其飞行计划,建立飞行计划的表达和描述模型,通过人机交互界面提供申报服务,并在飞行前对计划进行校验,在飞行中实时监控执行情况,以确保飞行计划的合规性和安全性。

05 监视信息处理服务:融合主被动监视系统的航迹信息,提供全面的飞行状态监视服务,基于飞行计划、气象、电子围栏和地理高程等信息对无人机运行进行精准监管,并提供多种告警服务。

06 综合计算服务:基于数字底座建立四维航迹的精细运行能力,包括空域流量控制、精细化空域组织与管理、无人机防撞测试、智能路线规划和航路航线网络优化等服务,实现对无人机运行的全面综合计算与管理。

通过以上技术模块的有机结合,该平台为低空无人机提供了高效、安全、可控的飞行管理与控制解决方案,为未来低空领域的应用提供了可靠的技术支撑。



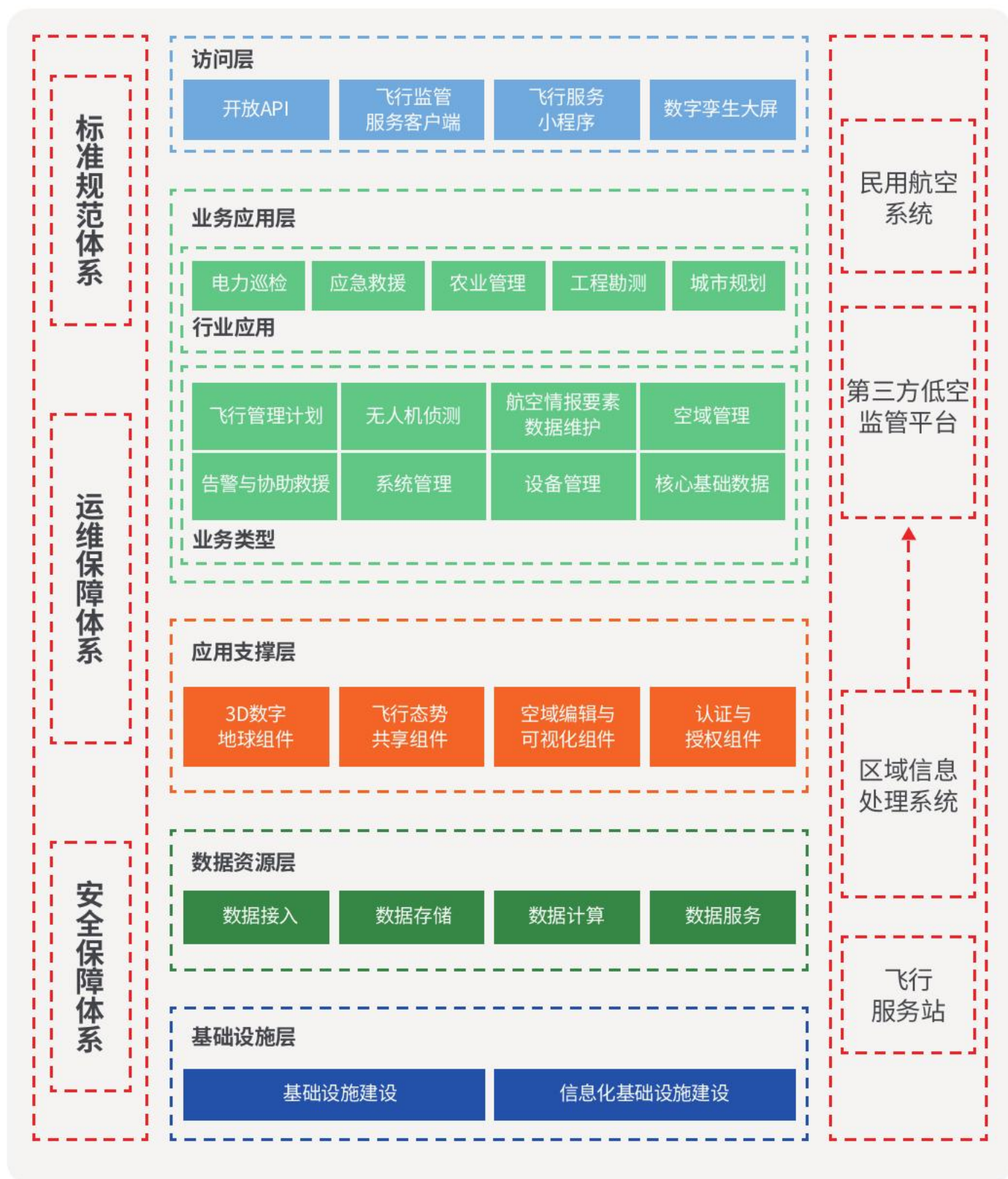


图22-低空无人机监管、服务平台架构





08 展望



低空经济作为国家战略性新兴产业已写入国家发展规划。借助市场驱动与地方政府参与,低空经济快速发展势不可挡。与航空行业成熟的管理与商业运营相比,低空经济作为一种开创性的商业形态,其发展可能存在一定的不确定性,需要更高效的技术来支撑无人机高负载、多层次、高密度和高频次的低空飞行。

中国电信将协同产业伙伴根据国家战略、行业需求和产业进展,以低空信息网络为抓手,开展通信感知一体化网络试验,实现低空无人机的识别、管理和控制,促进低空管理网络的成熟。中国电信愿打造合作、创新、共赢的低空网络生态系统,助力低空经济从蓄势待发到腾飞。

09 总结



本白皮书在第2章引言部分概述了中国电信发布低空信息网络白皮书的背景和意义。

本白皮书第3章针对当前正在加速发展的低空经济,从市场、技术、政策、监管等四个方面说明低空经济发展具备广阔的前景,也具备技术和政策的支持,同时也提出低空经济具有规范行业发展与风险管控的迫切需求。

低空经济优势在于立体,核心是飞行器和各种产业形态的融合,延伸拓展“低空+应用”、“低空+服务”产业链,因此本白皮书在第4章列举了在低空经济领域中,无人机在快递物流、地理测绘、城市管理、应急救援、能源巡检、交通巡检、农林植保、无

人机载人等场景中的典型应用,并在第5章说明了这些应用将带来的飞行监管和低空信息网络建设等方面的挑战,包括在飞行监管方面,需要避免无人机“乱飞”、“黑飞”等不合理和不合法的行为;在低空信息网络建设方面,需要建设一张在低空广域连续覆盖且能够支持大量无人机控制和高清多媒体数据传输的信息网络,该网络具备智能、安全、提供灵活服务的特性。

针对上述低空信息网络,本白皮书在第6章给出了该网络的总体架构,主要包含应用层和功能层。应用层为第三方行业用户提供低空信息服务,功能层包括通信、感知和智算三大功能,其中通信功能用于满足低空无人机多样化通信需求,包含业务传





输、飞行控制和身份标识认证等;感知功能旨在利用无线信号实现对目标无人机或环境的主动感知,包括对低空飞行目标的测距、测角、测速、定位和追踪等能力;智算功能为低空信息网络提供可靠的智能计算能力,实现基于图像、声音及相关数据信息的智能信息处理,实现低空信息系统中业务预测、故障诊断和飞行决策等功能。

本白皮书在第7章给出实现低空信息网络所需要重点研究的关键技术。在通感一体的信道模型研究中,感知目标特性建模是感知信道和通信信道最显著的差异,也是研究低空感知技术、评估感知性能的基础;通感一体波形和帧结构设计是低空信息网络空口设计基础,需要同时考虑通信性能和感知性能,合理的波形和帧结构设计能够提高感知的精度和通信的效率;在信道建模和空口设计完成后,需要挑选合适的用于低空信息网络的感知模式,本白皮书介绍了单站自发自收,双站A发B收,端网协作感知三种适于低空无人机感知的模式,以及各自的优缺点;在单站感知介绍后,本白皮书介绍在多站组网环境下,利用资源分配和波束管理消除邻站干扰,利用串行或批处理等算法消除环境杂波,以及利用多站组网优势,进行高可靠目标感知、精准目标识别的技术;由于低空信息网络部署后,还可能与地面现有移动通信网络相互影响,并存在一定的干扰,本白皮书还建议可以通过空地异频部署、制定合适迁移和驻留策略等方法进行低空和地面网络协同,降低空地网络间的相互影响;除了感知功能,本白皮书还给出低空信息网络的通信保障方法,包括低空通信业务精准识别、低空通信覆盖、低空网络站址密度选择的方法。

在低空信息网络应用系统方面,无人机防碰撞系统和航控平台必不可少。中国电信的无人机防碰撞系统是一整套基于空域资源栅格化和综合飞行资讯整合的泛低空领域的无人驾驶航空器防碰撞系统,集成了飞航安全感知、碰撞预警、飞行告警、智能路线规划等功能。中国电信航控平台是专为低空无人机飞行管理与控制而设计的综合平台,用于实现对无人机的可视化、可调度、可监控的管理目标,该平台包括气象处理服务、空域处理服务、情报处理服务、飞行计划处理服务、监视信息处理服务和综合计算服务等模块。

最后,本白皮书在第8章和第9章中进行了展望和总结。中国电信倡导与产业伙伴一起,以低空信息网络为契机,实践产业合作,驱动创新应用,推动低空数字产业链成熟,打造合作、创新、共赢的低空生态圈。





缩略语



缩略语	英文全称	中文全称
3GPP	Third Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划
4G	4th-Generation Mobile Communication System	第四代移动通信系统
5G	5th-Generation Mobile Communication System	第五代移动通信系统
5QI	5G Quality of Service Identifier	5G服务质量标识
6G	6th-Generation Mobile Communication System	第六代移动通信系统
A2A	Aircraft-to-Aircraft	无人机与无人机通信
A2G	Aircraft-to-Ground	无人机对地通信
A2X	Aircraft-to-Anything	空联网
AAM	Advanced Air Mobility	先进空中交通
AAV	Autonomous Aerial Vehicle	自主飞行器
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast	广播式自动相关监视
AI	Artificial Intelligence	人工智能
CAGR	Compound Annual Growth Rate	复合年均增长率
CIM	City Information Modeling	城市信息模型
C-V2X	Cellular-Vehicle-to-Everything	蜂窝车联网
DAA	Detect and Avoid	检测与避障





缩略语	英文全称	中文全称
EASA	European Union Aviation Safety Agency	欧洲航空安全局
eVTOL	Electronic Vertical Take-Off and Landing	电动垂直起降飞行器
FAA	Federal Aviation Administration	美国联邦航空管理局
GPS	Global Positioning System	全球定位系统
HD	High-Definition	高清
HRRP	High Resolution Range Profile	高分辨距离像
IMEISV	International Mobile Station Equipment Identity and Software Version	国际移动台设备标识和软件版本
IPP	Integration Pilot Program	无人机整合试点计划
ISAC	Integrated Sensing and Communication	通信感知一体化
JARUS	Joint Authorities For Rulemaking on Unmanned Systems	国际无人机规章制定联合体
LFM	Linear Frequency Modulation	线性频率调制
LOS	Line of Sight	视距
NAS	National Airspace System	国家空域系统
NASA	National Aeronautics and Space Administration	国家航空航天局
NLOS	Non-Line of Sight	非视距
NR	New Radio	新空口
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
QCI	QoS Class Identifier	服务质量类别标识





缩略语	英文全称	中文全称
QoS	Quality of Service	服务质量
RAT	Radio Access Technology	无线接入技术
RCS	Radar Cross-Section	雷达截面积
RFSP	RAT/Frequency Selection Priority	无线频率选择优先级
RPS	Remotely Piloted System	远程驾驶系统
S&C	Schmidl&Cox	施密特-考克斯算法
SINR	Signal-to-Interference Plus Noise Ratio	信号与干扰加噪声比
SORA	Specific Operation Risk Assessment	特定运行风险评估
SPID	Service Profile Identifier	服务配置文件标识符
UAM	Urban Air Mobility	城市空中交通
UAS	Unmanned Aerial System	无人机系统
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	无人机
UE	User Equipment	用户设备
UTM	Uncrewed Aerial System Traffic Management	无人机交通管理
Wi-Fi	Wireless Fidelity	无线保真





参考文献



- [1] Drone Industry Insights. Global Drone Market Report 2023-2030[R/OL]. 2023.
- [2] Drone Industry Insights. Drone Application Report 2023[R/OL]. 2023.
- [3] European Commission. Drone Strategy 2.0[R/OL]. 2021.
- [4] JARUS. JARUS Guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA)[R/OL]. 2019.
- [5] Grand View Research. Commercial Drone Market[R/OL]. 2021.
- [6] Technavio. Global Drone Market[R/OL]. 2023.
- [7] IMARC, Construction Drone Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2023-2028 [R/OL]. 2022.
- [8] GII. Urban Planning Software & Services Market Global Forecast 2023-2030[R/OL]. 2023.
- [9] Lattice. Drone Industry Report [R/OL]. 2023.
- [10] Markets and Markets. Smart Cities Market Analysis, Industry Size and Forecast [R/OL]. 2022.
- [11] 3GPP. Uncrewed Aerial System (UAS) support in 3GPP (Release 19): TS 22.125 V19.1.0-2023 [S/OL]. Valbonne: 3GPP Support Office, 2023.
- [12] 3GPP. Study on Integrated Sensing and Communication (Release 19): TR 22.837 V19.2.0-2023 [S/OL]. Valbonne: 3GPP Support Office, 2023.
- [13] C. Schwark and D. Cristallini, Advanced Multipath Clutter Cancellation in OFDM-based Passive Radar Systems[C]. 2016 IEEE Radar Conference (RadarConf), Philadelphia, PA, USA, 2016.
- [14] Z. Wei, F. Zhang, S. Chang, et al., MmWave Radar and Vision Fusion for Object Detection in Autonomous Driving: A review [J]. Sensors, 22(7): 2542, 2022.
- [15] 3GPP. Study on Enhanced LTE Support for Aerial Vehicles (Release 15): TR 36.777





V15.0.0-2017 [S/OL].Valbonne: 3GPP Support Office, 2017.

- [16] D. Mellinger and V. Kumar, Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors[C]. 2011 IEEE international conference on robotics and automation, 2520–2525. IEEE, 2011.
- [17] W. Peng and D. Zhiliang, A Multi-Objective Quantum-Inspired Seagull Optimization Algorithm Based on Decomposition for Unmanned Aerial Vehicle Path Planning [J].IEEE Access, 10:110497–110511, 2022.
- [18] 范恒山. 把发展低空经济作为构建新发展格局的重要抓手[EB/OL].2022.
- [19] 粤港澳大湾区数字经济研究院(福田). IDEA 低空经济发展白皮书深圳方案[R/OL].2022.
- [20] 中国民用航空局空管行业管理办公室. 无人驾驶航空器系统管理政策法规 [EB/OL].2020.
- [21] 杨宽,费秀艳.美国无人机立法新动态及其启示 [J].北京航空航天大学学报(社会科学版), 32(01):113-122,2019.
- [22] 国务院. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例 [国令第761号][EB/OL].2023.
- [23] 左荣昌.国外无人机立法及对中国的启示研究[J].齐齐哈尔大学学报(哲学社会科学版), (01):79-83,2018.
- [24] 飞行汽车.飞行汽车还是电动飞机[N/OL]. 飞行汽车,2022.
- [25] CNNIC.第52次中国互联网络发展状况统计报告[R/OL].2023.
- [26] 艾瑞咨询.2022年中国即时配送行业报告 [R/OL].2022.
- [27] 李心萍. 2022年完成业务量1105.8亿件, 快递服务覆盖全国95%建制村[N/OL].人民日报, 2023.
- [28] 国家邮政局.全球快递发展报告 (2023) [R/OL]. 2023.
- [29] 中航通信息研究所.2024年中国低空经济报告[R/OL].2023.
- [30] 无人机机场.浅谈无人机技术在测绘领域的应用[N/OL].无人机机场,2023.
- [31] 沙利文.中国工业无人机行业研究报告 [R/OL]. 2020.
- [32] 交通运输部.2022年交通运输行业发展统计公报[N/OL].中华人民共和国中央人民政府,2023.





- [33] 苏璇.自然资源部:我国耕地面积19.179亿亩[N/OL].中国新闻,2021.
- [34] 黄刚.无人机对于中国农业来说究竟有多重要? [N/OL].2021.
- [35] 世界农化网.中国农林植保工业无人机市场现状及发展前景[N/OL].世界农化网,2021.
- [36] 绿盟科技. 无人机现状观察及安全分析报告[R/OL].2023.
- [37] 亿航智能. 未来交通:城市空中交通系统白皮书[R/OL]. 2020.
- [38] 中金公司. 低空经济蓄势待发 eVTOL行业迎来发展临界点[EB/OL]. 2024.
- [39] Vivo,中国电信等. 通感一体化系统架构与关键技术[R/OL]. 2023.
- [40] 何友,王国宏等.多传感器信息融合及应用[M].北京:电子工业出版社,2000:36-42,2000.
- [41] 徐鑫宇, 万路军, 陈平等. 基于GeoSOT网格的空域栅格化表征方法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 22(2): 19-26, 2021.
- [42] 郭晓染,严超,苗世光. 城市微尺度气象要素快速模拟方法的建立及应用[J]. 中国科学:地球科学, 53(10): 2257-2272, 2023.

