



专题：低空物联网与低空安全

5G-A/6G+北斗通感导技术在低空经济中的应用与展望

金耀^{1,2,3}, 张贺^{2,3}, 邓中亮¹, 唐雄燕^{2,3}, 王泽林^{2,3}, 胡雅静⁴, 马重阳⁵

(1. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876;

2. 中国联合网络通信有限公司研究院, 北京 100048;

3. 下一代互联网宽带业务应用国家工程研究中心, 北京 100048;

4. 北京电信规划设计院有限公司, 北京 100048; 5. 中国联合网络通信有限公司, 北京 100033)

摘要: 低空经济作为国家战略性新兴产业, 将迎来重大发展机遇。然而, 低空活动所需的通信、感知和导航等基础设施还不够完善。聚焦低空物联网中的5G-A/6G通感一体和北斗通导一体化技术, 分析了二者的关键技术、融合思路及在低空经济中的应用和未来研究方向。首先, 介绍了5G-A/6G通感一体技术和北斗通导一体化技术, 并探讨了基于通信基站的通信、感知和导航3种技术的一体化融合思路。其次, 研究了通信、感知、导航定位及授时技术在低空经济中的应用场景。最后, 展望了面向低空经济应用的通信、感知及导航技术未来研究方向。

关键词: 低空经济; 北斗; 通感一体; 通导一体化; 通感导一体化; 低空物联网

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025045

Application and prospect of 5G-A/6G+Beidou communication, sensing and navigation technology in low-altitude economy

JIN Yao^{1,2,3}, ZHANG He^{2,3}, DENG Zhongliang¹, TANG Xiongyan^{2,3},
WANG Zelin^{2,3}, Hu Yajing⁴, MA Chongyang⁵

1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. China United Network Communications Co., Ltd. Research Institute, Beijing 100048, China

3. Next Generation Internet Broadband Service Application National Engineering
Research Center, Beijing 100048, China

4. Beijing Telecommunication Planning & Designing Institute, Beijing 100048, China

5. China United Network Communications Co., Ltd, Beijing 100033, China

Abstract: As a national strategic emerging industry, the low-altitude economy will usher in significant development

专题策划人: 曹先彬, 冷甦鹏, 熊凯, 赵中亮

收稿日期: 2025-01-13; 修回日期: 2025-02-27

通信作者: 邓中亮, dengzhL@bupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2022YFB2903302, No.2022YFB3904603)

Foundation Items: The National Key Research & Development Program of China (No.2022YFB2903302, No.2022YFB3904603)



opportunities. However, the infrastructure required for low-altitude activities, such as communication, sensing, and navigation, are not yet fully developed. 5G-A/6G integrated sensing and communication (ISAC) technology and Beidou integrated communication and navigation (ICAN) technology in low-altitude intelligent network were focused on, their key technologies and integration ideas, as well as their applications and future research directions in low-altitude economy were analyzed. Firstly, 5G-A/6G ISAC and Beidou ICAN technologies were introduced, and the integration of communication, sensing, and navigation technologies based on communication base stations were discussed. Secondly, the application scenarios of communication, sensing, navigation positioning, and timing technologies in low-altitude economy were studied. Finally, the future research directions of communication, sensing, and navigation technologies for low-altitude economic were discussed.

Key words: low-altitude economy, Beidou, ISAC, ICAN, communication-sensing-navigation integration, low-altitude intelligent network

0 引言

低空经济是以各类低空飞行器为载体,以低空飞行活动为牵引,以无人驾驶飞行、低空智能网等技术组成的新质生产力与空域、市场等要素相互作用,辐射带动相关领域融合发展的综合性经济形态^[1]。低空经济受到中央和地方政府的高度重视,2023年12月,低空经济被列为战略性新兴产业,2024年3月,低空经济首次被写入《政府工作报告》。据统计,全国已有20多个省(市)制定了促进低空经济发展的相应政策。在国家政策的大力支持下,随着低空空域管理的逐步开放和无人机技术的不断突破,低空经济迎来了重大发展机遇。无人机已被广泛应用于空中物流^[2-3]、农林植保^[4-5]、低空遥感^[6]、路线巡检^[7]、应急救援^[8-9]等低空经济领域,例如,在物流配送中,无人机可以实现“最后一公里”的高效配送;在农业领域,低空无人机可精准喷洒农药并实时监测农作物生长状态。

在低空经济活动中,无人机以高密度和高频次的方式飞行,同时还要应对复杂多变的空域环境。由于当前通信覆盖不足、感知精度有限及监管技术不全等,低空经济面临着“叫不到、看不见、管不住”的挑战。由于低空空域覆盖范围广,传统通信网络在部分低空空域存在信号盲

区,加上地面电磁环境复杂和信号干扰,现有的通信基础设施难以满足低空活动需求。部分无人机体积较小、飞行高度低,导致其雷达反射面积小,再加上低空探测信号易受建筑物及地形影响,这些无人机难以被传统的雷达或监控设备所发现。此外,目前针对无人机的管理手段还不够完善,部分无人机存在违规操作、非法飞行等问题,公共安全风险隐患日益增大。如何保障低空飞行通信稳定,提升对无人机的感知精度及导航定位精度,成为当前研究的重要课题。5G-A(5G-Advanced)/6G和北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system, BDS)的发展为保障低空飞行安全提供了新的解决方案。

5G-A/6G 通感一体(integrated sensing and communication, ISAC)技术将通信与感知功能融合,实现了对无人机的实时监测与智能管控。BDS 通导一体化(integrated communication and navigation, ICAN)技术以定位、短报文和授时为核心技术,为低空活动的精准定位导航、应急通信和时间同步提供了有力支持。近年来,大多数研究聚焦于ISAC^[10-13]和ICAN^[14-17]技术在无人机领域的应用,也有学者开始研究通信、感知和导航(通感导)3种技术的一体化融合。王莉等^[18]针对应急场景,提出了通感一体化的应急无人机网络低能耗部署方案,实现了通感多目

标需求与应急网络资源的灵活弹性适配；王腾飞等^[19]提出了基于积木单元思想的导航通信探测信号设计方法及性能度量准则；肖克等^[20]提出了通感导算一体化地下无人集群体系构建，研究融合地下战场环境中通感导自适应调整方法。然而，当前的这些通感导一体化研究并未针对低空经济应用场景。此外，ISAC 与 ICAN 技术在低空经济中的应用还缺乏系统的归纳，有必要对低空经济领域的 ISAC 和 ICAN 技术进行系统性的讨论和剖析。因此，本文对 5G-A/6G 通感一体技术和北斗通导一体化技术进行梳理，讨论其关键技术，探索面向低空经济的 5G-A/6G+北斗通感导一体化融合方案及其在低空经济领域的应用场景，为未来通感导一体化技术在低空经济中的研究和应用提供参考。

1 5G-A/6G 通感一体技术

1.1 5G-A/6G 通感一体技术概述

5G-A/6G 是在 5G 基础上的演进与增强，在通信速率、时延、连接数密度等方面都有显著提升。同时，5G-A/6G 还引入了 ISAC 技术，以适应低空经济和车联网等新兴应用场景的需求。ISAC 不仅能为低空活动提供稳定的通信支持，还具备类似雷达的感知能力，可实现对低空无人机的实时监测与跟踪。ISAC 早期也被称为雷达通信一体，其核心理念源于雷达与通信的频谱共享，希望通过一体化的设计，同时实现雷达和通信功能。雷达和通信系统经历了独立和并行发展后，二者之间的界限变得模糊，其信道特性和信号处理方法趋于相似^[21]。此外，感知功能不局限于雷达，无线通信设施也可以通过无线电信号实现环境感知，这为 ISAC 技术的发展奠定了重要基础^[22]。学者们开展了一系列关于 ISAC 的研究，包括感知网络框架^[21]、收发器架构和帧结构^[23-24]、信道状态参数^[25]、联合波束方案^[26]、一体化波形设计^[27]、性能极限^[28]、通感算一体化融

合^[29-30]及与无人机技术的集成^[31]等。5G-A/6G 通过引入大规模多进多出（multiple-input multiple-output, MIMO）和毫米波等技术，在时间和角度域上都具有高分辨率，这为基于通信基站的 ISAC 发展开辟了可能性^[28]。低空经济的快速发展，使得 ISAC 基站成为提供无人机通信和监测服务的基础设施，这为 ISAC 技术落地提供了应用场景。5G-A/6G 通感一体技术通过共享硬件、频谱资源、信号处理及融合数据流程，在同一系统上实现通信和感知功能，提升资源利用率，降低系统成本，实现了通信和感知的协同增益^[21]。第三代合作伙伴计划（3rd Generation Partnership Project, 3GPP）也在 R19 中立项研究与 ISAC 相关技术^[32]。

1.2 5G-A/6G 感知过程

5G-A/6G 感知技术基于电磁波反射原理，通过通感基站发出无线感知信号，接收并分析反射的回波信号，计算感知目标的距离、速度和角度等状态参数，实现对目标的精准感知。基站感知无人机示意图如图 1 所示。

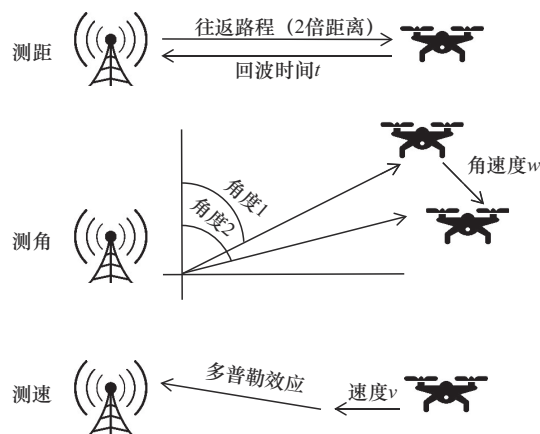


图 1 基站感知无人机示意图

感知无人机的具体过程如下。

(1) 通感基站发射无线感知信号，当无人机等低空飞行器进入基站的感知范围内时，无人机反射感知信号，反射的感知信号以回波的形式被



基站接收，基站检测到无人机。

(2) 通感基站对回波信号进行分析，利用回波的时延来计算与无人机的距离，基于波束扫描或多天线的相位差区分与无人机的角度，基于多普勒频偏识别无人机的速度。

(3) 基于测量的距离、角度及速度等参数，对无人机进行定位和追踪，完成对无人机的目标检测、跟踪和识别等感知任务。

1.3 5G-A/6G 感知模式

5G-A/6G 感知模式分为单站工作模式和多站协同感知模式。单站工作模式比较简单，不需要基站间时间同步，但是感知精度较低。多站协同感知模式利用多个基站参与感知信号的收发，并将各路单独的感知测量结果融合成最终感知结果^[33]。3GPP 中定义了 6 种感知信号的收发方式，在低空经济中主要采用自发自收和 A 发 B 收 2 种收发方式。基站感知无人机收发方式如图 2 所示。在自发自收方式中，基站自己发送感知信号，经感知目标反射（折射）后，再接收回波信号，如图 2 (a) 所示。在 A 发 B 收方式中，基站 A 发射感知信号，经感知目标反射（折射）后返回的回波信号由接收基站 B 接收，基站间需要高精度时间同步，如图 2 (b) 所示。此外，也可以将这 2 种方式进行混合^[34]，基站可以接收自己发的感知信号的回波信号，也可以接收其他基站发的感知信号的回波信号，如图 2 (c) 所示。

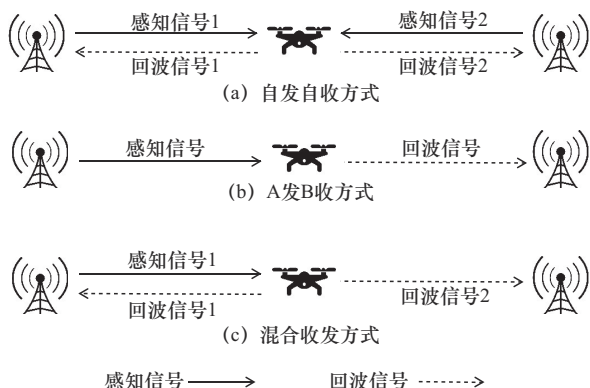


图2 基站感知无人机收发方式

1.4 ISAC 验证及应用

国内电信运营商已开展了 ISAC 技术的研究测试与应用。目前，ISAC 的频段主要聚焦于 3.5 GHz、4.9 GHz 及毫米波，中国移动侧重用 4.9 GHz 频段，中国联通与中国电信侧重用毫米波频段开展相关测试与应用。相较于 4.9 GHz，毫米波带宽大、多普勒分辨力好、测速精度较高，但其波长较短、衰减相对较大，导致感知距离受限，基站部署的密度较大。根据当前的 ISAC 验证情况，针对低空无人机场景的感知距离大约为 1 km，感知精度可达米级至亚米级。

1.4.1 ISAC 验证

中国联通在怀柔实施的测试中，采用 26 GHz 毫米波通感基站成功检测到无人机的最大距离超过 1 200 m，感知精度达到分米级，定位误差的中位数为 0.62 m^[35]。在低空场景下，毫米波通感技术对复杂图形具备识别能力，多基站组网可规避单站的站顶识别盲区；在内河航运场景下，毫米波基站可精准感知到船舶的轨迹和航速，船只感知距离可达到 1 km 以上^[36]。

中国移动基于 4.9 GHz+64TR 通感基站进行了系列测试，结果显示，在 200 m、1 000 m 及 1 300 m 距离下，位置感知精度分别达到 4.93 m、11.29 m 和 13 m；多站协同感知可以提升感知精度，但开启感知功能会导致通信流量减少 16%~18.9%^[37]。相较于 64TR 设备，128TR 设备在垂直感知能力由小于 500 m 提升至大于 600 m 时，感知距离也从不足 1 000 m 扩展到接近 1 500 m，探测角度由 40° 扩大至 60°；在复杂海域环境中对船只的检测成功率为 95%，位置精度达到 5.35 m^[38]。

1.4.2 ISAC 应用

中国联通的 ISAC 在多个应用场景中实现了突破，涵盖低空安防、交通监管及工业监测等领域。例如，在嘉兴变电站，中国联通将 ISAC 技术应用于电力行业无人机入侵检测；在南京无人机试验区，构建了集轨迹跟踪、电子围栏等功能

于一体的低空安防体系；在广州和深圳，实现了车船与无人机的立体感知与载人航空器的轨迹监控；在鄂尔多斯智慧矿山项目中，成功实施了边坡形变监测。2025 年哈尔滨第九届亚洲冬季运动会期间，中国联通首次采用毫米波通感基站进行连片交叉布网，实现了 1 km 范围内无人机的米级精准定位。

中国移动的 ISAC 应用领域包括机场安防、低空物流、智慧医疗及生态保护等。在保山云瑞机场，结合 AI 技术实现了无人机轨迹预警；在杭州奥体中心及周边区域，通过连续部署基站确保了低空无人机的安全飞行；在舟山至上海的百千米跨海航线上，支撑了无人机海鲜运输网络的建设；在河北基于 5G-A 开展无人机医疗物资运输，并依托通感基站对白洋淀生态环境进行了有效监测。

中国电信也在嘉兴、南京、深圳等地完成了 ISAC 技术对无人机轨迹跟踪、多场景测试及海域船舶态势的分析。例如，在汕头打造了海上风电场的电子围栏，实时监测船舶动态；在南京滨江区域，通过毫米波感知技术精准追踪低空飞行器。

2 5G+北斗通导一体化技术

ICAN 即通信和导航系统通过信号、信息、平台、网络等多层次的一体化设计，实现通信导航业务能力的协同与增强，使同一套系统实现通信和导航两方面功能^[39-41]。北斗和 5G 在各自的系统中都实现了通信和定位（导航）的双功能，都属于独立的 ICAN 系统。北斗 ICAN 技术以高精度定位和短报文通信为核心技术；5G 除了自身强大的通信功能外，其定位精度也可以达到亚米级。5G+北斗通导融合，可以实现通信和导航能力的相互增强。

2.1 北斗技术

北斗卫星导航系统是我国自主建设、独立运行的卫星导航系统。北斗系统从 1994 年开始研制，至 2000 年年底建成北斗一号，2020 年北斗

三号系统全球组网成功，面向全球用户提供全天候、高精度的定位导航、授时和短报文服务。经过多年发展，北斗系统已成为我国重要的新型基础设施，广泛应用于交通、能源及通信等行业。北斗全球定位精度优于 9 m，垂直定位精度优于 10 m，测速精度优于 0.2 m/s，授时精度优于 20 ns^[42]。北斗卫星导航系统服务参数见表 1。

表 1 北斗卫星导航系统服务参数

服务名称		性能指标
定位	SPP	水平 9 m、高程 10 m
	PPP	水平 30 cm、高程 60 cm
	RTK	厘米级
授时		20 ns
短报文	全球短报文	560 bit
	区域短报文	14 000 bit

2.1.1 北斗定位

北斗定位技术主要通过多颗卫星的伪距或载波相位观测值来实现，用户接收机通过接收来自多颗卫星的信号，利用三角定位原理计算出自身位置。北斗卫星信号经过长距离传输到达地面后强度较弱，加上卫星信号在传播过程中产生的误差和终端的误差，北斗的单点定位（single point positioning, SPP）精度约 10 m。为了消除误差，提升定位精度，通过实时动态（real-time kinematic, RTK）载波相位差分定位技术，定位精度可以达到厘米级，但 RTK 技术依赖于地面连续运行参考站系统（continuous operational reference system, CORS）。随着无人机和 CORS 站距离的增大，RTK 定位的精度也逐渐降低。精密单点定位（precise point positioning, PPP）技术无须依赖 CORS 站即可进行高精度定位，但卫星信号观测需要较长收敛时间。PPP-RTK 技术将 PPP 和 RTK 2 种定位技术结合，不仅保持了 RTK 的实时性和高精度，还克服了 RTK 依赖 CORS 站的局限和 PPP 收敛时间过长的缺点，能够在更广泛的区域内提供快速、高精度的定位服务。



2.1.2 北斗短报文

北斗短报文服务是北斗系统区别于其他全球卫星导航系统的特色服务，北斗三号经过通信体制升级，短报文服务能力得到了提升，单次短报文通信最大长度达到14 000 bit，约1 000个汉字，既能传输文字，也可传输语音和图片^[38]。北斗短报文有卫星通信覆盖广的优势，比传统的卫星通信成本低，通信抗干扰能力强。北斗短报文采用S/L波段进行卫星传输，这些频段能够穿透平流层和对流层，因此在极端天气条件下仍能保持通信的稳定性。北斗短报文与移动通信融合，可有效补充地面通信网络覆盖范围的短板，构建星地一体化通信服务，以满足在无移动网络覆盖地区的应急通信和数据传输需求^[43]。目前，北斗短报文已与地面移动通信网络打通，应用于大众消费领域。

2.1.3 北斗授时

北斗授时是北斗卫星通过高精度时间信号源为用户提供统一的时间基准。其原理是基于卫星上搭载的高精度原子钟，将时间信号嵌入导航电文，通过电波传递到地面用户终端，用户接收多个卫星的信号后进行解码和计算，修正本地时间，实现高精度授时。北斗授时精度优于20 ns，通过基于载波相位的差分高精度时间传递技术，可实现实时百皮秒级时频同步精度^[44]。在现代网络通信中，时间同步为通信系统内所有设备提供同步控制信号，使电信设备工作在共同的时间基准上，从而保证数据传输的准确性和可靠性。采用全球定位系统（global positioning system, GPS）授时存在受制于人的安全隐患。随着北斗授时技术的快速发展，北斗授时产品逐步替代GPS授时。此外，仅依靠卫星授时存在一定脆弱性，基于地面光纤链路授时，可以构建天地互备的授时体系，保障通信网时间同步安全^[45]。

2.2 5G定位技术

移动通信设计的初衷是提供通信服务，并未考虑定位功能。在2G网络中开始引入定位技术，

早期的通信网络基于基站位置进行粗定位，定位精度较低。随着移动通信定位技术的演进，5G定位精度较之前有了很大提升，达到亚米级，3GPP在R17中对5G定位的目标精度要求为：针对工业物联网应用场景，水平定位精度优于0.2 m，垂直定位精度优于1 m^[46]。5G定位技术分为共频带定位技术与带内定位技术，共频带定位技术是以低功率在通信信号工作的频段上播发定位信号的定位技术；带内定位技术是在通信网帧结构的框架下，使用通信子载波播发定位参考信号的定位技术。

共频带定位技术在通信信号背景噪声中嵌入定位信号，可以实现定位信号的连续捕获和跟踪^[40]。共频带定位技术具有测距精度高和信号功率小的优点，理论精度高达毫米级^[47]。3GPP中定义了6种带内定位技术，包括下行到达时间差、上行到达时间差、上行到达角、下行到达角、多站往返时间和增强小区法^[48]。带内定位技术的缺点之一是无法连续播发，终端无法对其进行信号跟踪，导致测距精度受限^[40]。5G定位方法中的到达时间差法，需要基站间严格的时间同步。当前室外基站间高精度时间同步成本较高，因此，5G高精度定位技术大多应用于室内或园区内。

2.3 5G+北斗通导融合

5G+北斗通导融合是指5G和北斗通过一体化信号设计、硬件集成或信息融合，实现通信和导航业务能力的协同与增强，相互提升对方的通信和导航能力。5G具有高速率和大连接等通信特性，且定位精度能达到亚米级，信号穿透性较强，在室内定位具有优势；北斗RTK定位精度可达到厘米级，北斗短报文通信具有覆盖范围广和全天候的优势。北斗定位能力强，但在信号遮挡区域存在短板；5G通信能力很强，但信号覆盖范围有限，这为5G+北斗通导融合提供了融合的基础。5G+北斗通导融合可以实现5G通信和北斗导航的相互增强，构建室内外无缝定位、星地一体化通信服务和天地互备的授时体系，详细如下。

(1) 5G通信对北斗导航的增强: 5G定位可以补齐北斗在信号遮挡区域的定位短板。基于5G网络的辅助, 北斗定位技术缩短了定位收敛时间^[49]。基于5G基站建设北斗CORS站, 可以降低CORS站的建设和运维成本, 且5G网络为北斗RTK定位的差分信息播发提供了稳定的网络传输。此外, 基于5G的光纤授时增强了北斗授时的可靠性。

(2) 北斗导航对5G通信的增强: 在5G基站中引入北斗RTK定位, 可提升基站的工作参数(包括经纬度、高程、方位角及倾角等)精度, 有助于精细化网络运营管理和优化网络覆盖, 也可以提升5G定位精度。北斗授时为5G网络提供高精度时间同步, 保障了通信系统安全, 并提升了5G系统的定位和感知精度。北斗短报文通信弥补了5G在无地面信号覆盖区域的通信能力。

3 通感导一体化技术

ISAC和ICAN技术在低空经济中发挥着重要作用, 为低空活动提供了通信、感知和导航定位等基础保障服务, 确保低空飞行安全。通信、感知和导航3种技术的系统架构存在一定的相似性, 将通感导功能融合在同一系统中, 不仅可以增强不同业务性能, 还能够提高无线频谱、硬件设备等资源利用率, 这为通感导一体化融合提供了基础。在低空经济中, 通信网、感知网及导航网是重要的基础设施, 基于5G-A通信基站构建“通感导一张网”, 还可以节省低空经济基础设施建设和运维成本。因此, 探索面向低空经济的通感导一体化技术具有重要意义。目前, 基于通信基站的通感导一体化融合思路为: 在5G-A定位基站上新增感知功能, 或在5G-A通感基站上新增北斗定位功能, 实现基于通信基站的通感导一体化。

(1) 在5G-A定位基站上新增感知功能。这种方式又可分为基于共频带融合和带内融合2种方

式。前者与基于5G共频带定位技术的原理类似, 通过一体化波形设计, 在共频带信号中新增感知信号, 即通信背景噪声信号中包含定位信号和感知信号, 实现基于5G共频带的通感导一体化。后者在5G通信信号中新增感知信号, 即带内信号中包含定位信号和感知信号, 该方式在通信频段上增加的非通信功能较多, 会影响通信性能。此外, 由于5G-A感知功能也可以实现定位, 在融合的时候去掉专用的定位信号, 使用感知技术的定位功能来替代5G定位。不过, 感知技术的定位精度较低, 不能满足高精度定位场景的要求。

(2) 在5G-A通感基站上新增北斗定位功能。在上面的融合方式中, 依靠5G定位, 定位能力偏弱。为了提升通感基站的导航定位能力, 可以在通感基站上融合北斗导航定位能力, 实现通感导一体化。其思路是在5G-A通感基站的基础上, 复用通感基站的北斗授时模块, 对北斗授时模块进行改造, 使得授时模块能返回北斗卫星测量信息, 从而将通感基站改造成北斗CORS站, 实现北斗RTK高精度定位与5G通感技术的深度融合。基于通信基站的通感导一体化示意图如图3所示。此外, 在该融合方式中, 北斗RTK定位结果可以用来修正感知功能的定位结果, 从而提升其他感知参数的精度, 实现通感导的深度融合。

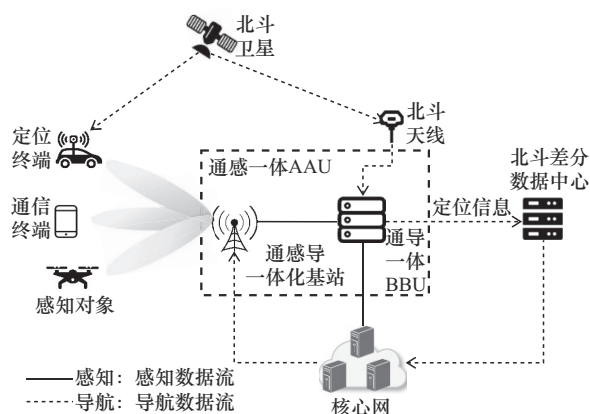


图3 基于通信基站的通感导一体化示意图

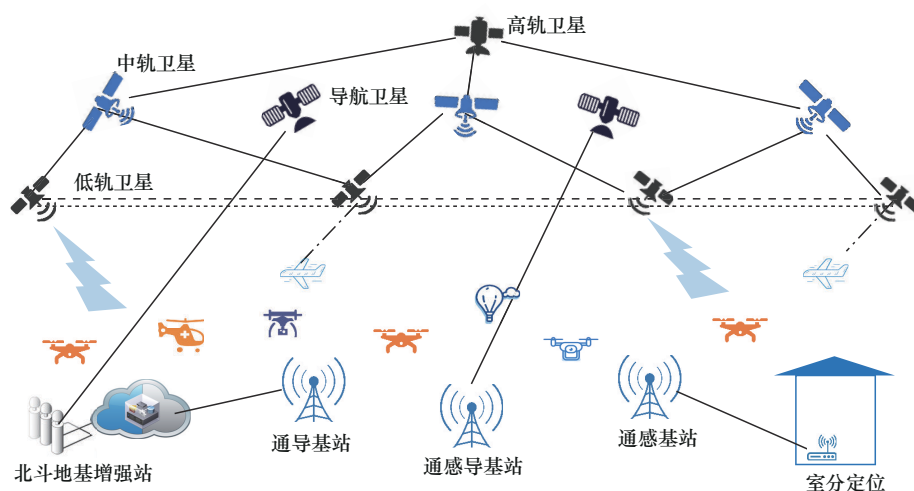


图4 空地一体化通感导融合示意图

未来,随着低空活动范围的扩展及卫星互联网技术的发展,低轨卫星不但可以用于通信,也可以增强导航定位,地面的6G通感导一体化基站可以提供通信、感知、算力、导航定位及授时等服务。6G网络、低轨卫星和新一代北斗卫星导航系统深度融合,构建新一代低空智能网,提供空地一体化通信、全域高精度感知、泛在高精度导航定位及天地互备的授时体系服务,赋能低空经济高质量发展。空地一体化通感导融合示意图如图4所示。

4 通感导技术在低空经济中的应用

4.1 通信技术在低空经济中的应用

通信是低空经济活动的基础保障。为实现对低空活动中无人机的有效管理,无人机需要能随时随地与地面保持低时延的双向通信,以保证无人机能被“叫得到”和“管得住”。在传统的短距离低空飞行中,无人机依靠Wi-Fi、蓝牙等技术实现与遥控器之间的通信连接,随着低空活动飞行距离增大,传统的通信方式无法满足低空长距离飞行通信需求。5G-A/6G通信通过大范围组网,实现通信的连续性和毫秒级响应,保障无人机的实时控制需求。5G-A/6G采用动态波束成形和空域切片技术,能够有效缓解高速移动引发的

链路波动问题,提升通信的稳定性。此外,5G-A/6G地面移动通信融合北斗短报文服务,为无人机提供空地一体化通信服务,可以提升低空经济通信的覆盖范围和可靠性。5G-A/6G+北斗短报文无人机通信示意图如图5所示。

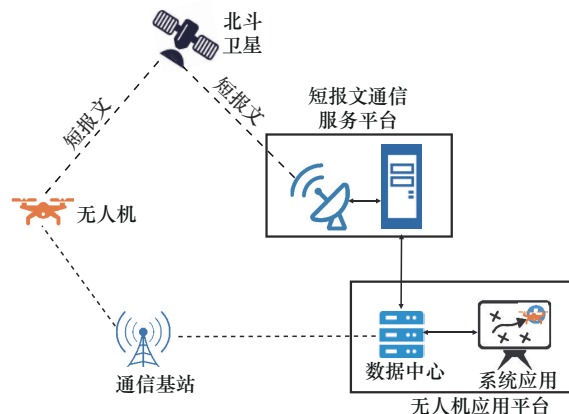


图5 5G-A/6G+北斗短报文无人机通信示意图

通信在低空经济中主要有两个方面的应用:一是无人机的指挥控制通信,二是无人机的数据传输通信。指挥控制通信对时延有严格要求,需要即时上报飞行状态和下达飞行指令。5G-A/6G能够支持低空连续大面积覆盖,提供高可靠性和低时延的通信链路^[50]。通过5G-A/6G网络,地面控制人员发送操控指令,实现对无人机的远程实时操控、智能调度、飞行计划和路线规划等。低

空经济数据传输通信需要上行大带宽能力和低时延传输, 以实现无人机采集的大量数据(如图像、视频及传感器数据等)的实时传输和分析, 为智能识别和目标跟踪等应用场景提供数据支持和决策依据。在缺少地面网络信号的区域, 北斗短报文作为无人机的备份通信链路, 能够发挥卫星通信覆盖广和全天候优势, 满足低空活动对通信覆盖范围的要求。

4.2 感知技术在低空经济中的应用

随着低空活动的发展, 关于无人机黑飞或安全事故的报道屡有发生, 严重威胁着公共安全, 确保低空飞行活动安全已成为一项亟待解决的重要课题。传统的雷达探测技术存在不能连续组网、难以形成连续覆盖、对低慢小飞行器探测效果不好及成本较高等问题。5G-A/6G 感知技术采用 MIMO 天线阵列和智能波束成形技术, 能够通过回波信号的分析, 感知目标物的距离、速度和角度, 为低空活动提供精确、实时的感知能力。在低空经济中, 针对无人机的感知业务场景主要包括: 非法入侵探测、航线保护、路径规划和跟踪导航等^[50]。

(1) 无人机非法入侵探测: 在监管部门划定的禁飞区或限制区, 通感基站对飞入的无人机进行感知探测, 监测黑飞和乱飞, 并及时上报。

(2) 无人机航线保护: 在固定的飞行航线中, 需要保障该航线内的飞行秩序和飞行畅通。通感基站对航线内合法无人机进行实时监测、跟踪和预警避障; 对非法无人机进行入侵检测上报, 确保航线内无人机有序飞行。

(3) 路径规划和跟踪导航: 对无特定航线的飞行任务, 基站需要实时感知无人机位置, 规划导航路线, 并追踪无人机航迹, 确保无人机按照规划路线安全飞行。

4.3 导航技术在低空经济中的应用

在低空飞行活动中, 无人机对定位精度要求较高, 飞行阶段的定位精度一般要求为米至亚米

级, 起降阶段为亚米至厘米级。导航技术为无人机提供高精度定位和导航服务, 避免定位偏差引发飞行的安全问题。导航技术在低空飞行中的应用主要有以下 3 点。

(1) 精准定位: 高精度、高可靠性的定位服务, 让无人机能够准确判断自身位置, 避免与障碍物发生碰撞, 确保无人机群安全协同运行, 减少相互碰撞, 也能提升无人机的作业效率, 防止重复作业或遗漏任务。

(2) 飞行导航: 导航技术可以实时更新无人机的位置信息, 实现航线规划和飞行管理, 确保无人机在飞行过程中始终保持预定的航向和速度。此外, 空中交通管理部门可以实时监控无人机的位置和状态, 有效避免空中交通拥堵和飞行冲突。

(3) 追踪监管: 利用导航定位技术可实时追踪无人机的位置、状态和轨迹, 方便监管端实时掌控无人机的航迹。导航定位技术与电子围栏结合, 可以识别无人机是否偏离航线或进入禁飞区等。

此外, 5G-A 定位和感知技术是通过精确计算基站的绝对位置与探测目标之间的相对位置来确定无人机的位置的。在基站内引入北斗 RTK 定位, 可以提升基站工作参数的精度, 从而提升基站的定位和感知精度。

4.4 北斗授时在低空经济中的应用

在低空活动中, 整个系统需要基于统一的时间基准实现功能协同运作。北斗高精度授时, 在低空经济中主要有两方面应用: 一是提升基站时间同步精度, 二是提升无人机时间同步精度。北斗授时及时间同步在低空经济中的应用如图 6 所示。基站可以基于北斗卫星授时, 也可以基于地面光纤链路进行时间同步; 无人机等低空飞行器可以使用北斗授时, 也可以使用通信基站授时。

(1) 基站时间同步: 北斗高精度授时保障通信网络安全、提升定位精度和感知精度。相对

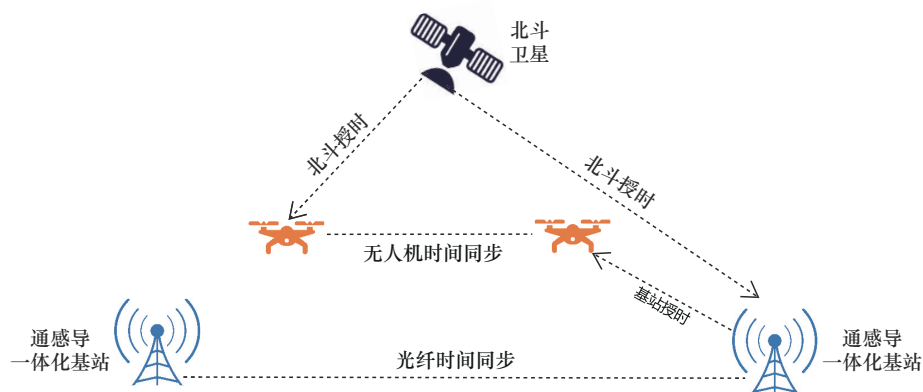


图6 北斗授时及时间同步在低空经济中的应用

GPS授时，北斗授时更加可靠和安全，可以提升低空经济通信网的时间同步安全性和网络安全性。5G时间到达差定位技术，需要基站间严格的时间同步，高精度时间同步可以提升定位精度。在多基站协同感知中，信号的发送和接收由不同基站来进行，提升基站间时间同步精度，可以提升感知精度。

(2) 无人机时间同步：北斗高精度授时可以提升无人机系统的时间同步精度，为无人机协同作业及数据融合提供统一的时间基准。无人机群在执行编队飞行或协同作业任务时，需要各无人机之间精确的时间同步来协调各自的动作和任务进度。此外，无人机上搭载的多个用于采集数据的传感器，需要精确的时间戳来同步数据，以便进行数据融合和分析。

5 未来展望

ISAC和ICAN为低空活动提供了基础保障服务。ISAC和ICAN技术的融合，可以构建以通信基站为核心的低空智联网，为低空经济提供通感一体化服务。现阶段，ISAC和ICAN技术虽然已在部分地区进行了试点应用，但在低空经济中大规模应用还面临诸多挑战。本节旨在展望未来ISAC和ICAN技术的研究方向，为后续研究提供思路和启发。

5.1 感知性能提升

(1) 资源优化分配

由于ISAC是通信和感知共享相同的频段和硬件资源，在资源竞争中此消彼长，如何实现二者平衡是ISAC技术的重要命题^[51]。研究根据通信和感知的优先级进行资源管理，使通信和感知信号可以在时间、频率、空间及功率域上进行分配和调度，避免通感信号出现碰撞和干扰^[52]。此外，研究通感任务共享同一时域、频域或空间域的资源，可以最大化提升通感性能，实现通信和感知的增益^[53]。

(2) 感知精度提升

非预期的信号或噪声会对目标信号造成干扰，导致通信传输错误和感知误差^[38]。干扰也会使目标回波的信干比下降，导致检测精度下降^[37]。在多基站协同感知时，基站间的时间同步误差也会导致感知误差。因此，需要研究干扰抑制和基站间高精度时间同步技术来提升感知精度。

5.2 导航定位提升

(1) 5G定位

虽然3GPP设定的5G定位精度可以达到亚米级，但因为时间同步、非视距、多路径和终端设备等问题^[54-55]，5G定位还未能大规模部署使用。未来，可在5G-A/6G定位中引入载波相位定位和直通链路(sidelink)定位理念，结合人工智能、

机器学习等技术, 并与 ISAC 的感知观测信息进行融合^[56-57], 进一步提升 5G-A/6G 定位能力。

(2) 北斗定位

当前北斗 RTK 定位基于用户面播发北斗差分信息, 其通信链路较长, 系统资源消耗较多, 不适用于未来大规模无人机群定位。在未来研究基于 5G-A/6G 控制面广播差分信息, 可以提升数据播发效率, 应对海量低空飞行器定位导航场景。此外, 在低空环境下, 网络通信波动会引起北斗网络 RTK 导航定位性能衰减, 研究北斗网络 RTK 与 B2b-PPP 技术融合, 能够在断网环境下维持较高定位精度^[58]。

5.3 无人机群协同

(1) 无人机协同通信

3GPP 中定义了直接设备对设备 (device-to-device, D2D) 的通信方式, 以支持在移动网络不可用时, 2 个或多个设备之间直接通信。该方式可以应用于无人机之间的通信, 避免无人机碰撞和冲突^[59], 使得无人机能够协同工作, 为无人机群建立“互帮互助”的关系^[60]。

(2) 无人机协同定位与感知

在卫星定位拒止环境中, 运用直通链路定位技术进行无人机间的相对量测, 来实现无人机间协同定位、提升定位精度和可靠性^[61-62], 使无人机群更精确地保持队形。融合本地观测与共享观测, 多无人机之间共享观测信息, 实现对周围环境的全面感知。在未来, 大规模无人机群的应用会越来越多, 需要研究应对基于多无人机的协同定位和感知技术。

5.4 低空飞行安全

(1) 可信接入认证

对无人机精准的接入识别及管控是推动通信网络赋能低空经济的重要环节。在无人机接入中引入网联方式, 并基于无人机网联实现对无人机接入的准确识别。3GPP 在 R18 中新增对无人机的识别、认证和授权研究, 并支持基于订阅的无

人机身份识别, 可确保只有符合 3GPP 标准的无人机才能由 5G-A 网络提供服务^[63]。未来, 需要进一步研究基于网络的无人机身份识别和鉴权授权技术。

(2) 反攻击和干扰

对单个无人机的攻击主要包括拒绝服务和欺骗攻击, 攻击者利用网络攻击对无人机系统的信息传输进行干扰攻击^[64], 或通过拦截、篡改或伪造无人机与地面控制站之间的通信数据, 实现对无人机的控制或干扰。此外, 攻击者伪造或干扰北斗卫星信号, 导致无人机无法准确定位, 或系统时间错乱, 还会影响飞行安全。因此, 针对反网络攻击和反信号干扰的相关安全研究至关重要。

5.5 通感导一体化

(1) 信号处理与频谱资源

通信、感知和导航信号易产生频谱资源竞争和跨系统干扰, 例如, 通信与感知信号叠加可能降低通信效率, 需设计更高效的抗干扰一体化波形和动态资源分配机制, 使一体化基站既能高效传输信息, 又能精准感知环境和定位目标。

(2) 硬件集成及协同增益

通感导一体化融合增加了系统的设计难度和复杂性。一体化基站需同时兼顾通信、感知和导航任务, 涉及大量的数据融合处理, 导致算力需求激增和硬件改造成本上升。未来, 需要研究面向低空经济的低成本通感导一体化系统, 研究感知和导航观测之间的数据融合和深度协同, 实现通感导一体化系统的整体增益。

6 结束语

5G-A/6G 通感一体和北斗通导一体化技术为无人机提供了可靠的通信连接、全域感知和高精度导航定位服务, 保障低空活动的安全。5G-A/6G 通信为无人机的指挥控制和数据传输提供稳定可靠的通信服务, 而在缺少地面通信信号



的区域，北斗短报文可作为无人机的应急备份通信链路。5G-A/6G感知技术为低空经济提供无人机非法入侵探测、航线保护、路径规划和跟踪导航等感知服务。北斗导航定位技术不仅为无人机提供精准定位、飞行导航和追踪监管服务，还通过提升基站的工作参数精度，进一步提升5G-A/6G的感知精度。北斗高精度授时保障了通信网络安全，通过提升基站的时间同步精度，提高了定位和感知精度，也为无人机协同作业及数据融合提供统一的时间基准。5G-A/6G+北斗在通信、感知和导航领域的深度融合，为低空经济发展构建了“通感导一张网”。在未来，6G和卫星技术的深度融合将推动空天地一体化的通信、感知和导航定位服务，进一步促进低空经济的高效发展。

参考文献：

- [1] 赛迪顾问股份有限公司. 中国低空经济发展研究报告(2024)[R]. 2024.
CCID. Research report on the development of China's low-altitude economy (2024) [R]. 2024.
- [2] YI J, ZHANG H H, WANG F, et al. An operational capacity assessment method for an urban low-altitude unmanned aerial vehicle logistics route network[J]. *Drones*, 2023, 7(9): 582.
- [3] YAN Y G, LI X F, SHEN Z Y, et al. A high-precision risk analysis model of logistics UAV network with multiple constraining factors[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, 41(2): 218-232.
- [4] FAN S Y, TSAI M F, CHOU L H, et al. Application of UVA in soil and water conservation: preparation of planting materials for UVA[C]//*Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Advanced Manufacturing (ICAM)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 163-165.
- [5] 刘金成, 王海明, 何亚琼, 等. 无人机技术在精准林业中的应用与挑战[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(5): 14-24.
LIU J C, WANG H M, HE Y Q, et al. Application and challenges of UAV-based technology in precision forestry[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(5): 14-24.
- [6] ZHANG J G, XU S L, ZHAO Y, et al. Aerial orthoimage generation for UAV remote sensing: Review[J]. *Information Fusion*, 2023, 89: 91-120.
- [7] 张佳庆, 孙韬, 蒋弘瑞, 等. 基于林火风险的高压输电线路无人机巡检路径规划[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2024, 64(5): 911-921.
ZHANG J Q, SUN T, JIANG H R, et al. Path planning for transmission line unmanned aircraft inspection based on forest fire risk[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2024, 64(5): 911-921.
- [8] 李明龙, 杨文婧, 易晓东, 等. 面向灾难搜索救援场景的空地协同无人群体任务规划研究[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(11): 1-9.
LI M L, YANG W J, YI X D, et al. Swarm robot task planning based on air and ground coordination for disaster search and rescue[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(11): 1-9.
- [9] KOZIOŁ A, SOBCZYK A. Usage of unmanned aerial vehicles in medical services: a review[C]//*Proceedings of the 12th Conference on Terotechnology*. Pennsylvania: Materials Research Forum LLC, 2022, 24: 288-293.
- [10] WANG M, CHEN P, CAO Z X, et al. Reinforcement learning-based UAVs resource allocation for integrated sensing and communication (ISAC) system[J]. *Electronics*, 2022, 11(3): 441.
- [11] MU J S, ZHANG R H, CUI Y H, et al. UAV meets integrated sensing and communication: challenges and future directions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2023, 61(5): 62-67.
- [12] ZHAO J W, GAO F F, JIA W M, et al. Integrated sensing and communications for UAV communications with jittering effect[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(4): 758-762.
- [13] ZHOU Y G, LIU X, ZHAI X P, et al. UAV-enabled integrated sensing, computing, and communication for Internet of things: joint resource allocation and trajectory design[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(7): 12717-12727.
- [14] HU H H, ZHOU H F, LI J H, et al. Automatic and intelligent line inspection using UAV based on Beidou navigation system[C]//*Proceedings of the 2019 6th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1004-1008.
- [15] ZUO J K, CHEN J T, LI Z S, et al. Research on maritime rescue UAV based on Beidou CNSS and extended square search algorithm[C]//*Proceedings of the 2020 International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 102-106.

- [16] BO W, WANG D L, ZHAO Y, et al. Rapid positioning method of power line inspection unmanned aerial vehicle assisted by BeiDou ground-based augmentation station[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 1139-1148.
- [17] ZHANG X M, YANG M J, WANG D, et al. A transmission line tower tilt detection method based on BeiDou positioning signals and UAV inspection images[J]. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2024, 17(4): 101192.
- [18] 王莉, 魏青, 徐连明, 等. 面向通信-导航-感知一体化的应急无人机网络低能耗部署研究[J]. *通信学报*, 2022, 43(7): 1-20.
WANG L, WEI Q, XU L M, et al. Research on low-energy-consumption deployment of emergency UAV network for integrated communication-navigating-sensing[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(7): 1-20.
- [19] 王腾飞, 姚铮, 陆明泉. 导航通信探测一体化信号设计探究[J]. *全球定位系统*, 2022, 47(5): 1-8.
WANG T F, YAO Z, LU M Q. Research on integrated signal design for navigation, communication and detection[J]. *GNSS World of China*, 2022, 47(5): 1-8.
- [20] 肖克, 王鹏泽, 薛文军, 等. 通感算一体地下无人集群协同通信技术[C]//2023 第七届全国集群智能与协同控制大会论文集. 南京: 中国指挥与控制学会, 2023: 164-169.
XIAOK, WANG P Z, XUE W J, et al. Cooperative communication technology of underground unmanned cluster with communication-perception-navigation-computing integration[C]//Proceedings of the 7th National Conference on Cluster Intelligence and Collaborative Control 2023. Nanjing: Chinese Society of Command and Control, 2023: 164-169.
- [21] LIU F, CUI Y H, MASOUIROS C, et al. Integrated sensing and communications: toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1728-1767.
- [22] CUI Y H, LIU F, JING X J, et al. Integrating sensing and communications for ubiquitous IoT: applications, trends, and challenges[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(5): 158-167.
- [23] LIU F, MASOUIROS C, PETROPULU A P, et al. Joint radar and communication design: applications, state-of-the-art, and the road ahead[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(6): 3834-3862.
- [24] HUANG T Y, SHLEZINGER N, XU X Y, et al. MAJoRCom: a dual-function radar communication system using index modulation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020(68): 3423-3438.
- [25] KOBAYASHI M, HAMAD H, KRAMER G, et al. Joint state sensing and communication over memoryless multiple access channels[C]//Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). Piscataway: IEEE Press, 2019: 270-274.
- [26] ZHANG J A, HUANG X J, GUO Y J, et al. Multibeam for joint communication and radar sensing using steerable analog antenna arrays[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(1): 671-685.
- [27] YUAN X, FENG Z Y, ZHANG J A, et al. Spatio-temporal power optimization for MIMO joint communication and radio sensing systems with training overhead[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(1): 514-528.
- [28] LIU A, HUANG Z, LI M, et al. A survey on fundamental limits of integrated sensing and communication[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(2): 994-1034.
- [29] 闫实, 彭木根, 王文博. 通信-感知-计算融合: 6G 愿景与关键技术[J]. *北京邮电大学学报*, 2021, 44(4): 1-11.
YAN S, PENG M G, WANG W B. Integration of communication, sensing and computing: the vision and key technologies of 6G[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2021, 44(4): 1-11.
- [30] 段向阳, 杨立, 夏树强, 等. 通感算智一体化技术发展模式[J]. *电信科学*, 2022, 38(3): 37-48.
DUAN X Y, YANG L, XIA S Q, et al. Technology development mode of communication/sensing/computing/intelligence integration[J]. *Telecommunications Science*, 2022, 38(3): 37-48.
- [31] 刘晨熙, 马睿, 彭木根. 无人机通信感知一体化: 架构、技术与展望[J]. *电信科学*, 2023, 39(2): 1-9.
LIU C X, MA R, PENG M G. UAV-enabled integrated sensing and communication: architecture, techniques, and future vision[J]. *Telecommunications Science*, 2023, 39(2): 1-9.
- [32] 3GPP. Study on uncrewed aerial vehicle (UAV) phase3: TR 22.843 v19.0.0[S]. 2023.
- [33] 王瑜新, 马一华, 王钟斌, 等. 多站协同感知技术[J]. *信息通信技术*, 2024, 18(1): 16-24.
WANG Y X, MA Y H, WANG Z B, et al. Multi-station collaborative sensing technology[J]. *Information and Communications Technologies*, 2024, 18(1): 16-24.
- [34] 林祉秋, 张玖鹏, 闫实. 多基站协作通感一体化体系架构及关键技术研究[J]. *移动通信*, 2024, 48(6): 52-60.
LIN Z Q, ZHANG J P, YAN S. Architecture and key technologies for multi-base station cooperative integrated sensing and



- communication[J]. *Mobile Communications*, 2024, 48(6): 52-60.
- [35] 范君, 曾伟, 钟检荣. 通感一体化技术探讨[J]. *邮电设计技术*, 2024(1): 6-9.
- FAN J, ZENG W, ZHONG J R. Discussion on integrated sensing and communication technology[J]. *Designing Techniques of Posts and Telecommunications*, 2024(1): 6-9.
- [36] 王璐璐, 杨艳, 李培, 等. 基于毫米波的5G-A通感一体化技术综述[J]. *邮电设计技术*, 2025(1): 27-32.
- WANG L L, YANG Y, LI P, et al. Review of 5G-A ISAC technology based on millimeter wave[J]. *Designing Techniques of Posts and Telecommunications*, 2025(1): 27-32.
- [37] 瞿水华, 许乐飞, 程世伟, 等. 5G-A通信感知一体化技术对低空无人机检测性能的研究[J]. *电信工程技术与标准化*, 2024, 37(7): 75-80.
- QU S H, XU L F, CHENG S W, et al. Research on performance of low-altitude UAV by the 5G-A integrated sensing and communication[J]. *Telecom Engineering Technics and Standardization*, 2024, 37(7): 75-80.
- [38] 乔勇, 周威, 戴君, 等. 面向智慧海洋场景的5G-A关键技术的研究与应用[J]. *移动通信*, 2024, 48(11): 115-123.
- QIAO Y, ZHOU W, DAI J, et al. Research and application of key 5G-A technologies for smart ocean scenarios[J]. *Mobile Communications*, 2024, 48(11): 115-123.
- [39] 蔚保国, 鲍亚川, 杨梦煊, 等. 通导一体化概念框架与关键技术研究进展[J]. *导航定位与授时*, 2022, 9(2): 1-14.
- YU B G, BAO Y C, YANG M H, et al. Conceptual framework and research progress on communication and navigation integration[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2022, 9(2): 1-14.
- [40] 尹露, 马玉峥, 李国伟, 等. 通信导航一体化技术研究进展[J]. *导航定位与授时*, 2020, 7(4): 64-76.
- YIN L, MA Y Z, LI G W, et al. Research progress of communication-positioning integrated technology[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2020, 7(4): 64-76.
- [41] 邓中亮, 王翰华, 刘京融. 通信导航融合定位技术发展综述[J]. *导航定位与授时*, 2022, 9(2): 15-25.
- DENG Z L, WANG H H, LIU J R. Status and trend of communication-navigation integrated positioning technology[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2022, 9(2): 15-25.
- [42] 中华人民共和国国务院办公厅.《新时代的中国北斗》白皮书[R].2022.
- State Council Information Office of the People's Republic of China. White paper on China's Beidou in the new era [R]. 2022.
- [43] 金耀, 张贺, 王泽林, 等. 北斗短报文发展与应用[J]. *邮电设计技术*, 2024(3): 53-57.
- JIN Y, ZHANG H, WANG Z L, et al. Development and application of Beidou short message[J]. *Designing Techniques of Posts and Telecommunications*, 2024(3): 53-57.
- [44] 施闯, 宋伟, 郑福, 等. 北斗实时百皮秒级单差时频同步方法[J]. *测绘学报*, 2024, 53(5): 869-878.
- SHI C, SONG W, ZHENG F, et al. BDS real-time 100 picosecond level single difference time and frequency synchronization method[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, 53(5): 869-878.
- [45] 金耀, 张贺, 史正思, 等. 北斗在电信领域应用的发展思考[J]. *信息通信技术*, 2023, 17(5): 63-69.
- JIN Y, ZHANG H, SHI Z S, et al. Thoughts on the development of Beidou's application in the telecommunications field[J]. *Information and Communications Technologies*, 2023, 17(5): 63-69.
- [46] 3GPP. Study on NR positioning enhancements: TR38.857 version17.0.0[S]. 2021.
- [47] 邓中亮, 王翰华. “北斗+5G”融合发展机遇[J]. *卫星应用*, 2021(11): 20-24.
- DENG Z L, WANG H H. “Beidou +5G” integration development opportunity[J]. *Satellite Application*, 2021(11): 20-24.
- [48] 3GPP. Stage 2 functional specification of user equipment(UE) positioning in NG-RAN: TS38.350 version 16.3.0 [S]. 2021.
- [49] 金耀, 周又眉, 张贺, 等. 北斗+5G融合定位技术研究及应用进展[J]. *全球定位系统*, 2023, 48(4): 12-18.
- JIN Y, ZHOU Y M, ZHANG H, et al. Research and application progress of Beidou+5G fusion positioning technology[J]. *GNSS World of China*, 2023, 48(4): 12-18.
- [50] 赵川斌, 罗宏亮, 高飞飞. 基站对低空无人机通感算一体化应用组网研究[J]. *移动通信*, 2024, 48(9): 57-63, 70.
- ZHAO C B, LUO H L, GAO F F. Integrated sensing, communication, and computing for low-altitude UAV networks: a base station-centric approach[J]. *Mobile Communications*, 2024, 48(9): 57-63, 70.
- [51] 陈立, 邱健熙. 推动5G-A通感一体技术发展构筑低空经济坚实基础[J]. *新经济导刊*, 2024(7): 36-41.
- CHEN L, QIU J X. Promote the development of 5G-A integrated sensing and communication technology building a solid foundation for low-altitude economy[J]. *New Economy Weekly*, 2024(7): 36-41.
- [52] ZHANG J A, RAHMAN M L, WU K, et al. Enabling joint com-

- munication and radar sensing in mobile networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(1): 306-345.
- [53] AHMED A, ZHANG Y D. Optimized resource allocation for distributed joint radar-communication system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(3): 3872-3885.
- [54] 贾兴华, 刘鹏, 齐望东, 等. 5G 通导融合高精度定位技术进展及仿真验证平台[J]. 电信科学, 2022, 38(8): 75-85.
- JIA X H, LIU P, QI W D, et al. Technical perspective and simulation platform for 5G integrated communication and high precision localization[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(8): 75-85.
- [55] 汪保友, 杨景涛, 姚赛彬, 等. 面向智慧园区的5G室内高精度定位技术研究[J]. 电信科学, 2023, 39(9): 163-173.
- WANG B Y, YANG J T, YAO S B, et al. Research on 5G high-precision indoor positioning technology for smart parks[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(9): 163-173.
- [56] 李健翔, 贾艺楠, 田晓阳, 等. 5G 定位关键技术与标准进展[J]. 电信科学, 2023, 39(11): 137-144.
- LI J X, JIA Y N, TIAN X Y, et al. Key technologies and standards progress for 5G positioning[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(11): 137-144.
- [57] 任斌, 张振宇, 方荣一, 等. 面向5G-Advanced无线系统的高精度定位技术[J]. 电信科学, 2022, 38(3): 65-73.
- REN B, ZHANG Z Y, FANG R Y, et al. High-accuracy positioning for 5G-Advanced wireless systems[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(3): 65-73.
- [58] 黄洪, 高旺, 缪巍巍, 等. 基于BDS-3/GPS的RTK/B2b-PPP融合切换定位技术[J]. 全球定位系统, 2023, 48(4): 57-62.
- HUANG H, GAO W, MIAO W W, et al. RTK/B2b-PPP fusion switching positioning technology based on BDS-3/GPS[J]. GNSS World of China, 2023, 48(4): 57-62.
- [59] 田园, 吴峰, 欧阳俊, 等. 面向低空经济的无人机通信及标准进展分析[J]. 信息通信技术, 2023, 17(5): 38-44.
- TIAN Y, WU F, OUYANG J, et al. Analysis of uncrewed aerial vehicle communication and standard progress for LowAltitude economy[J]. Information and Communications Technologies, 2023, 17(5): 38-44.
- [60] 杨晨, 张少卿, 孟光磊. 多无人机协同任务规划研究[J]. 指挥与控制学报, 2018, 4(3): 234-248.
- YANG C, ZHANG S Q, MENG G L. Multi-UAV cooperative mission planning[J]. Journal of Command and Control, 2018, 4(3): 234-248.
- [61] 刘淑青, 高永新, 韩德强. 采用相对位置量测的紧耦合式多无人机协同定位算法[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(10): 178-187.
- LIU S Q, GAO Y X, HAN D Q. Tightly coupled cooperative localization algorithm for multiple unmanned aerial vehicles based on relative position measurements[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(10): 178-187.
- [62] 朱徐东, 赖际舟, 周本川, 等. 基于构型寻优的多无人机鲁棒自适应协同定位方法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(7): 650-658, 664.
- ZHU X D, LAI J Z, ZHOU B C, et al. Robust adaptive cooperative localization method for multiple UAVs based on configuration optimization[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 31(7): 650-658, 664.
- [63] 3GPP. WI on NR support for UAV: RP-23.782 version 18.0.0 [S]. 2023.
- [64] 陈谋, 马浩翔, 雍可南, 等. 无人机安全飞行控制综述[J]. 机器人, 2023, 45(3): 345-366.
- CHEN M, MA H X, YONG K N, et al. Safety flight control of UAV: a survey[J]. Robot, 2023, 45(3): 345-366.

[作者简介]



金耀 (1986-), 男, 北京邮电大学工程学院博士生, 中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为5G+北斗通导融合、高精度定位技术及低空经济等。



张贺 (1971-), 男, 中国联合网络通信有限公司研究院正高级工程师, 主要研究方向为北斗时间同步及5G光纤传输等。



邓中亮 (1965-), 男, 北京邮电大学工程学院教授, 国际欧亚科学院院士, 主要研究方向为无线网络定位与导航、卫星定位与导航、北斗+5G融合定位等。



唐雄燕（1967-），男，中国联合网络通信有限公司研究院副院长、首席科学家、正高级工程师，主要研究方向为宽带通信、光纤传输、互联网/物联网、新一代网络等。



胡雅静（1979-），女，北京电信规划设计院有限公司高级工程师，主要研究方向为北斗定位、5G无线通信、智慧城市网络等。



王泽林（1983-），男，中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师，主要研究方向为云网融合、算力网络及IP等。



马重阳（1976-），男，中国联合网络通信有限公司高级工程师，主要从事光网络领域WDM/OTN网络运营、维护管理工作。