

5G-A 通感技术在公安低空监管工作中的应用及前景展望

■ 李玉涛 贾春雷

摘要 伴随着低空经济的迅速发展，无人机作业因其能够有效推动生产率的提升，逐渐成为我国发展新质生产力的重要代表。但无人机“黑飞”的日益凸显，严重威胁着公共安全，并给公安低空安全监管工作提出了新的挑战。根据国家总体安全观中推动公共安全治理向事前预防转型的要求，笔者综述反无人机技术与无人机探测技术现阶段发展情况，对 5G-A 通感这一新兴探测感知技术的特点展开研究，讨论其在公安低空监管工作中的应用及未来发展前景，力求为当前低空安全监管中存在的困境与难点提供工作思路与解决路径。

关键词 低空经济 公安低空监管 无人机探测技术 5G-A 通感技术

近年来，我国经济已进入高质量发展阶段，亟待以科技创新推动产业创新，大力发展新质生产力。习近平总书记强调，高质量发展需要新的生产力理论来指导，而新质生产力已经在实践中形成并展示出对高质量发展的强劲推动力、支撑力，需要我们从理论上进行总结、概括，用以指导新的发展实践。低空经济作为新质生产力的代表，已经成为培育发展新动能的重要方向，可以形成至少万亿级别市场，成为经济增长新的重要引擎。

低空经济是指一般在垂直高度 1000 米以下、根据实际需要延伸至不超过 3000 米的低空空域范围内，以民用有人驾驶和无人驾驶航空器为载体，以载人、载货及其他作业等多场景低空飞行活动为牵引，带动相关领域融合发展的综合性经济业态。它具有辐射面广、产业链条长、成长性和带动性强等特点。过去，受限于低空飞行管制，低空经济发展一直是个“伪命题”。但随着政策解绑，低空空域改革与各个省份开放低空飞行市场

作者：李玉涛，安徽省铜陵市公安局特警支队警航中队中队长；

贾春雷，中国人民警察大学警务装备技术学院教授，博士

基金项目：本文系公安部科技计划项目“基于频谱检测技术的黑飞无人机探测定位装备研制”（项目编号：2022ZB02）阶段性研究成果。

让低空空域从“自然资源”转变为“经济资源”，从“可通达空域”转变为“可计算空域”，进而成为“可运用空域”，为低空经济发展奠定了基础。据统计，2024年以来，已有安徽、广东、江苏等17个省（市、自治区）将“低空经济”一词写入政府工作报告。合肥市早在1月就已正式公布了《合肥市低空经济发展行动计划（2023—2025年）》这一大力推动低空经济发展的“合肥20条”。并预计在2025年，基本建成具有国际影响力的“低空之城”。2024年5月在深圳举办的第八届世界无人机大会更是喊出了“低空经济，未来已来”的响亮口号。

在低空经济中，无人机是乘势而起的新引擎。无人机能够切实提高效率，降低成本，提供安全保障，在农业植保、应急救援和物流配送等方面发挥出独特的优势。最新数据显示，2023年，我国民用无人机产业规模超过1200亿元，无人机飞行总小时数达到了2311万小时。国内现有注册登记无人机118万架，其中，中大型无人机就有10万架。但是，伴随着无人机操纵愈发简单、购买愈加便利，民用无人机出现在城市低空航拍炫技，“黑飞”侵扰重要敏感区域、侵犯公民隐私、影响航班运行、失控砸伤危害群众等事件时有发生。2024年来，全国已出现多起无人机“黑飞”重大案事件。3月22日，田某出于网络炫耀、涨粉目的，明知机场设有禁飞区，却仍操纵无人机非法闯入揭阳潮汕机场禁飞区域，对机场及航班起降过程进行航拍，严重影响航班正常起落。后被刑事拘留。4月8日，韶关一企业工人违规使用无人机吊运以及擅自跨越电力线路，造成电力线路跳闸，致使3000户居民家中停电，造成重大损失。

公共安全事关人民群众的生命健康和财

产安全，事关国家和社会的安定有序，既是建设更高水平平安中国的重要方面，也是推进强国建设、民族复兴伟业的必然要求。党的二十大报告提出，完善国家安全法治体系、战略体系、政策体系、风险监测预警体系、国家应急管理体系，坚持安全第一、预防为主，建立大安全大应急框架，完善公共安全体系，推动公共安全治理模式向事前预防转型。无人机的安全有序运行，除了需要不断健全完善低空监管法律法规，更需要监管部门对无人机飞行动态进行有效感知，提前判断并介入干预危险飞行情形，防范于未然。根据《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》具体要求，公安机关作为低空安全监管主体责任部门，如何充分利用并发挥好反无人机技术，守好低空安全底线，服务低空经济大局，已成为重要且紧迫的研究课题。5G-A作为5G向6G演进的重要节点，其通感一体技术能够高精度感知无人机的飞行高度、航行轨迹等关键指标，为低空资源的开放、使用和管理提供关键技术。因此作为新兴无人机感知技术，研究5G-A通感与现有感知技术间的优劣势比较，讨论其在公安低空安全监管工作中的应用与前景具有重要意义。

一、反无人机技术概述

反无人机(counter unmanned aerial vehicles, C-UAV)技术是指能探测无人机并使之失效的手段或措施，主要通过整合或改进现有先进技术，实现对无人机目标的检测、跟踪、识别、干扰、诱骗、控制或摧毁。反无人机需要首先准确地检测、跟踪和识别无人机，并根据实际情况，对无人机进行反制，以达到迫使其降落、返航或损毁的效果。

（一）反无人机技术分类

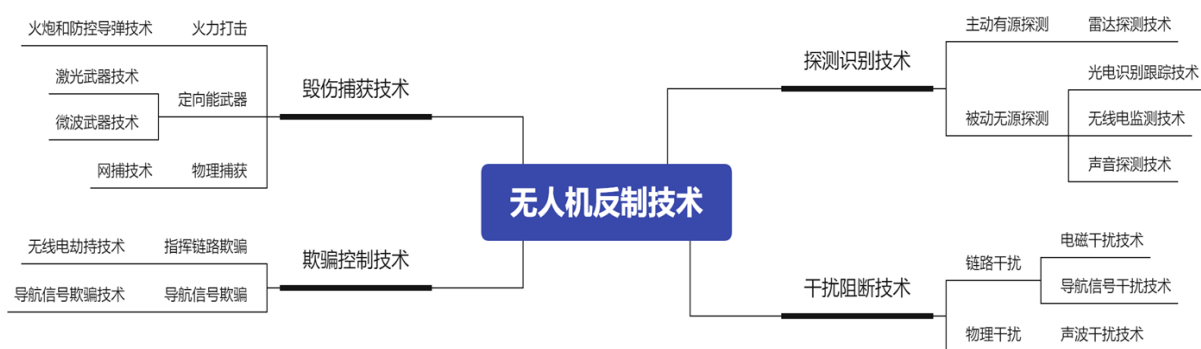


图 1 反无人机技术分类

反无人机技术按照功能大致可以分为四大类：探测识别技术、干扰阻断技术、欺骗控制技术和毁伤捕获技术（见图 1）。

（二）公安低空监管中反无技术的应用思路

不同于军事上发现无人机以打击为主的策略，对于公安低空监管工作性质及具体内容而言，城市及人口稠密地区是无人机管控重点区域。在高楼信号屏蔽遮挡与电磁干扰强杂波环境下，只有正确感知并识别出空中正在飞行的目标，精准定位其飞行方位，才能为下一步反制与打击提供可能性。在重点反恐区域、要人警卫安保、马拉松与演唱会等公安常见低空监管场景中，大范围高功率开启阻断打击设备虽然能够保证无人机无法飞入目标区域，但由于设备本身具有电磁干扰特性，就存在因破坏关键合法重要通信系统导致区域内正常交通、通信以及网络信号不正常运行风险，造成更严重的次生灾害。对于使用毁伤捕获技术进行反制打击，则容易使无人机或其他设备坠落、爆炸，造成不可预估的人身伤害和财产损失，不到万不得已不会使用。因此，公安低空监管工作的主要工作思路是首先探测识别区域内的合作与非合作目标。对于合作目标，通过正常手段进行管理。对于非合作目标，监测跟踪其飞行轨迹与态势，通过干扰阻断或欺骗控制等

技术将其隔绝于核心区域外。对于仍无法进行有效控制的非合作目标，通过技术手段定位飞手及无人机位置，呼叫地面警力查找并定向打击，做到“落地查人”。最后，对即将造成重大危险的无人机采取毁伤捕获等物理打击手段。这充分证明对于公安低空安全监管而言，探测识别技术极为关键。

二、无人机探测技术

无人机探测技术是利用目标无人机物理属性的不同，综合利用各种传感器来发现目标无人机并进行识别的技术。

（一）无人机探测技术的分类及特点

1. 雷达探测技术

雷达探测技术是指雷达系统通过发射电磁波，接收分析反射的雷达波并获得目标位置信息的探测无人机技术手段。雷达对高快大目标有良好的探测效果，具有探测距离远、定位精确、反应速度快、技术成熟度高等优势。对于探测中大型无人机等符合雷达探测分辨率的目标时，利用雷达可取得极佳的效果。但与传统威胁目标的特性不同，无人机作为“低慢小”目标，具有与地物杂波接近、多普勒频移不明显、RCS（雷达截面积）小的特点。因此雷达低空探测虚警高，近程探测存在盲区。且作为有源探测手段，容易受

到电子干扰影响而降低探测性能。

2. 光电识别跟踪技术

光电识别跟踪技术是通过无人机的光学、电子和红外等传感器实时监测分析，实现对目标无人机位置、航迹、速度等参数的测量和跟踪的技术。光电探测可通过红外、可见光、激光波段对无人机等“低慢小”目标自身辐射能量或反射能量进行被动探测，并实现高精度跟踪识别。作为无源探测手段，光电识别跟踪技术具有良好的抗干扰能力，但受气象环境影响较为显著，逆光情况无法有效探测。在城市与人群聚集地区等复杂环境下，目标信号容易淹没在背景信号中，检测和跟踪难度较大。在城市高楼林立视场存在物理遮挡的情况下也难以进行有效探测。

3. 无线电监测技术

无线电监测技术是通过无人机的无线电通信设备和系统进行监视和分析，以获取无人机的位置、航迹、通信内容等相关信息的技术。在无人机飞行的过程中，内部的飞控系统、图传系统均会发出无线电信号。通过对没有做加密处理的操控以及图传信号进行监测，可实现对目标无人机的精准定位。

无线电侦测技术主要探测小型无人机的图传、遥测信号等，受天气环境影响小，侦测效果不受无人机尺寸、形状、速度、材料的限制，具有开机即发现的侦测效率，并能够对典型商用无人机进行型号识别，还可对非法操控者进行定位，且通视要求相对较低。

与雷达探测技术相比，无线电频谱探测设备成本更加低廉，且可以满足大范围的防御需求。但无线电频谱探测技术对于经过加密处理的信号进行破解时，则需要花费大量时间，对采用加密、跳频、特殊频段等遥控技术的无人机目标也很难发挥作用。在遇到采用路径规划飞行即无人机处于自主巡航状

态或保持静默航行而不发射信号的情形时也无法使用。

三、5G-A 通感技术概述

（一）5G-A 技术

5G-A 是 5G-Advanced 的缩写，意为增强 5G。2021 年 4 月，国际标准化组织 3GPP 正式确定 5G-Advanced（5G-A）为 5G 下一阶段演进的官方名称，从 Rel-18 开始标志着全球 5G 发展进入新阶段。5G-A 能够实现下行万兆和上行千兆的峰值速率、毫秒级时延和低成本千亿物联。5G-A 的目标不是取代 5G，而是在热点区域或特定场景对 5G 的补充，负责支持部分有较高要求的应用场景。

与 5G 相比，5G-A 在原有 eMBB（超宽带）、mMTC（大连接）和 uRLLC（低时延高可靠）三个方向上进行增强。同时还新增了全域的通感、泛在智能和空天地一体三个场景。中国人民公安大学低空安全研究中心主任孙永生表示，现有雷达、无线电、光电等无人机探测技术无法承担起目前低空空管系统重任，因此需要既能感知，又能通信的新技术手段来突破原有局限性。不仅要能感知无人机及其他低慢小目标，还要为空中飞行的各种设备提供通信信息，应答、对话等。而由 5G-A 延伸的通感一体技术则会赋予公安低空安全监管新技术加持和工作思路。

（二）通感一体技术

在传统信息处理流程中，通信与感知是相对独立的。但通信系统与感知系统均基于电磁波理论，在工作原理上都是利用电磁波的发射和接收来完成信息的传递和获取，在系统架构和硬件上都具有天线、发送端、接收端、信号处理器等部件。随着技术的不断

断发展，通信和雷达的工作频率和带宽逐渐接近，利用同一套硬件设备或共享部分设备器件来同时实现无线通信和无线感知功能变得可能，从而可以实现通信感知一体化。

通感一体技术是指在同一系统中通过频谱共享、硬件共享、信号共享等方式，在进行信息传递的同时感知目标物体的方位、距离、速度等信息，或者对目标物体、事件或环境等进行检测、跟踪、识别、成像等。相比常规无人机探测技术，5G-A 通感技术具有以下优势：

一是感知识别能力强，定位精度及准确度高。目前市面上的主流消费级无人机在毫米波频段的雷达反射截面积约 0.01~0.02 平方米，容易混在地杂波里。5G-A 感知技术对于此类“低慢小”探测目标具有亚米级定位、探测距离远、感知识别准确率高的优势。根据华为与深圳移动等单位联合进行的 5G-A 通感一体测试，可实现探测面积小到 0.01 平方米的目标感知，达到 99% 的检测准确率，单基站感知距离超过 2km。中国联通在浙江国网完成 5G-A 通感一体无人机试点，实现单站感知范围 >1000 米，速率精度达 0.5 米 / 秒，距离精度达分米级。

二是突破单点部署难题，实现大规模组网应用。传统无人机探测手段中，大规模组网应用是一大难题。雷达探测成本高，对周边通信干扰严重，光电探测需要提供无遮挡的高地，无线电频谱探测则受到城市电磁干扰影响较大，均无法在市区和人员密集场所大规模组网使用。5G-A 通感一体技术在硬件上基于已大规模部署的 5G 基站，利用连续组网、站间协同技术，进行多目标探测、无人机跨站跨区域完整航迹的连续跟踪与上报，完成关键路段上空的防护和预警，可实现同时间、多节点的连片通感区域设计。福

建省厦门市试点并打造“平台+机房+站点+无人机”5G-A 通感一体低空协同组网模式，可满足警务系统 150 米低空以下安防保障、交通管理等应用需求。2024 年厦金海峡两岸焰火晚会期间，依托 5G-A 通感一体基站，全程护航现场无人机“黑飞”管控等巡查保障工作，为相关部门实时掌握、调度、处置安全事件提供智能可视化支撑。

三是开展大数据低空监管，提供网联无人机运行环境。随着低空经济发展，未来将会加快推进无人机物流配送、应急救援、载人运输等应用。天空很快就会像地面道路一样，变得“车水马龙”。数以万计，甚至几十万计大中小型无人机将在天空开展各类作业，传统技术很难承接如此大体量监管数据的处理分析。且无人机大规模商业化使用必然脱离当前人工使用遥控器进行操纵的模式，转而通过互联网或其他通讯技术完成无人机之间、无人机与地面控制中心之间通讯和数据交换，实现无人机之间协同控制、避撞、区域管理等功能，提高安全性和效率。那么基于无人机控制信号进行探测的无线频谱技术，如 TODA、AOA 等效果将会大打折扣。5G-A 通感一体技术相比 5G 具有 10 倍网络能力提升，其感知模块可容纳低空无人机商业运营所需的数据处理需求，满足公安部门对大范围、多目标、快响应的低空监管要求。而通感一体技术本身对低空通信水平和能力都有很大加强，网联无人机在运行时能够做到平稳飞行，画面清晰传回，保障飞行稳定。广域覆盖和可靠的低空通信网络对于低空经济的规模化发展将大有帮助。

四是设备改造难度小，部署成本低。5G-A 是 5G 的延伸，技术的底层架构没有大变化。因此无需大规模重新部署，只需在原有基站基础上加装感知模块，在重点区域

增设基站数量，保证监管空域连接成片即可。相较于单独布设雷达、TODA 等单套动辄上百万的无人机低空探测设备，5G-A 的成本优势明显。且在不改变 5G 基站天线仰角前提下，5G-A 的低空探测空间高度近 600 米，这避免了低空专网重复建设，有助于城市对“低慢小”飞行物的识别管理，为未来 600 米以下空域进一步放开预留了监管空间。

五是设备标准统一，便于对接低空监管平台。作为国内首家以民用无人驾驶航空器航行服务提供方（USS）模式运行的省级平台，由安徽省公安厅和省通航控股集团共同打造的安徽省低空无人机管理与服务平台已正式上线运行。平台除了以国家无人驾驶航空器一体化监管服务平台推送的实施飞行态势为监管依据，还可通过采集各地市重点区域部署的无人机探测设备的数据，弥补非标无人机、未注册无人机等监管中的空白与漏洞，为全省重点区域低空安全监管调度提供支持，为决策提供参考。但在现实中却存在因各地市配备探测设备接入端口及数据流通标准不一致，致使部分关键数据无法及时传输，导致平台在运行过程中数据更新不及时、不完整，影响决策指挥。与当前手机厂家与运营商的关系类似，生产无人机探测设备的厂家可根据实际需求的不同设计生产不同性能的无人机探测设备，亦可开发适配不同场景的特色功能。但因都基于 5G-A 这一通信传输标准，各厂商所生产的设备都可进行统一接入和数据交换。公安部门在低空安全监管平台的开发和后期维护上，只需根据其标准端口适配相应接入模式，通过接入各地市配备的探测设备，打通平台和设备间的数据流通渠道，实现低空安全监管跨区、跨市甚至跨省的紧密结合，真正做到大范围全覆盖。

四、5G-A 通感技术在公安低空监管中的前景展望

（一）解决“数据来源难”的困境

当前，公安低空安全监管中飞行数据来源有限，仍需依托国家无人驾驶航空器一体化综合监管服务平台来提供无人机飞行高度、飞行速度和飞行轨迹角，以及申请状态、UAS 码注册信息、机器厂商代码等数据。但通过民航部门转接后，数据的时效性无法保证，且最大的问题是只能接收合作目标，即已注册登记的无人机数据，对于非合作目标和非制式无人机，无法进行有效监测。而公安监管的重点恰是此类无人机。未来在 5G-A 技术普及基础上，城市区域内基站的布设从重点区域向一般区域大范围延伸后，公安监管平台可以通过终端设备进行数据采集。区域内飞行的无人机无论是合作还是非合作的，型号是制式还是组装的，只要能够被 5G-A 感知技术感知，就能够第一时间探测并发送至监管平台，并实时监测其飞行姿态，及时进行预警和提前干预，做到飞行数据传输的高时效性和无人机管控类型的全面，解决公安监管中“数据获取难”的困境。

（二）解决“设备投入高”的困境

传统监测设备单价高，组网难度大，雷达设备以百万级起步，TDOA 等无线电探测设备需三台及以上组网方可使用。对于公安机关一家承担如此高昂的费用，实现全域覆盖是不现实的。5G-A 通感技术平时以提供通信功能为主，特殊时期特殊地点占用 20% 的频谱资源进行感知，这样就大大降低了日常运维成本，提高了设备的利用率，且作为通信基建项目，5G-A 基站的布设可以大幅度提升当地通信速度，为 XR、无人驾驶汽车、江河航道监管以及无源物联等提供网络

保障, 创造更大的社会和经济效益, 未来将会有更多的企业和社会资本入局参与建设, 极大缓解了公安监管“设备投入高”的困境。

(三) 解决“区域不成片”的困境

当前公安部门在开展一些长距离、大范围任务时, 常出现低空安全无法连续进行监管的现象。例如警卫任务要人安保时高铁、高速沿线的无人机监管, 因距离过长, 管控片区之间由于设备的数量及承接转换等问题无法做到有效衔接。随着低空经济快速发展, 无人机开展物流配送、应急救援等工作会从城市的重点区域向一般性区域逐步延伸, 伴随着飞行区域扩大, 公安低空监管就需要做到全域覆盖无死角。未来 5G-A 通过 5G 基站的更新换代做到大范围布设后, 无论是高铁沿线还是偏僻山区, 只要有 5G 信号存在, 理论上都可使用 5G-A 通感技术对该空域进行全方位探测与感知, 通过省市级以及国家级公安低空安全监管平台的统一调度指挥, 即可开展跨区域大范围的无人机监管工作, 解决公安低空监管“区域不成片”的困境。

要想富, 先修路。只有完成了低空新型基础设施建设, 让无人驾驶航空器在低空安全、有序地飞起来, 才能有效激活低空新经济。5G-A 通感技术作为新兴无人机探测技术, 虽然在技术方案与原型设计等方面不断取得突破, 但在基础理论、低复杂度方案与工程设计上仍面临挑战。理论上提升频谱利用效率和硬件效率之间的一体化性能指标存在性能边界的矛盾, 技术上也存在一体化波形设计、站内波束和频谱干扰、基站间的抗干扰协调机制等亟需解决的问题。当前在公安低空安全监管工作中, 更多的是采用雷达、无线电频谱、光电探测等传统技术相互配合, 数据互相印证, 辅以 5G-A 等新兴探测技术

共同使用, 以达到区域内低空空域的安全。随着低空经济的不断深入, 无论是为了提升频谱利用效率、硬件效率还是信息处理效率, 通感一体化都是未来发展的趋势。伴随着科技的飞速发展, 公安低空安全监管工作必将成为未来一个阶段我国公安工作的重要发展方向, 成为服务社会稳定大局, 助力国家新质生产力不断发展的重要保障。

参考文献:

- [1] 中共中央党校. 发展新质生产力是推动高质量发展的内在要求和重要着力点 [EB/OL]. 2024. 5
- [2] 李晓华. 低空经济蓄势高飞 [N]. 人民日报. 2024. 1
- [3] 央视网. 打造发展“新赛道”低空经济“起飞”催生万亿级大市场 [EB/OL]. 2024. 1
- [4] 中国新闻网. “无人机违规进入揭阳潮汕机场禁飞区”涉事人员已被刑拘 [EB/OL]. 2024. 3
- [5] 澎湃新闻. 无人机“黑飞”致大跳闸, 韶关近 3000 户居民家中停电 [EB/OL]. 2024. 4
- [6] 范维澄. 落实总体国家安全观 推动应急管理体系和能力现代化 [J]. 中国减灾. 2024. 1
- [7] 蒋冬婷、范长军、雍其润等. 面向重点区域安防的无人机探测与反制技术研究 [J]. 应用科学学报. 2022. 40
- [8] 钟梁. 关于反无人机技术手段现状分析 [J]. 大众标准化. 2023. 23
- [9] 李丽亚. “低慢小”目标防控体系建设及发展思路 [J]. 红外与激光工程. 2023. 52
- [10] 杨超斌. 5G-Advanced 时代展望 [J]. 信息通信技术. 2023. 17
- [11] 王宇. 有效监管是激活低空经济的不二法门——访中国人民公安大学低空安全研究中心主任孙永生 [J]. 交通建设与管理. 2023. 5
- [12] 姜大洁、姚健、李健之等. 通信感知一体化关键技术与挑战 [J]. 移动通信. 2022
- [13] 李晖晖. 通信感知一体化在 5G-A/6G 环境下的无人机应用探究 [J]. 广东通信技术. 2024. 1
- [14] 梁宝俊. 坚持 5G-A/6G 一体化推进的思考 [J]. 信息通信技术. 2023. 6
- [15] 王柳欣. 福建移动创新 5G-A 应用场景助力经济发展“提档升级” [N]. 人民邮电. 2024. 3
- [16] 徐勇、邬贺铨. 市场需求, 技术驱动, 5G-A 发展正当其时 [N]. 人民邮电. 2023. 6
- [17] 中国民航网. 安徽省上线全国首家省级无人机管理与服务平台 [EB/OL]. 2024. 1

责任编辑 韩笑尘