

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.06.001

## 低空监视技术及其发展趋势综述

汤新民<sup>1,2</sup>, 顾俊伟<sup>2</sup>, 刘冰<sup>1</sup>, 张康<sup>2</sup>

(1. 中国民航大学天津市城市空中交通系统技术与装备重点实验室, 天津 300300; 2. 南京航空航天大学民航学院, 南京 211106)

**摘要:** 随着低空经济改革的不断推进, 低空飞行器呈现高密度、异构性、自主性、有人/无人混合运行的新局面。低空监视作为低空运行安全的重要保障, 可以保证飞行器低空安全高效运行。为解决当前低空监视手段不健全的问题, 需要针对复杂的低空环境, 构建涵盖有人/无人混合运行的低空无盲区监视技术体系。首先, 从低空监视的概念及其发展趋势分析了当前低空监视存在的难点问题, 包括机载设备重量体积功耗限制、信道资源紧张和飞行器差异性; 其次, 从协作监视技术和非协作监视技术两个角度出发, 阐述了国内外关键监视技术现状, 并对各技术手段的相关特性进行系统化的对比总结; 最后, 面向新一代低空监视的发展, 探讨未来协作监视、非协作监视以及融合监视技术的发展方向, 以期对未来低空飞行器安全运行有一定的指导意义。

**关键词:** 低空监视技术; 协作与非协作监视; 城市空中交通; 广播式自动相关监视; 通感一体

中图分类号: V19

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2024)06-0973-21

## Review on Low-Altitude Surveillance Technology and Its Development Trend

TANG Xinmin<sup>1,2</sup>, GU Junwei<sup>2</sup>, LIU Bing<sup>1</sup>, ZHANG Kang<sup>2</sup>

(1. Tianjin Key Laboratory of Urban Air Traffic System Technology and Equipment, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** With the continuous reforms of low-altitude economy, the advancement of low-altitude aircraft are presenting a new landscape characterized by high density, heterogeneity, autonomy, and mixed manned/unmanned operations. Low-altitude surveillance, as an important safeguard for the safety of low-altitude operations, can ensure the safe and efficient operation of aircraft at low altitudes. To address current issues of inadequate low-altitude surveillance means, it is necessary to construct a low-altitude surveillance technology system with no blind spots, covering mixed manned/unmanned operations, based on the characteristics of the complex low-altitude environment. Firstly, current difficulties in low-altitude surveillance are analyzed from the perspectives of the concept of low-altitude surveillance and its development trends, including weight, size and power limitations of airborne equipment, tight channel resources, and significant differences among aircraft. Secondly, from the perspectives of the cooperative surveillance technology and the non-cooperative surveillance technology, the current status of key surveillance technologies worldwide is elaborated, and a systematic comparison and summary of the relevant characteristics of each technology are provided. Finally,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61773202, 52072174); 高端外国专家引进计划(G2023202003L)。

**收稿日期:** 2024-11-01; **修订日期:** 2024-11-20

**作者简介:** 汤新民, 男, 教授, 博士生导师, 民航科技创新拔尖人才, 江苏省“六大人才高峰”。研究方向为新一代空中交通管制自动化系统、先进场面活动引导与控制系统、无人机运行服务与交通管理系统等。

**通信作者:** 汤新民, E-mail: tangxinmin@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 汤新民, 顾俊伟, 刘冰, 等. 低空监视技术及其发展趋势综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(6): 973-993. TANG Xinmin, GU Junwei, LIU Bing, et al. Review on low-altitude surveillance technology and its development trend[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(6): 973-993.

facing the development of a new generation of low-altitude surveillance, the development directions of future cooperative surveillance, non-cooperative surveillance, and integrated surveillance technologies are discussed, with the expectation of providing certain guidance for the safe operation of low-altitude aircraft in the future.

**Key words:** low-altitude surveillance technology; cooperative and non-cooperative surveillance; urban air mobility; automatic dependent surveillance-broadcast; integrated sensing and communication

低空一般指 3 000 m 以下的空间,在低空空域飞行的航空器一般包括各类有人驾驶通用航空器和无人驾驶航空器,简称无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)。随着航空科技的飞速发展,尤其在智能态势感知、自主飞行控制、电推进及清洁能源等方面的技术逐渐成熟,无人机驾驶航空器越来越多进入到低空。世界各国低空飞行器种类繁多,性能差异较大,空中出租、空中巴士、空中物流的载人/载货飞行穿梭的场景即将出现<sup>[1]</sup>。为此,各国政府出台了各项低空监视的管理政策,以应对未来复杂的低空运行需求。

2016年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)以及美国工业界、学术界联合研制了无人机空中交通管理 Unmanned Aircraft System Traffic Management,即 UTM 框架,用于支持无人机在低空空域运行的管理工具,设计理念主要源于超低空大规模无人机的运行安全,但该管理框架设计仅针对 120 m 以下空域内的无人驾驶航空器<sup>[2-3]</sup>。此后,由 FAA、NASA 和工业界又共同提出城市空中交通(Urban air mobility, UAM)的概念<sup>[4]</sup>,它是先进空中交通(Advanced air mobility, AAM)的一个子集,目标是开发一种全新的空中运输系统,利用最新的飞行器、技术和运行方式,在城市及其周边地区提供高效、便捷的客运和货运服务。新推出的 UAM 运行概念 V2.0,是由前期实验验证迭代的成果,并进一步细化了 UAM 的运行环境、操作流程和监管框架,为未来的城市空中交通发展提供了更加清晰的指导。在 UAM 通信导航和监视的技术框架中,涉及飞行器机载协作监视与非协作监视<sup>[5]</sup>,其中协作监视包括第 2 频率通用收发信机(Second universal access transceiver, UAT2)数据链、多点定位、ACAS-X(Airborne collision avoidance system)、5G 等手段;非协作监视包括毫米波雷达、激光雷达、红外等手段。由于未来的 UAM 发展必将导致低空飞行器的数量增多,网络安全、通信技术、卫星导航、监视和态势感知等必须适应先进的技术,通信、导航和监视的集成、整合及小型

化要求对未来 UAM 部署非常重要。因此,飞行器和航空电子制造将面临严格的尺寸、重量和功率的约束。

2017年,欧盟与欧控成立的欧洲单一天空计划(Single European Sky ATM research, SESAR)联合企业发布了 U-Space 设计蓝图<sup>[6]</sup>,旨在为欧洲未来无人机安全、高效、大规模混合运行提供一套新型智能服务程序<sup>[7]</sup>。在设计蓝图中指出,飞行器机载通信/监视设备需具备将自身位置广播给周边飞行器或地面操控员的能力,以便能够达到飞行器间协调感知与避让的目的。同时针对区域内可能存在非协作的无人机,应考虑在现有监视功能的基础上,补充非协作监视传感器,如摄像头、光电/红外、相控阵/全息式雷达等传感器。

2022年,中国民航局发布的《无人驾驶航空器发展技术路线图》指出:到 2025年,利用全球定位系统(Global positioning system, GPS)与通信链路相结合、广播式自动相关监视(Automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)、“北斗”短报文实现对合作目标常态监视,利用可见光、电磁波探测对非合作目标实现被动监视和侵入告警;到 2030年,应用机载 ADS-B 收发装置,在无人驾驶航空器之间实现实时位置感知。对大流量起降场、载人起降场实现运行态势实时监视与数据共享;到 2035年,导航通信一体化将成为高密度运行区域空空、空地主要监视技术体制,飞行姿态、噪音和 CO<sub>2</sub>排放特征将成为新的监视重点<sup>[8]</sup>。

低空空域的管理具有独特的属性,无法直接套用发达国家成熟的低空空管模式,加上中国配套的通信、导航、监视和管制手段的落后或缺乏,以及低空飞行管理和服务能力还存在不少薄弱环节,“看不见、连不上、喊不应”的问题,尤其是“看不见”问题比较突出。主要原因在于通航/无人机大多在城市上空、荒漠区、无人区、陆地与海洋交界区、地形复杂的山区等环境进行低空飞行活动,并且执行通航作业任务时,飞行高度较低,加上现有的监视系统及监视网络往往受到地形遮挡等影响,对低空通航/无人机飞行活动的监视存在“盲区”。因此,加强对低空飞行器的实时监控,减少低空飞行监视盲

区,才能有效保证低空飞行安全、有序、顺畅。

## 1 低空监视的概念与难点

### 1.1 低空监视的概念

国际上针对低空空域通常认定在4 000 ft (1 219.2 m)以下的空域,而中国鉴于航空发展特定阶段与挑战,为解决通用航空发展与低空飞行管理存在的突出矛盾,才引入了低空的概念。依据《中华人民共和国飞行基本规则》和《通用航空飞行管制条例》对空域进行特殊划分,并考虑到通用航空飞行活动高度主要在真高1 000 m以下。2010年8月,国务院、中央军委印发《关于深化我国低空空域管理改革的意见》[2010]25号规定“各类低空空域垂直范围原则为真高1 000 m以下,可根据不同地区特点和实际需要,具体划设低空空域高度范围,报批后严格掌握执行”。但随着低空应用的深入发展,根据不同地区特点和实际需要,管理部门和业内普遍将低空高度提升至3 000 m<sup>[9-10]</sup>。

低空监视是全方位动态监控飞行器航迹、位置

信息,并提供航线规划、飞行计划执行、实时信息传递等服务的过程。核心目的是确保飞行器安全飞行,预防违规飞行。低空监视的技术手段主要包括协作监视技术和非协作监视技术。其中协作监视技术包括1 090ES(1 090 MHz extended squitter)/UAT978 ADS-B链路、广域多点定位、ACAS Xu、4G/5G、“北斗”短报文、远程识别(Remote identification, Remote ID)等;非协作监视技术包括毫米波雷达、多普勒距离门控雷达、双基地雷达、激光雷达(Light detection and ranging, LIDAR)、光电/红外(Electro optical/infrared, EO/IR)等。通过搭建涵盖雷达、光电和频谱探测等多源监视设备网,形成低空飞行的主被动探测能力,可根据不同空域、不同航空器类型以及飞行特点,灵活搭配多源主被动监视设备,构建分层适度的低空低成本监视网络,实现全面覆盖协作与非协作航空器的有效监视能力,将传统的城市地基监控网升级到低空立体监视网<sup>[11]</sup>。图1为低空立体监视概念示意图。

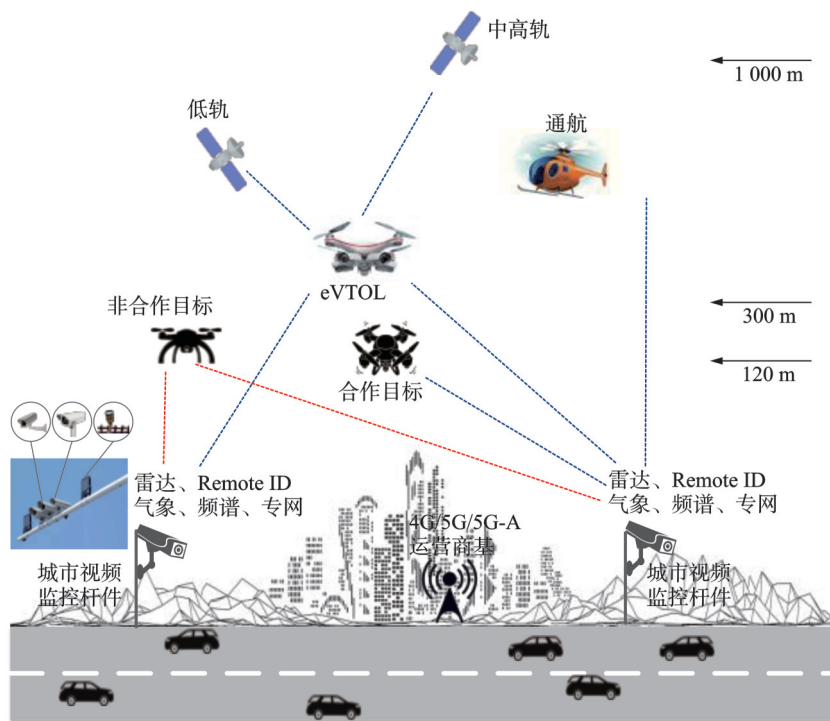


图1 低空立体监视概念示意图

Fig.1 Schematic of the concept of low-altitude stereo surveillance

### 1.2 低空监视存在的难点

未来的低空运行特点表现为:(1)高密度,根据中国航空运输协会发布的2023—2024年度《中国无人机发展报告》,截至2024年8月底,中国无人机实名登记共计198.7万架,保守估计5年内中国无人机数量将突破千万架;(2)异构性,相比于运输航空器采用的商用航空器,低空将面临着有人/无人驾驶航空器等多种类型、载物/载人等多种用

途、飞行速度及飞行剖面差异、空域保持和被监视能力差异明显的问题;(3)自主性,自主感知周边飞行态势以及气象情况,自主进行飞行路径规划,在最佳路径条件下自适应调整飞行状态,以实现与其他航空器、起降设施和地面空管系统之间的协同。因此,面向运输航空的传统空中交通管理(Air traffic management, ATM)模式难以保障高密度异构飞行器的监视,主要表现为以下几点:



(1) 机载设备质量体积和功耗的限制。目前仅有极少数如美国通用原子公司的空空雷达(Air-to-air radar, ATAR)满足美国航空无线电技术委员会(Radio Technical Commission for Aeronautics, RTCA) DO-366B标准, 中国还缺乏能够满足此标准的空空雷达产品。美国霍尼韦尔公司推出的IntuVue RDR-84K雷达采用K波段脉冲体制<sup>[12]</sup>, 尽管体积很小, 质量不到1 kg, 探测距离却可以达3 km, 但其运行功耗达到60 W, 不适用于低空飞行器, 如电动垂直起降航空器(Electric vertical take-off and landing, eVTOL)等, 且上述两款雷达对中国实行禁运。而目前车规级别的毫米波雷达采用调频连续波(Frequency modulated continuous wave, FMCW)的工作体制, 虽然在功耗方面具备一定的优势, 但目标探测距离一般小于500 m, 无法满足探测轻小型高速无人驾驶航空器的需求。

(2) 现有民航运输航空监视信道拥挤。根据中国《民用航空监视技术应用政策》<sup>[13]</sup>, 基于1090ES数据链的ADS-B监视系统主要用于民航运输航空器, 目前其地面站标称接收容量为600批/s。如果将该数据链用于未来数量急剧增长的低空航空器, 则将导致1 090 MHz信道发生拥挤, 干扰民航运输器的运行。因此, 中国《民用微轻小型无人驾驶航空器系统运行识别概念(暂行)》明确禁止轻小型无人驾驶航空器使用ADS-B发射机广播运行识别数据<sup>[14]</sup>。

(3) 低空飞行器的种类和特点差异大。监管部门在实现对所有低空飞行器实时全面监控方面面临显著挑战。鉴于低空飞行器种类的多样性, 其通信与导航技术的非标准化特性显著, 直接降低了构建统一、高效的监控平台的可能性<sup>[15]</sup>。此外, 未经授权的低空飞行活动潜藏着对公共安全的重大威胁, 监管单位往往难以迅速识别并有效遏制非法飞行行为; 加上新型低空飞行器及其飞行模式的不断涌现, 为监管工作带来了更为复杂的挑战。监管部门须持续更新监管手段与技术, 以应对日益增长的监管难度。

## 2 低空监视关键技术现状

### 2.1 协作监视技术现状

#### 2.1.1 1090ES/UAT978 ADS-B链路

ADS-B是国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)确定的空中交通管理航空监视新技术。按照飞机广播信息传递方向划分为发射(ADS-B OUT)和接收(ADS-B IN)两

类<sup>[16-17]</sup>。ADS-B OUT是指机载发射机能周期性对外广播本机的位置、身份识别、速度、高度、航向等丰富的ADS-B监视信息。ADS-B IN是指机载或地面接收站接收来自其周围其他飞机的ADS-B OUT信息以及ADS-B地面站设备广播的交通态势信息。由于该技术成本低、精度高、更新快等特点, 美国、欧洲、中国等均在大力推广ADS-B技术。

目前ADS-B数据链路有3种, 即1090ES、通用访问收发机(Universal access transceiver, UAT)和模式4甚高频数据链(Very high frequency data link mode 4, VDL-4)。UAT使用的空对空ADS-B性能在高密度和低密度情况下总体优于其他2种数据链, 更加适合通用航空的飞行以及低空空域的监视<sup>[18]</sup>; VDL-4由于甚高频良好的传播特性, 在机场地面监视性能更优异; 1090ES的性能虽然并不优于其他2种数据链, 但其非技术要素具有多项优势, 包括唯一标准化链路、获得了全球无线电频谱、技术已经成熟并在全球范围内应用。

#### (1) 1090ES数据链

1090ES数据链是基于S模式的相关技术标准<sup>[19]</sup>, 全球应用最广泛的ADS-B数据链路。目前, 中国的运输航空ADS-B已基本实现全覆盖, 而在低空通航的ADS-B运用较少。早在2011年, 中国首次在成都-拉萨航线上实验了ADS-B系统, 取得显著的成效, 标志着中国通用航空空域安全提升一个新台阶<sup>[20]</sup>。2012年, 中国民用航空局在《中国民用航空ADS-B实施计划》中指出: 到2025年底, 根据国家低空空域改革方案中所述: 逐渐开放、完善和增强低空空域的ADS-B监视覆盖<sup>[21]</sup>。为此, 国内外学者针对ADS-B在低空空域中的不同应用展开了探索。如低空监视架构方面: 帅博等<sup>[22]</sup>和刘珏等<sup>[23]</sup>在研究中对于中国的无人机监管系统的状况进行分析, 提出并设计了一种基于北斗与ADS-B融合的无人机飞行管控系统架构, 为低空海量无人机的有效管理提供了一种技术架构方法。低空航迹预测方面: Zhang等<sup>[24]</sup>设计了一种基于ADS-B信息的无人机航迹预测系统, 并提出了基于循环长短期记忆网络(Recurrent long short term memory networks, RLSTM)的无人机航迹预测算法, 通过ADS-B数据实验验证了算法的可行性。卢献宇等<sup>[25]</sup>以卡尔曼滤波算法为基础对ADS-B航迹预测进行分析研究, 进一步证明了基于卡尔曼滤波算法的ADS-B航迹预测效果的优越性。低空碰撞规避方面: Tong等<sup>[26]</sup>利用ADS-B数据进行目标感知, 随后根据卡尔曼滤波器对无人机航迹进行预测, 利用预测的信息来确定潜在的冲突场景, 并相应地选择不同的消除冲突策略。

尽管 1090ES 数据链有着低成本、低功耗、高性能等方面的优势,但在低空覆盖范围、信道容量以及安全性方面依然存在着诸多问题:(1)从低空覆盖范围角度,中国领土幅员辽阔,部分偏远地区,地形复杂,要实现全国范围内低空覆盖,建站难度比较高,加上低空通航/无人机飞行高度比较低,需在地面密集布站,必将大幅度增加建站和维护成本<sup>[27-28]</sup>; (2)从信道容量角度,中国推行的是 1090ES ADS-B 数据链,与空中交通警戒防撞系统(Traffic collision avoidance system, TCAS)、航管应答共用通道,容易造成堵塞和丢包,若是大面积应用到低空轻小型无人机,势必会使信道更加拥挤,影响运输航空正常运行; (3)从安全性角度,ADS-B 技术采用广播的方式传输信号,加之通信链路和报文协议是公开的,信号传输过程中并没有对数据进行加密处理,使得系统的安全性面临极大风险,非常容易受到欺骗干扰的影响,且无线信号的模拟技术门槛比较低,导致地面接收设备在接收到该信号时,不能确保信号目标的真实性<sup>[29]</sup>。

针对上述问题,未来可以考虑采用星基 ADS-B 系统解决覆盖性问题;通过 1090ES 链路扩容,或切换其他 ADS-B 链路进行通信,避免信道拥挤问题;通过阵列天线<sup>[30-31]</sup>或多点定位<sup>[32-33]</sup>等技术进行虚假目标识别,提升 ADS-B 通信的安全性。

## (2) UAT 数据链

UAT 数据链是 ICAO 推荐的数据链协议的简称,源于为 FAA 提出的“安全飞行 21 世纪”计划而开发的系统。作为支持 ADS-B 功能的 3 种数据链技术之一,UAT 数据链技术具有系统实现结构简单,使用灵活等优点<sup>[34]</sup>。

美国于 1995 年开始独立研发 UAT 项目,2000 年 FAA 开展实施 CAPSTONE 项目对基于 UAT 数据链的 ADS-B 进行试验和性能评估<sup>[35]</sup>,项目的成功使得 UAT ADS-B 技术在美国迅速推广。在 2022 年 6 月,RTCA 颁布了最新的 UAT 数据链最低运行性能标准 DO-282C<sup>[36]</sup>。

随着无人驾驶航空器的迅速扩张,如何将 UAS 纳入美国国家空域系统一度成为研究热点。Barrett 等<sup>[37]</sup>基于 UAT ADS-B 数据链,提出潜在的增强措施,显示了 UAT ADS-B 可以有效促进高密度情况下的 UAS 空中交通管理。麻省理工学院林肯实验室多年来一直在进行将 UAT 应用于小型 UAS 的研究<sup>[38-40]</sup>,持续研究了适用于小型 UAS 的轻量级、低成本和低功耗版本的 UAT ADS-B,评估了应用的各项可行性与潜能。

随着 UAM 近年来受到越来越广泛的关注,为防止可预见的数量激增的 UAS 及未来 UAM 飞行

器运行所导致的信道拥挤,FAA 禁止在 UAS 上发射 ADS-B 信息,这一禁令预期也将适用于 UAM 飞行器。NASA 在参考 FAA 频谱办公室<sup>[41]</sup>提出的 UAT 第 2 频率 1 104 MHz 后,强烈推荐 1 104 MHz UAT2 数据链作为未来 UAM 运行的监视手段。NASA 报告<sup>[3]</sup>指出,UAT2 最低运行标准(Minimum operational performance standards, MOPS)的大部分内容可以直接借鉴 UAT 数据链标准,只需将中心频率从 978 MHz 调整到 1 104 MHz,调制方式、前向纠错和频谱掩蔽仍然使用 UAT 标准。这使得 UAT2 能够提供与 UAT 相同的状态向量(State vector, SV)消息,并且在此基础上针对未来 UAM 飞行器监视需求,额外增加可寻址的数据上行通信并支持 UAM 飞行器的部件健康状况信息等功能。

Karch 等<sup>[42]</sup>针对 FAA 禁令,认为可以使用 UAT 类似协议的 UAS 专属信道将 UAS 集成到美国国家空域系统,并通过研究表明 UAT ADS-B 仍然是应对 UAS 空域融合的有效解决方案。Stouffer 等<sup>[43]</sup>在研究中指出 UAT2 数据链相较于 5G 系统等其他监视方案,作为近未来 UAM 协作监视数据链更具可行性。目前,相关研究尚未得到广泛关注,但随着低空经济的快速发展,UAT2 或类 UAT 数据链的应用及研究必将引起更多的讨论。

### 2.1.2 广域多点定位

广域多点定位(Wide area multilateration, WAM)是一种基于时间差的定位技术,主要用于监视和追踪航空器的位置<sup>[44]</sup>。该技术利用多个地面站接收来自飞机的应答信号,通过测量信号到达不同地面站的时间差,精确计算飞机的三维位置。作为一种新兴的监视技术,多点定位技术已成为全球多个国家民航机构的研究重点<sup>[45]</sup>。

ICAO 要求 WAM 系统应能够覆盖从机场起飞、进近和远程航路的多个空域,覆盖半径通常可达到 200 km 以上,以确保远程航空器的监视<sup>[46]</sup>;使用全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)进行时间同步,并确保地面站间的时间同步精度达到纳秒级,同时保证 WAM 系统的定位误差不超过数十米;为了确保实时监视,WAM 系统必须具备高更新率,通常为 1 Hz 或更快;WAM 系统必须与现有的航空监视技术(如雷达和 ADS-B)兼容,确保在不同系统间的互操作性,整合多源数据。

多点定位系统既可以在 GNSS 信息丢失时作为二次监视雷达(Secondary surveillance radar, SSR)的备份,也可以在存在盲点和覆盖间隙的地



方作为雷达的增强功能;在其他情况下,多点定位可在非雷达空域提供监视,并作为ADS-B的补充技术。与ADS-B不同,多点定位系统不需要对飞机系统进行任何更改<sup>[47]</sup>。因此,多点定位监控系统正在成为成熟监控解决方案的合适补充<sup>[48]</sup>。

WAM系统是一种低成本技术,在运营和维护方面具有重大优势。相关研究表明,WAM系统能够在低空、山区等具有挑战性的条件下进行监视,并且通过合理的地面站布局与优化的信号处理算法,能够在低空复杂环境中实现较高的监视精度<sup>[49]</sup>。随着技术的发展,WAM系统在全球范围内的低空监视应用越来越多。在墨西哥湾等地区,由于陆上雷达设施的位置和范围限制,低空航空交通,尤其是直升机,常常无法得到有效的雷达监视。为了解决这一问题,NASA艾姆斯研究中心(Ames research center,ARC)发起并赞助了直升机飞行跟踪系统(Helicopter in-flight tracking system, HITS)项目,该项目利用多点定位技术,为低空飞行的直升机和其他飞机提供精确的位置和高度信息<sup>[50]</sup>。WAM虽然已经被全球多个国家的民航系统广泛应用于高空和机场监视,但其在低空监视中的应用仍须进一步研究和优化,主要包括信号干扰与反射、地面站布局优化、依赖配备有机载标准应答机监视等挑战<sup>[51]</sup>。尽管如此,该技术在低空监视中仍具有重要作用,特别是在复杂城市环境下的飞行器监控,同时考虑将其与其他监视技术(如ADS-B等)集成使用,以提高系统的鲁棒性和适应性。

### 2.1.3 ACAS Xu

2009年,美国联邦航空局为了改进TCAS的不足,开始了新一代机载防撞系统ACAS X<sup>[52-53]</sup>的研究。2018年10月,ACAS X的最新标准RTCA DO-385<sup>[54]</sup>被推出,Wang等<sup>[55]</sup>和Manfredi等<sup>[56]</sup>对ACAS X的主要模块和实现细节进行了介绍。

ACAS Xu是ACAS X系统的无人机版本,适用于无人机。国内外无人机探测与避让(Detect and avoid, DAA)概念及标准日渐成熟,使得ACAS Xu具有更健全可靠的监视技术和跟踪性能<sup>[57-58]</sup>。ACAS Xu由前端监视模块(Ratio front-end monitoring, RF)、监视跟踪模块(Surveillance tracking module, STM)和威胁解脱模块(Threat resolution module, TRM)构成。前端监视模块RF可以对接收前端的多种监视信号源的信号进行处理,并将处理后的原始监视数据输入给STM模块。信号源可以为混合监视、C模式小声呼叫、二次雷达S模式主动询问、S模式捕获电文连续监测及采集、ADS-B报文和ATAR雷达监视。

STM的功能为对监视数据进行跟踪滤波,生成跟踪数据输入给TRM模块。TRM模块最终基于跟踪数据以及防撞逻辑对航空器进行警示及机动引导<sup>[59-62]</sup>。ACAS Xu的系统框架如图2所示。



图2 ACAS Xu系统框架

Fig.2 ACAS Xu system framework

目前,已有相关组织进行了ACAS Xu的飞行验证。随着无人机在民用空域的日益普及,ACAS Xu将成为确保无人机安全运行的关键技术之一。传感器小型化、无方位主动监视和预测集成等技术的成熟,相关的法规和标准也将逐步完善,为无人机的安全运行提供法律和技术基础<sup>[63-64]</sup>。一些机构也进行了基于ACAS Xu的人机在环评估<sup>[60]</sup>和对ACAS X性能进行验证<sup>[65]</sup>,证明了其良好特性。ACAS Xu允许为不同性能的无人机定制优化表,以提供适合其特定性能的防撞解决方案。此外,ACAS Xu能够提供垂直和水平方向上的解决方案,这增加了它在不同情况下的灵活性。但在无人机上集成ACAS Xu系统还需要在传感器性能和成本之间找到平衡点,这可能限制了某些小型或低成本无人机的应用<sup>[56]</sup>。

### 2.1.4 4G/5G

自20世纪70年代以来,移动通信技术经历了从模拟语音到数字数据传输的演进,如今已能够提供每秒数兆比特的高速移动通信服务,显著提升了用户体验。这一进步对于低空监视领域尤为重要,因为该领域依赖于快速、可靠的数据传输来监控低空飞行的物体<sup>[66]</sup>。第4代(4G)和第5代(5G)移动通信技术在低空监视方面的应用能力显著增强。4G技术通过整合3G与无线局域网(Wireless local area networks, WLAN)技术,能够快速传输低空监视所需的数据、音频、视频和图像。而5G技术则通过高接入速率、低延迟、大连接数和高流量密度,进一步支持了低空飞行物体的智能互联和实时监控,构建了一个以用户为中心的全方位信息生态系统<sup>[67-68]</sup>。

5G网络的快速发展为无人机低空监视提供了新的技术支持,使低空环境中的实时监控和数据传输变得更加高效与稳定。5G的高速率、低延迟和广覆盖等特性极大提升了无人机的监视能力<sup>[69]</sup>。一方面,研究利用5G网络的小基站部署和多基站协同优化的覆盖效果,使无人机在飞行路径中始终获得强信号连接,避免了因信号盲区导致的监控中断<sup>[70]</sup>;另一方面,5G的信道可通过波束成形和路径

优化技术减轻城市低空中多径效应和路径损耗的问题,从而提升无人机在复杂环境下的信号稳定性<sup>[71-72]</sup>。上述技术进展表明,4G/5G在低空无人机监视任务中的应用前景广阔,为低空空域的安全管理和复杂环境监控提供了新的技术手段。

目前,5G仍存在覆盖能力弱、传播范围不足、低渗透和较高海拔监视能力弱的难题<sup>[73]</sup>。为了保证覆盖率,大量布置基础设施将造成大量浪费,同时也会造成网络规划难度以及运维难度的大幅提升。

#### 2.1.5 “北斗”短报文

中国自主研发的“北斗”三号系统继承“北斗”一号/二号的优点,仍保留区域短报文业务(Regional short message communication, RSMC),新增了全球短报文业务(Global system for mobile communications, GSMC)。该技术不仅可以实现点对点的双向通信,还可以通过指挥型终端机进行一对多的广播通信,可为低空监视应用提供极大便利<sup>[74]</sup>。在低空导航、监视方面,“北斗”短报文可用于监控飞行器的位置和状态,提供航行指引和飞行参数,增强飞行器的安全性并提高导航精度;同时管制人员利用“北斗”短报文可以实现飞机航班的实时跟踪和监测,提高航班调度的准确性和运行效率。此外,“北斗”三号全球卫星导航系统实现了通导一体化设计,拥有GPS没有的短报文能力,“北斗”机载设备能实现全空域无盲区飞机位置的短报文报告,为飞行上“双保险”。

2022年,中国民航局发布的《“十四五”通用航空发展专项规划》要求提升低空通信监视能力,充分利用现有ADS-B基站、“北斗”飞行动态信息服务平台和已有飞行服务中心(站),推动以“北斗”定位数据为基础,融合“北斗”短报文、ADS-B数据的低空监视信息平台建设<sup>[75]</sup>。因此,中国学者开展了针对“北斗”短报文的低空监视技术研究。由于“北斗”短报文更新频率慢,一般与其他技术如ADS-B结合实现对低空监视补盲。张永旺<sup>[76]</sup>根据中国低空空域管理的特点,通过结合“北斗”卫星无线电测定业务(Radio determination satellite service, RDSS)和ADS-B技术,构建了独立的航空监视系统架构,为低空空域的空管工作空白提供了一种有益的技术保障思路 and 手段。王尔申等<sup>[77]</sup>针对目前ADS-B定位取自GPS及传输距离受限的问题,研究了基于“北斗”的ADS-B监视技术,在深入研究ADS-B报文协议的基础上,将“北斗”通信作为ADS-B传输链路的补充,研究了通航飞机的无缝导航监视技术,设计了基于“北斗”定位源的多网融合的机载监视终端系统。刘飞<sup>[78]</sup>将“北斗”定位

数据编码成下行数据链格式(Downlink format, DF),利用“北斗”短报文和1090ES双链路完成空-地之间数据传输,为通用航空活动提供双保险的监视服务。综上,利用“北斗”短报文作为低空ADS-B等监视盲区的补充,通过实现ADS-B与北斗短报文融合,对解决低空通航/无人机运行安全问题具有重要的现实意义。

#### 2.1.6 Remote ID

Remote ID为无人机在飞行中提供的身份识别和位置信息,该信息能被其他无线网卡或者蓝牙设备接收<sup>[79]</sup>,类似于无人机的电子车牌系统,允许当局识别无人机的操作者。Remote ID的实施提高了无人机飞行的安全性和可追溯性,帮助监管机构和其他相关方追踪和识别无人机及其操作者的位置和身份<sup>[80]</sup>。近年来,欧洲和美国相继规定,无人机系统必须广播自身身份、位置和高度等信息,例如,美国制定了《ASTM F3411-22a》规范<sup>[81]</sup>,要求在美国空域内运行的大多数无人机具备远程识别能力<sup>[82-85]</sup>。

为填补微轻小型无人驾驶航空器监视领域的空白,加强微轻小型无人驾驶航空器运行管理,中国民用航空局于2024年发布了《民用微轻小型无人驾驶航空器运行识别最低性能要求》<sup>[86]</sup>,明确微轻小型无人驾驶航空器运行识别功能性能要求,提升微轻小型无人驾驶航空器的可靠被监视能力。

近年来,无人机的匿名远程识别<sup>[87-88]</sup>等技术快速发展,Mujumdar等<sup>[89]</sup>将远距离无线电(Long range radio, LoRa)通信技术应用于Remote ID,相较于WiFi和蓝牙有更强的抗干扰性。LoRaWAN是建立在LoRa技术之上的协议,用于在物联网中实现设备与网络之间的通信。Ghubaish等<sup>[90]</sup>用该技术传输Remote ID,识别和定位无人机。在中国,大疆等企业正在开发和完善全球范围内适用的Remote ID解决方案,以满足监管机构和无人机操作者的需求。但是Remote ID的功率较小,信号的有效传输距离较短,且穿透能力较差,容易受到环境的影响。未来,Remote ID可以与现有的空中交通管理体系进行技术融合,实现无人机与有人驾驶飞机的协同空域管理,提升空域效率和安全性。

#### 2.1.7 协作监视技术总结对比

低空监视常用的协作监视技术主要包括ADS-B(含1090ES和UAT链路)、WAM、ACAS-Xu、4G/5G、“北斗”短报文、Remote ID等,通过对比总结,得到表1所示的各项低空监视技术手段的优缺点,为选取合适的低空协作监视手段提供理论支撑。

表1 低空协作监视技术优势对比

Table 1 Comparison of advantages of low-altitude collaborative surveillance technologies

协作监视技术	执行标准	工作频率/MHz	优点	缺点
1090ES链路	RTCA DO-260C	1 090	更新率高、功耗低、监视距离远、建站成本低	用于高密度低空通航/无人机监视,信道拥挤,干扰民航运行;数据链开放,存在欺骗式干扰的风险
UAT链路	RTCA DO-282C	978	避免信道拥挤、更新率高、功率低、建站成本低	存在相近频率干扰,如JTIDS/MIDS Link 16数据链,测距仪(Distance measure equipment, DME)等;数据链开放,存在欺骗式干扰的风险
WAM		1 030/1 090	定位精度高,可以避免虚假目标干扰	信号干扰与反射、地面站布局优化、依赖配备有机载标准应答机进行监视
ACAS-Xu	RTCA DO-386	1 030/1 090	可实现空中防撞与引导	价格昂贵,体积功耗较大,不适合小型无人机,存在1 090 MHz信道拥挤
4G/5G		4G:1 880~1 900 2 320~2 370 2 575~2 635 5G:450~6 000 24 250~52 600	监视距离远、更新率高、功耗小	基站建设成本高,尤其是要覆盖3 000 m高度,需要升级基站
“北斗”短报文	BD 430077	L1频段:1 559.052~1 591.788 L2频段:1 166.220~1 217.370 L5频段:1 176.45 S波段:2 491.75±8.16	监视距离远、覆盖率高	数据更新率低,其中普通民用三代更新周期为30~60 s/次;而物联网仅300 s/条,并且按更新周期频次收费
Remote ID	ASTM F3411-22a ASD-STAN prEN 4709-002	$2.4 \times 10^3 / 5.8 \times 10^3$	体积小,重量轻,功耗低	作用距离较小,一般不超过1 km,需要在地面进行密集建站

## 2.2 非协作监视技术现状

### 2.2.1 毫米波FMCW雷达

毫米波FMCW雷达是指工作频段在30~300 GHz,波段在1~10 mm的探测雷达。它不但具备精准测距测速优势,还能满足各种气候要求,雨、雪、雾等天气对其影响较小。常用于目标检测和跟踪,能够辅助其他设备工作,如摄像头等,弥补其他设备在夜间工作性能低的弊端。Menichino等<sup>[91]</sup>研究了德州仪器的IWR1642雷达芯片,评估了其在UAM运行中的应用潜力。该芯片广泛应用于汽车领域,它的FMCW技术使其在短波电磁波的传输和接收方面具有高精度。Lies<sup>[92]</sup>提出了一种低成本雷达芯片组的扩展方法,通过弱信号相关技术和长测量间隔实现了1 km的探测范围。Li等<sup>[93]</sup>提出了一种基于机载雷达的碰撞检测和避让系统,该系统能够检测恒定速度下的飞行物体,生成避让轨迹,并使用四元数坐标变换来处理 and 显示雷达检测到的障碍物。Gellerman等<sup>[94]</sup>将雷达传感器集成到了北达科他大学的DAA算法中,通过模拟测试验证了雷达传感器在检测非合作目标方面的有效性。Wasik等<sup>[95]</sup>基于Xilinx RFSoc设备开发了一种实验性雷达载荷,用于小型多旋翼无人机的自主DAA目的,验证了原型的概念可行性并评估了其性能。雷达传感器不仅能够提供精确的距离测量,

还能够与摄像头等其他传感器融合,提供更全面的环境感知能力,Lies等<sup>[96]</sup>研究表明,通过将雷达与摄像头结合,可以显著扩大雷达芯片组的应用范围,使其适用于DAA。

### 2.2.2 多普勒距离门控雷达

多普勒距离门控雷达技术是现代雷达系统中不可或缺的一部分,它结合了传统脉冲雷达的距离测量能力与多普勒效应的速度检测优势。现阶段多普勒距离门控雷达的研究主要涉及:(1)高分辨率,通过采用先进的信号处理技术,如脉冲压缩、合成孔径雷达等方法,研究人员已经能够实现更高的空间分辨率和速度分辨率,从而更精确地识别目标;(2)杂波抑制,为了提高在复杂环境下的探测性能,研究者们开发出了多种杂波抑制技术,包括自适应滤波器、主瓣杂波抑制以及基于机器学习的方法,有效减少了地面或海面反射造成的干扰;(3)多功能集成,单个多功能雷达平台是当前发展趋势,这种平台不仅能够执行传统的搜索、跟踪任务,还可以进行地形测绘、气象观测等,满足多样化需求的同时降低了系统的整体成本;(4)数字化与软件定义,随着数字信号处理器件的发展,越来越多的雷达系统采用了全数字化架构,并且支持软件定义的功能,允许用户根据实际需要灵活调整雷达的工作模式。De等<sup>[97]</sup>和Harmanny等<sup>[98]</sup>首次提出



将微多普勒特征用于无人机分类,分别提出利用回波的时频特性(短时傅里叶变换)和倒谱图来产生微多普勒特征。陆晨阳<sup>[99]</sup>从微多普勒理论出发,建立了旋翼回波模型,研究介绍了时域双门限检测方法和多闪烁周期长时间积累方法。Fuhrmann等<sup>[100]</sup>借助3种常用的信号表示来产生微多普勒特征,即短时傅里叶变换(Short-time Fourier transform, STFT)、倒谱图和节奏速度图(Cadence velocity diagram, CVD),通过奇异值分解来提取特征,最后利用支持向量机进行分类。

### 2.2.3 双基地雷达

非合作双基地雷达是无源雷达的一种,同时也是一种特殊的双基地雷达。非合作双基地雷达可以定义为利用现有信号(例如广播、通信、无线电导航或雷达信号),通过探测目标反射的回波信号从而实现目标探测的雷达系统。与传统有源主动雷达相比,非合作双基地雷达具有如下独特优势:(1)低空覆盖效果更佳;(2)目标探测性能更为优越;(3)安装部署更为灵活;(4)组网探测投资更为低廉。利用第三方发射的信号作为机会照射源进行被动的目标检测,避免了发射站的建设投资,同时进一步提高了战场的生存能力。基于雷达辐射源的非合作双基地雷达既丰富了双基地雷达类型,又提高了雷达的探测性能。但是由于收发装置的特殊性和辐射源的非合作性,也为探测系统带来了不少技术难题。非合作无源雷达作为用频装备,正在从传统单一探测功能向多功能一体化发展,将目标识别能力、侦察成像能力、反隐身能力、抗干扰能力综合一体,真正做到“一机多能”,达到资源整合、探测效果增倍的目的<sup>[101]</sup>。德国高频物理和雷达技术研究所也开展了电子支援措施(Electronic support measures, ESM)传感器和无源雷达的融合研究<sup>[102]</sup>。外辐射源是一部Ka波段的低截获概率调频连续波雷达,利用ESM接收机对辐射源信号进行分析,并估计出信号参数,然后利用估计出的信号参数重构参考信号,最后通过相关处理实现对高速目标的检测。挪威防御研究所奥斯陆机场的L波段高功率远程民用空中交通管制雷达为外辐射源,利用多次扫描数据的非相参积累来获得目标航迹,相关报道发表在两届美国电气和电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)国家雷达会议上<sup>[103-104]</sup>,该辐射源是一部机械扫描的调频雷达。

### 2.2.4 激光雷达

LIDAR技术是一种在现代高科技背景下发展起来的测量手段,具有高精度和高分辨率的特点。它发射的激光束可以穿透云雾、沙尘等障碍物,并快速、准确地获取航空器周围环境的点云数据<sup>[105]</sup>。通过对这些数据的处理和分析,可以实时抓取航空

器/障碍物的体积、位置和距离信息,从而帮助飞行器及时采取规避措施,避免与航空器/障碍物发生碰撞,从而提高飞行器的安全性和可靠性。LIDAR应用于低空监视,具有高精度三维成像、高分辨率、不受光照条件影响、实时数据获取的巨大优势。可应用在机场周边低空监视、城市低空飞行管理、军事基地及重要设施周边低空监视。

近年来,LIDAR针对低空目标监视技术受到国内外学者广泛关注。Singletary等<sup>[106]</sup>将2D LiDAR(Hokuyo UST-10LX)及摄像机一起搭载在四旋翼飞行器上,进行室内感知与避障实验,与人工势场法(Artificial potential fields, APF)相比,使用控制屏障函数(Control barrier functions, CBFs)的性能有所提高。Gadde等<sup>[107]</sup>使用单目相机和二维LIDAR的多传感器融合方法,为四轴飞行器提供感知障碍物区域,并估计避障的自由空间进行避障,通过室外飞行实验验证了算法的可行性。Fan等<sup>[108]</sup>为满足无人机巡视图象的实时性和精确性,提出一种基于机载LIDAR点云融合的实时定位模型。将数字表面模型(Digital surface model, DSM)与无人机巡更图像在特定几何约束下融合,实现逐像素的实时定位,再通过对关键点周围的LiDAR点云进行主成分分析(Principal component analysis, PCA),实现更精确的目标定位。Ramasamy等<sup>[109]</sup>介绍了用于无人驾驶航空器的新型激光障碍物警告和避障系统(LIDAR obstacle warning and avoidance system, LOWAS),并仿真验证了该系统目标感知、避障检测及轨迹优化算法能够有效确保在各种环境下安全避开所有障碍物,为未来感知与避让架构提供一种可行途径。

LIDAR技术在低空探测领域的应用正处于快速发展阶段,虽然在气象监测、环境评估、城市规划等多个领域得到广泛应用,但在低空监视应用中仍存在不足,其设备成本较高,且数据的处理和分析较为复杂,尤其是在处理大规模数据时,需要强大的计算能力和先进的数据处理算法;此外,由于缺乏统一的技术标准,不同设备之间的数据不能兼容,给数据共享与应用带来障碍。随着技术的发展,未来LIDAR的成本会逐渐降低,还将与人工智能和大数据结合,提高数据处理效率,并实现技术标准化,实现数据兼容与共享,扩大在智能交通、低空监视等新兴领域的应用。

### 2.2.5 光电/红外

EO/IR技术近年来在低空监视领域得到了广泛应用,这主要得益于其优越的探测能力和成像性能。EO/IR技术是一种结合了光电效应和红外辐射原理的综合性技术,主要用于探测、成像和非接触式测量。技术核心在于多样的传感器配置,光电探测器可以有效捕捉可见光信号;红外探测器则可

探测到不可见的红外辐射。结合这两种探测器,低空监视系统可以在各种天气条件和光照条件下进行有效监控,这对于低空飞行器的快速识别和追踪尤为重要。

光电技术是以光电效应为基础,综合运用可见光和非可见光(如红外光)进行探测,并运用成像与信息处理的多学科技术。光电技术主要分为陆地和海洋的光纤通信两种形式。包括空间通信的激光通信,相对于电缆而言,具有极强的抗干扰能力,并具有通信容量大,传输损耗低、传播距离远的特点<sup>[110]</sup>。

李正东<sup>[111]</sup>利用光电图像与雷达航迹信息融合的方式,使得目标识别的结果更加精确。他提出了一种基于D-S(Dempster-Shafer)证据理论的光电图像与雷达航迹决策级融合目标方法,有效降低了冲突证据对目标识别系统的负面影响。针对决策级融合在目标识别中的局限性,又提出了一种基于多层长短期记忆网络(Long short-term memory, LSTM)和基于区域的快速卷积神经网络(Faster region-based convolutional neural network, Faster R-CNN)雷达航迹与光电图像特征级融合的目标识别方法,来提升对小目标或处于复杂背景中目标的特征提取能力。Wu等<sup>[112]</sup>提出一种基于贝叶斯推理的可见光和红外图像融合的车辆目标识别方法。采用开路运算滤波器提取红外图像中的车辆目标特征,通过引入交并比(Intersection of union, IOU)得到可见光图像与红外图像的融合结果,作为贝叶斯推理的参数,定义参数的类别和属性并代入建立的朴素贝叶斯分类模型中,使得识别准确率提高。

红外技术体系是以红外辐射的探测、成像和应用为核心的综合性技术,涵盖了红外探测器、成像设备和处理技术等多个部分。红外辐射波长范围通常在0.75~1 000  $\mu\text{m}$ 之间,被广泛应用于夜视、热成像、环境监测、安防、医疗成像等领域。红外探测器根据材料和工作原理的不同可分为热探测器和光学探测器。热探测器常用于测量目标的温度变化,而光学探测器则能够直接探测红外光信号。

近年来,随着材料科学的发展和制造工艺的提升,红外技术不断向高分辨率、高灵敏度和小型化方向发展,推动了其在无人机、自动驾驶及智能监控等新兴领域中的广泛应用。

马旗等<sup>[113]</sup>利用红外图像,提出了一种低空无人机检测识别方法,通过残差网络对红外图像的深度特征进行提取,然后预测网络采用多尺度模型结构对提取的特征进行位置和类别的预测,最后经过非极大值抑制的方式对重复的结果进行剔除,降低了无人机的低空威胁,提升了对无人机的检测识别能力。邵文博<sup>[114]</sup>利用红外图像传感器对低空飞行的小目标进行检测和跟踪,提出了一种基于传播滤波器(Propagated filter, PF)的核相关滤波器(Kernel correlation filters, KCF)算法,利用PF对图像进行滤波,得到的滤波结果和原图像的差值图像作为基样本,再通过KCF进行跟踪,实验表明改进的KCF算法在一定程度上提高了跟踪的准确率。红外小目标检测在红外预警和无人机监控中扮演着重要角色。Wu等<sup>[115]</sup>在低空低速小(Low-altitude slow-speed small, LSS)目标检测场景中,为解决因无法有效抑制低空背景下高对比度的角点和稀疏边缘而导致误报的问题,提出了一种基于目标稀疏性和运动显著性(Target sparsity and motion saliency, TSMS)融合的红外LSS目标检测方法,通过融合目标稀疏性和运动显著性获得真实的LSS目标,降低了红外小目标检测过程的误报率。

未来EO/IR技术会更加广泛的应用于低空监视领域,更多地与雷达、摄像头等传感器融合,对目标进行更加全面的探测,使得探测结果更加精确,为低空航空器的飞行安全提供保障。

#### 2.2.6 非协作监视技术总结对比

低空监视常用的非协作监视技术主要包括毫米波FMCW雷达、多普勒距离门控雷达、双基地雷达、LIDAR、EO/IR等,对比总结如表2所示。这些总结可为后续用户选取合适的低空非协作监视手段提供理论支撑。

表2 低空非协作监视技术优势对比

Table 2 Comparison of advantages of low-altitude non-collaborative surveillance technologies

非协作监视技术	工作频率/GHz	优点	缺陷
FMCW 雷达	30~300	体积小,重量轻,穿透能力强,灵敏度较高	作用距离较小,一般2 km
多普勒距离门控雷达	1.55~5.2(除2.4 GHz, 2.4~2.283 GHz为未授权频段; 3.55~3.7 GHz为共享频段)	已通过认证	成本和尺寸大,不适合轻小无人机使用
双基地雷达	L波段(航路):1~2 S波段(机场):2.7~2.9 X波段(非航空):8~12	价格便宜,航程短,适用于城市环境	受国外限制,中国无法采购获得;且受杂波影响大,技术成熟度不够
LIDAR	$10^5$	分辨率精度高,无频率堵塞问题	功耗大,受环境要求影响,如大雾、雨水
EO/IR	光电:400~790 $\times 10^3$ 红外:300~400 $\times 10^3$	可在各种天气环境下使用	作用距离小(约800 m),成本高;且以军事为主,目前还没有商业化



### 3 新一代低空监视发展

#### 3.1 协作监视技术发展趋势

##### 3.1.1 链路扩容

近几年,随着全球航空量的飞速发展及ADS-B技术全球化的普及,现行格式简单的1090ES数据链将很难满足在密集空域的管制需求。这是由于1090ES数据链的信息承载能力有限,航空器数量的增多会导致信道拥挤、频谱共享干扰等问题<sup>[116]</sup>。为解决容量受限问题,RTCA、FAA、欧控等多家权威机构,先后提出并开展了基于相位调制的1090ES信号扩容方法的一系列验证和评估工作<sup>[117-119]</sup>。国内外学者也针对该扩容技术进行了深入研究与验证。如Álvarez等<sup>[120]</sup>对1090ES ADS-B数据链的脉冲相位调制(Pulse-phase modulation, PPM)与相移键控(Phase shift keying, PSK)调制的叠加进行了详细概述,通过脉冲内相位调制实现了数据链容量的扩充。实验结果表明,PSK系统验证了所选技术要求,符合标准文件RTCA DO-260C和ED-102B要求<sup>[121-122]</sup>。王洪等<sup>[123]</sup>对ADS-B系统的1090ES脉位调制信号做脉内调相,可在不增加发射次数、不占用新的频段、不影响现有系统运行的情况下增加信号的数据传输能力,并讨论了相位调制扩容1090ES信号需解决的几项关键技术,包括扩容信号的调制、信号的接收、解调和解码、信号的同步、数据的校验码设计、可行性及安全性评估。黄清等<sup>[124]</sup>针对ADS-B 1090ES数据链,将PPM调制与八相位移键控叠加调制,通过脉内调相实现数据链容量扩充。这些研究都是基于脉内调相进行1090ES数据链扩容,在不增加1090ES报文广播次数的前提下提升1090ES数据链容量,确保与现有ADS-B系统兼容的前提下,提高ADS-B系统的信息传输速率<sup>[125]</sup>。

未来低空飞行器将呈现爆发式增长,仅对1090ES数据链扩容将难以应对未来低空高密度飞行场景,并存在干扰民航运输航空运行的风险。因此,中国民航局明确规定不得使用ADS-B发射机进行UAS运行识别的广播<sup>[126]</sup>。因此,为了更好地满足中国未来低空UAM高密度空域内飞行器的监视需求,缓解1090ES ADS-B数据链拥挤问题,考虑从两个角度进行解决:(1)通过更换ADS-B数据链频率,即引入UAT 978 MHz数据链实现低空通航/无人机监视<sup>[127]</sup>,或参考NASA与FAA频谱办公室的建议,运用UAT第2频率1 104 MHz实现对低空目标监视;(2)考虑对UAT/UAT2数据链进行扩容(如多进制相位连续频移键控调制扩容、调制指数恒定扩容及载波频差恒定扩容等),以

适应未来低空更高密度的运行场景<sup>[128]</sup>。

##### 3.1.2 通感一体化

通感一体化(Integrated sensing and communication, ISAC)是指融合通信与感知两个功能,使系统同时具有通信和感知能力<sup>[129]</sup>。通感一体化可以实现通信感知的相互协作,以较低成本实现多点组网协同感知,进而在不同场景提供定制化感知服务<sup>[130-131]</sup>。

当前随着无人机商用的普及,无人机非法入侵空中碰撞、噪声干扰等问题逐渐引起关注。多种探测方案并存于无人机安防市场,但都面临技术、效率、成本等诸多限制。5G-A通感一体化技术可以发挥5G网络优势,让通信和感知共用资源、共享成本,实现更好的感知性能及成本效益。一方面实现无人机位置、速度、航道、禁飞区等信息的连续感知探测;另一方面,利用5G大带宽通信能力,实现无人机飞控数据的实时回传,确保无人机依法依规飞行,防范非合作无人机入侵导致的各类安全事故。

2023年10月,国际移动通信(International Mobile Telecommunications, IMT)2020(5G推进组)为验证技术的可行性,开展了5G-A通感一体化关键技术研究,包括场景、架构、测试、仿真和空口技术等,并进行了多项通感融合场景案例方面的可行性验证测试,其中包含无人机低空场景下的通感增强性能<sup>[132]</sup>。同月中兴通讯也完成了5G-A通感融合演示验证测试,验证采用了毫米波频段和4.9 GHz频段下,低空无人机通感融合场景应用的可行性。

未来,通感一体化技术具有广阔的应用前景,但现阶段的研究还有许多问题亟待解决,如通信功能和感知功能之间干扰消除问题、多站协同感知与精准同步、人工智能技术与感知信号处理办法的融合、通感系统运算的算力等<sup>[133]</sup>,为未来针对低空监视通感一体化的发展提出了挑战与研究方向。

##### 3.1.3 地基转向星基

目前,ICAO组织主要推行的航空监视系统——陆基ADS-B系统,难以在现有基站的基础上实现未来航空全程无缝监视覆盖,尤其需要面临低空通航/无人机的监视。这是因为陆基ADS-B系统具有先天的时空局限性,即ADS-B基站仍属视距工作,受地形环境约束多,监视空域覆盖不足,要实现全覆盖需要在地形复杂的山区大量部署ADS-B地面站,建设和维护成本将大幅提高<sup>[134-135]</sup>。因此,针对陆基系统的不足,ICAO提出星基ADS-B监视的概念,即在低轨卫星上搭载



ADS-B接收设备,利用卫星星座全球覆盖、无地形遮挡等优势,实现对全球航空器的实时连续无缝监视<sup>[136]</sup>。

星基ADS-B系统虽然覆盖范围广,但其复杂度高、部署周期长,且存在信噪比低、信号交织严重等问题。为此,国内外学者为提高星基ADS-B系统的监视性能纷纷开展了深入研究。在技术性能提升方面:Ren等<sup>[137]</sup>提出了一种最优阈值的N置信度纠错算法和具有恒定复杂度的降序纠错算法,通过改进低信噪比提升ADS-B的接收性能。张学军等<sup>[138]</sup>设计了以相干解调为基础的星基ADS-B联合解调算法,重点解决了信号帧头的同步和信号的频偏问题,在之前的研究基础上有效提高了解调灵敏度。Yu等<sup>[139]</sup>提出了一种具有自校准功能的数字波束形成系统,采用一个 $4 \times 4$ 微带阵列天线和一个16通道接收机,可以同时产生19个以上波束大小和方向可灵活控制的独立波束,减少信号碰撞,提高星基ADS-B系统的可靠性。在实验论证方面:美国、欧洲航天局(European Space Agency, ESA)、德国等国家和地区都启动了基于星基ADS-B系统航空监视计划,包括Proba-V、GOMX系列、CanX-7、ALAS系统、Spire、铱星二代系统,并通过验证确定能够满足全球非繁忙空域的空管监视应用需求。中国民航局发布的《中国民航航空器追踪监控体系建设实施路线图》<sup>[140]</sup>和民航科技发展“十三五”规划中均强调了加强自主星基ADS-B技术研发与建设的重要性。国内多家单位针对天地一体化、空间互联网提出计划并发射验证星,包括“鸿雁”星座、“虹云”工程等搭载的星基ADS-B系统,相关性能指标达到国际先进水平。这对中国未来复杂区域低空目标连续监视应用具有重要的意义。

### 3.2 非协作监视技术发展趋势

#### 3.2.1 低SWaP-C

雷达技术不断进步,低尺寸、重量、功耗和成本(Size, weight, power and cost, SWaP-C)是雷达技术的新趋势,它将雷达系统集成到更小的芯片上,降低尺寸、重量和功耗,从而提高其便携性和可靠性。主要优势有:(1)将雷达系统集成到更小的芯片上,减小了系统的体积和重量,使其更加便携;(2)采用更加先进的技术,使得系统的功耗更低,延长了系统的使用时间;(3)将雷达系统集成到芯片上,减小了系统的热噪声和机械振动对性能的影响,提高了系统的稳定性。雷达低SWaP-C的尺寸更小、功耗更低、性能更稳定,使其在各种复杂的应用场景中更加适用。Lies等<sup>[141]</sup>提出了一种融合相

机和雷达的解决方案,利用相机的高角度分辨率来引导雷达信号处理,可在1 km范围内检测到典型的垂直起飞着陆(Vertical take-off and landing, VTOL)飞行器,使用Inras RadarLog开发套件进行测试,结果表明,如果实现全尺寸系统,可以在1 km范围内检测到典型大小的VTOL飞行器。Lin等<sup>[142]</sup>开发了一种低相位噪声、高灵敏度的线性调频连续波(Linear frequency modulated continuous wave, LFM CW)雷达,质量仅为0.5 kg,使用两节AA电池可连续工作超过4 h。该雷达使用贴片天线,能够在空中检测小型无人机。Dogan等<sup>[143]</sup>设计了一种工作在Ka波段的低SWaP-C雷达高度计,通过使用商用现成品(Commercial off-the-shelf, COTS)组件,实现了高分辨率、低体积、低重量的设计。仿真结果显示,该设计能够满足系统级别的要求。

#### 3.2.2 远距离、高精度和全天候

未来雷达技术的研究将继续围绕提升远距离探测、高精度定位以及全天候工作能力展开,同时还会结合新兴技术进行创新。以下是一些可能的发展趋势。

(1)增强远程探测能力:随着高频段技术和超宽带雷达技术的进步,未来雷达系统将能够实现更远的探测距离。这些技术不仅提高了雷达的空间分辨率,还增强了对微弱信号的捕捉能力,在更远的距离上也能精确地识别和跟踪目标。

(2)提高精度与分辨率:通过采用相控阵技术、多波束雷达等先进的设计,雷达系统的精度将进一步提高。相控阵雷达能够快速调整发射和接收波束的方向,无需物理移动天线,这有助于提升目标识别的速度和准确性。此外,多波束技术允许同时使用多个独立的波束覆盖不同的区域,从而增加探测效率和数据获取速度。

(3)智能化处理:人工智能和机器学习算法的应用将是雷达技术发展的关键因素之一。这些智能技术可以用于自动目标识别、杂波抑制、自适应信号处理等,进一步优化雷达性能,减少人为操作错误。

(4)全天候适应性:为了确保在各种恶劣天气条件下都能正常运作,未来雷达系统将更加注重抗干扰能力和环境适应性的设计。这包括开发更好的信号处理算法以减轻雨雪雾等自然现象的影响,以及改进硬件材料和技术以应对极端温度和其他气候条件。

SARape系统<sup>[144]</sup>采用了94 GHz的高频段,带宽高达1 GHz。该系统能够在高分辨率下工作。系统集成了数字下变频、数字数据链路和实时合成

孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)处理器,能够实现实时图像显示和可靠运动补偿。SARape系统的设计注重小型化,使其能够安装在低载荷无人机上。输出功率超过100 MW,确保了系统的高性能。Barbaresco等<sup>[145]</sup>使用X波段雷达在巴黎奥利机场和巴黎戴高乐机场进行了尾涡监测试验。这些雷达能够连续检测、表征和剖面测量尾涡,最大探测距离可达2 000 m。试验结果显示,X波段雷达在晴朗和雨天条件下都能有效检测尾涡,验证了其全天候性能。

### 3.3 协作/非协作监视技术融合趋势

近年来,随着自动化、人工智能技术的不断突破<sup>[146-147]</sup>,学者开始尝试使用新的探测融合方法和传统成熟的监视技术相结合来开发新的低空监视体系,以适应未来日渐复杂运行场景的任务需求。

低空空域由于其复杂的背景环境,面临诸多挑战,如杂波干扰和地面物体遮挡等<sup>[148-149]</sup>。在复杂情况下,能够准确探测到空域中的有效目标已经非常困难,进一步获取目标的精确量测信息,并排除无效的杂波虚警或干扰,将大幅增加空域监视系统设计的复杂度。因此,利用多传感器协同监视,通过结合不同传感器的特点,能够有效提高探测能力和跟踪精度,提升系统的鲁棒性与准确性。充分利用协作与非协作的协同监视模式,对低空空域实施可靠性监控并精确跟踪目标,是未来亟待深入研究的方向。

多传感器融合技术是一个多层次、多方面的多源信息处理过程,通过对不同信息源数据的一系列整合处理,克服单一传感器的局限性,提供更全面、准确的空域监视能力。

针对不同的融合对象,融合信息源的层次可分为数据级融合、特征级融合以及决策级融合3个级别。数据级融合以较为原始的方式对收集的传感器数据进行预处理,对数据进行组合、关联等一系列操作,最终融合的数据输出也可以很好地保留传感器的原始信息。特征级融合是一种针对特定数据筛选的融合过程,利用聚类、分割等方法对数据进行特征提取,再将所有的特征进行关联组合后输入到最终的融合层,得到较为详细的融合信息。决策级融合是3种方法中最高级别的融合,系统里融合了多个事件数据流的决策,在对每一个传感器数据进行初步判断后,再融合到最终的结果中,得到更全面的融合结果。

多传感器数据融合技术首先预处理数据、统一信息格式和配准时空,然后根据不同的传感器的组合模式以及数据类型,采用合适的方法校正系统误差,比如基准航迹法适用于传感器间距较大的情况,而多传感器中仅有单个传感器提供的量测信

息,可能不需要进行误差校正。目标关联技术作为多传感器融合跟踪的核心部分,受到传感器性能不同、目标检测方式和环境未知的影响,仍是多传感器协同工作的一大研究难点。常见的目标关联方法包括基于统计量和概率假设的算法、基于神经网络和模糊数学的方法等,数据关联的质量直接影响到整个系统的探测和跟踪性能。

综上所述,基于协作和非协作监视手段的多传感器融合作为低空监测研究的一项新兴技术<sup>[150-151]</sup>,不仅要进行有效的目标航迹关联,还要通过滤波跟踪来估计飞行器的状态信息<sup>[152-153]</sup>,实现对空域态势的分析和管控,包括自主飞行目标的识别,空中自主监视、引导和控制等。协作与非协作监视技术融合应用可以极大地提高对低空态势的安全性判断,增强安全飞行的能力,具有重要的现实意义。

## 4 结论与展望

### 4.1 关键问题总结

根据国内外低空监视技术发展现状与新一代低空监视发展趋势,总结如下关键问题。

(1) 监视技术手段多样:随着低空飞行器的数量和种类不断增加,传统的监管手段已难以满足实际需求。例如传统的空管一二次雷达对于航路的覆盖受到地形的影响,无法实现低空空域完整覆盖。而新兴的ADS-B、5G-A、Remote ID、FMCM等都存在弊端,包括作用距离、基站部署成本、频率资源、机载设备成本、功耗和重量等。因此,如何运用融合监视、人工智能等先进技术提升监管效率,实现对低空飞行器的实时跟踪、监控和预警,成为亟待解决的问题。

(2) 频谱资源紧张:低空监视设备面临频谱资源受限的问题,空天地频谱矛盾日益突出,形成了复杂电磁环境和立体交叠电磁干扰,频谱资源高效安全共享与控制难度加大。例如,当前ADS-B OUT发射端普遍安装在民航、通航及大型无人机上,不适合安装在数量庞大的轻小型无人机上,除了重量、功耗、成本等问题外,还存在1090ES信道堵塞拥挤的现象,影响正常的民航空中航班管理。

(3) 技术路线不明:由于目前低空飞行器种类繁多,各地对于低空飞行器的监管手段也是多种多样,并没有形成更为明确的技术路线。因此,结合中国《民用航空监视技术应用政策》不明之处,提出针对不同的低空应用场景的监视技术路线,为未来低空监视应用提供理论方案支撑。具体低空监视技术应用路线如表3所示。

表3 低空监视技术应用路线

Table 3 Application routes of low-altitude surveillance technologies

管制要求	应用范围	监视技术	技术应用路线
空中交通管理 监视	通用航空	1090ES ADS-B+ “北斗”	实现对管制空域和监视空域ADS-B的全覆盖,针对盲区区域采用“北斗”短报文技术进行监视补盲,全面实现对低空通航的连续全覆盖监视
		星基ADS-B	推进中国自主全球低轨卫星移动通信系统监视及星基ADS-B建设,实现星基ADS-B空管行业应用需求
非空中交通管 理监视	低空无人驾驶航空器 (中大型)	“北斗”短报文 UAT ADS-B数据链 FMCW EO/IR等	中大型无人驾驶航空器要求安装和携带可被监视的设备,需实现实时位置状态监控,同时可配备机载传感器进行周边目标监视与自主感知与避让
	低空无人驾驶航空器 (轻微小型)	Remote ID 4G/5G等	轻微小无人驾驶航空器运行在W类空域(120 m以下),需实现利用通信链路自动发送自身的识别信息

#### 4.2 未来展望

低空监视是确保低空空域安全的重要保障。为解决低空空域的安全问题,应结合中国低空运行的实际情况,将协作和非协作监视技术融合运用到低空飞行器监视体系中,大力探索和解决这些技术在实际中的应用问题,如作用距离、频率资源、重量/功耗/体积、成本等,确保中国低空经济的健康发展。

面向未来低空经济发展的需求、问题和挑战,建议从理论研究、统一标准、示范应用等方面全面开展低空监视研究:

(1)加强理论研究:重点研究低空监视技术,如ADS-B链路扩容、不同波段雷达探测与抗干扰等基础理论与关键技术,突破各监视手段在探测距离、资源容量、重量/功耗/体积等指标方面的限制,探索建立涉及低空协作、非协作及多传感器融合监视技术的法律法规,逐步形成一套面向低空通航/无人机的监视理论、方法和技术体系。

(2)加快统一标准:为能够统一推广应用北斗、5G、ADS-B、FMCW、EO/IR等新技术手段,需制定统一的行业标准,如UAT2链路扩容、Remote ID设备、机载FMCW等标准,以此为依据开展通信、导航、监视等基础设施布局规划建设,构建多方协同、空地一体、互联互通的低空监视网络,研制覆盖全低空空域的通航/无人机监视系统及其配套设施设备。

(3)开展示范应用:中国首个全域低空飞行试点省份湖南,已建成全国第1个覆盖全省的低空监视网络,综合运用“北斗+ADS-B+5G”三模技术,开展面向低空通航/无人机监视示范性应用试验,基本实现湖南低空监视信号全覆盖。以此示范为参考,不断融入新技术并逐步推广全国,最终建成一个安全、高效、绿色、可持续发展的低空监视管理体系,加快推动低空经济健康发展。

#### 参考文献:

- [1] 廖小罕, 屈文秋, 徐晨晨, 等. 城市空中交通及其新型基础设施低空公共航路研究综述[J]. 航空学报, 2023, 44(24): 6-34.  
LIAO Xiaohan, QU Wenqiu, XU Chenchen, et al. A review of urban air mobility and its new infrastructure low-altitude public routes[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(24): 6-34.
- [2] 李诚龙, 屈文秋, 李彦冬, 等. 面向eVTOL航空器的城市空中运输交通管理综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(4): 35-54.  
LI Chenglong, QU Wenqiu, LI Yandong, et al. Overview of traffic management of urban air mobility (UAM) with eVTOL aircraft[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(4): 35-54.
- [3] KOPARDEKAR P, RIOS J, PREVOT T, et al. Unmanned aircraft system traffic management (UTM) concept of operations[C]//Proceedings of AIAA Aviation Forum and Exposition. Washington DC, USA: AIAA, 2016.
- [4] FAA. Concept of operations v2.0, foundational principles, roles and responsibilities, scenarios and operational threads, urban air mobility (UAM) [M]. Washington DC, USA: FAA, 2023.
- [5] NASA. Reliable, secure, and scalable communications, navigation, and surveillance (CNS) options for urban air mobility (UAM) [M]. Cleveland, USA: NASA, 2020.
- [6] SESAR. U-space blueprint[EB/OL]. (2019-09-01) <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/U-space%20Blueprint%20brochure%20final.PDF>.
- [7] BARRADO C, BOYERO M, BRUCCULERI L, et al. U-space concept of operations: A key enabler for opening airspace to emerging low-altitude operations [J]. Aerospace, 2020, 7(3): 24.
- [8] 中国民用航空局. 无人驾驶航空器发展技术路线图V1.0征求意见稿[EB/OL]. (2022-08-22). <http://>



- www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/202208/P020220822615871900321.pdf.
- [9] 中国空中交通管制委员会. 低空空域使用管理规定(试行)(征求意见稿)[EB/OL]. (2014-07-23). <http://news.carnoc.com/list/288/288814.html>.
- [10] 国务院办公厅. 关于促进通用航空业发展的指导意见[EB/OL]. (2016-05-17). [http://www.gov.cn/xinwen/2016-05/17/content\\_5074151.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2016-05/17/content_5074151.htm).
- [11] 中国电子科技集团有限公司. 低空航行系统[EB/OL]. (2024-09-01). <http://www.cetc13.cn/zgdk/1593022/1592495/1816065/2024090608464631229.pdf>.
- [12] HONEYWELL. Honeywell's IntuVue RDR-84K Band Radar is the ultimate all-purpose sensing system [EB/OL].(2022-04-07). <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/hardware-and-systems/weather-radar/intuvue-rdr-84k-band-radar-system>.
- [13] 中国民用航空局空管行业管理办公室. 民用航空监视技术应用政策[EB/OL]. (2018-02-01). [http://www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK\\_17/XXGK/GFX-WJ/201812/P020181214590772674664.pdf](http://www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK_17/XXGK/GFX-WJ/201812/P020181214590772674664.pdf).
- [14] 中国民用航空局空管行业管理办公室. 民用微轻小型无人驾驶航空器系统运行识别概念(暂行)[EB/OL]. (2022-03-01). <https://www.wuhan.gov.cn/ztzl/24zt/dkjjgzlfz/zcwj/202409/P020240909391068050886.pdf>.
- [15] 中国电信. 通感一体低空网络白皮书[EB/OL]. (2024-02-26). <https://www.doc88.com/p-49139520818702.html>.
- [16] RTCA. Minimum operational performance standards for 1090MHz extended squitter automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) and traffic information service-broadcast (TIS-B): DO-260B—2009[S]. Washington DC, USA: Radio Technical Commission for Aeronautics, 2009.
- [17] 何昕, 李哲, 张智豪. ADS-B技术应用及发展趋势研究[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(4): 4-6.  
HE Xin, LI Zhe, ZHANG Zhihao. Research on ADS-B technology application and development trend[J]. Microcomputer Applications, 2022, 38(4): 4-6.
- [18] 陈晓, 毛焯炳. ADS-B技术在低空空域安全中应用的现状与展望[J]. 电子测量技术, 2022, 45(20): 61-67.  
CHEN Xiao, MAO Yebing. Status and prospect of ADS-B technology application in low-altitude airspace security[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(20): 61-67.
- [19] RTCA. Minimum operational performance standards for air traffic control radar beacon system / mode select (ATCRBS/Mode S) airborne equipment: DO-181E—2011[S]. Washington DC, USA: Radio Technical Commission for Aeronautics, 2011.
- [20] 郭俊鹏. ADS-B在通用航空机场的应用和影响[J]. 现代商贸工业, 2018, 39(9): 183-184.  
GUO Junpeng. Application and influence of ADS-B in general aviation airport[J]. Modern Business Trade Industry, 2018, 39(9): 183-184.
- [21] 中国民用航空局. 中国民用航空 ADS-B 实施规划[EB/OL]. (2012-12-01). <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/ZFGW/201601/P020160125652058562641.pdf>.
- [22] 帅博, 张江林, 肖建平, 等. 一种新的基于北斗与 ADS-B 融合的无人机管理系统技术架构[C]//第十二届中国卫星导航年会. 上海:[s.n.], 2018.  
SHUAI Bo, ZHANG Jianglin, XIAO Jianping, et al. A new UAV management system technical architecture based on Beidou and ADS-B fusion[C]//Proceedings of the 12th China Satellite Navigation Annual Conference. Shanghai, China: [s.n.], 2018.
- [23] 刘珏, 张恩宇, 漆骏骞, 等. 基于北斗与 ADS-B 技术的无人机监视管理系统设计[J]. 科技创新与应用, 2020, 10(15): 37-39.  
LIU Jue, ZHANG Enyu, QI Junqian, et al. Design of UAV surveillance and management system based on Beidou and ADS-B technology[J]. Technology Innovation and Application, 2020, 10(15): 37-39.
- [24] ZHANG Y F, JIA Z Y, DONG C, et al. Recurrent LSTM-based UAV trajectory prediction with ADS-B information[C]//Proceedings of GLOBECOM 2022—2022 IEEE Global Communications Conference. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2022: 1-6.
- [25] 卢献宇, 张媛媛. 基于卡尔曼滤波算法的 ADS-B 航迹预测[J]. 现代信息科技, 2021, 5(8): 48-50, 53.  
LU Xianyu, ZHANG Yuanyuan. ADS-B track prediction based on Kalman filtering algorithm[J]. Modern Information Technology, 2021, 5(8): 48-50, 53.
- [26] TONG L, GAN X S, WU Y R, et al. An ADS-B information-based collision avoidance methodology to UAV[J]. Actuators, 2023, 12(4): 165.
- [27] 覃睿, 史娅琪, 王明科. 面向低空飞行安全监视的 ADS-B 地面站空间布局规划方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(7): 100-105.  
QIN Rui, SHI Yaqi, WANG Mingke. Spatial distribution programming method of ADS-B ground station oriented to low altitude flight safety[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(7): 100-105.
- [28] 汤新民, 张颖, 胡钰明, 等. 基于网格划分的 ADS-B 地面站信号覆盖及选址分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(6): 1114-1120.  
TANG Xinmin, ZHANG Ying, HU Yuming, et al.

- Analysis on signal coverage and site selection for ADS-B ground station based on grid division[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2022, 54(6): 1114-1120.
- [29] SCHÄFER M, LENDERS V, MARTINOVIC I. Experimental analysis of attacks on Next Generation air traffic communication[M]//JACOBSON M, LOCASIO M, MOHASSEL P, et al. *Lecture notes in computer science*. Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 253-271.
- [30] 冯子亮, 潘卫军, 王洋, 等. 一种检测 ADS-B 虚假目标的方法: CN102323567B[P]. 2012-11-07.
- [31] 王文益, 陈庚, 吴仁彪, 等. 基于十字阵列的 ADS-B 欺骗式干扰抑制方法: CN104360323B[P]. 2017-01-04.
- [32] 刘逸, 倪育德, 方姝, 等. 基于 TDOA/TSOA 的 ADS-B 虚假信号检测技术研究[J]. *现代导航*, 2015, 6(2): 95-101.
- LIU Yi, NI Yude, FANG Shu, et al. Study on false signal detection technology of ADS-B based on TDOA/TSOA[J]. *Modern Navigation*, 2015, 6(2): 95-101.
- [33] 张科晶. ADS-B 自主式防欺骗技术探微[J]. *大科技*, 2017(28): 299.
- ZHANG Kejing. A probe into ADS-B autonomous anti-deception technology[J]. *Super Science*, 2017(28): 299.
- [34] 陈志杰, 朱晓辉. 基于现有机载设备信道构建 UAT 数据链路[J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(10): 1840-1843.
- CHEN Zhijie, ZHU Xiaohui. Constructing UAT datalink based on transceiving channel of airborne equipment in service[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(10): 1840-1843.
- [35] Federal Aviation Administration. Capstone program information and procedures[EB/OL]. (2022-08-31). [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/air\\_traffic/technology/adbs/archival/CSMASTER.PDF](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/air_traffic/technology/adbs/archival/CSMASTER.PDF).
- [36] RTCA. Minimum operational performance standards for universal access transceiver (UAT) automatic dependent surveillance-broadcast: DO-282—2009[S]. [S.l.]: RTCA, 2009.
- [37] BARRETT J A, GREEN T, PETERSON C K, et al. Modeling of universal access transceiver ADS-B performance capabilities in high-density airspace[C]//Proceedings of AIAA Scitech 2021 Forum. Reston, USA: AIAA, 2021: 1636.
- [38] STRAIN R, DEGARMO M, MOODY J. A light-weight, low-cost ADS-B system for UAS applications [C]//Proceedings of AIAA Infotech@Aerospace 2007 Conference and Exhibit. Rohnert Park, USA: AIAA, 2007: 2750.
- [39] MOODY C, STRAIN R. Implementation consideration for automatic dependent surveillance-broadcast on unmanned aircraft systems[C]//Proceedings of AIAA Infotech@Aerospace Conference. Reston, USA: AIAA, 2009: 1865.
- [40] GUTERRES M, JONES S, ORRELL G, et al. ADS-B surveillance system performance with small UAS at low altitudes[C]//Proceedings of AIAA Information Systems—AIAA Infotech @ Aerospace. Grapevine, USA: AIAA, 2017: 1154.
- [41] FAA. Department of Transportation. Policy statement for the reported geometric altitude of the control station of a standard remote identification unmanned aircraft: FAA-1100—2019[S]. Washington DC, USA: FAA, 2019.
- [42] KARCH C, BARRETT J, ELLINGSON J, et al. Collision avoidance capabilities in high-density airspace using the universal access transceiver ADS-B messages[J]. *Drones*, 2024, 8(3): 8030086.
- [43] STOUFFER V L, COTTON W, IRVINE T, et al. Enabling urban air mobility through communications and cooperative surveillance[C]//Proceedings of AIAA Aviation 2021 FORUM. Reston, USA: AIAA, 2021: 3172.
- [44] HE D L, LU X, WANG W, et al. Analysis of wide area multilateration localization accuracy under different stations layout and aircraft height[J]. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*, 2017: 7068.
- [45] 孙卓振. 广域多点定位系统关键技术分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- SUN Zhuozhen. Analysis on key technologies of wide area multipoint positioning system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- [46] ICAO. Manual on air traffic surveillance: Doc 9924 [R]. [S.l.]: ICAO, 2011.
- [47] XU N, CASSELL R, EVERS C, et al. Performance assessment of Multilateration Systems—A solution to nextgen surveillance[C]//Proceedings of 2010 Integrated Communications, Navigation, and Surveillance Conference Proceedings. Herndon, USA: IEEE, 2010: 1-8.
- [48] DA S B, PORTO P P, ELLER R. Aeronautical surveillance systems: Historical and future perspectives [J]. *Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society*, 2013, 9(1): 9-10.
- [49] SKRYPNIK O N. Multiposition (multilateration) surveillance systems[M]//Springer Aerospace Technology. Singapore: Springer Singapore, 2019: 203-226.
- [50] MARTONE P J, DASKALAKIS A C. Helicopter in-flight tracking system (HITS) for the Gulf of Mexico [C]//Proceedings of the 21st Digital Avionics Sys-

- tems Conference. Irvine, USA: IEEE, 2002: 3E3.
- [51] 李春雷. 监视新技术在我国低空空域改革中的应用[J]. 科技视界, 2016(26): 2-3.  
LI Chunlei. The application of new technology in the surveillance of China's low altitude airspace reform [J]. Science & Technology Vision, 2016(26): 2-3.
- [52] CHOMIK G. The future of collision avoidance-ACAS X[J]. International Journal of Engineering Trends and Technology, 2016, 39(5): 284-287.
- [53] 冯涛, 李洪伟, 李家蓬. ACAS X监视特性分析及防欺骗技术探讨[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2021, 40(6): 39-44.  
FENG Tao, LI Hongwei, LI Jiapeng. Analysis of surveillance characteristics and discussion on anti-deception technology of ACAS X[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2021, 40(6): 39-44.
- [54] RTCA. Minimum operational performance standards (MOPS) for airborne collision avoidance system X (ACAS X) (ACAS Xa and ACAS Xo): DO-385—2018[S]. Washington DC, USA: RTCA, Inc, 2018.
- [55] WANG S Q, PEI K X, WHITEHOUSE J, et al. Formal security analysis of neural networks using symbolic intervals[EB/OL]. (2018-04-28). <https://arxiv.org/abs/1804.10829v3>.
- [56] MANFREDI G, JESTIN Y. An introduction to ACAS Xu and the challenges ahead[C]//Proceedings of 2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Sacramento, USA: IEEE, 2016: 1-9.
- [57] OWEN M P, PANKEN A, MOSS R, et al. ACAS Xu: Integrated collision avoidance and detect and avoid capability for UAS[C]//Proceedings of 2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC). San Diego, USA: IEEE, 2019: 1-10.
- [58] 魏麟, 杨济睿, 雷中洲, 等. 机载防撞系统防撞逻辑分析[J]. 中国科技信息, 2023(2): 57-60.  
WEI Lin, YANG Jirui, LEI Zhongzhou, et al. Anti-collision logic analysis of airborne anti-collision system [J]. China Science and Technology Information, 2023 (2): 57-60.
- [59] GREBE T, KUNZI F. Detect and avoid (DAA) alerting performance comparison: CPDS vs. ACAS-Xu[C]//Proceedings of 2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC). San Diego, USA: IEEE, 2019: 1-6.
- [60] RORIE R C, SMITH C, SADLER G, et al. A human-in-the-loop evaluation of ACAS Xu[C]//Proceedings of 2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC). San Antonio, USA: IEEE, 2020: 1-10.
- [61] JIA K, RINARD M. Verifying low-dimensional input neural networks via input quantization [M]//Lecture Notes in Computer Science. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2021: 206-214.
- [62] 李铜波. 综合化防撞系统混合监视的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.  
LI Tongbo. Design and implementation of mixed monitoring of integrated anti-collision system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [63] 王允钊. 机载防撞系统ACAS X中TRM模块的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.  
WANG Yunzhao. Design and implementation of TRM module in airborne collision avoidance system X [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [64] 张鸿麟. 基于MDP的通用航空机载防撞逻辑的设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.  
ZHANG Honglin. Design of general aviation airborne anti-collision logic based on MDP[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [65] AVENEAU C, TORATANI D, SENOGUCHI A, et al. Potential operational consequences of the use of ACAS Xu in controlled airspace[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2024, 67(3): 164-174.
- [66] 张平, 陶运铮, 张治. 5G若干关键技术评述[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 15-29.  
ZHANG Ping, TAO Yunzheng, ZHANG Zhi. Survey of several key technologies for 5G[J]. Journal on Communications, 2016, 37(7): 15-29.
- [67] 张宇翔, 李育, 崔德龙. 无人机混合无线通信技术综述[J]. 通信技术, 2024, 57(4): 323-330.  
ZHANG Yuxiang, LI Yu, CUI Delong. Review of hybrid wireless communication technologies for UAV[J]. Communications Technology, 2024, 57(4): 323-330.
- [68] 卢超, 王恒彬, 叶建均. 5G专网的应用分析[J]. 数字化用户, 2021, 27(2): 24-25.  
LU Chao, WANG Hengbin, YE Jianjun. Application analysis of 5G private network[J]. Digitization User, 2021, 27(2): 24-25.
- [69] LI S C, LI D X, ZHAO S S. 5G Internet of things: A survey[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2018, 10: 1-9.
- [70] DE RESENDE H C, FRANCISCO NUNES PINHEIRO J, REITER P, et al. 4G/5G performance of a multi-RAT UAV for medical parcel delivery[C]//Proceedings of 2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). Las Vegas, USA: IEEE, 2022: 268-271.
- [71] 杨怀宇. 5G通信技术促进军用无人机发展[J]. 网络安全技术与应用, 2020(12): 92-93.  
YANG Huaiyu. 5G communication technology pro-



- motes the development of military UAV[J]. *Network Security Technology & Application*, 2020(12): 92-93.
- [72] KARAMCHEDU V P. A path from device-to-device to UAV-to-UAV communications[C]//*Proceedings of 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall)*. Victoria, Canada: IEEE, 2020: 1-5.
- [73] 夏褚宇. 基于LoRa无线通信技术的颗粒物浓度监测系统[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- XIA Chuyu. Particle concentration monitoring system based on LoRa wireless communication technology [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.
- [74] 庄衡衡. 基于北斗短报文的机器人遥控遥测系统研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2023.
- ZHUANG Hengheng. Research on robot remote control and telemetry system based on Beidou short message[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2023.
- [75] 中国民用航空局. “十四五”通用航空发展专项规划[EB/OL]. (2022-06-13). <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/FZGH/202206/P020220613533137333208.pdf>.
- [76] 张永旺. 基于北斗RDSS和ADS-B的航空监视系统架构研究[J]. *电脑知识与技术*, 2017, 13(26): 169-170.
- ZHANG Yongwang. Research on the architecture of aviation surveillance system based on Beidou RDSS and ADS-B[J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2017, 13(26): 169-170.
- [77] 王尔申, 宋远上, 徐嵩, 等. 基于“北斗”的低空空域通航飞机导航监视技术研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2019, 51(5): 586-591.
- WANG Ershen, SONG Yuanshang, XU Song, et al. Navigation and surveillance technology based on “Beidou” for general aviation aircraft in low altitude airspace[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2019, 51(5): 586-591.
- [78] 刘飞. 基于北斗RDSS的ADS-B数据传输技术与实现[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2020.
- LIU Fei. The research and implementation of ADS-B data transmission technology based on Beidou RDSS [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2020.
- [79] BESADA J A, CARRAMIÑANA D, BERGESIO L, et al. Modelling and simulation of collaborative surveillance for unmanned traffic management[J]. *Sensors*, 2022, 22(4): 1498.
- [80] BELWAFI K, ALKADI R, ALAMERI S A, et al. Unmanned aerial vehicles’ remote identification: A tutorial and survey[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 87577-87601.
- [81] ASTM INTERNATIONAL. Standard guide for remote ID and tracking of unmanned aircraft systems (UAS): ASTM F3411-22a—2022 [S]. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2022.
- [82] EUROPEAN COMMISSION. Commission delegated regulation (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems[S]. Brussels, Belgium: European Commission, 2019.
- [83] EUROPEAN COMMISSION. Commission delegated regulation (EU) 2020/1058 of 27 April 2020 amending delegated regulation (EU) 2019/945 as regards the introduction of two new unmanned aircraft systems classes [S]. Brussels, Belgium: European Commission, 2020.
- [84] FEDERAL REGISTER. Remote identification of unmanned aircraft [EB/OL]. (2021-01-01). <https://www.federalregister.gov/documents/2021/01/15/2020-28948/remote-identification-of-unmanned-aircraft>.
- [85] F38 COMMITTEE. Standard specification for Remote ID and tracking[S]. Conshohocken, USA: ASTM International, 2019.
- [86] 中国民用航空局. 民用微小型无人驾驶航空器运行识别最低性能要求 [EB/OL]. (2024-02-27). [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202402/t20240227\\_223037.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202402/t20240227_223037.html).
- [87] TEDESCHI P, SCIANCALEPORE S, DI PIETRO R. ARID: Anonymous remote IDentification of unmanned aerial vehicles[C]//*Proceedings of Annual Computer Security Applications Conference*. [S.l.]: ACM, 2021: 207-218.
- [88] WISSE E, TEDESCHI P, SCIANCALEPORE S, et al. A2RID—Anonymous direct authentication and remote identification of commercial drones[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(12): 10587-10604.
- [89] MUJUMDAR O, CELEBI H, GUVENC I, et al. Use of LoRa for UAV remote ID with multi-user interference and different spreading factors[C]//*Proceedings of 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)*. Helsinki, Finland: IEEE, 2021: 1-7.
- [90] GHUBAISH A, SALMAN T, JAIN R. Experiments with a LoRaWAN-based remote ID system for locating unmanned aerial vehicles (UAVs)[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2019: 9060121.
- [91] MENICHINO A, DI VITO V, ARIANTE G, et al. Radar-On-Chip laboratory characterization for UAM applications[C]//*Proceedings of 2023 IEEE 10th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*. Milan, Italy: IEEE, 2023: 296-301.
- [92] LIES W A. Extending the range of low SWaP-C FM-

- CW radar[D]. Austin, USA: The University of Texas, 2021.
- [93] LI H R, KINSNER W, WANG Y, et al. Airborne radar based collision detection and avoidance system for unmanned aircraft systems in a varying environment [C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE). Cleveland, USA: IEEE, 2021: 43-48.
- [94] GELLERMAN N, MULLINS M, FOERSTER K, et al. Integration of a radar sensor into a sense-and-avoid payload for small UAS[C]//Proceedings of 2018 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, USA: IEEE, 2018: 1-9.
- [95] WASIK V, CASADEBAIG L, GABARD B, et al. Prototyping a radar sensor based on a xilinx RFSoC device for detect-and-avoid onboard small UAV[C]//Proceedings of 2023 20th European Radar Conference (EuRAD). Berlin, Germany: IEEE, 2023: 229-232.
- [96] LIES W A, NARULA L, IANNUCCI P A, et al. Low SWaP-C radar for urban air mobility[C]//Proceedings of 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Portland, USA: IEEE, 2020: 74-80.
- [97] DE WIT J J M, HARMANNY R I A, PRÉMEL-CABIC G. Micro-Doppler analysis of small UAVs [C]//Proceedings of 2012 9th European Radar Conference. Amsterdam, Netherlands: IEEE, 2012: 210-213.
- [98] HARMANNY R I A, DE WIT J J M, CABIC G P. Radar micro-Doppler feature extraction using the spectrogram and the cepstrogram[C]//Proceedings of 2014 11th European Radar Conference. Rome, Italy: IEEE, 2014: 165-168.
- [99] 陆晨阳. 雷达低速目标检测方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.  
LU Chenyang. Research on detection method of radar low-speed target[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [100] FUHRMANN L, BIALLOWONS O, KLARE J, et al. Micro-Doppler analysis and classification of UAVs at Ka band[C]//Proceedings of 2017 18th International Radar Symposium (IRS). Prague, Czech Republic: IEEE, 2017: 1-9.
- [101] WANG Y S, BAO Q L, WANG D H, et al. An experimental study of passive bistatic radar using uncooperative radar as a transmitter[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(9): 1868-1872.
- [102] MATTHES D. Convergence of ESM sensors and passive covert radar[C]//Proceedings of IEEE International Radar Conference. Arlington, USA: IEEE, 2005: 430-444.
- [103] OVERREIN O, OLSEN K E, JOHNSRUD S, et al. Geometrical and signal processing aspects using a bistatic hitchhiking radar system[C]//Proceedings of IEEE International Radar Conference. Arlington, USA: IEEE, 2005: 332-336.
- [104] JOHNSEN T, OLSEN K E. Hitchhiking bistatic radar: Principles, processing and experimental findings [C]//Proceedings of 2007 IEEE Radar Conference. Waltham, USA: IEEE, 2007: 518-523.
- [105] 邓继伟. 融合无人机激光点云和影像的新建铁路交叉测量方法研究[J]. 铁道勘察, 2024, 50(5): 32-37.  
DENG Jiwei. Research on a new railway cross measurement method based on the fusion of UAV laser point cloud and image[J]. Railway Investigation and Surveying, 2024, 50(5): 32-37.
- [106] SINGLETARY A, KLINGEBIEL K, BOURNE J, et al. Comparative analysis of control barrier functions and artificial potential fields for obstacle avoidance [C]//Proceedings of 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Prague, Czech Republic: IEEE, 2021: 8129-8136.
- [107] GADDE C S, GADDE M S, MOHANTY N, et al. Fast obstacle avoidance motion in small quadcopter operation in a cluttered environment[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT). Bangalore, India: IEEE, 2021: 1-6.
- [108] FAN W, LIU H J, PEI H Y, et al. A real-time positioning model for UAV's patrolling images based on airborne LiDAR point cloud fusion[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2024, 28(7): 2952-2965.
- [109] RAMASAMY S, SABATINI R, GARDI A, et al. LIDAR obstacle warning and avoidance system for unmanned aerial vehicle sense-and-avoid[J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 55: 344-358.
- [110] 王凡. 多领域中有关光电技术的应用[J]. 中国战略新兴产业, 2018(12): 34.  
WANG Fan. Application of photoelectric technology in many fields[J]. China Strategic Emerging Industry, 2018(12): 34.
- [111] 李正东. 基于光电图像与雷达航迹信息融合的目标识别技术研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2024.  
LI Zhengdong. Research on target recognition technology based on photoelectric image and radar track information fusion[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2024.
- [112] WU J, ZHANG X Q. Vehicle target recognition method based on visible and infrared image fusion using Bayesian inference[J]. Applied Sciences, 2023, 13(14): 8334.
- [113] 马旗, 孙晓军, 张杨, 等. 基于红外图像的低空无人机检测识别方法[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(3): 150-154.

- MA Qi, SUN Xiaojun, ZHANG Yang, et al. Detection and recognition method of low-altitude UAV based on infrared images[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2020, 40(3): 150-154.
- [114] 邵文博. 近程低空红外小目标检测及跟踪技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2021.
- SHAO Wenbo. Research on short-range low-altitude infrared small target detection and tracking technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [115] WU L, MA Y, HUANG J, et al. Infrared low-altitude and slow-speed small target detection via fusion of target sparsity and motion saliency[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2024, 142: 105492.
- [116] HONDA J, KAKUBARI Y, OTSUYAMA T. Estimation of 1 090 MHz signal types used in aircraft surveillance system[C]//Proceeding of 2021 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). Taipei, China: IEEE, 2021: 1-2.
- [117] STAYTON G T. Systems and methods for providing an advanced ATC data link: US8344936 [P]. 2013-01-01.
- [118] 王洪, 孙清清. 一种基于相位调制的1090ES信号扩容方法: CN104539567A [P]. 2015-04-22.
- [119] PAGANO T. Update on the status of phase overlay development to increase ES capacity 21. 06.[R]. Malakoff, France: FAA, 2011.
- [120] ÁLVAREZ D P, FERNANDO FLORES ACEDO R. Increased capacity in ADS-B messages implementing phase shift keying encoding[C]//Proceedings of 2024 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS). Herndon, USA: IEEE, 2024: 1-14.
- [121] RTCA. Minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) and traffic information services-broadcast (TIS-B): DO-260C—2020 [S]. [S. l.]: RTCA, 2020.
- [122] EUROCAE. Minimum operational performance standards (MOPS) for 1 090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) and traffic information services-broadcast (TIS-B): ED-102B—2020[S]. [S.l.]: 2020.
- [123] 王洪, 孙清清, 李华琼, 等. 扩充1090ES数据链容量的相位调制技术[J]. *电讯技术*, 2015, 55(4): 385-389.
- WANG Hong, SUN Qingqing, LI Huaqiong, et al. Techniques to increase 1090ES capacity based on phase modulation[J]. *Telecommunication Engineering*, 2015, 55(4): 385-389.
- [124] 黄清, 王洪, 王飞, 等. 基于软件无线电平台的1090ES扩容信号收发处理[J]. *电讯技术*, 2020, 60(3): 298-302.
- HUANG Qing, WANG Hong, WANG Fei, et al. Implementation of transceiver for increasing 1090ES capacity based on software radio platform[J]. *Telecommunication Engineering*, 2020, 60(3): 298-302.
- [125] 宋妍. 基于相位调制的1090ES扩容技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- SONG Yan. Research on 1090ES capacity expansion technology based on phase modulation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [126] 中国民航局. 民用微轻小型无人驾驶航空器运行识别最低性能要求(试行)[EB/OL]. (2024-02-27). [http://www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK\\_17/XXGK/GFXWJ/202402/P020240227625810188684.pdf](http://www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK_17/XXGK/GFXWJ/202402/P020240227625810188684.pdf).
- [127] CHEN B. FPGA implementation of universal access transceiver (UAT) receiving unit for surveillance of small and general aircraft[D]. Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2022.
- [128] 文旌宇, 汤新民, 汤盛家, 等. UAT2数据链监视容量扩充研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2024. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0534.
- WEN Jingyu, TANG Xinmin, TANG Shengjia, et al. Research on the expansion of surveillance capacity for UAT2 data link[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0534.
- [129] 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 Jun, ZENG Wei, ZHONG Jianrong. Discussion on integrated sensing and communication technology [J]. *Designing Techniques of Posts and Telecommunications*, 2024(1): 6-9.
- [130] 中国通信学会. 通感算一体化网络前沿报告[EB/OL]. (2022-02-24). <https://cloud.tencent.com/developer/article/1969070>.
- [131] 张燕霞, 刘向南, 孙春蕾, 等. 基于通感一体化的6G无人网络[J]. *移动通信*, 2023, 47(9): 71-76.
- ZHANG Yanxia, LIU Xiangnan, SUN Chunlei, et al. Integrated sensing and communication-based 6G UAV networks[J]. *Mobile Communications*, 2023, 47(9): 71-76.
- [132] 陈大伟, 向际鹰, 陈诗军, 等. 5G-A通感一体化的场景、挑战及关键技术[J]. *邮电设计技术*, 2022(8): 23-28.
- CHEN Dawei, XIANG Jiyong, CHEN Shijun, et al. Scenarios, challenges and key technologies of 5G-A integrated sensing and communication[J]. *Designing Techniques of Posts and Telecommunications*, 2022(8): 23-28.
- [133] 高飞, 王文剑, 刘建国, 等. 通感一体化融合的研究及其挑战[J]. *移动通信*, 2022, 46(5): 45-51.



- GAO Fei, WANG Wenjian, LIU Jianguo, et al. Research and challenges of integrated sensing and communication[J]. *Mobile Communications*, 2022, 46(5): 45-51.
- [134] CANADA. The concept of space-based reception of automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B): A38-WP/132[R]. Montreal, China: ICAO, 2013.
- [135] 安强, 李家蓬, 黄泉, 等. 星基ADS-B虚假目标验证方法[J]. *工业控制计算机*, 2023, 36(11): 12-14, 17.  
AN Qiang, LI Jiapeng, HUANG Xiao, et al. Satellite-based ADS-B false target verification based on signal TDOA calculation[J]. *Industrial Control Computer*, 2023, 36(11): 12-14, 17.
- [136] 张学军, 谭元皓, 李雪缘, 等. 星基ADS-B系统及关键技术发展综述[J]. *北京航空航天大学学报*, 2022, 48(9): 1589-1604.  
ZHANG Xuejun, TAN Yuanhao, LI Xueyuan, et al. A review of development of space-based ADS-B system and its key technologies[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2022, 48(9): 1589-1604.
- [137] REN P, WANG J X, ZHANG P X. Novel error correction algorithms for ADS-B signals with matched filter based decoding[J]. *Physical Communication*, 2019, 36: 100788.
- [138] 张学军, 李雪缘, 王子润. 一种适用于高灵敏度星载ADS-B接收机的信号处理方法: CN111884981B[P]. 2021-05-18.
- [139] YU S Q, CHEN L H, FAN C G, et al. Integrated antenna and receiver system with self-calibrating digital beamforming for space-based ADS-B[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 170: 480-486.
- [140] 中国民用航空局. 中国民航航空器追踪监控体系建设实施路线图 [EB/OL]. (2017-01-07). <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/ZFGW/201708/P020170821611383001667.pdf>
- [141] LIES W A, NARULA L, IANNUCCI P A, et al. Low SWaP-C radar for urban air mobility[C]//Proceedings of 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Portland, USA: IEEE, 2020: 74-80.
- [142] LIN X P, SUL B, ZHUANG P, et al. Low SWaP-C LFM CW airborne radar for counter-UAS applications [C]//Proceedings of NAECON 2023—IEEE National Aerospace and Electronics Conference. Dayton, USA: IEEE, 2023: 300-303.
- [143] DOGAN O, UYSAL F, HOOGEBOOM P, et al. A low SWaP-C radar altimeter transceiver design for small satellites[C]//Proceedings of 2020 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS). Vancouver, Canada: IEEE, 2020: 1-5.
- [144] CARIS M, STANKO S, SOMMER R, et al. SAR-ape—Synthetic aperture radar for all weather penetrating UAV application[C]//Proceedings of 2013 14th International Radar Symposium (IRS). Dresden, Germany: IEEE, 2013: 41-46.
- [145] BARBARESCO F. Airport radar monitoring of wake vortex in all weather conditions[C]//Proceedings of the 7th European Radar Conference. Paris, France: IEEE, 2010: 85-88.
- [146] 易重辉. 基于深度学习的低空监视雷达目标检测的研究[D]. 成都: 四川大学, 2021.  
YI Chonghui. Research on target detection of low altitude surveillance radar based on deep learning[D]. Chengdu: Sichuan University, 2021.
- [147] 农翔宇. 结合深度学习与卡尔曼滤波算法的航空监视信息融合技术的研究与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.  
NONG Xiangyu. Research and implementation of aviation surveillance information fusion technology based on deep learning and Kalman filtering algorithm[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [148] KOTEGAWA T. Proof-of-concept airborne sense and avoid system with ACAS-Xu flight test[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2016, 31(9): 53-62.
- [149] HOLLAND J E, KOCHENDERFER M J, OLSON W A. Optimizing the next generation collision avoidance system for safe, suitable, and acceptable operational performance[J]. *Air Traffic Control Quarterly*, 2013, 21(3): 275-297.
- [150] 曲成华. 多元数据融合技术在低空领域监视中的应用研究[J]. *科技信息*, 2012(19): 74-76.  
QU Chenghua. Application research on the multisensor data fusion for low-altitude airspace surveillance [J]. *Science & Technology Information*, 2012(19): 74-76.
- [151] 吕德虎. 复杂场景感知与安全飞行技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.  
LYU Dehu. Complex scene perception and safe flight technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2023.
- [152] 邓美连. 低空目标跟踪方法的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.  
DENG Meilian. Research on low altitude target tracking method[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [153] 赵梦涛. 基于雷达与ESM的低空目标跟踪技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.  
ZHAO Mengtao. Low altitude target tracking technology based on radar and ESM[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.