

# 基于ADS-B与Remote ID的低空智能网无人机 监视性能分析

朱奕安, 何佳, 贾子晔, 吴启晖, 董超, 张磊

(南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京 211106)

**摘要:** 低空智能网作为新质生产力促进了低空经济的飞速发展,但无人机的广泛应用对空域监管提出了很高的要求。本文主要关注两种潜在无人机飞行监管技术应用于低空智能网的性能分析:广播式自动相关监视(Automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)和无人机远程识别(Remote identification, Remote ID)。首先,系统介绍了ADS-B和Remote ID的基本原理;然后,基于当前技术标准分析了两种技术的理论传输距离,并定义了定位精度评估方法。搭建了符合性能要求的ADS-B和Remote ID实验系统,通过实测信号强度估计实际传输距离,并测量了经纬度和高度的定位精度以及丢包率。通过实测数据分析首次全面评估了ADS-B和Remote ID在低空智能网中的实际应用效果。结果显示,ADS-B在传输距离和定位精度上优于Remote ID,而Remote ID在高度定位上更具优势;在通信稳定性方面,ADS-B能够为远距离提供稳定服务,Remote ID在近距离下表现良好。最后,展望了未来无人机监管技术的发展方向,围绕优化传输距离、覆盖范围、定位精度和丢包率等问题提出优化方向和解决方案。

**关键词:** 低空智能网;无人机监视技术;广播式自动相关监视;无人机远程识别;蓝牙;Wi-Fi

中图分类号: V1 文献标志码: A

## ADS-B and Remote ID Based Performance Analysis for UAV Surveillance in Low-Altitude Intelligent Networks

ZHU Yian, HE Jia, JIA Ziye, WU Qihui, DONG Chao, ZHANG Lei

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** The low-altitude intelligent network, as a new type of productivity, has facilitated the rapid development of the low-altitude economy. However, the widespread application of unmanned aerial vehicles (UAVs) has posed significant challenges for airspace regulation. This paper mainly focuses on the performance analysis of two potential UAV flight regulation technologies applied to the low-altitude intelligent network: Automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) and remote identification (Remote ID). Firstly, we systematically introduce the basic mechanisms of ADS-B and Remote ID. Then, based on current technical standards, theoretical transmission distances of these two technologies are analyzed, and methods for evaluating positioning accuracy are defined. We build ADS-B and Remote

**基金项目:** 国家自然科学基金(62301251);江苏省前沿引领技术基础研究专项基金(BK20222013);航空科学基金(2023Z071052007);东南大学移动通信全国重点实验室开放研究基金(2024D04)。

**收稿日期:** 2024-05-09; **修订日期:** 2024-07-16

ID experimental systems that meet performance requirements, estimate the actual transmission distances through measured signal strength, and measure the positioning accuracy of latitude, longitude, and altitude, as well as the packet loss rate. Through the analysis of the measured data, this paper comprehensively evaluates practical application effects of ADS-B and Remote ID in low-altitude intelligent network for the first time. Results show that ADS-B outperforms Remote ID in terms of transmission range and positioning accuracy, while Remote ID performs better in altitude positioning. In terms of communication stability, ADS-B provides stable reception over long distances, while Remote ID performs well in short-range scenarios. Finally, the future development directions of UAV regulation technology are discussed, and solutions for optimizing transmission distance, coverage range, positioning accuracy, and packet loss rate are proposed.

**Key words:** low-altitude intelligent network; UAV surveillance technology; automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B); UAV remote identification (Remote ID); bluetooth; Wi-Fi

## 引 言

近年来,低空物联网作为一种新兴的智能网络体系架构,依托空天地海网络基础设施建设,正在促进低空经济的飞速发展。低空物联网主要运营于低空空域内(通常海拔3 km以下),包括地面移动用户和基础设施组成的地面网络、空中平台以及低轨卫星网络。这一网络体系的构建实现了“人-机-物”三元融合智能互联,是推动第五代通信系统(Fifth generation of communication system, 5G)向低空空间拓展和延伸的重要基础设施<sup>[1-2]</sup>。低空物联网对解决地面基础设施部署困难、减轻移动网络拥塞、增强用户服务覆盖范围及促进低空经济发展具有重要意义。

然而,低空物联网的发展面临诸多挑战。随着作为低空物联网重要组成部分的无人机数量的日益增长,其移动性和动态性带来了应用范围的多样性,进而引发了空域安全、频谱安全和数据安全等多重重大安全隐患<sup>[3]</sup>。这些安全问题制约了低空物联网的广泛应用和经济社会的转型发展。因此,需要综合安全管控措施,确保低空物联网的安全和可靠运行。

各国航空业正积极促使无人航空器安全融入国家空域系统:中国已于2024年1月全面启用民用无人驾驶航空器综合管理平台(UOM)<sup>[4]</sup>,规定所有无人机和操作人员必须在UOM上注册后才能飞行;美国联邦航空局(Federal aviation administration, FAA)计划于2024年3月全面执行其发布的无人机远程识别(Remote identification, Remote ID)标准<sup>[5]</sup>,涵盖飞行操作登记、产品设计与制造,以及无人机监控的规范化要求。

在低空物联网的应用场景中,监视技术扮演着至关重要的角色。有效的监视技术能够实时跟踪无人机的飞行状态,确保空域安全,提升低空交通管理的效率<sup>[6]</sup>。目前的无人机监管主要分为两类:基于第四代移动通信技术(Fourth generation of communication system, 4G)/5G网络的网络监视和无线电系统的广播式监视。其中,网络监视依赖于地面网络,其范围受限于基站覆盖,且受网络稳定性影响大;相比之下,广播式监控利用无人机装载的无线电设备定期向地面站发送飞行状态信息,实现对无人机的实时监控。这种手段具有延迟低、覆盖面广和通用性强的优点,在基础设施不完善、通信质量差的地区尤为实用。

国内外研究主要关注两种无人机广播监控技术:广播式自动相关监视(Automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)是专为民航设计的高级监控系统<sup>[7]</sup>,在1 090 MHz频段工作,利用卫星导航定位并自动向其他飞行器和地面站发送飞行数据<sup>[8-9]</sup>。在国际上,ADS-B已经广泛应用于民航领

域,通过1 090 MHz频段进行广播,实现了对飞行器的定位、监控和防撞等功能。FAA和欧洲航空安全局已经将ADS-B作为民航飞行器的标准监视技术,并逐步向无人机领域推广。另一种是基于Remote ID标准<sup>[10]</sup>的广播方法(简称广播式Remote ID),通过无人机负载蓝牙模块和Wi-Fi模块,利用信标技术向周围设备广播无人机的标识、位置、高度、速度以及控制站位置等关键信息。这一技术旨在提高空中交通管理系统的安全性和有效性,确保飞行器能够被准确地识别和追踪。Remote ID作为一种新兴的无人机监视标准,近年来在欧美逐渐得到应用和推广。美国FAA已经发布了Remote ID的相关法规,要求无人机在飞行时必须广播识别信息,以便于监管部门和公众对无人机进行识别和监控。这些措施显著提升了无人机运行的安全性和可监管性。

随着低空物联网概念的引入,无人机监管将更加智能化。通过将无人机与物联网技术结合,可以构建一个低空通信网络,无人机在飞行中能实时与地面系统交换数据,实现远程监控和自主管理。这不仅有助于提高监管效率,还能支持无人机在物流配送、农业监测和环境监测等领域的广泛应用,推动无人机技术的创新和发展。尽管ADS-B和Remote ID在国内尚未被相关监管标准采用,但它们作为潜在的无人机监视方案具有很大的可行性。本研究旨在探讨并评估这两种技术在国内无人机飞行监管中的应用可行性和性能,填补国内研究的空白,并为进一步的研究提供基础。

国内外的研究者正在不断探索和优化这些技术,以适应无人机技术的快速发展,确保无人机在安全、高效的前提下,更好地服务于社会各个领域。Zhu等<sup>[11]</sup>针对原始ADS-B数据中噪声影响无人机追踪精度的问题,提出了一种基于ADS-B数据的无人机航迹追踪方法;Liao等<sup>[12]</sup>研究了ADS-B设备对民航运行的影响,分析了不同距离下民用飞机的丢包情况以及搭载ADS-B的无人机对民航数据更新的影响;文献[13]基于三维泊松点过程,利用随机几何理论,建立了无人机与民用飞机共存模型,并分析了ADS-B监测系统的干扰性能;文献[14]分析了行业应用、发射设备性能及数据安全等方面对ADS-B数据质量的需求,在此基础上构建了ADS-B数据质量评估指标体系,提出了基于集成学习自适应提升算法的新型数据质量评估方法;文献[15]则针对ADS-B报文数据特点,采用深度学习的Seq2seq模型对ADS-B报文数据进行重构,通过重构误差来检测异常,并对数据进行特征扩展,使模型能更好地捕捉数据的时间依赖性;为实现ADS-B航迹与雷达航迹的高质量融合,必须对ADS-B航迹和雷达航迹数据质量进行分析,文献[16]在分析实际ADS-B航迹数据的基础上,提出以航路为参考基准验证ADS-B航迹数据精度及完好性的方法;Raheb等<sup>[17]</sup>通过数据包传输率(Packet delivery ratio, PDR)评估广播式Remote ID的通信质量,研究影响PDR的因素,特别是对无人机碰撞防范中安全距离设定的影响;Vinoogradov和Pollin<sup>[18]</sup>建议在Remote ID消息中加入额外信息,如机身尺寸、定位精度和无线通信质量,仿真结果证明了这有助于提升空域容量并缩短安全飞行间距;Alkadi和Shoufan<sup>[19]</sup>提出了一种基于区块链的分布式无人机交通管理系统,利用广播式Remote ID支持群体智能感知,实现对无人机的分散空域管理和规则监管;美国联邦航空管理局开发了一套适用于小型无人机的监测与避撞系统<sup>[20]</sup>,能与ADS-B、Remote ID和机载雷达等监控源无缝集成,用于监控合作和非合作的入侵者。

本文的贡献在于首次系统地提出并评估了ADS-B与Remote ID两种技术在低空物联网无人机飞行监管中的应用及性能表现。首先,从报文格式和传输协议方面详细介绍了ADS-B与Remote ID技术,并对这两种技术进行了对比分析。基于技术标准,分析了两种技术的理论传输距离,并定义了定位精度的评估方法。搭建了符合性能要求的ADS-B和Remote ID实验系统,通过实测数据对这两种技术在通信性能、覆盖范围和定位精度等关键监视技术指标上的差异进行了对比分析,提供了无人机监视技术的选择和性能优化的科学依据,填补了国内在这一领域的研究空白。通过实验分析,发现ADS-B和Remote ID在不同应用场景下各有优劣。基于此,提出了初步的应用建议,为无人机监管技术的选择和性能优化提供了科学依据。最后,围绕无人机监视技术的关键性能指标讨论了潜在的优化方向和解

决方案。本文希望能为低空智联网的发展提供更为坚实的技术支持,确保无人机技术在低空智联网中发挥更大的作用。

## 1 ADS-B 基本原理

ADS-B 是一种航空领域常用的监视技术,它通过飞机上搭载的 ADS-B 设备自动地向地面站和其他飞机广播飞机的位置、速度等信息,集通信和监视技术为一体,具有高精度、低成本和抗干扰等优点,能够在空域范围内对复杂异构的飞行器进行全天时全天候的监视和管理<sup>[2,21]</sup>。ADS-B 的主要目的是提高空中交通的安全性和效率,使飞行员和空中交通管制人员能够实时监视周围飞机的位置和运动状态。ADS-B 技术被广泛应用于民用航空、军事航空和其他航空领域,特别是用于空中交通管制,在无法部署航管雷达的大陆地区,可以提供优于雷达间隔标准的虚拟雷达管制服务;在雷达覆盖地区,即使不增加雷达设备也能以较低成本增强雷达系统监视能力,提高航路和终端区的飞行容量,已成为一种重要的航空监视和管理工具<sup>[22]</sup>。

### 1.1 ADS-B 系统组成

ADS-B 系统是一个集通信与监视于一体的信息系统,主要由信息源、信息传输通道和信息处理与显示 3 部分组成。ADS-B 系统获取并传送的信息主要包括以下内容<sup>[23-24]</sup>:

- (1) 飞机位置信息:包括飞机的经度、纬度和高度信息,以及飞机在空间中的位置;
- (2) 时间信息:指示信息传输的时间戳,通常与 GPS 时间同步;
- (3) 飞机身份信息:包括飞机的识别号码或注册号码,用于唯一标识飞机;
- (4) 飞机状态信息:可能包括飞机的航向、空速和垂直速度等状态信息;
- (5) 附加信息:可能包括飞机的航路、航迹角、航线拐点、冲突告警信息、飞行员输入信息和气象信息等。

ADS-B 系统获取的各类信息主要来源于飞机上的多种机载设备<sup>[25-26]</sup>。其中,GPS 接收器用于确定飞机的位置、速度和航向等信息;飞行管理系统(Flight management system, FMS)提供飞行计划和航线信息,包括航路、航迹角和航线拐点等;气象雷达提供飞机周围的气象信息,如风速、风向和气温等;机载雷达提供飞机周围的目标信息,用于辅助飞行员了解周围环境和可能的冲突情况;另外,还有其他传感器,如气压计、加速度计等,用于获取飞机的高度、垂直速度等状态信息。这些机载设备共同工作,将获取的信息传输给 ADS-B 系统,从而实现了对飞机周围态势的实时监视和管理。ADS-B 的信息传输通道主要通过无线电频段进行。具体来说,ADS-B 使用 1 090 MHz 频率进行数据传输。飞机上的 ADS-B 设备会周期性地广播包含飞机位置、速度及航向等信息的数据包,这些数据包通过 1 090 MHz 频率发送出去。地面站和其他飞机上也装有 ADS-B 接收器,可以接收到这些广播的飞机信息。通过这种方式,ADS-B 实现了飞机位置和状态的实时监视和管理<sup>[27]</sup>。

ADS-B 的信息处理与显示部分通常由机舱综合信息显示器和相关系统组成。机舱综合信息显示器接收并处理来自其他飞机和地面的 ADS-B 信息、机载雷达信息和导航信息等,为飞行员提供飞机周围的态势信息和其他附加信息,如冲突告警信息、避碰策略和气象信息等。这些信息可以帮助飞行员更好地了解周围环境,并做出相应的飞行决策。同时,相关系统接口还可以将 ADS-B 信息传输给飞机的其他系统,如自动驾驶仪或飞行管理系统,以实现更全面的飞行监视和管理。

### 1.2 ADS-B 技术分类

按照航空器报文广播的方向,ADS-B 技术可以分为 ADS-B IN 和 ADS-B OUT 两种类型<sup>[12]</sup>。ADS-B IN 是指接收周围飞机通过 ADS-B OUT 发送的广播信息,或者接收地面站发送的空中交通态

势信息广播(Traffic information situation-broadcast, TIS-B)和飞行服务信息广播(Flight information service-broadcast, FIS-B)。这些信息可以在驾驶舱中显示,使飞行员能够识别周围空域的气象信息和附近的交通态势,有助于飞行员提前做出正确的决策,避免危险,提高飞行效率和安全性,缩小空中飞行器间的间隔。ADS-B OUT是指航空器周期性向外广播飞机的矢量状态信息以及其他附加信息。附近安装了ADS-B机载设备的航空器和地面站可以接收这些广播信息,从而监视空中交通状况,实现类似雷达监视的功能。ADS-B OUT作为一项成熟技术,已经得到国内外的广泛应用。ADS-B可以为飞行员建立空中交通状况情景,帮助飞行员做出正确的飞行决策,还可实现飞行员对指定飞行间隔的保持,减轻空中交通指挥压力。

### 1.3 ADS-B报文结构

ADS-B为S型扩展数据包,数据帧长112位,由5个主要部分组成,具体如图1所示。

DF (5 bits)	CA (3 bits)	ICAO 24 bits	ME (56 bits)	PI (24 bits)
----------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------

图1 ADS-B S型扩展数据包

Fig.1 ADS-B S-mode extended packet

民用飞机的ADS-B消息下行链接格式(Downlink format, DF)为17开始。它对应于前5位的10001二进制文件;第6~8位表示应答机的能力(Transponder capability, CA);之后,包括24位应答机代码,也称为国际民航组织飞行身份标识(International civil aviation organization, ICAO);最后两个部分是56位有效负载(Message extended squitter, ME)和24位奇偶校验(Parity/interrogator ID, PI),其具体架构如表1所示<sup>[28]</sup>。

表1 ADS-B报文架构

Table 1 Structure of ADS-B frame

位置	比特数/bits	缩写	字段含义
1~5	5	DF	下行链路格式
6~8	3	CA	应答机能力
9~32	24	ICAO	国际民航组织飞机身份标识
33~88	56	ME	有效负载信息
(33~37)	(5)	(TC)	(类型码)
89~112	24	PI	奇偶校验码

值得注意的是,从S模式应答机发送的ADS-B扩展电文数据链使用下行格式DF=17。而非基于应答机的ADS-B发送子系统和TIS-B发送设备使用下行格式DF=18。通过使用下行格式18而不是17,ADS-B/TIS-B接收子系统将知道该消息来自无法被询问的设备。

#### (1) 应答机能力(CA)

ADS-B消息的第二个字段由3个表示应答机级别的bit位组成。功能值可以是介于0到7之间的十进制值,这些值的定义如表2所示。

#### (2) 国际民航组织飞行身份识别(ICAO)

每个ADS-B消息中,发送方飞机可以使用根据ICAO规定分配的S模式应答机代码进行识别<sup>[29]</sup>。S模式应答机代码通常也称为ICAO

表2 S模式应答机能力

Table 2 CA of mode S

CA	功能定义
0	地面应答机功能
1~3	预留未使用
4	空中应答机功能
5	地面应答机功能、二次雷达功能
6	地面应答机功能、二次雷达功能和模拟应答机功能
7	地面应答器功能、二次雷达、模拟应答器功能和拖曳绳索功能

地址或十六进制代码。ICAO地址在二进制表示中位于第9到第32位(或十六进制表示中的第3到第8位)。每架飞机的S模式应答机被分配了唯一的ICAO地址,该地址用作每架飞机的唯一标识符。原则上,该代码在飞机使用寿命内不会改变。然而,可以重新编程应答机,使消息包含不同的地址。已观察到一些军用飞机以及一些选择加入FAA隐私ICAO地址系统的私人飞机采取了这种做法<sup>[30]</sup>。

### (3) ADS-B消息类型

为了确定ADS-B消息中包含的信息类型,需要查看该消息的类型代码。类型代码位于第33~37位(或ME段的前5位)。表3显示了每个类型代码及其在ME段中包含的信息之间的关系。

## 2 广播式 Remote ID 基本原理

广播式 Remote ID 技术为地面站在无人机飞行期间提供身份识别和位置信息,接收者可通过接收信号获取(图2)。通过集成飞控系统或在无人机上附加模块来满足 Remote ID 性能需求,要求无人机在起飞至降落全程广播 Remote ID 信息,如唯一标识、位置、高度及控制站或起飞点坐标。广播式 Remote ID 采用公开广播的方式,相关公众可通过应用程序接收该广播,考虑到传输协议与公众普遍拥有的手持设备(如手机和平板电脑)之间的兼容性,具体来说使用蓝牙和 Wi-Fi 传输协议<sup>[10]</sup>。

蓝牙和 Wi-Fi 这两种传输协议可以连续广播消息以通知其他设备。这些广播通常允许其他设备发现并建立与其关联设备的连接,但广播本身也可以携带有效载荷。广播式 Remote ID 将数据封装在蓝牙或 Wi-Fi 广播帧中,相关方使用手持设备接收 Remote ID 数据时,无需建立连接,只需要接收和处理广播即可。

### 2.1 广播式 Remote ID 消息格式

广播式 Remote ID 通过无线通信技术,即蓝牙和 Wi-Fi 信标广告,向周围环境广播无人机身份和位置信息。Remote ID 消息被设计成轻量级的广播数据包,便于高效传输。消息分为多种类型,每种类型承载不同信息,具体类型如表4所示。

(1)基本 ID 消息(0x0)提供无人机类型和唯一标识符。这是一种静态消息,包含无人机的序列号、注册 ID 或其他形式的唯一识别码。

(2)位置/矢量消息(0x1)是一种动态消息,提供无人机的当前位置、高度、方向和速度。此类信息对于监测无人机的飞行状态和确保空域安全至关重要。

(3)认证消息(0x2)提供一种验证无人机身份的机制。这类可选消息包含数字签名或其他形式的认证数据,以证明无人机的身份。

(4)自我声明消息(0x3)允许远程操作员选择性地声明其身份或飞行意图。这是一种静态周期性的可选消息,可用于减少无人机在特定区域或方式飞行时的潜在威胁感知。

表3 ADS-B消息类型码及其含义  
Table 3 Type code and content of ADS-B message

类型码	数据帧内容
1~4	飞机识别
5~8	地面位置
9~18	空中位置(带气压高度)
19	空中速度
20~22	空中位置(带 GNSS 高度)
23~27	保留未使用
28	飞机状态
29	目标状态和状态信息
31	飞机操作状态



图2 广播式 Remote ID 系统概念

Fig.2 Broadcast Remote ID overview

表4 Remote ID消息概览  
Table 4 Summary of Remote ID message

消息编号	消息名称
0x0	基本 ID 消息
0x1	位置/矢量消息
0x2	认证消息
0x3	自我声明消息
0x4	系统消息
0x5	操作员 ID 消息
0xF	消息包

(5)系统消息(0x4)提供关于无人机系统的一般信息,如远程操作员的位置和飞行区域。这是另一种可选消息,用于传递飞行任务的相关信息。

(6)操作员 ID 消息(0x5)可包含由民航局发行的操作员 ID。这是一种静态周期性的可选消息,旨在提供操作员的官方身份认证。

(7)Remote ID 消息可以单独发送,也可以打包成消息包(0xF)一起发送,特别是在使用能够发送大型数据帧的传输技术(如 Bluetooth 5 或 Wi-Fi)时,这种打包方法允许在单次传输中发送多种类型的消息,提高了数据传输的效率。

除消息包类型,上述 Remote ID 消息严格遵守 25 字节的长度要求进行编码,以保证信息的一致性和可靠性。具体格式为一个 1 字节的数据头部和 24 字节的数据部分组成。头部用于指明消息类型,而数据部分则根据消息类型携带具体的信息内容。广播式 Remote ID 消息格式为无人机的身份验证和监控提供了一个标准化的框架,确保了无人机和其他空域用户的安全共存。通过实施这些消息格式,无人机操作者可以在遵守相关法规的同时,有效地传递飞行相关信息。

### 2.2 广播式 Remote ID 传输协议

蓝牙低功耗(Bluetooth low energy, BLE)在蓝牙 4.0 核心规范中引入<sup>[31]</sup>,与传统蓝牙传输协议相比,调整了频带划分、调制方式和发射功率,以实现低能耗、低延迟和广播功能。蓝牙 5.0(及后续版本)对 BLE 4.x 的广播机制进行了进一步优化,提升了广播负载处理能力<sup>[32]</sup>。Remote ID 广播系统利用了 BLE 4 和 BLE 5 两种蓝牙广播协议,以高效传输信息。

Wi-Fi 作为一种常见的无线通信技术,主要用于设备的局域网连接和互联网接入。在广播式 Remote ID 中,采用 Wi-Fi 邻域感知(Neighbor awareness network, NAN)和 Wi-Fi Beacon 两种传输协议。NAN 关注的是设备在无线网络中的位置感知<sup>[33]</sup>,而 Wi-Fi Beacon 则用于设备间的广播通信,两种协议之间具体差异主要体现在物理层传输方面。

#### (1) BLE 4

BLE 运行在 2.4 GHz 频段,频率范围为 2.400 至 2.483 5 GHz,拥有 40 个无线射频信道,每个信道带宽为 2 MHz。信道中心频率均匀分布,其中,信道 37、38 和 39(分别对应中心频率 2.479 0、2.481 0 和 2.483 0 GHz)被指定为广播信道,专为设备广播设计,以供其他设备侦听和定位。数据信道(信道 0 至 36)则用于连接建立和数据传输<sup>[34]</sup>。

在 BLE 4 中,为非特定节点设计了 3 个广播信道(37、38、39)进行无连接 Remote ID 消息的广播,如图 3 所示。为了增强可靠性,BLE 4 在这些信道上重复发送 3 次相同的消息。具体操作是,使用 ADV\_NONCONN\_IND 类型的协议数据单元(Protocol data unit, PDU)封装 Remote ID 信息,广播帧格式如图 4 所示。1 字节前导码标识编码方式,4 字节接入地址标明广播包数据类型,39 字节的 PDU 可承载最多 25 字节的 Remote ID 消息内容,3 字节循环冗余校验(Cyclic redundancy check, CRC)用于校验数据的准确性和完整性。值得注意的是,由于 BLE 4 的 PDU 最大数据负载限制为 31 字节,因此只能发送 0x0-0x6 类型的 25 字节 Re-



图 3 BLE 4 广播机制

Fig.3 BLE 4 broadcast mechanism

Preamble (1 Byte)	Access address (4 Bytes)	PDU (39 Bytes)	CRC (3 Bytes)
----------------------	-----------------------------	-------------------	------------------

图 4 BLE 4 广播帧

Fig.4 BLE 4 broadcast frame

remote ID 消息。BLE 4 应用非编码物理层,支持 1 Mbps 的数据传输速率<sup>[10]</sup>。

(2) BLE 5

BLE 5 广播方式相较于 BLE 4 在广播范围与数据载荷方面进行了提升。BLE 5 通过在编码物理层引入前向纠错(Forward error correction, FEC)编解码实现了传输距离的扩展,理论传输距离与 BLE 4 相比提升了 4 倍。在数据载荷扩展方面,BLE 5 通过改变信道使用方式实现了更大负载的无连接广播,允许传输最大 254 字节的广播数据。

如图 5 所示,BLE 5 通过在广播信道发送广播指针,指示接收机在特定数据信道接收实际信息。这种将实际数据卸载至数据信道进行传输的方式,被称为 BLE 5 扩展广播。BLE 5 的广播帧结构如图 6 所示。在广播阶段,BLE 5 使用 ADV\_EXT\_IND PDU 发送扩展广播指针包,其中包含辅助指针字段,提供了接收 Remote ID 消息的数据信道信息,如信道索引、时钟精度、发送时间和物理层参数。在数据信道上,BLE 5 发送 AUX\_ADV\_IND PDU,其包含实际的 Remote ID 消息,最大可容纳 254 字节,因此 BLE 5 能发送类型为 0xF 的 Remote ID 消息。在广播式 Remote ID 中,BLE 5 采用物理层编码,图 6 中的编码指示器(Coding indicator, CI)、TERM1 和 TERM2 字段是纠错编码相关开销字段,通过编码技术,在接收端对数据进行纠错有助于提升 BLE 5 的广播范围,但数据传输速率下降为 125 kb/s<sup>[35]</sup>。

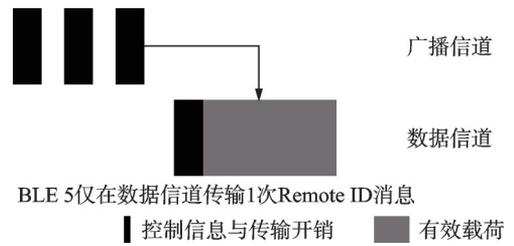


图 5 BLE 5 广播机制

Fig.5 BLE 5 broadcast mechanism

Preamble (1 Byte)	Access Address (4 Bytes)	CI (2 bits)	TERM1 (3 bits)	PDU (Variable)	CRC (3 Bytes)	TERM2 (3 bits)
----------------------	-----------------------------	----------------	-------------------	-------------------	------------------	-------------------

图 6 BLE 5 广播帧

Fig.6 BLE 5 broadcast frame

(3) Wi-Fi NAN

Wi-Fi NAN 作为一种支持邻近 Wi-Fi 设备快速交互的技术,已被主要 Wi-Fi 芯片制造商采纳。为了便于手持设备的交互,广播式 Remote ID 利用 NAN 标准定义的 NAN 服务发现帧(Service discovery frame, SDF)对 Remote ID 消息进行编码。如图 7 所示,NAN SDF 广播帧基于使用 IEEE 802.11 Wi-Fi 标准<sup>[36]</sup>的管理动作子类型帧结构,组织唯一标识符(Organizationally unique identifier, OUI)用于标识符合 Wi-Fi 联盟标准的 Wi-Fi 设备,Remote ID 消息通过服务描述符属性(Service descriptor attribute, SDA)中的服务信息字段封装,该字段最大可容纳 255 字节,因此可以发送类型为 0xF 的 Remote ID 消息,最多可封装 9 条 Remote ID 消息,服务描述符扩展属性(Service descriptor extension attribute, SDEA)用于携带用于服务发现的附加信息,帧校验序列(Frame check sequence, FCS)用于确保帧的完整性。根据 NAN 规范,在发送 NAN SDF 广播帧前,需要发送 NAN 同步广播帧,通过同步接收设备和 NAN 发送设备的时钟信息,实现接收时钟同步,其帧格式如图 8 所示,采用的是 IEEE 802.11 Wi-Fi 标准中的管理信标子类型编码结构<sup>[37]</sup>。

NAN SDF 广播帧与同步广播帧使用正交频分复用调制技术,数据传输速率 6 Mb/s,广播在 2.4 GHz 频段的信道 6(2.437 GHz)上运行,并可以选择工作在 5 GHz 频段的信道 149(5.745 GHz)上运行。

MAC hdr (variable)	Category (1 Byte)	Action (1 Byte)	OUI (3 Bytes)	OUI type (1 Byte)	NAN SDA (15+N×25)	NAN SDEA (4 Bytes)	FCS (4 Bytes)
-----------------------	----------------------	--------------------	------------------	----------------------	----------------------	-----------------------	------------------

图 7 NAN SDF 广播帧

Fig.7 NAN SDF broadcast frame

MAC hdr (variable)	Element ID (1 Byte)	Length (1 Byte)	OUI (3 Bytes)	OUI Type (1 Byte)	NAN attrs (21 Bytes)	FCS (4 Bytes)
-----------------------	------------------------	--------------------	------------------	----------------------	-------------------------	------------------

图8 NAN 同步广播帧

Fig.8 NAN synchronization broadcast frame

#### (4) Wi-Fi Beacon

广播式 Remote ID Wi-Fi Beacon 的传输机制利用 IEEE 802.11 标准中的管理信标子类型帧,并通过附加供应商特定的元素(Information element, IE)字段来广播 Remote ID 消息。信标帧的详细结构如图 9 所示。IE 字段的最大信息容量为 253 字节,足以容纳数据包类型为 0xF 的 Remote ID 消息。Wi-Fi Beacon 在两个频段工作,即 2.4 和 5 GHz。与 Wi-Fi NAN 不同,Wi-Fi Beacon 可以在 2.4 和 5 GHz 的任何信道上运行,其数据传输速率固定为 6 Mb/s<sup>[10]</sup>。

MAC hdr (variable)	Mandatory Beacon Info (17 Bytes)	Vendor specific IE (9+N×25)	FCS (4 Bytes)
-----------------------	-------------------------------------	--------------------------------	------------------

图9 Wi-Fi 信标帧

Fig.9 Wi-Fi beacon frame

### 3 监视技术对比分析与性能评估

#### 3.1 ADS-B 与 Remote ID 技术对比

前两节详细介绍了 ADS-B 和 Remote ID 的基本原理。ADS-B 主要用于民航和商业飞行器,依赖 1 090 MHz 频段进行广播,覆盖范围广且数据丰富;Remote ID 则是为了满足无人机的操作和管理需求,使用 2.4 和 5 GHz 频段,适合短距离低功耗的应用场景。为了更清晰地比较这两种技术,表 5 总结了它们的主要特征。

表5 ADS-B/Remote ID 技术对比

Table 5 Technology comparison between ADS-B and Remote ID

特征	ADS-B	Remote ID
主要用途	民航和商业飞行器	无人机操作和管理
广播频率	1 090 MHz 频段	2.4 与 5 GHz 频段
消息类型	定位、速度、航向、高度等	位置、识别信息、飞行状态等
覆盖范围	数百公里	1~2 km
功率需求	较高,需要较大功率实现远距离传输	较低,适合小型无人机
标准化组织	国际民航组织	美国联邦空管局
应用场景	商业航空	消费级、工业无人机
隐私保护	无数据加密,公开广播	可引入数据加密机制

如表 5 所示,ADS-B 和 Remote ID 在广播频率、覆盖范围、功率需求和隐私保护等方面存在显著差异。ADS-B 采用 1 090 MHz 频段,主要用于民航和商业飞行器,能够提供数百公里的广覆盖,这使其在高空和远距离飞行中具备优势<sup>[38-39]</sup>。然而,ADS-B 的高功率需求限制了其在小型无人机中的应用,因为小型无人机通常无法负担如此高的功率消耗。此外,ADS-B 广播的信息包括定位、速度、航向和高度等详细飞行数据,这些数据对于空中交通管理至关重要,能够帮助空中交通管制员实时监控和管理飞行器的动态<sup>[40]</sup>。

相比之下,Remote ID 使用 2.4 和 5 GHz 频段,这些频段适用于短距离通信,通常覆盖范围为 1~

2 km<sup>[41]</sup>。这种覆盖范围使得 Remote ID 更适合用于无人机操作和管理,尤其是在城市环境和近距离操作中。此外,Remote ID 的功率需求较低,非常适合小型无人机,特别是在重量和能耗受限的情况下。Remote ID 广播的信息包括位置、识别信息和飞行状态,这些信息足以满足无人机管理和操作的需求,特别是在需要快速识别和跟踪无人机的场景中。

在隐私保护方面,ADS-B 采用公开广播的方式,没有数据加密,容易受到监视和干扰<sup>[42]</sup>。这在某些场合可能带来隐私和安全隐患,尤其是在无人机领域,隐私保护显得尤为重要。而 Remote ID 则可以引入数据加密机制,增强隐私保护和数据安全<sup>[43]</sup>。这种加密机制可以有效防止数据被未经授权的第三方截获和篡改,特别适用于需要保护敏感信息的商业和工业无人机应用。

综合来看,ADS-B 由于其广覆盖和高精度的信息传输,更适用于大型无人机和高空长距离飞行的场景。然而,其高功率需求和缺乏隐私保护的特性,使其在小型无人机和低空短距离飞行中受到限制。相比之下,Remote ID 由于低功率需求和良好的隐私保护机制,更适用于小型无人机,特别是在城市环境和近距离操作中。因此,在无人机的监视和管理中,综合使用这两种技术可以充分发挥它们的优势,提高监视的全面性和效率。

### 3.2 ADS-B 与 Remote ID 传输距离分析

在 3.1 节中,综合比较了 ADS-B 和 Remote ID 技术,从广播频率、覆盖范围、功率需求和隐私保护等方面对两种技术进行了评估。尽管 ADS-B 在广覆盖数据传输方面具有优势,但 Remote ID 则更适用于小型无人机和近距离操作,其低功率需求和隐私保护机制使其在特定应用场景中具有独特的优势。本节将进一步探讨 ADS-B 和 Remote ID 的传输距离,以揭示它们在不同环境下的实际应用情况。通过理论仿真分析,评估两种技术的传输范围,为无人机的监视和管理提供更全面和深入的理解与指导。

在分析 ADS-B/Remote ID 传输范围时,首先考虑自由空间路径损耗模型。ADS-B 和 Remote ID 信号从无人机端发送,使用地面站进行接收时,得到接收信号强度的表达式为

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - 20 \cdot \lg d + 20 \cdot \lg(4\pi f/c) \quad (1)$$

式中: $P_{rx}$ 和 $P_{tx}$ 分别为接受和发射功率(dBm), $G_{tx}$ 、 $G_{rx}$ 分别为发射与接收天线增益(dBi), $d$ 为传输距离(m), $f$ 为信号工作频率(Hz)。

根据民航领域 ADS-B 发射性能要求<sup>[16]</sup>和 Remote ID 标准,ADS-B 和广播式 Remote ID 设定了不同的发射功率,分别为 45 和 20 dBm。假设使用理想全向天线,发射和接收端的增益均为 0 dBi。为了评估通信距离,采用了通用的接收灵敏度阈值。对于 ADS-B 系统,设定的接收灵敏度为 -80 dBm。而对于其他技术,如 BLE 4、BLE 5 和 Wi-Fi,分别设定为 -90、-100 和 -95 dBm 的接收灵敏度。这些阈值将在后续的性能比较和距离计算中起到关键作用。

在不考虑障碍物阻挡引起的阴影衰落以及信号发射折射等造成的多径效应下,使用式(1)可得到不同距离下 ADS-B 与 Remote ID 的接收功率,结果如图 10 所示。从

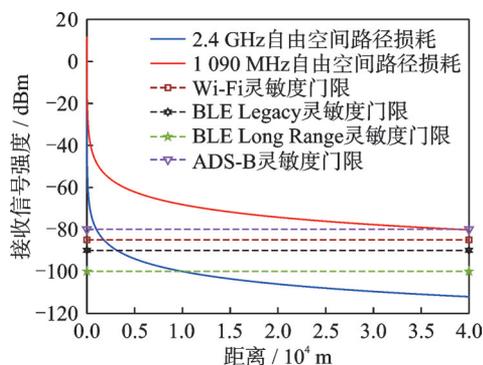


图 10 ADS-B/Remote ID 传输距离

Fig.10 ADS-B/Remote ID transmission range

图 10 可以看出,在 1090 MHz 频段工作的 ADS-B 在自由空间下的传输范围可达 39 km,对于广播式 Remote ID,使用 BLE 4 进行广播时的传输范围为 3.1 km,使用 BLE 5 进行广播时的传输范围为 9.9 km,使用 Wi-Fi 时的传输距离为 5.5 km。可以看出,ADS-B 系统具有较大的传输范围,这使得 ADS-B 系统在民航领域中被广泛应用,主要用于飞行器的定位、监控和防撞等;Remote ID 使用的无线通信技术功耗

低、传输范围小,通常用于家居智能等物联网场景。总体而言,ADS-B 系统适合对空域内具有长距离飞行能力的中大型无人机进行监视识别,而 Remote ID 可以帮助监测在特定区域中活动的无人机。

### 3.3 ADS-B 与 Remote ID 定位精度评估

除了覆盖范围之外,定位精度是评估无人机监视与管理系统的另一个关键指标。在实际应用中,准确的定位数据对于航空安全、飞行任务效率和空中交通管制至关重要。因此,本节定义了用于评估 ADS-B 与广播式 Remote ID 目标定位数据精度的评估方法。具体而言,通过设置无人机航迹悬停点,并在悬停点处广播大量定位数据,以测算不同传输手段的定位精度。无人机飞控软件将预设飞行测试航迹,并设置一系列航迹悬停点。在飞行过程中,无人机同时搭载 ADS-B 与 Remote ID,记录两种技术监测下的无人机飞行航迹。通过比较悬停点的实际位置与预设航迹数据,评估 ADS-B 与 Remote ID 的定位精度。

设  $P_i$  表示第  $i$  个悬停点位置矢量,  $O_i$  表示预设悬停点位置矢量。考虑 ADS-B 与 Remote ID 均传输无人机在大地坐标系下的经纬度定位信息,使用 Haversine 公式<sup>[44]</sup>计算定位误差(m)

$$\begin{cases} d_i = 2000r \arcsin\left(\sqrt{\sin^2 \Delta_i^{\text{Lat}} + \cos P_i^{\text{Lat}} \cos O_i^{\text{Lat}} \sin^2 \Delta_i^{\text{Lon}}}\right) \\ \Delta_i^{\text{Lat}} = \frac{P_i^{\text{Lon}} - O_i^{\text{Lon}}}{2} \\ \Delta_i^{\text{Lon}} = \frac{P_i^{\text{Lat}} - O_i^{\text{Lat}}}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $d_i$  表示定位误差,即  $P_i$  与  $O_i$  之间的距离,  $P_i^{\text{Lat}}$  与  $P_i^{\text{Lon}}$  分别表示悬停点  $i$  的经、纬度坐标,  $O_i^{\text{Lat}}$  与  $O_i^{\text{Lon}}$  则分别表示悬停点  $i$  预设的经、纬度坐标,  $r$  为地球半径。

飞行高度精确度直接关系到航空安全、飞行任务效率与空中交管效能,在无人机监管方面具有重要意义。因此,评估 ADS-B 与 Remote ID 传输目标数据的高度精度十分重要。高度精度可通过高度误差  $h_i$  来定义,即

$$h_i = |P_i^{\text{Hgt}} - O_i^{\text{Hgt}}| \quad (3)$$

式中  $P_i^{\text{Hgt}}$  和  $O_i^{\text{Hgt}}$  分别表示悬停点  $i$  的高度坐标以及预设高度坐标。

通过上述评估方法,可以量化 ADS-B 与 Remote ID 在不同条件下的定位精度,为后续章节中进行的实验对比提供理论基础。在第 4 节中,基于此方法进行实际测试,进一步验证和比较两种技术在定位精度方面的表现。这将为无人机监视与管理系统的选择和应用提供更加全面的依据。

## 4 监视技术性能对比实验与分析

### 4.1 ADS-B 实验系统搭建

在搭建的 ADS-B 实验系统中(图 11),发射端选用了一款大功率无人或通用航空器适用的 ADS-B 发射机。它配备 GPS/BDS 定位模块获取位置信息,并通过 RF 发射天线发送信号,功率稳定在  $46 \pm 1$  dBm。接收端采用树莓派 4 Model B 和 RTL-SDR 电视棒,专门用于接收 1 090 MHz 的 ADS-B 信息。数据通过 USB 2.0/3.0 传输到树莓派,然后由接收程序解码并存储。为了提升接收质量,使用高增益(18 dBi)接收天线来增强信号接收灵敏度和覆盖范围。



图 11 ADS-B 收发系统

Fig.11 ADS-B measured transceiver system

## 4.2 Remote ID 实验系统搭建

采用符合国际标准的广播式 Remote ID 收发设备搭建 Remote ID 实验系统,如图 12 所示,包括高性能接收机 Drone Scout ds230。设备采用四核 Cortex-A53 ARM CPU (1.8 GHz) 和 2 GB RAM/8 GB eMMC 闪存,确保了强大的数据处理能力和充足的存储空间;ds230 配备 1 个支持 BLE 4.0 和 BLE 5.0 的 Bluetooth 模块,以及 2 个覆盖 2.4、5.2 和 5.8 GHz 的 Wi-Fi 模块,其高灵敏度(BLE 4 为  $-97$  dBm, BLE 5 为  $-105$  dBm, Wi-Fi  $-85$  dBm) 确保远距离信号接收;对于发射端,使用 Drone Beacon db120,它兼容各种 Remote ID 协议,包括 BLE 4/5、WLAN NAN 2.4 GHz 和 WLAN Beacon 2.4 GHz;db120 配备全向天线(0 dBi 增益)和  $+18$  dBm 发射功率,确保信号覆盖广泛且稳定,同时内置 GPS 模块用于定位。



图 12 Remote ID 收发系统

Fig.12 Remote ID measured transceiver system

## 4.3 传输距离测试结果与分析

图 13 显示了在不同传输距离下实测的 ADS-B 接收信号强度,可见随着距离的增加,接收信号强度呈下降趋势。为了评估 ADS-B 系统的实际传输范围,结合对数正态路径损耗模型分析实测数据,考虑了多径效应和阴影衰落等环境因素。具体为:分别在 1、50、100 和 200 m 处测量接收信号强度作为实测数据,基于这些实测数据,使用路径损耗模型预测得到更远距离下的 ADS-B 信号强度,结果如图 14 所示。根据 ADS-B 接收灵敏度  $-80$  dBm,估计出实验 ADS-B 系统的最远传输距离为 55 175 m。

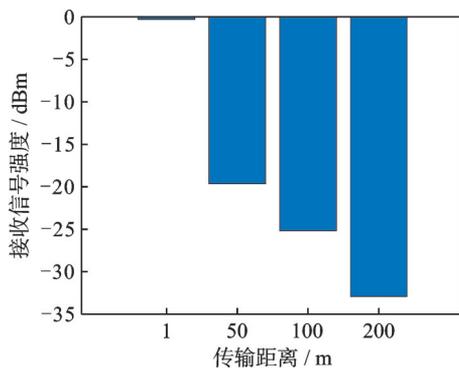


图 13 ADS-B 接收信号强度

Fig.13 ADS-B measured transmission range

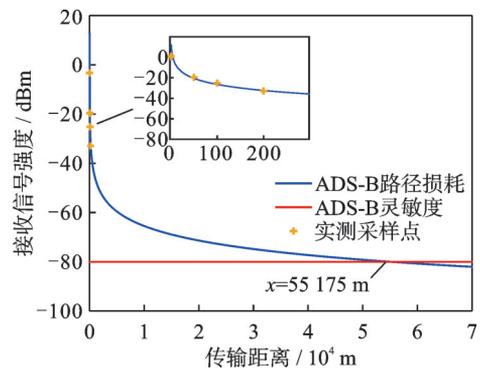


图 14 ADS-B 传输距离估计

Fig.14 ADS-B transmission range estimation

在测试 Remote ID 信号的接收性能时,保持发射模块的功率为 18 dBm。实验设置在 1、50 和 100 m 的距离记录并平均化接收信号强度。测试结果显示,随着距离的增加(图 15),接收信号强度明显减弱,这是由于信号在传播过程中经历路径损耗。值得注意的是,尽管使用了不同的广播技术(BLE 4/5、WLAN NAN 2.4 GHz、WLAN Beacon 2.4 GHz),在相同距离内,信号强度的下降趋势大致相同。这是因为所有技术都工作在 2.4 GHz 频段,主要影响因素是路径损耗,而非技术本身的特性。

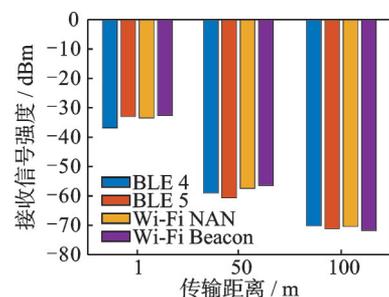


图 15 Remote ID 接收信号强度

Fig.15 Remote ID receive signal strength

评估 Remote ID 系统的实际传输范围,结合对数正态路径损耗模型,分析实际测试数据,结果如图 16 所示。根据 Drone Scout ds230 接收机的规格,其接收灵敏度如下:BLE 4 为  $-85$  dBm, BLE 5 为  $-97$  dBm, Wi-Fi 为  $-105$  dBm。通过这些数据,估计出 Remote ID 实验系统的实际传输范围: BLE 4 技术的最大有效距离为  $330$  m, Wi-Fi 技术的最大距离为  $1435$  m,而 BLE 5 技术的最大距离则为  $3740$  m。图 16 反映了各种技术在实际环境中的性能表现。

#### 4.4 定位精度测试结果与分析

测试 ADS-B 与 Remote ID 监视无人机轨迹定位精度,实验场地为南京航空航天大学将军路校区东区操场。无人机同时装载 ADS-B 和 Remote ID 发射机,测试数据发送正常。使用 Mission Planner 地面站规划飞行路径,设定航点和悬停点。飞行中,无人机实时广播 ADS-B 和 Remote ID 数据并记录。图 17 展示了规划航迹与实际由 ADS-B/Remote ID 监测的轨迹,无人机从操场右上角出发,绕内圈一圈后返回原点,形成封闭矩形航线。

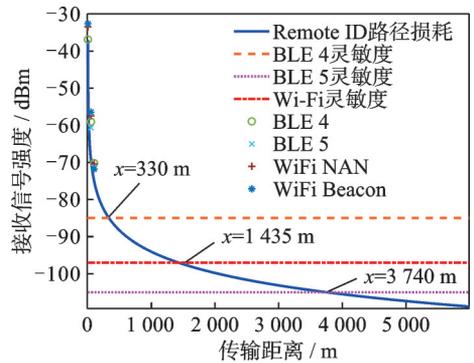


图 16 Remote ID 传输距离估计

Fig.16 Remote ID transmission range estimation

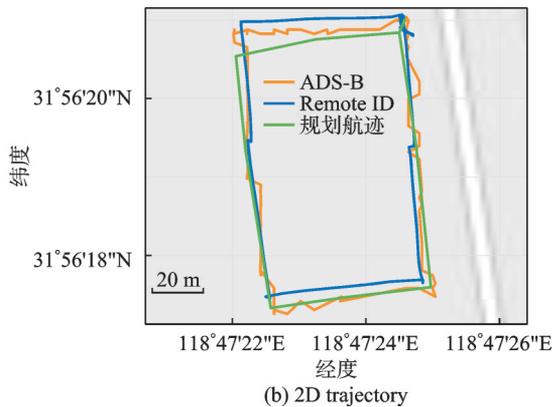
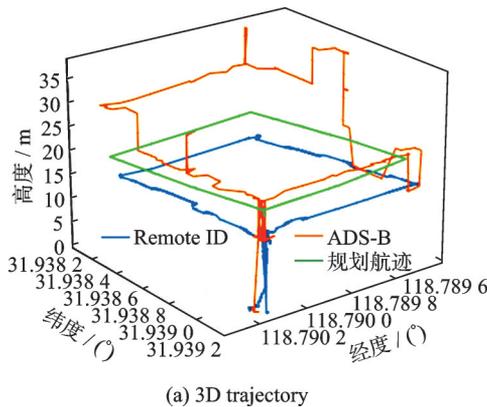


图 17 ADS-B/Remote ID 监视无人机航迹

Fig.17 UAV trajectories by ADS-B/ Remote ID surveillance

对收集的航迹数据进行处理,筛选出 6 个无人机悬停阶段的报文信息。对每个悬停点的经纬度坐标取平均值,然后利用式(3)计算定位误差,结果如图 18 所示。对比显示,使用 ADS-B 进行定位的悬停点精度普遍优于基于广播的 Remote ID。具体数据表明,ADS-B 在 6 个悬停点的平均定位误差为  $3.435$  m,而 Remote ID 的平均误差为  $5.95$  m。

图 19 展示了高度精度的统计分析。结果显示,无论在哪个悬停点,Remote ID 的高度定位精度普遍优于 ADS-B。具体来说,Remote ID 在 6 个悬停点的平均高度误差为  $4.79$  m,而 ADS-B 的平均误差为  $8.26$  m。原因在于,Remote ID 的设计考虑到无人机体积小、灵活性强,其高度信息的最小分辨率可达  $1$  m,而 ADS-B 主要针对民航客机,其最小分辨率高达

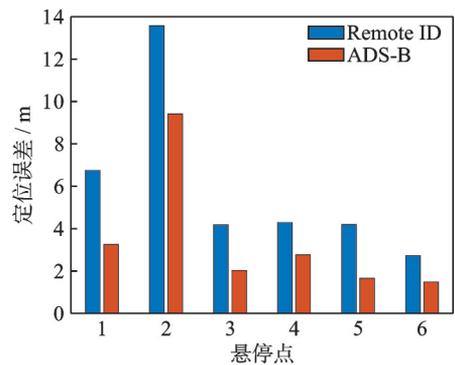


图 18 ADS-B/Remote ID 定位精度对比

Fig.18 Location accuracy comparison between ADS-B and Remote ID

7.62 m。因此,对于无人机这种对精细定位有需求的设备,Remote ID 提供了更优的高度信息。

#### 4.5 丢包率测试结果与分析

在评估无人机监控系统的性能时,丢包率是衡量数据传输质量的重要指标。定位信息数据包,包含位置和高度等关键信息,一旦丢包,接收端可能无法实时跟踪飞行状态。实验中,对比了 ADS-B 和 Remote ID 在不同传输方式下的表现。

图 20 展示了 ADS-B 在不同传输距离下的数据包接收率。结果显示,ADS-B 在短距离表现出高可靠性,1 和 50 m 内的接收率均为 100%,确保了数据在短距离内的稳定传输。随着距离的增加,接收率在 100 和 200 m 分别降至 94.286% 和 93.333%。ADS-B 的优势在于其使用 1 090 MHz 频段,具有优良的传播性能,不易受障碍物干扰。此外,ADS-B 采用时分多址技术,减少了信号冲突,提高了数据传输的可靠性。

如图 21 所示,Remote ID 在 1 m 范围内,BLE 4、BLE 5 和 Wi-Fi Beacon 的传包率均达到 100%,显示了它们在短距离内的稳定和高可靠性。然而,Wi-Fi NAN 在同样距离下的传包率仅为 65.17%,因为 Wi-Fi NAN 在 2.4 GHz 频段仅在 Wi-Fi 信道 6 广播,而在 Wi-Fi 接收的扫描机制中,接收机需要在多个接收频道上扫描,从而导致了接收效率的降低。

随着距离增加,BLE 4 和 BLE 5 在 50 和 100 m 的传包率依然保持较高水平,Wi-Fi Beacon 的传包率分别降至 78.9% 和 62.23%,Wi-Fi NAN 则更低,分别为 43.76% 和 36.8%。这表明,对于广播式 Remote ID,BLE 广播技术在数据包传输成功率上性能更佳,主要由于其成熟的广播机制和更有效的信道管理。因此,在对高可靠性有严格要求的 Remote ID 应用场景中,选择蓝牙广播技术更为合适,因为它能更有效地利用信道资源,减少数据包丢失,确保飞行状态的实时追踪。

相比之下,Remote ID 在 2.4 和 5 GHz 频段,由于与 Wi-Fi 和蓝牙等设备共用,可能面临更多干扰。因此,在长距离无人机监控场景中,选择 ADS-B 技术更为适宜,它能提供更稳定和高效的通信性能。

## 5 总结与展望

本文主要探讨了两种低空无人机监视技术 ADS-B 和 Remote ID 用于低空智能网中无人机的监视性能。首先,文章概述了这两种技术的基本原理,强调了评估其性能的关键指标,包括传输距离、经纬定位精度、高度定位精度以及丢包率。通过理论分析与实际实验,对比了两者的性能。结果显示,ADS-B 在传输距离、定位精度和丢包率方面表现优于 Remote ID。Remote ID 在高度定位精度上更具优势,尤其适合小型无人机在小范围内的

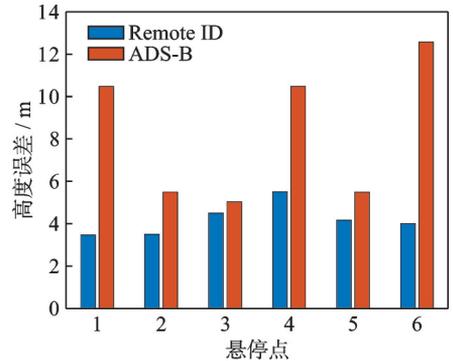


图 19 ADS-B/Remote ID 高度精度对比  
Fig.19 Height accuracy comparison between ADS-B and Remote ID

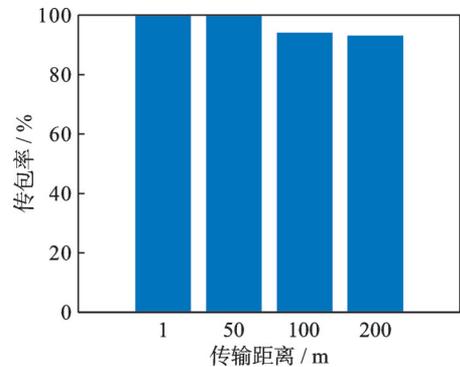


图 20 ADS-B 实测数据包接收率  
Fig.20 ADS-B measured packet reception ratio

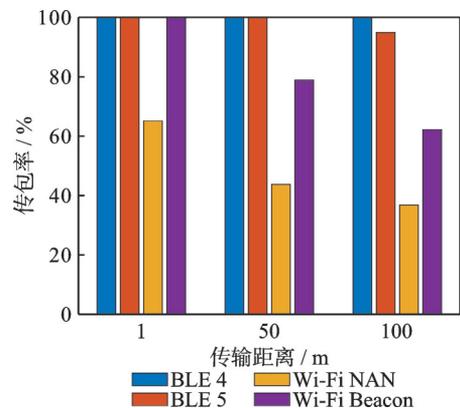


图 21 Remote ID 实测数据包接收率  
Fig.21 Remote ID measured packet reception ratio

监视。ADS-B能够在远距离提供稳定服务,而Remote ID在近距离下表现良好。同时,成本是实际应用中的重要因素,Remote ID成本低,更适合满足小型无人机的小范围监视需求。而ADS-B,尽管在通信性能层面表现优异,但其受限于成本与可能对民航飞机飞行造成的干扰,更适合于中大型无人机的监视。因此,需要综合考虑性能、成本和特定应用环境来选择合适的监视手段作为无人机航迹监视解决方案,以确保最有效的使用。

未来,ADS-B与Remote ID这两类无人机监视技术将为低空智能网中无人机监管提供关键技术支撑。然而,当前无人机监视技术在实际应用中仍面临诸多挑战和潜在的优化方向。本文基于当前低空无人机监视技术方面存在的挑战,提出了以下几点潜在技术方案的研究方向,为后续研究的深入提供参考。

(1)传输距离和覆盖范围仍然是无人机监视技术需要解决的主要问题。虽然ADS-B在远距离传输上表现出色,具有较强的覆盖能力,但在城市密集区域和复杂地形中,信号传输仍然会受到限制。Remote ID在传输距离方面的限制更为明显,通常仅适用于较小范围内的监视。这两种技术同属于无线电广播监视技术,其固有的限制包括信号易受干扰、频谱资源有限以及在复杂环境中传输效果不佳。

为了解决这些问题,首先可以考虑利用中继站和无人机中继技术增强信号覆盖范围。通过在地面部署中继站,ADS-B和Remote ID信号可以在地形复杂或建筑密集的区域得到有效延伸。而使用无人机作为中继平台,则能够在高空中提供更广泛的信号覆盖,特别适用于临时任务和特殊地形区域。此外,基于蜂窝网络的监视技术也是一种有效的解决方案。利用现有的4G和正在广泛部署的5G网络,可以实现更可靠的无人机监视。5G技术不仅提供更高的数据传输速度和更低的延迟,还适合实时监控和大规模无人机的管理。未来的第六代移动通信技术将进一步提升传输速度和网络覆盖,结合人工智能和大数据分析,提供更智能化的监控解决方案。卫星通信技术也可以为无人机监视提供重要支持。利用低地球轨道卫星,可以实现全球范围内的无人机监视,特别适用于远洋、荒野和无人区等地面通信难以覆盖的区域。同时,地球静止轨道卫星提供广域覆盖,能够作为地面网络和低轨卫星系统的补充,增强监视网络的整体覆盖能力。多模态融合监控技术则通过结合多种监视手段,提供更加全面和可靠的监视服务。例如,结合全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)与地面基站,可以提供高精度的定位和监视服务,适用于各类复杂环境。此外,利用雷达和光学设备,可以在信号受限的环境中提供补充监视手段,提高整体监视的可靠性。

(2)经纬定位精度和高度定位精度是无人机监视技术的核心性能指标。高精度的定位技术对于确保无人机的安全飞行和避免空中碰撞至关重要。然而,当前的定位技术在不同环境下仍面临诸多挑战。例如,GNSS在高楼林立的城市环境中可能会受到信号反射和遮挡的影响,导致定位精度下降。惯性导航系统(Inertial navigation system, INS)虽然可以在短时间内提供较高精度的定位,但长期使用会产生累积误差。因此,单一的定位技术难以满足复杂环境下的高精度需求。

为提升定位精度和可靠性,可以进一步研究融合多源数据的定位方法。将GNSS、INS与地面基站的信号结合,可以构建多模态定位系统,弥补单一技术的不足。例如,GNSS提供全球范围的基本定位数据,INS提供短时间内的低精度补偿,而地面基站可以提供额外的定位信息,特别是在GNSS信号不佳的环境中。此外,还可以利用V2X(Vehicle to everything)技术,通过无人机之间以及无人机与地面基础设施之间的通信,进一步提高定位精度和可靠性。进一步的研究还可以考虑利用机器学习和数据融合算法,对多源数据进行智能分析和处理,提升定位精度。例如,通过深度学习算法对历史飞行数据进行分析,可以预测和校正定位误差,提供更加精准的定位服务。结合实时环境感知技术,无人机可以根据周围环境动态调整其定位算法,提高在复杂环境中的定位精度和稳定性。

(3)丢包率问题在无人机监视技术的实际应用中仍然存在,特别是在电磁干扰较多的环境中。这不仅影响数据传输的可靠性,还可能导致监视数据的丢失或延迟,进而影响无人机的安全飞行和任务

执行。为了解决这一问题,需要采取多种技术手段来降低丢包率。首先,可以通过优化通信协议来提高数据传输的稳定性。采用更具鲁棒性的通信协议,如自适应调制和编码技术,可以根据信道条件动态调整传输参数,提高抗干扰能力和数据传输效率。其次,更高效的频谱资源管理技术对降低丢包率至关重要。动态频谱共享技术允许无人机根据实时的频谱使用情况,灵活地在不同频段之间切换,避免拥堵和干扰。这种技术不仅提高了频谱利用率,还增强了通信的稳定性。自适应跳频技术则通过在多个频段之间快速切换,分散干扰源的影响,从而提升通信系统的抗干扰能力。此外,可以考虑采用多天线技术和波束赋形技术,进一步提高通信系统的抗干扰能力和传输效率。多天线技术通过在发送端和接收端使用多个天线,提高信号的空间分集增益,降低丢包率。波束赋形技术则通过定向传输信号,减少干扰和提高信号强度,特别适用于无人机在复杂环境中的通信需求。

未来的研究将进一步探索 ADS-B 和 Remote ID 两种广播技术的协同合作方式,研究其在实际应用中的性能优化方法。通过协同使用这两种技术,期望能够提高无人机监视的整体性能,提供更可靠的低空飞行监管方案。此外,计划增加更多的实验数据和分析,尤其是在不同环境下(如城市、郊区和农村等)对这两种技术的综合表现进行深入研究,从而更加全面地评价它们的实际应用效果。通过这些深入研究,本文期望为低空智联网的发展提供更为坚实的技术支持,确保无人机技术在低空经济和低空智联网中发挥更大的作用。

#### 参考文献:

- [1] 沈高青,蔡圣所,雷磊,等.基于数字孪生和强化学习的低空智联网协同认知干扰[J].数据采集与处理,2024,39(1):15-30.  
SHEN Gaoqing, CAI shengsuo, LEI Lei, et al. Cooperative cognitive jamming in low-altitude intelligent network based on digital twin and reinforcement learning[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2024, 39(1): 15-30.
- [2] 吴启晖,董超,贾子晔,等.低空智联网组网与控制理论方法[J].航空学报,2024,45(3):6-23.  
WU Qihui, DONG Chao, JIA Ziyue, et al. Networking and control mechanism for low-altitude intelligent networks[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(3): 6-23.
- [3] 金永光,叶方伟,卢晓珍,等.区块链赋能的低空智联网[J].数据采集与处理,2024,39(1):2-14.  
JIN Yongguang, YE Fangwei, LU Xiaozhen, et al. Low-altitude intelligent network empowered by blockchain[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2024, 39(1): 2-14.
- [4] 中国民用航空局.中国民用航空局关于民用无人驾驶航空器监管服务有关事宜的公告[EB/OL].(2023-12-31)[2024-02-19].  
[http://www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK\\_17/XXGK/TZTG/202312/t20231231\\_222550.html](http://www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK_17/XXGK/TZTG/202312/t20231231_222550.html).  
Civil Aviation Administration of China. Announcement on the regulatory services for civil unmanned aerial vehicles [EB/OL]. (2023-12-31)[2024-2-19]. [http://www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK\\_17/XXGK/TZTG/202312/t20231231\\_222550.html](http://www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK_17/XXGK/TZTG/202312/t20231231_222550.html).
- [5] FAA. Department of Transportation. Enforcement policy regarding operator compliance deadline for remote identification of unmanned aircraft[EB/OL].(2023-09-15)[2024-02-19]. <https://www.federalregister.gov/documents/2023/09/15/2023-20074/enforcement-policy-regarding-operator-compliance-deadline-for-remote-identification-of-unmanned>.
- [6] 羊钊,李娜,毛亿,等.低空空域无人机运行安全保障技术研究综述[J].西华大学学报(自然科学版),2024,43(1):41-47.  
YANG Zhao, LI Na, MAO Yi, et al. A review of research on safety assurance technology for UAV operation in low-altitude airspace[J]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2024, 43(1): 41-47.
- [7] 沈笑云,张硕,张思远.终端区航空器三维实时监视系统仿真[J].航空学报,2023,44(S1):727598.  
SHEN Xiaoyun, ZHANG Shuo, ZHANG Siyuan. Simulation of 3D real-time monitoring system of aircraft in terminal area[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(S1): 727598.
- [8] 李自俊.ADS-B广播式自动相关监视原理及未来的发展和应用[J].中国民航飞行学院学报,2008,19(5):11-14.  
LI Zijun. The principle of ADS-B and its future development and applications[J]. *Journal of Civil Aviation Flight University of China*, 2008, 19(5): 11-14.
- [9] JIA Z Y, LIAO Y Y, DONG C, et al. Joint ADS-B in 5G for hierarchical aerial networks: Performance analysis and optimization[EB/OL].(2024-04-29)[2024-06-13]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.00733>.

- [10] ASTM International. Standard specification for remote ID and tracking: F3411-22a[S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022.
- [11] ZHU Y A, JIA Z Y, WU Q H, et al. UAV trajectory tracking via RNN-enhanced IMM-KF with ADS-B data[C]// Proceedings of 2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-6.
- [12] LIAO Y Y, ZHANG L, JIA Z Y, et al. Impact of UAVs equipped with ADS-B on the civil aviation monitoring system[C]// Proceedings of 2023 IEEE/CIC International Conference on Communications in China. Piscataway: IEEE Press, 2023.
- [13] LIAO Y Y, JIA Z Y, DONG C, et al. Interference analysis for coexistence of UAVs and civil aircrafts based on automatic dependent surveillance-broadcast[EB/OL]. (2024-06-12)[2024-06-13]. <https://doi.org/10.48550/arXiv:2406.08038>.
- [14] 张召悦, 阳颖. 基于聚类和 AdaBoost 的 ADS-B 数据质量综合评估方法[J]. 航空学报, 2024, 45(9): 329584.  
ZHANG Zhaoyue, YANG Ying. A comprehensive evaluation method of ADS-B data quality based on clustering and AdaBoost [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(9): 329584.
- [15] 丁建立, 邹云开, 王静, 等. 基于深度学习的 ADS-B 异常数据检测模型[J]. 航空学报, 2019, 40(12): 167-177.  
DING Jianli, ZOU Yunkai, WANG Jing, et al. ADS-B anomaly data detection model based on deep learning[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(12): 167-177.
- [16] 沈笑云, 唐鹏, 张思远, 等. ADS-B 统计数据的位置导航不确定类别质量分析[J]. 航空学报, 2015, 36(9): 3128-3136.  
SHEN Xiaoyun, TANG Peng, ZHANG Siyuan, et al. Quality analysis of navigation uncertainty category for position based on ADS-B statistical data[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(9): 3128-3136.
- [17] RAHEB R, JAMES S, HUDAK A, et al. Impact of communications quality of service on Remote ID as an unmanned aircraft coordination mechanism[C]// Proceedings of IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021.
- [18] VINOGRADOV E, POLLIN S. Reducing safe UAV separation distances with U2U communication and new Remote ID formats[C]// Proceedings of IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1425-1430.
- [19] ALKADI R, SHOUFAN A. Unmanned aerial vehicles traffic management solution using crowd-sensing and blockchain[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2023, 20(1): 201-215.
- [20] LOPEZ J G, REN L L, MENG B L, et al. Integration and flight test of small UAS detect and avoid on a miniaturized avionics platform[C]// Proceedings of Digital Avionics Systems Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [21] ZHANG Y F, JIA Z Y, DONG C, et al. Recurrent LSTM-based UAV trajectory prediction with ADS-B information[C]// Proceedings of 2022 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.
- [22] 李建儒, 高岩, 张佳新, 等. 基于 SRTM3 的岸基 ADS-B 接收站覆盖性能比较分析[J]. 电波科学学报, 2023, 38(5): 870-876.  
LI Jianru, GAO Yan, ZHANG Jiixin, et al. Comparative analysis of the coverage performance of shore-based ADS-B receiving stations based on SRTM3[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023, 38(5): 870-876.
- [23] TIAN S, CHEN H, JIANG S, et al. Research on the identification of abnormal flight status based on ADS-B data[C]// Proceedings of 2021 IEEE 3rd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology. Piscataway: IEEE Press, 2021: 168-173.
- [24] TABASSUM A, ALLEN N, SEMKE W. ADS-B message contents evaluation and breakdown of anomalies[C]// Proceedings of 2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-8.
- [25] HONDA J, KAKUBARI Y, OTSUYAMA T. Estimation of 1090 MHz signal environment on airport surface by using multilateration system[C]// Proceedings of 2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-2.
- [26] ZULUAGA J A F, BONILLA J F V, PABON J D O, et al. Radar error calculation and correction system based on ADS-B and business intelligent tools[C]// Proceedings of 2018 International Carnahan Conference on Security Technology. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [27] CHIOCCHIO S, PERSIA A, SANTUCCI F, et al. Modeling and evaluation of enhanced reception techniques for ADS-B signals in high interference environments[J]. Physical Communication, 2020, 42: 101171.
- [28] SUN J. The 1090 megahertz riddle: A guide to decoding mode S and ADS-B signals[M]. TU Delft: OPEN Publishing, 2021.
- [29] BLYTHE W, ANDERSON H, KING N, et al. ADS-B implementation and operations guidance document[R]. [S.l.]: International Civil Aviation Organization, 2011.

- [30] GRAY D E, BARRETT C W. Privacy impact assessment (PIA)—Federal aviation administration (FAA) privacy ICAO address system[R]. [S.1]: U.S. Department of Transportation, 2019.
- [31] HORTELANO D, OLIVARES T, RUIZ M C, et al. From sensor networks to internet of things. Bluetooth low energy, a standard for this evolution[J]. *Sensors*, 2017, 17(2): 372.
- [32] YIN J, YANG Z, CAO H, et al. A survey on Bluetooth 5.0 and mesh: New milestones of IoT[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2019, 15(3): 1-29.
- [33] CAMPS-MUR D, GARCIA-VILLEGAS E, LOPEZ-AGUILERA E, et al. Enabling always on service discovery: Wi-Fi neighbor awareness networking[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2015, 22(2): 118-125.
- [34] JEON W S, DWIJAKSARA M H, JEONG D G. Performance analysis of neighbor discovery process in bluetooth low-energy networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 66(2): 1865-1871.
- [35] BLUETOOTH SIG. Bluetooth core specification v5.0[S]. Kirkland: Bluetooth SIG, 2016.
- [36] Working group of the LAN/MAN standards committee of the IEEE computer society. IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks—Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: IEEE Std 802.11—2016[S]. New York, USA: IEEE, 2016.
- [37] Wi-Fi Alliance. Wi-Fi aware specification: Wi-Fi aware specification version 4.0[S]. Texas, USA: Wi-Fi Alliance, 2022.
- [38] FAA. Automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B) out performance requirements to support air traffic control (ATC) service final rules[EB/OL]. (2010-05-28)[2024-06-03]. <https://www.federalregister.gov/documents/2010/05/28/2010-12645/automatic-dependent-surveillance-broadcast-ads-b-out-performance-requirements-to-support-air-traffic>.
- [39] International Civil Aviation Organization. Annex 10 to the convention on international civil aviation: Aeronautical telecommunications[M]. Montreal: ICAO, 2007.
- [40] VARGA M, POLGAR Z A, HEDESIU H. ADS-B based real-time air traffic monitoring system[C]//Proceedings of 2015 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2015.
- [41] KUBO D, OSEDO A, YASUI I. Low altitude situational awareness enhancement using Remote ID broadcasted from small UAS[C]//Proceedings of AIAA Aviation 2020 Forum. Reston: AIAA, 2020: 2867.
- [42] MANESH M R, KAABOUCH N. Analysis of vulnerabilities, attacks, countermeasures and overall risk of the automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) system[J]. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2017, 19:16-31.
- [43] TEDESCHI P, NUAMI F A A, AWAD A L, et al. Privacy-aware remote identification for unmanned aerial vehicles: Current solutions, potential threats, and future directions[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 20(2): 1069-1080.
- [44] CHOPDE N R, NICHAT M. Landmark based shortest path detection by using A\* and Haversine formula[J]. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 2013, 1(2): 298-302.

#### 作者简介:



朱奕安(2001-),男,硕士研究生,研究方向:低空智能网联, E-mail: zhuyian@nuaa.edu.cn。



何佳(2000-),男,硕士研究生,研究方向:低空智能网联。



贾子晔(1990-),通信作者,女,副教授,硕士生导师,研究方向:空天地一体化网络、低空智能网联、卫星网络, E-mail: jiaziye@nuaa.edu.cn。



吴启晖(1970-),男,教授,博士生导师,研究方向:认知信息论、电磁空间频谱智能管控、天地一体化信息网络和无人机集群智能通信。



董超(1980-),男,教授,博士生导师,研究方向:无人机蜂群自组织网络、空天地一体智能网联、边缘网络智能和无人机协同智能应用。



张磊(1972-),男,教授,硕士生导师,研究方向:嵌入式系统与边缘计算、人工智能与无线自组网。

(编辑:王静)