

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209606

ADS-B 技术在低空空域安全中应用的现状与展望

陈晓^{1,2} 毛焯炳¹

(1.南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044; 2.南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044)

摘要:随着我国经济水平的不断提高以及社会生活的进步与发展,国家的通用航空的产业也一步一步走向崛起,低空空域逐步实现了开放。与此同时,低空空域的开放也进一步促进了航空产业的发展,一些新兴的低空飞行器被投入使用。低空飞行器数量的增加使得低空飞行的安全事故频发。为了应对低空空域安全等问题,应建立健全的低空空域飞行监视系统。本文首先对低空空域安全现状进行了分析从而引入 ADS-B 技术,介绍 ADS-B 的基本内容,接着对 ADS-B 系统功能模块进行了详细介绍,再阐述 ADS-B 技术在低空空域安全中的应用和趋势,探讨该技术的存在的问题及可能的解决方法。最后结合文章内容对 ADS-B 技术未来在低空空域安全方面的发展和前景进行了总结。

关键词: ADS-B;低空空域;空域安全;低空空域监视;无人机

中图分类号: TN98-34 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Status and prospect of ADS-B technology application in low-altitude airspace security

Chen Xiao^{1,2} Mao Yebing¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: With the development of economy in China and the improvement of social life, the national general aviation industry is rising step by step. Low-altitude airspace is also gradually opening up. At the same time, the opening of low-altitude airspace has further promoted the development of the aviation industry. Some new low-altitude aircraft have been put into use. The increase in the number of low-altitude aircraft has resulted in frequent safety accidents in low-altitude airspace. In order to settle with the security issues in low-altitude airspace, we need to build a healthy low-altitude airspace surveillance system. This paper firstly analyzes the current situation of low altitude airspace security. Secondly, it introduces the basic situation of the ADS-B technology. Thirdly it introduces the functional module of the ADS-B system. Then it expounds the application and trend of ADS-B technology in airspace, and discusses the existing problems this technology and possible solutions. Finally, it elaborates the future development and prospects of ADS-B technology in low-altitude airspace security.

Keywords: ADS-B; low-altitude airspace; airspace security; low-altitude airspace monitoring; unmanned aerial vehicle

0 引言

低空空域飞行一般指航空器在 1 000 米以下的高度所进行的飞行。一般在低空空域中飞行的航空器都是一些低空飞行器如无人机等。近年来,随着科技的进步,我国无人机行业也在迅速地发展,无人机以及一些低空飞行器的数量也逐年增加。各种低空飞行器数量的增加使得低空空域情况也更加的复杂多变,增加了低空空域的监管难度。我

国国土面积辽阔,各种地形错综复杂,一些偏远地区难以实现空域管控。城市中的大厦楼宇林立,地域之间的边界模糊复杂。飞行器同时也容易受到城市中的一些社会活动或天气因素影响^[1]。这些问题都使得低空空域的安全性难以保证。

美国是较早开放低空空域的国家之一,国家以及各大公司都对低空空域的开放十分的重视。各大公司相继研制出具有各类功能的飞行器并投入使用,低空飞行器的数量

增加。这也使得各种各样的飞行事故也频频发生。针对上述的各种情况,美国也出台了各种各样的法律以及管理条例,来规范低空飞行的秩序。一些州规定无人机的飞行法规,不允许无人机在没有官方授权的情况下进行采集信息的工作,禁止无人机携带装配致命性武器。无人机安全逐步成为了美国国土安全的重要战略地位。与此同时,中国政府为了满足通航市场的发展需求也出台了一系列的政策来对低空空域进行改革。张玉梅等^[2]在我国低空空域管理现状与发展策略一文中对国内的低空空域改革的发展初步阶段、起步阶段以及成熟阶段进行分析探讨,提出了未来改革发展低空空域的建议:明确低空空域的分类以及划设范围;将低空空域的安全责任划分好;制定合理的法律法规来管控低空空域;建立相应的低空空域保障系统;明确低空空域相关的人员以及设备的要求。

随着国家经济和社会发展水平不断提高,一些航空产业以及民航运输业也逐渐兴起。低空空域改革,实现了逐步的开放。这使得我国低空飞行器制造业的发展更加迅速,一些低空飞行器以及具有各类功能的无人机被制造出来用于社会生活中的各个领域之中。低空空域的安全问题出现在了大众的视野之中,对社会生活造成了一定的影响。无人机的广泛使用,无人机以其灵活实用的特点被用于航拍、救援搜索、快递物流、飞行表演等方面。复杂的城市低空障碍以及密集的人类社会活动给城市低空空域飞行的安全性带来了严峻的挑战^[3]。无人机的快速发展以及无人机的数量的与日俱增必定会使得未来低空空域的管理更加复杂。考虑到低空空域环境的影响以及人们的社会活动的因素,应结合传统的民航技术,针对现有的低空空域的特点进行研究,设计出一套适合于低空航空管理的方法。因此如何在开放低空空域的同时,对现今的无人机等低空航空器进行合理的管控,为低空空域的飞行器规划安全可行的航路通道成为了一个急需解决的重要问题。

在现今的民航技术中就有着 ADS-B 技术的应用。ADS-B 技术是中国民航重点推进的空管技术之一,是新一代空中管理系统的重要组成部分^[4]。ADS-B 技术以其技术成本低廉、性能优越等优点成为了航空监视的主要手段之一。广播式自动相关监视技术(又称 ADS-B 技术)将自身所接收到来自卫星导航设备(GPS 系统)、飞行管控等系统的信息如飞机的位置信息、飞行高度、飞行速度、航迹信息以及飞机身份识别码等相关的信息通过多种的数据链路通信模式周期性、自动地向外广播。安装了相关接收设备的地面站或飞机能够收到相关的报文,对其分析后可得到实时的信息,从而达到监视飞机的效果。若将此技术运用到低空空域的飞行之中,并加以推广则可能更好的对低空空域中的航空器进行监视,实现对无人机私人飞机等低空飞行器进行有效地管理,从而减少低空飞行安全事故的发生,构建安全高效的低空空域管理系统。

本文从低空空域安全出发,对低空空域安全的现状进

行分析,接着引入 ADS-B 技术,并介绍了 ADS-B 技术的基本内容,接着对 ADS-B 系统功能模块进行介绍,再分析 ADS-B 技术在空域中的应用和趋势,探讨该技术的存在的问题及措施。最后结合文章内容对该技术未来发展的前景进行了总结和展望。

1 ADS-B 技术概述

ADS-B 技术全称为广播式自动相关监视技术。它是一种飞行监视技术。飞机的机载设备在收到卫星导航系统发出的信息后,将接收到的位置、高度、航向等多维信息传输给机载的处理设备,机载的处理设备将信息处理过后通过利用多种数据链的通信模式(包括地对空,空对地,空对空等)周期性地,自动地广播自身的多维信息(包括飞机自身的高度、飞行航向、飞行速度以及身份识别码等等)^[5-6]。广播式自动相关监视系统主要是由信息处理显示、信息源以及信息传输通道 3 个部分组成^[7]。其中信息源所接收到的信息指的是飞机的多维信息,它不仅包括飞机自身的位置信息还包括飞机的一些其他的信息比如飞机航向、飞行速度和方向、航迹信息以及飞行高度等。这些多维信息能够通过一些航空电子设备得到。ADS-B 技术是以报文的形式在信息传输通道中传输。它主要通过几种不同的数据链进行消息广播,它们分别是 1090ES、VDL Mode4 以及 UAT 三种数据链^[8]。

近年来,国内外的研究者们对 ADS-B 监视系统及其性能优势进行了大量的研究。何佳萍等^[9]在 ADS-B 数据链的比较与特性研究一文中对 3 种数据链进行研究,分析不同数据链的特点以及所面临的风险并提出应对的方法。最后将接收到的位置信息、高度信息以及一些其他的附加信息经过处理并转换成为直观的图像窗口信息,以简洁明了的画面直观的展示给用户。王凤鑫等^[10]对星基 ADS-B 监视性能进行评估,发现了单颗卫星载荷覆盖下系统航空器位置消息接收不足的问题。袁梦婷等^[11]对无人机飞行的安全进行研究,为了提升飞行过程中的安全性,提出了一种无人机感知与规避蚁群算法模型。

ADS-B 技术在运用时有许多有效的功能模块,其中最重要的两大功能分别是 ADS-B OUT 和 ADS-B IN。其中 ADS-B OUT 功能指的是飞机在航行过程中使用发射器自动地周期性地向外广播自身的多维信息。ADS-B IN 指的是飞机接收其他地面基站又或是飞行器发出的 ADS-B 信息。ADS-B IN 的应用使得飞行员能够通过驾驶舱交通信息显示系统(CDTI)监视彼此,从而减小飞机跑道之间的距离,显著提高机场的利用率。ADS-B 系统的工作原理如图 1 和 2 所示。

2 ADS-B 系统功能模块

ADS-B 的系统功能模块的组成主要包括三个部分,分别是机载设备、地面收发处理应用设备以及通信链路与传

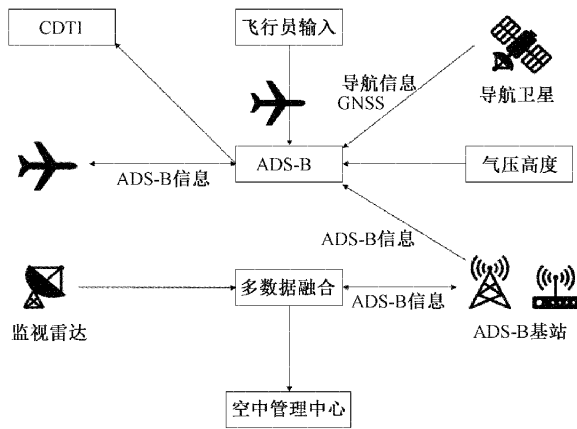


图1 飞行器和地面相互监视工作原理

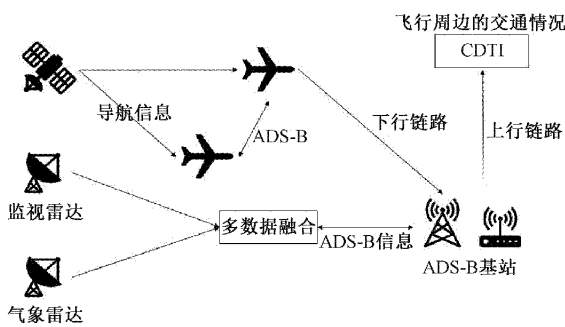


图2 数据交互原理

输网络。

2.1 ADS-B 机载设备

ADS-B的机载设备包含GNSS全球卫星导航系统、接收机、数据链系统以及CDTI交通信息驾驶舱的显示。全球卫星导航系统获取飞机实时的位置信息。GNSS将位置信息转化成为数字码。ADS-B系统收发机将飞机的位置信息以及其他的如飞行高度、速度等信息通过数据链将其广播出去,最终形成可视化的信息展现在地面空管系统的显示设备上,实现空域范围内的空中管制。

ADS-B的机载设备具有ADS-B IN和ADS-B OUT两种功能。ADS-B OUT功能指的是飞机在航行过程中使用发射器自动地周期性地向外广播自身的信息。具有ADS-B IN功能的机载设备不仅可以直接接收并处理其他飞行器发射机发出的ADS-B OUT信息,还能接收来自地面站设备发射的信息。ADS-B IN技术的发展使得信息更新更加高效,精确性也得到了提高^[12]。ADS-B地面站发射的信息包括空中交通信息服务广播(traffic information service broadcast, TIS-B)和飞行信息服务广播(flight information services-broadcast, FIS-B)^[13]。ADS-B IN功能将飞行器周围一定空域范围内的航空飞行器的飞行状况显示在驾驶舱交通信息显示设备(CDTI)。这使得飞行员能够更好地监视周边情况,减少事故的发生,提升了规避风险提前预警的能力。

2.2 地面收发及处理应用设备

ADS-B地面设备接收机载1090ES S模式和UAT模式ADS-B设备发送的信息。其还向空中的飞行设备发送TIS-B和FIS-B信息。ADS-B地面设备接收机载设备发送的ADS-B位置报文,再经过处理后将其传递给监视数据处理系统简称SDPS。SDPS将这些数据统合处理发送给TIS-B, TIS-B再经过处理将其显示在设备上。

2.3 通信链路和传输网络

ADS-B拥有几种不同的数据链传输模式,它们分别是1090ES数据链、UAT(通用访问收发机数据链)数据链以及VDL-4数据链模式。

1)1090ES数据链模式

1090 MHz ES数据链是基于S模式的相关技术标准^[14]。S模式数据链凭借其特殊的性能特点在TCAS空中防撞系统和ADS-B系统中成功实践。1090ES的数据块是由两个部分组成,包括一个8 μs报头和112 μs数据位。其信息数据块的编码方式为PPM脉冲位置调制编码。

1090ES模式的信息生成方式为扩展断续振荡。112位的数据位中前88位定义为消息位,包含ADS-B的主要信息内容:航空飞行器的位置信息,场面位置信息,飞行速度,航空器身份标识码,飞行速度等。89~112位定义为校验位,形成奇偶校验和地址域。其信息结构图如图3所示。

1090ES ADS-B信息结构模式			
控制位	地址位	信息位	校验位

包含飞机的场面位置信息、飞行速度、航空器身份标识码、飞行速度等

图3 信息结构图

2)UAT数据链模式

UAT是专门为ADS-B广播数据链设计的一种数据链模式。该数据链拥有着上行链路容量大,成本低的优势。同是也只有UAT数据链模式能够满足所有RTCA ADS-B最低航空系统性能标准的数据链配置要求。UAT为宽带式数据链,其频带宽度在1~2 MHz之间,工作通讯频率范围在960~1 215 MHz。UAT模式相比于其他的数据链模式,更加适用通用航空的飞行以及低空空域的监视。其拥有专属的978 MHz信道,不存在共同使用信道的问题。1090ES模式存在和雷达监视信号干扰的问题,航空器的增多使得信道更加拥挤,信号传输困难,飞行的安全性降低^[15]。

3)VDL-4数据链模式

VDL-4甚高频数据链的工作频率段为118~137 MHz,带宽标准为25 kHz,调制方式为GFSK(高斯滤波频移键控)调制,数据信号传输的速率为19.2 kbit/s。VDL-4模式拥有信道预约访问协议,其交换短小重复的信息的能力得到提升。

3 ADS-B 技术的应用与趋势

3.1 ADS-B 低空空域监视应用

ADS-B 技术作为监视技术,与传统的监视技术相比,其在监视的范围精度和成本方面都拥有着显著的优势。在监视范围方面,ADS-B 技术能够对航天器从起飞到返回地面的全过程监视,实现了更加安全的监视过程。

传统的监视雷达技术在建设地面站的过程中会因为地处偏远地区以及环境恶劣等因素而难以建设。然而,ADS-B 地面站能够在无人值守的情况下全天候运行,其受到地理环境等因素的影响较小,能够对区域进行有效的监视,监视范围更加广阔。在监视范围之内,ADS-B 能够提供更高精度和抗干扰的监视。其数据的更新速度比传统的雷达监视技术更快,能更加实时地监视空域内的飞行情况。ADS-B 技术不仅在监视技术方面具有显著优势,其成本廉价等优点也使其成为空域监视与管控的一大重要手段。ADS-B 技术的成本相对于雷达,其设备的投资成本要低廉的多。一套雷达监视设备的设置所需要的 100~400 万美元的投资^[16]。而 ADS-B 设备只需 10~40 万美元。这些因素使得 ADS-B 技术逐步成为未来监视技术的基石。

目前 ADS-B 的产品按照功能构型主要可以分为 3 种类型,分别是只接收的 ADS-B IN 设备、只广播的 ADS-B OUT 设备以及同时支持接收和广播双向的设备。并且 ADS-B 产品在针对不同飞行情况下的要求以及技术特点各不相同。对于航线飞机而言,其主要的目标则是实现 ADS-B 技术、防撞技术、告警系统等技术的一体化,形成具有较强综合性交通管理系统。而在低空空域的无人机 ADS-B 产品的设计中,其主要的目标则是将 ADS-B 产品高度集成,减轻产品的重量以及低成本化。近年来随着无人机产品的推广,低空空域的飞行情况愈发复杂,无人机事故频发,无人机的监视管控也逐渐成为了一个急需解决的重大问题。针对无人机事故特别是无人机干扰航行事件的发生,一些无人机厂商也在无人机的产品中加入了 ADS-B 技术。其主要方法是在无人机中安装 ADS-B IN 的接收端,这样在无人机飞行的过程中便可以探查到客机的航迹等飞行信息,使操作员能够提前探知到客机的位置航迹等信息对飞行计划做出调整,从而减少无人机与客机航线发生冲突事故的发生,提高了空域飞行的安全性。ADS-B 设备需要不断的优化,减轻其产品重量,以适应无人机的飞行需求。

在国内外的一些研究中,一些学者对 ADS-B 在低空空域中的应用进行了探索。帅博等^[17]在研究中对于我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。徐剑锋^[18]在探索研究无人机飞行管理的过程中,以 ADS-B 为基础设计了一种无人机航迹规划算法。唐斌等^[19]在 TCAS 防撞系统以及 ADS-B 的基础上,设计了 ADS-B 信号雷达,

能同时监控合作和非合作的无人机。Weinert 等^[20]展示了一种开发低空载人飞行统计模型或适用于低空的统计模型的方法。ADS-B 的高监视精度效果使得监管人员能够实时地观察评估空域中的交通态势,空域交通管制变得更加便捷高效。保障了空域的安全性,进一步缩小了航空器之间的飞行间隔,提高了空域资源的利用率,增大了空域容量。低空空域的逐步开放使得通用航空的需求量也逐渐变大。ADS-B 监视的应用有利于无人机以及通用航空的发展。ADS-B 数据与一二次雷达等多监视数据源的融合,提高了流量空域的监视冗余能力,提供更加可靠的监视服务。

3.2 基于 ADS-B 碰撞避让技术

通用航空包含了观光旅游、抢险救灾、医疗卫生、气象探测、文体娱乐等方面的飞行活动。这类飞行活动的航程航迹各不相同飞行过程中的不确定性因素较高,其监管的难度较大,容易出现飞行冲突碰撞的事故。而随着无人机技术的发展,无人机与民航运输飞机的冲突时有发生,民航运输飞机的飞行高度较高,冲突多发生在进近阶段。通用航空的飞行高度低,与无人机发生碰撞的概率较大。因此发展研究适用于全空域的碰撞避让技术是保障空域安全的一大关键。

TCAS II 作为一种传统的空域防撞技术通常运用于运输航空的防撞。TCAS 通过对航空器当前的位置以及历史的航迹、飞行速度、飞行方向等信息进行分析,对可能发生的冲突预测。该防撞技术预测冲突的精准度受到飞行任务的复杂程度影响。TCAS II 防撞技术主要是通过向周围询问装配了应答机的航空器,再根据收到的应答信息来得到飞行器的各种飞行信息。将对周围航空器监视得到的航迹信息与当前飞行器自身的飞行情况相结合,评估出与目标机的威胁等级。TCAS II 和地面空中交通管制系统都使用 1 030/1 090 MHz 频率^[21]。容易造成信号频率的拥堵阻塞,一般通过降低询问的重复频率来解决该问题。ADS-B 技术的监视信息实时性更高,数据精度高。它能够克服天气因素导致的能见度低的影响,使得飞行的过程更加的安全可靠。ADS-B 与 TCAS II 防撞系统相比,其系统体积较小、造价成本更低。除此之外,ADS-B 的广播间隔较短,间隔时间仅为 1 s,航空器在装配了 ADS-B 设备情况下,能够更加实时迅速地了解周围的空域情况,有效地提高了整个飞行过程的安全性。

近年来无人机的技术迅速地发展,无人机技术的普及使得低空空域内的无人机的数量增多。空域中的冲突时有发生,防撞技术的研究也显得十分重要。鉴于 ADS-B 系统各方面的优势,基于 ADS-B 的防撞系统在各个方面的性能都比传统的防撞系统更加优越。近年来,一些学者也对于 ADS-B 以及空中防撞技术进行了研究。何佳萍等^[21]针对 ADS-B 的优势将其与 TCAS II 相结合,提出了一种 TCAS II 和 ADS-B 技术相结合的监视防撞系统,并以卡尔曼滤波算法为基础,提出了一种最优数据融合估计算法。李宏伟

等^[22]通过被动式接收 ADS-B 广播报文信息实现对空域的监视提出了一种冲突探测告警方法。Lai 等^[23]提出并描述了一种基于 ADS-B 的防撞雷达,该雷达允许小型自主无人机在与有人驾驶的飞机共同定位的空间中检测合作和非合作目标。

此外基于 ADS-B 的防撞算法也是研究的一个重要方面。徐文江等人基于 ADS-B 技术对防撞检测算法进行了研究,以 ADS-B 技术为基础扩大了飞行保护区的范围,在保护区和冲突区的基础上增加了监视区域。李波等^[24]以 ADS-B 监测工作范围广等特点,提出了时间轴映射航路冲突检测算法。Gariel 等^[25]提出了一种利用 ADS-B 进行交通状况感知和警报的新算法。该系统的目标是向飞行员发出潜在碰撞或危险情况的警报。

3.3 基于 ADS-B 数据的航迹预测

ADS-B 还被应用于航迹预测中,其数据信息可支持对四维航迹的预测。国内的研究主要集中在对航迹的预测,缺少基于 ADS-B 数据的航迹预测研究。卢献宇等^[26]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 航迹预测效果优越性。曾润等^[27]提出一种数据融合的改进粒子滤波航迹预测算法,其预测精度比传统方法更高,对三维航迹预测的研究有一定的参考价值。Sahienya 等^[28]提出了一种新的混合深度学习模型来提取机场的时空特征,将自动相关监视广播(ADS-B)数据用作模型的输入,对 4D 航迹预测有一定帮助。Sahadevan 等^[29]为了提高现有方法的弹道预测精度,提出了一种双向长短时记忆(Bi-LSTM)神经网络模型。实验数据来自飞行雷达收集的历史 ADS-B(自动相关监视广播)轨迹数据。该研究为弹道预测研究中的决策建立了坚实的平台。基于 ADS-B 信息对航空器的四维信息进行精准的预测能够有效的减少空域中事故发生概率,是实现空域自动化管理的关键。

3.4 天基 ADS-B 技术

天基 ADS-B 技术也是一个崭新的应用方向。传统 ADS-B 主要包括机载发射机和地面接收基站^[30]。对于一些高山峡谷地区以及海洋区域很难实现 ADS-B 系统的覆盖。然而天基 ADS-B 可以有效解决这个问题。天基 ADS-B 技术是将 ADS-B 的地面站建设到卫星上,通过借助低轨道卫星的强大功能解决地面站在一些偏远地区难以建设的问题^[31]。若能够实现,则可以使得 ADS-B 监视技术覆盖到全球范围内,实现一套完善健全的空域监视系统。

4 问题与相应措施

4.1 覆盖范围

在覆盖的范围方面,我国的幅员疆域辽阔,想要实现 ADS-B 的技术全覆盖,需要大量地部署地面设备。而在我国某些偏远地区,气候环境恶劣,部署地面站的难度较高,不仅要考虑到气候环境因素的影响,还应该考虑到温度因

素,确保不同温度下地面站的正常运行。此外,地面站还应具备无人操控能够自动工作以及远程监视的能力。

4.2 数据链路扩容

在数据链路方面,在我国 ADS-B 技术推行的是 1090ES 数据链,TCAS 防撞和航管应答共用通道,容易造成堵塞,丢失报文和报文时延。若是再加上无人机,势必会使通道更加的拥挤。随着 ADS-B 技术应用的愈发广泛,传输信息的要求也会变得越来越高,不仅局限于飞行过程中位置、速度等信息,更包括了气象和实时情报信息。因此针对该问题,需要进一步的改进数据链路,提升 1090ES 链路容量。

4.3 安全性的提升

ADS-B 技术采用了开放共享的广播式架构。广播监视的可靠性较差,其安全性能有待提升。ADS-B 的协议是公开的,其信息也没有经过加密,ADS-B 信息的获取简单仅需要一些简单的无线电设备便可以实现对 ADS-B 信息的获取,因此该技术容易受到他人的蓄意监听,更可能会被一些不法分子进行人为的干扰以及蓄意的篡改,这严重影响了航空的安全性。针对该问题,可以通过使用一些信息验证或是身份认证的方法来减少虚假信息的接收,提升 ADS-B 系统的信息真实性。

4.4 其他问题

考虑到低空飞行器数量的增多,为更好地对低空飞行器进行管理,应该对无人机等低空飞行器标识不同的身份识别码^[32]。在拥有身份识别码的条件下,无人机的管理会变得更加的高效便捷。然而,ADS-B 应用于低空飞行器的技术还不够完善,一些无人机中仅加入了 ADS-B IN 接收端。当前 ADS-B OUT 发射端还普遍只安装在载人飞机上,目前技术还不适合装在无人机上。一是发射端需要安装独立的发射设备,可能会增加无人机的重量,无人机会因为负重的原因难以升级。二是无人机数量庞大,若是都加装了发射设备势必会是的信道变得拥堵,从而影响到正常的民航空中航班管理。三是成本问题。因此用低成本嵌入式系统^[33-39]使得发射端重量减轻、降低成本,通过智能算法^[40-51]优化信道,解决信道拥挤问题并且使得无人机信号与航天载人飞机信号不发生冲突是一个有待解决的问题。

5 结 论

综上所述,低空空域是国家重要的战略资源,应切实重视低空空域安全的问题并逐步实现低空空域的开放^[52-54]。低空空域的开放促进了低空飞行器的发展,无人机以其灵活操作便捷的特点给人们的生活带来了便利,但这也对低空空域的安全性产生了一定的影响。为解决低空空域的安全问题,应结合实际情况将 ADS-B 技术运用到低空飞行器中,我们应大力探索并解决 ADS-B 技术在运用于实践中所遇到的各种问题。

目前,我国在低空空域安全监管方面的规章制度还不

够完善,还没有建立起成熟的低空安全监管平台。在低空无人机的交通管理发展过程之中,有许多关键技术还有待完善。例如当前无人机的地面站和无人机多为一对一的连接方式,无法实现多架无人机之间的信息共享。无人机之间无法感知对方的航线,可能会出现撞击的危险^[55]。为保障无人机在低空空域中飞行的安全性,应对多个方面的技术进行研究。除了对 ADS-B 监视技术的研究外还可以通过机器学习等算法优化空中避让技术^[56-61],对适用于低空空域的防撞系统进行研究,使得无人机能够更加迅速的规避障碍风险。此外,还可以结合航空器的飞行环境,加强对空域容量的管理。通过对一些动态规划算法的研究,使得无人机在空域中的飞行区域分布更加均匀,降低了空域管理的难度,提高了空域的安全性。低空空域安全已经成为了影响人们生活的大事,应该得到重视。

参考文献

- [1] 冯登超. 面向低空安全三维数字化空中走廊体系的飞行器交通管理平台构建[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(12): 137-140.
- [2] 张玉梅, 苑永月. 我国低空空域管理现状与发展策略[J]. 电子技术, 2020, 49(7): 104-105.
- [3] 张宏宏, 甘旭升, 李双峰, 等. 复杂低空环境下考虑区域风险评估的无人机航路规划[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 257-266.
- [4] 周君. ADS-B 全面实施对未来空管项目建设规划的意义[J]. 数字技术与应用, 2021, 39(12): 39-43.
- [5] 王运帷. ADS-B 技术优势探讨及前景展望[J]. 工业技术创新, 2017, 4(2): 146-148.
- [6] 邓晓波, 王飞, 杨光曜. 机载 ADS-B 技术现状与发展趋势[J]. 航空工程进展, 2021, 12(1): 121-128.
- [7] 张天平, 郝建华, 许斌, 等. ADS-B 技术及其在空管中的发展与应用[J]. 电子产品世界, 2009, 16(6): 34-37.
- [8] 赵万友, 李茂. ADS-B 在低空空域监视与目标防护中的应用[J]. 电子测量技术, 2018, 41(9): 37-40.
- [9] 何桂萍, 徐亚军. ADS-B 数据链的比较及特性研究[J]. 中国民航飞行学院学报, 2010, 21(4): 3-6.
- [10] 王凤鑫, 刘海涛, 李保国, 等. 星基 ADS-B 监视性能评估软件设计与实现[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(3): 25-30.
- [11] 袁梦婷, 时宏伟. 基于 ADS-B 的无人机感知与规避蚁群算法模型[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(4): 761-769.
- [12] 姚飞, 王军, 谢凯承, 等. 基于 ADS-B IN 的多机冲突解脱及路径规划[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(1): 65-71.
- [13] 杨成, 林琳. ADS-B 数据链应用风险与对策研究[J]. 现代电子技术, 2014, 37(21): 98-101.
- [14] 贺星. 广播式自动相关监视(ADS-B)接收系统关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [15] 杨荣盛, 何光勤, 潘卫军. 基于低空空域适用性的 ADS-B 数据链研究[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2011, 24(2): 63-67.
- [16] 金晶, 陈龙, 宋凯, 等. ADS-B 技术在航空器运行管理中的应用[J]. 长江信息通信, 2021, 34(6): 113-115.
- [17] 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论文集——S01 卫星导航行业应用, 2021: 46-53.
- [18] 徐剑锋. 基于 ADS-B 的航迹规划算法在无人机飞行管理中的应用[J]. 现代雷达, 2021, 43(1): 34-41.
- [19] 唐斌, 郑晓霞, 蒲红平. 基于 ADS-B 信道雷达的合作与非合作无人机监视系统[J]. 成都航空职业技术学院学报, 2021, 37(4): 47-49.
- [20] WEINERT A, UNDERHILL N, WICKS A. Developing a low altitude manned encounter model using ADS-B observations[C]. 2019 IEEE Aerospace Conference, IEEE, 2019: 1-8.
- [21] 何桂萍, 徐亚军. 基于 TCAS II 和 ADS-B 的组合监视防撞系统研究[J]. 电光与控制, 2011, 18(4): 61-64.
- [22] 李洪伟, 章学锋, 易东, 等. ADS-B 被动监视防撞告警系统设计[J]. 中国民航大学学报, 2019, 37(6): 6-11.
- [23] LAI C P, REN Y J, LIN C. ADS-B based collision avoidance radar for unmanned aerial vehicles[C]. 2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, IEEE, 2009: 85-88.
- [24] 李波, 翟书颖, 李茹, 等. 基于 ADS-B 的时间轴映射航路冲突检测算法[J]. 电光与控制, 2019, 26(3): 8-11.
- [25] GARIEL M, KUNZI F, HANSMAN R J. An algorithm for conflict detection in dense traffic using ADS-B[C]. 2011 IEEE/AIAA 30th Digital Avionics Systems Conference, IEEE, 2011: 4E3-1-4E3-12.
- [26] 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.
- [27] 曾润, 田杰, 江虹, 等. 改进粒子滤波的无人机航迹预测方法[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(5): 148-151.
- [28] SAHFIENYA H, REGAN A C. 4D flight trajectory prediction using a hybrid deep learning prediction method based on ADS-B technology: A case study of hartsfield-jackson atlanta international airport (ATL)[J]. ArXiv Preprint, 2021, ArXiv:2110.07774.
- [29] SAHADEVAN D, PONNUSAMY P, GOPI V P, et al. Ground-based 4d trajectory prediction using bi-

- directional LSTM networks[J]. Applied Intelligence, 2022; 1-18.
- [30] 王洪全, 刘天华, 欧阳承曦, 等. 基于星基的 ADS-B 系统现状及发展建议[J]. 通信技术, 2017, 50(11): 2483-2489.
- [31] 房屹光, 张翔. 天基 ADS-B 发展综述[C]. 2021 年无人系统高峰论坛(USS 2021)论文集, 2021: 104-108.
- [32] 姚虹翔, 叶博嘉, 程予. 低空无人机空中交通管理研究[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(25): 183-187.
- [33] 陈晓, 张凯. 嵌入式自动气象站故障检测系统研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(23): 158-164.
- [34] 荣百川, 陈晓. 基于蓝牙的智能防摔监测系统设计[J]. 激光杂志, 2019, 40(7): 32-34.
- [35] 邢玉品, 陈晓. 基于 TDC-GP22 的超声波测风仪设计[J]. 现代电子技术, 2018, 41(21): 128-131.
- [36] 卢明乔, 陈晓. 基于 ZigBee 组网的智能照明系统的研究与设计[J]. 信息技术, 2013, 12: 56-59.
- [37] 杨应鹏, 陈晓. 基于蓝牙的可穿戴式脉搏波形采集系统设计[J]. 激光杂志, 2018, 39(6): 74-77.
- [38] 赵苏徽, 陈晓. 基于树莓派和云平台的智能灌溉系统[J]. 计算机系统应用, 2022, 31(4): 123-129.
- [39] 卢明乔, 陈晓. 基于 ZigBee 传感网的农业智能照明系统[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(23): 5858-5860.
- [40] 孙超文, 陈晓. 基于多尺度特征融合反投影网络的图像超分辨率重建[J]. 自动化学报, 2021, 47(7): 1689-1700.
- [41] 沈千里, 陈晓, 支亚京, 等. 一种新的人脸图像去噪算法[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(11): 133-136.
- [42] 陈晓, 杨瑶. 基于长期递归卷积网络的无创血压测量[J]. 电子测量技术, 2022, 45(5): 51-59.
- [43] 杨瑶, 陈晓. 基于神经网络的说话人识别实验设计[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(9): 38-41.
- [44] 朱娟, 陈晓. 改进胶囊网络的有序重叠手写数字识别方法[J]. 激光杂志, 2019, 40(7): 43-46.
- [45] 郭妍, 陈晓, 任晓晔. 一种优化随机森林模型的室内定位方法[J]. 激光杂志, 2018, 39(10): 70-74.
- [46] 胡春杰, 陈晓, 郭银. 基于多混沌映射的光学图像加密算法[J]. 激光杂志, 2017, 38(1): 110-114.
- [47] 胡春杰, 陈晓, 陈霞. 基于改进广义 Arnold 映射的多混沌图像加密算法[J]. 包装工程, 2017, 38(3): 144-149.
- [48] 陈霞, 陈晓, 邹胜男. 基于正态检验的室内定位算法[J]. 激光杂志, 2017, 38(3): 41-45.
- [49] 邹胜男, 陈晓, 陈霞. 基于改进的 UKF 算法的室内测距定位[J]. 激光杂志, 2017, 38(4): 61-65.
- [50] 徐畅, 陈晓, 季仟亿. 基于稀疏编码的 Shearlet 域图像去噪[J]. 激光杂志, 2017, 38(10): 96-100.
- [51] 任晓晔, 陈晓, 郭妍. 基于 Fluent 和 LSTM 神经网络的超声波测风仪阴影效应补偿研究[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(7): 89-98.
- [52] 冯登超, 袁晓辉. 低空安全走廊及应急管理可视化研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(4): 493-505.
- [53] 冯登超, 袁晓辉. 低空空域安全告警航图可视化研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(3): 305-316.
- [54] 庞峰, 冯登超. 警用无人系统与低空安全防范初探[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(7): 205-208.
- [55] 全权, 李刚, 柏艺琴, 等. 低空无人机交通管理概览与建议[J]. 航空学报, 2020, 41(1): 6-34.
- [56] 周磊磊, 刘玄冰, 祁亚辉, 等. 基于 L1 制导法的无人机避障研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(3): 246-250.
- [57] 张香竹, 张立家, 宋逸凡, 等. 基于深度学习的无人机单目视觉避障算法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 101-108.
- [58] 彭继慎, 孙礼鑫, 王凯, 等. 基于模型压缩的 ED-YOLO 电力巡检无人机避障目标检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 161-170.
- [59] 肖英楠, 孙抒雨. 基于改进 SIFT 图像匹配的无人机高精度避障算法设计[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(1): 237-240.
- [60] 陈晓, 荆茹韵. 单图像超分辨率方法综述[J]. 电子测量技术, 2022, 45(9): 104-112.
- [61] 李晓辉, 苗苗, 冉保健, 等. 基于改进 A* 算法的无人机避障路径规划[J]. 计算机系统应用, 2021, 30(2): 255-259.

作者简介

陈晓(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为现代电子系统统计、信号与信息处理、图像处理、超声成像等。

E-mail: chenxiao@nuist.edu.cn

毛焯炳, 硕士研究生, 主要研究方向为低空空域安全。

E-mail: 708877439@qq.com