

文章编号: 1674-8190(2021)01-121-08

机载 ADS-B 技术现状与发展趋势

邓晓波, 王飞, 杨光曜

(中国航空工业集团有限公司 雷华电子技术研究所, 无锡 214063)

摘要: 随着广播式自动相关监视(ADS-B)技术的发展与广泛应用, 国外涌现出许多 ADS-B 设备研制商, 开发出多种应用于不同平台、具有不同功能构型的 ADS-B 产品。从搭载平台与功能构型两个视角出发, 对国内外机载 ADS-B 产品进行分类; 分析航线飞机、通航飞机以及无人机载 ADS-B 产品的功能与技术特点, 并针对当前 ADS-B 系统面临航空器监视应用开发、安全性、密集干扰环境下接收增强、1090ES 链路扩容等难点问题, 分析讨论技术途径并提出发展建议。

关键词: 机载; ADS-B; 安全性; 干扰抑制; ADS-B 防欺骗

中图分类号: V243; V355

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.01.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A Survey on Airborne ADS-B Technology and Its Development Trend

DENG Xiaobo, WANG Fei, YANG Guangyao

(Leihua Electronic Technology Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Ltd., Wuxi 214063, China)

Abstract: With the development and wide application of automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) technology, there have been emerging many ADS-B manufacturers who have developed a large number of ADS related products with versatile configurations for different airborne platforms. This paper firstly categorizes the diverse ADS-B products with respect to configuration and intended platform, and then, analyzes the functional and technical characteristics of the ADS-B products designed for airlines, general aviation, and unmanned aircraft system (UAS). Finally, this paper analyzes and discusses the countermeasures to the challenging problems of ADS-B system including information security, enhanced reception in dense jamming environment, as well as 1090ES channel capacity improvement.

Key words: airborne; ADS-B; security; interference suppression; ADS-B anti-fraud

0 引言

广播式自动相关监视(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, 简称 ADS-B)系统把源自机载卫星导航、飞行管理等系统的多维信息(包括位置、速度、识别码、意图等)通过数据链自动广播

发送, 为监视者提供了一种高精度低成本的监视方式^[1-2]。ADS-B 系统可以为飞行员与监管者提供空地一致的情景意识, 优化解决交通冲突, 提高飞行安全水平; 可以辅助实现更优化的进近与爬升程序, 提升航班运行效率。ADS-B 技术被认为是下一代空中监视以及未来自由飞行理念的基石。

收稿日期: 2020-07-23; 修回日期: 2020-09-02

通信作者: 邓晓波, xiaobobo.deng@qq.com

引用格式: 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.

DENG Xiaobo, WANG Fei, YANG Guangyao. A survey on airborne ADS-B technology and its development trend[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(1): 121-128. (in Chinese)

ADS-B 正在迅速成为新的全球空中交通管理标准,已在全球主要区域开始实施。美国联邦航空局已强制要求自 2020 年 1 月 1 日起,在美国运行的航空器需要具备 ADS-B 发射功能。欧洲航空安全局要求自 2020 年 6 月 7 日起,在欧洲地区运行的航空器需要具备 ADS-B 发射功能。中国民航 ADS-B OUT 系统于 2019 年 7 月 1 日开始全面运行,并且中国民航总局要求,要在 2022 年 12 月 31 日前完成满足 RCTA DO-260B 标准的 ADS-B 设备加改装。

随着 ADS-B 技术的发展与广泛应用,国外研制了许多应用于不同平台、具有不同功能构形的 ADS-B 产品。本文对国外主流机载 ADS-B 产品进行分类,分析这些产品的技术与功能特点;针对 ADS-B 系统面临的基于 ADS-B 航空器监视应用开发、信息安全性、密集干扰环境下接收增强、链路扩容等问题,分析讨论相关技术途径,提出一些技术发展建议,以期国内产品研制提供有益借鉴。

1 ADS-B 产品分类

从应用平台来看,ADS-B 产品包括地面站、机载、车载以及星载产品。其中,地面设备主要以 ADS-B 接收站为主;机载平台、车载平台都有比较成熟的 ADS-B 发射与接收产品;星载 ADS-B 产品主要是 ADS-B 接收机。本文重点关注机载 ADS-B 产品,其分类如图 1 所示。

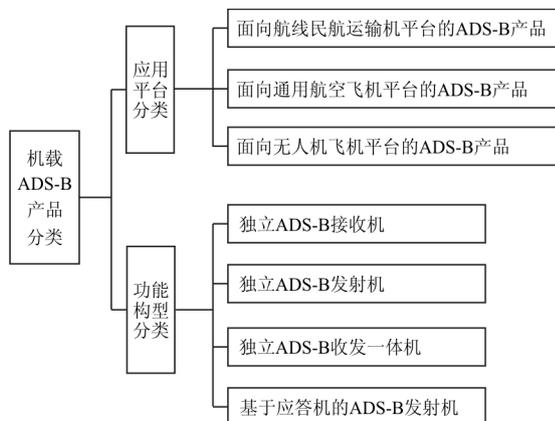


图 1 机载 ADS-B 产品分类

Fig. 1 Classification of airborne ADS-B products

从图 1 可以看出:从应用平台来看,机载 ADS-

B 产品可以粗略分为面向航线飞机的 ADS-B 产品、面向通用航空飞机的 ADS-B 产品以及面向无人机的 ADS-B 产品;从功能构型视角来看,机载 ADS-B 产品又可以分为独立 ADS-B 接收机、ADS-B 发射机以及 ADS-B 收发机。

分别从载机类型与功能构型两个视角对机载 ADS-B 产品进行分类,如表 1 所示。

表 1 机载 ADS-B 主要产品
Table 1 Main products of airborne ADS-B

应用平台	产品厂商	产品名称/型号	
		仅发射	收发一体
面向航线飞机平台	Rockwell Collins	TPR-901 TDR-94D	ISS-2100
	Honeywell	TRA-67A TRA-100B	TPA-100B AESS
	ACSS	NXT-700 NXT-800	TCAS3000 T ³ CAS
面向通航飞机平台	BendixKing	—	KGX-130 KGX-150
	uAvionix	tailBeaconX	—
	L3Harris	NGT-1000 NGT-2000	NGT-9000
面向 UAS	Garmin	GDL 90	GNX-375 GTX-335
	uAvionix	ping200SR	PingRx Ping1090i Ping2020i

1.1 按载机平台分类

(1) 面向航线飞机的 ADS-B 产品

目前,航线飞机的 ADS-B 相关产品大都被 Rockwell Collins、Honeywell、ACSS 等主流供应商垄断。这些公司多通过对现有 S 模式应答机的升级来实现 ADS-B 发射功能;通过对交通防撞和告警系统(Traffic Alert and Collision Avoidance System,简称 TCAS)进行升级实现 ADS-B 接收功能。具有 ADS-B 发射功能的主流产品有:Honeywell 公司的 TRA-100B 应答机、Rockwell Collins 公司的 TPR-901 应答机、ACSS 公司的 NXT-600/700/800 系列应答机。具有 ADS-B 接收功能的产品有:Honeywell 公司的 AESS, ACSS 公司的 T³CAS 等,如图 2 所示。



图 2 三大国外厂商综合监视产品示意图

Fig. 2 Schematic diagram of comprehensive monitoring products of three foreign manufacturers

(2) 面向通用航空飞机的 ADS-B 产品

在通航领域,提供 ADS-B 产品与解决方案的厂商众多,包括 L3Harris、FreeFlight、BendixKing、uAvionix、Garmin 等。由于通航飞机种类繁多,应用场景多样,其产品功能构型也比较多,包括独立的接收机、发射机以及一体化收发机。具有代表性的产品有: BendixKing 公司研制的 KGX-130/150 接收机; Garmin 公司的 GTX 335/345 收发机的价格仅 2 295 美金,市场竞争力极强^[3]; uAvionix 公司研制的 tailBeaconX 发射机(如图 3 所示); L3Harris 公司研制的 NGT-2000/2500、NGT-9000 系列一体化收发机。其中, uAvionix 公司研制的 tailBeaconX 发射机非常有特点,它集成了广域增强 GPS 接收机与航行灯,结构设计非常巧妙,可以方便地安装于飞机尾垂的航行灯位置,原位替换原航行灯。



图 3 面向通航的 ADS-B 发射产品 tailBeaconX

Fig. 3 Navigation oriented ADS-B launch product tailBeaconX

(3) 面向无人机的 ADS-B 产品

在无人机 ADS-B 产品领域, uAvionix 公司推出了多款轻巧且集成度很高的 ADS-B 产品,包括 ADS-B 接收机 PingRx、ADS-B 发射机 ping-200SR; ADS-B 一体化收发机 Ping2020i 与 Ping-1090i 等。其中 Ping1090i(如图 4 所示)仅重 26 g,

支持 1 090 与 978 MHz 双频接收, 1 090 MHz 发射, 集成了广域增强 GPS 接收机与气压高度表。



图 4 面向无人机的 ADS-B 收发机 Ping1090i

Fig. 4 ADS-B transceiver Ping1090i for UAS

1.2 按功能构型分类

从功能构型来看, ADS-B 产品可分为以下三类:

(1) ADS-B 接收

独立的 ADS-B 接收机主要应用于通用航空与无人机, 大多支持 1 090 与 978 MHz 双频段接收, 比较有代表性的产品包括 BendixKing 公司的 KGX-130/150、Freelight 公司的 FDL-978-RX、uAvionix 公司的 plugUSB 接收机等。这些接收机十分轻巧、集成度高、价格便宜, 可以通过无线网络与智能手机、平板电脑交联, 信息可以在第三方软件上直观显示, 只要很小的代价就可以极大地增强飞行员对周边交通态势的感知能力。

(2) ADS-B 发射

ADS-B 发射机按频段可以分为 978 与 1 090 MHz 两种, 工作于 978 MHz 的 ADS-B 发射机主要面向美国通用航空飞机; 工作于 1 090 MHz 的 ADS-B 发射机其应用范围广。为了防止 1090ES 链路拥堵与干扰, 独立的、不与应答机集成的 ADS-B 发射机类型与应用场景受到了约束, 因此, 主流的工作于 1 090 MHz 的 ADS-B 发射机大多与应答机集成。面向航线飞机的典型产品有 TRA-100B、TPR-901、NXT-800 等; 面向通航飞机的产品有 BendixKing 公司研制的 KT74 应答机、Freelight 公司研制的 FDL-1090-TX 等。面向通航飞机的 ADS-B 发射产品大都集成了广域增强 GPS 接收机、气压高度表等, 安装方便、性价比高。

(3) ADS-B 一体化收发机

该构型集成 ADS-B 发射与接收功能, 主要应用于通用航空与无人机, 集成广域增强 GPS 接收机与气压高度表, 大都支持 1 090 与 978 MHz 双

频接收;发射机一般都有多种配置,可工作于 978 或 1 090 MHz。L3Harris 公司针对通航飞机开发了 NGT-9000 多功能收发机,支持双频接收,可以获取交通、飞行与气象信息;发射机工作于 1 090 MHz,与 S 模式应答机集成。uAvionix 公司针对无人机开发了 Ping1090i 与 Ping2020i 系列收发机,两者都支持 1 090 与 978 MHz 双频接收,其中,Ping2020i 发射机工作于 978 MHz,Ping1090i 发射机工作于 1 090 MHz 频段。

2 机载 ADS-B 系统技术特点

总体而言,面向航线飞机、通航飞机与无人机的 ADS-B 产品具有各自不同的技术特点。

对于航线飞机而言,其 ADS-B 发射功能多通过对已装备的 S 模式应答机、GPS 位置源进行软硬件升级或替换来实现。比如 Rockwell Collins 针对波音与空客系列飞机,把原 TPR-900 应答机升级到 TPR-901,把原 GPS 接收机 GPS-4000 升级到 GPS-4000S,就可以满足 DO-260B 要求。同时,航线飞机又把 S 模式应答机、TCAS 系统、地形提示和告警系统(Terrain Awareness Warning System,简称 TAWS)进一步集成,形成交通监视系统,如 ACSS 公司 T³CAS 系统、Honeywell 公司 SmartTraffic 交通监视系统。最终,交通监视系统又与气象雷达系统集成构成了综合监视系统,如图 5 所示,它们的特点是继承性很强,综合性很强,技术壁垒很大。



图 5 Honeywell 综合监视系统

Fig. 5 Honeywell integrated monitoring system

通航飞机种类多,应用场景差异大,因此,其 ADS-B 产品构型也比较多,涵盖独立的接收机、发射机以及一体化接收机。通航飞机 ADS-B 产品关注系列化设计、集成化设计、结构与功能一体化设计;同时,非常重视与第三方软硬件的交互,一般都

可以方便地与平板电脑、智能手机互联,各种交互式信息可以直接在第三方应用软件(例如 ForeFlight、Avare)上显示。

无人机 ADS-B 产品更加关注高集成度、轻量化、低成本设计,大都支持 1 090 与 978 MHz 双频接收,并且带有与自动驾驶软件交联的接口,支持“自动感知与规避”功能,能够自主感知周边空中交通信息,自主规避,从而保障空域安全。

3 问题及发展趋势

随着 ADS-B 系统应用越来越广泛,其面临的支持 ADS-B 的监视应用开发、安全性、密集干扰环境下增强接收、1090ES 链路扩容等问题也越来越受到关注,本节对上述问题及潜在技术途径进行深入分析,并提出技术发展建议。

3.1 支持 ADS-B 的航空器监视应用

基于 ADS-B 优质的监视数据链,航空器可以接收其他航空器发送的 ADS-B OUT 信息或地面服务设施发送的信息,为驾驶员提供运行支持。其中最典型的应用是机组通过驾驶舱交通信息显示设备(CDTI)获知其他航空器的运行状况,从而提高驾驶员的空中交通情景意识。

支持 ADS-B 的航空器监视应用仍在进一步发展中,现阶段主要包括基本型状态感知类、增强型状态感知类和驾驶舱间隔管理类等。主要分类包括:

(1) 基本型状态感知类:空中态势感知(Airborne Situational Awareness,简称 ATSA-AIRB)、目视间隔进近(Visual Separation on Approach,简称 ATSA-VSA)、CDTI 辅助目视间隔(CDTI Assisted Visual Separation,简称 CAVS)、航迹中程序(In-Trail Procedure,简称 ATSA-ITP)、机场场面态势感知(Situational Awareness on Airport Surface,简称 ATSA-SURF)。

(2) 增强型状态感知类:支持告警交通情景意识(Traffic Situation Awareness with Alerts,简称 TSAA)、支持指引和告警的机场场面态势感知(Enhanced Traffic Situational Awareness on the Airport Surface with Indications and Alerts,简称 SURF IA)。

(3) 间隔管理类:空中间距(Airborne Spac-

ing,简称 ASPA-FIM)、指定间隔(Delegated Separation)、自主间隔(Self-Separation)。

支持 ADS-B 的航空器监视应用划分如图 6 所示。

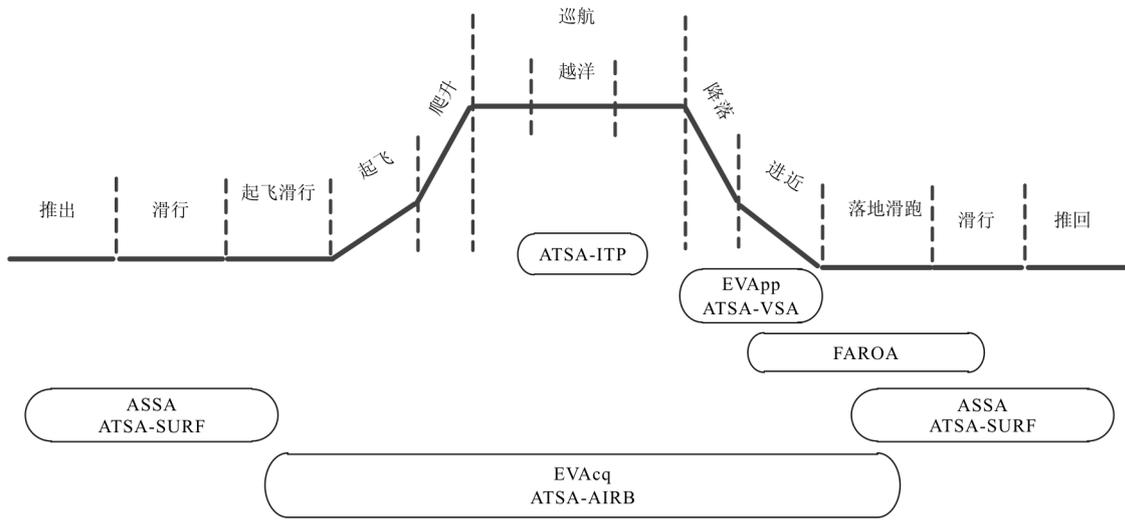


图 6 支持 ADS-B 的航空器监视应用划分

Fig. 6 Application division of aircraft surveillance supporting ADS-B

ADS-B 作为下一代监视的基石,部分应用独立于地面系统和空管系统,但大部分应用还是基于或与空管有密切联系的。未来的发展方向是监视、导航和通信综合的新航行系统,因此将来更多的应用需要结合通信、导航才能发挥最大效益。ADS-B 应用需要确保不影响空域的运行安全,故都应建立在大量实验和实际运行的基础上。支持 ADS-B 的航空器监视应用仍在发展中,随着制度和标准的不断完善,其应用范围将会更加广泛。

3.2 ADS-B 安全性提升

由于历史与现实多方面原因,ADS-B 采用开放、共享和广播式架构,其协议也是公开的,这些特点虽然极大地促进了商业应用,但也带来了一些问题^[4-8],这些问题不仅是地面单方面的问题,机载 ADS-B 系统作为空空和空地监视数据链最关键的一方,也对机载系统提出了极大的挑战,具体问题如表 2 所示。

(1) 易被蓄意接收监听。由于 ADS-B 协议是公开的,信息也没有加密,采用简单的无线电设备就可以接收到飞机的身份、位置与速度等信息,这些信息可能会被非法用于后续恶意攻击,带来很大的安全隐患。

(2) 易被人为电子干扰。人为电子干扰是指在特定区域,通过辐射大功率同频段干扰信号,导

致 ADS-B 接收前端饱和、ADS-B 报头脉冲提取困难、ADS-B 信息解码错误等一系列问题,造成地面或机载 ADS-B 接收功能下降或丧失,严重影响空空、空地监视链路的正常运行^[6-7]。

(3) 易被恶意欺骗篡改。信息欺骗篡改是指通过发射与 ADS-B 消息类似的虚假消息、接收篡改飞机 ADS-B 消息相关字段等手段,致使空管人员或者机载接收方接收到虚假或错误信息,造成决策错误,这将对航空安全带来非常严重的威胁。

表 2 ADS-B 面临问题分析
Table 2 Analysis of ADS-B problems

问题分类	原因分析
安全问题	蓄意监听 协议公开,仅需一个简单的天线和收发装置就可以获得飞机的精确信息,增加了运行风险。
	人为干扰 利用大功率的无线电发射机就可以干扰信号的正常接收,这种干扰可能是故意的或无意的。
	恶意欺骗 通过架设天线,可以发射与 ADS-B 类似的虚假消息,给空管和飞机飞行造成恶劣的影响。
数据链路问题	链路性能 数据链的带宽和性能取决于所设想的复杂性,并有可能成为主要的问题。
	链路拥堵 ADS-B 与 SSR、MDL 共同占用 1 090 MHz,导致频段十分拥挤,引发丢报和报文时延现象。

针对以上信息安全问题,总体而言,可以采用

以下三个途径提升 ADS-B 系统信息安全。

(1) 基于外部系统的 ADS-B 信息验证。基于外部系统的信息验证是指采用一次雷达、二次雷达、多点定位等外部系统获得目标信息来对 ADS-B 信息进行验证,可以在很大程度上剔除虚假的 ADS-B 目标^[9-10]。

(2) ADS-B 数据真实性独立校验。ADS-B 数据独立校验指接收端对接收到的 ADS-B 信息进行完好性与真实性校验,剔除非法的虚假信息。此方法可以不依赖外部系统,实现代价低,具有很高的工程实用价值^[11-14]。当前,主要技术手段包括:基于 Kalman 滤波的航迹突变检测^[11];意图校验,即验证 ADS-B 消息中意图字段是否与目标的滤波航迹相关匹配;ADS-B 消息中导航不确定类别参数校验^[12];另外,还可以通过验校回波信号幅度、多普勒频移、时延等参数与发射机位置及速度的符合性来确认发射机的合法性^[13-14]。

(3) 身份认证技术。ADS-B 身份认证包括指纹特征认证^[15]与基于密钥的身份认证^[16-17]。指纹特征认证利用发射机在辐射电磁指纹、时钟偏移等方面特征差异辨识非法发射机^[18-19]。

3.3 密集干扰环境下的接收增强

由于 ADS-B 与二次雷达、TCAS、多点定位、敌我识别等多个系统共用 1090ES 链路,该频段非常拥挤,容易受到同频干扰;同时,随着航空器数目持续增长,各种应答信号、ADS-B 信号密度会进一步增加,地面及空中 ADS-B 接收机将面临着密集的异步虚假应答信号(False Replies Unsynchronized with Interrogator Transmissions, 简称 FRUIT)以及窜扰^[20-21]。

FRUIT 是指其他询问机触发的非期望应答信号,包括 A/C 模式 FRUIT 与 S 模式 FRUIT,ADS-B 接收机需要应对的 FRUIT 密度可达到 40 000 次/秒。窜扰是指一个询问机触发的多个目标应答信号交叠;不同目标的 ADS-B 信号也会时域交叠窜扰,彼此难以分离。由于独立于应答机的 ADS-B 发射机被限制,数目相对很少,ADS-B 信号彼此窜扰的情形也可以归类到 S 模式 FRUIT 类别中。影响 ADS-B 接收性能的主要因素是密集 FRUIT 干扰信号。

对于空中 ADS-B 接收机而言,由于空间体积

等代价约束,基本上都是单通道接收体制,主要通过传统方法进行优化升级来实现接收增强^[20-21]。主要的优化手段有:基于匹配滤波的信噪比增强技术,通过自相关接收提高回波信噪比;同步脉冲回波强度一致性检验技术,通过检验四个同步脉冲强度是否一致来判决是否被干扰;基于多采样点分析的数据位及其置信度提取技术;全信息误差检测与纠错技术,提升多个异步干扰条件下的纠错能力^[20-24]。

3.4 1090ES 链路扩容

随着 ADS-B 应用进一步发展成熟,不仅需要传输位置、速度、识别与意图等信息,还有传输飞行情报、实时气象等多种信息的需求,这对 1090ES 链路容量提出了很高的要求。因此,提升 1090ES 链路容量成了广受关注的课题^[25-27]。目前,提升 1090ES 链路容量的途径主要有:

(1) 增加广播频次。当前 ADS-B 的信号发送频率要求不超过每秒 6.2 次,每帧信息为 112 bit,对应的传输速率不超过 694 bit/s。虽然增加广播频次,传输速率会成倍提升,但是会带来比较严重的信号重叠干扰,特别是当空中目标较多时,不同飞机 ADS-B 信号重叠概率也会急剧增大,导致后续报头检测、信息解码等处理困难。

(2) 信号中增加相位调制。当前,1090ES 链路采用相对简单的脉冲位置调制与脉冲幅度调制,载波相位连续,没有携带任何信息,传输效率不高。可以通过增加相位调制的方式,如二相调制、四相调制、八相调制等,提高信息传送速率。如果采用八相调制,每个比特位将增加 3 bit 信息,每一帧将增加 336 bit 信息,传输速率将最大提升 2.083 kbit/s。通过相位调制可以在不增加信号重叠干扰的条件下扩充链路容量,但是,也带来了一些新问题,比如相位突变导致的谱频扩展抑制、接收端载频同步、链路扩容后信息编码与校验、传输位数增加后字段定义等还有待进一步研究与验证。

4 未来发展趋势

美国联邦航空局已于 2020 年 1 月强制要求相应航空器具备 ADS-B 发射功能;欧洲与中国航空局也陆续推行了 ADS-B OUT 的运行。在此背景下,ADS-B 产品研制将迎来非常好的发展机遇。

在技术发展方面,支持 ADS-B 的航空器监视应用将不断开发和完善,ADS-B 信息安全将会越来越受到关注,ADS-B 数据独立校验技术、身份认证技术可以不依赖雷达、多点定位等相对昂贵的外部系统,是比较有前景的解决方案。

针对密集 FRUIT 环境下接收增强问题,一方面可以通过精细化处理算法提升接收性能;另一方面,可进一步研究低成本、多通道接收架构,通过自适应阵列处理提升抗干扰能力。

针对 1090ES 链路扩容,在信号中增加相位编码提高传送速率是一种比较有前景的方法,但需要进一步解决链路扩容后信息编码与校验、传输位数增加后字段定义等新问题。

5 结束语

本文对国外主流 ADS-B 产品进行了梳理,对典型产品技术特点进行分析后发现:美国针对航线飞机、通航飞机以及无人机需求,已经成体系地研制了功能多样的 ADS-B 产品,形成了较为完备的产品谱系;而国内机载 ADS-B 产品仍然很少,存在较大的差距,需要依据不同平台的特定需求,有层次地开展相关产品研制。对运输类飞机而言,ADS-B 发射与接收功能大都通过原有应答机、TCAS 系统升级获得,这些交通监视系统又与气象雷达综合,形成综合监视系统,技术门槛很高,国内厂商需要顶层策划、通力合作才能推出有竞争力的产品。对通用飞机和无人机而言,门槛相对较低,国内厂商可以针对一些细分市场与特定平台,研制高集成度、结构巧妙、安装便捷灵活的 ADS-B 产品。

参考文献

- [1] 张召悦. 空管监视技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
ZHANG Zhaoyue. Air traffic surveillance technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017. (in Chinese)
- [2] Radio Technical Commission for Aeronautics. Minimum operational performance standards for 1 090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) and traffic information services-broadcast (TIS-B): RTCA DO-260B[S]. USA: RTCA, 2009.
- [3] 王飞只. ADS-B 系统机载设备维护之研究[J]. 科技资讯, 2010(11): 5-6.
WANG Feizhi. Research on maintenance of airborne equipment in ADS-B system[J]. Science & Technology Information, 2010(11): 5-6. (in Chinese)
- [4] STROHMEIR W, LENDERS V, MARTINOVIC I. On the security of the automatic dependent surveillance-broadcast protocol[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 1066-1087.
- [5] KOCAA E, KÜLEKCI M O. Security analysis on the ADS-B technology[C]// 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). Antalya: IEEE, 2017: 1-4.
- [6] MANESH M R, MULLINS M, FOERSTER K, et al. A preliminary effort toward investigating the impacts of ADS-B message injection attack[C]// 2018 IEEE Aerospace Conference. Montana: IEEE, 2018: 1-6.
- [7] LEONARDI M, PIRACCI E, GALATI G. ADS-B vulnerability to low cost jammers: risk assessment and possible solutions[C]// 2014 Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications-Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles (TIWDC/ESAV). Rome: IEEE, 2014: 41-46.
- [8] LEONARDI M, MAISANO M. Degarbling technique for low cost ADS-B receivers[C]// 2019 IEEE 5th International Workshop on Metrology for Aerospace (Metro Aerospace). Torino: IEEE, 2019: 65-69.
- [9] MARADY A. Enhancing accuracy and security of ADS-B via MLAT assisted-flight information system[C]// 2017 12th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES). Cairo: IEEE, 2017: 182-187.
- [10] MONTEIRO M, KACEM T. Detecting malicious ADS-B transmitters using a low-bandwidth sensor network[C]// 18th International Conference on Information Fusion. Washington: IEEE, 2015: 1696-1701.
- [11] KROZEL J. Aircraft ADS-B data integrity check[C]// AIAA 4th Aviation Technology, Integration and Operations Forum. [S.l.]: AIAA, 2004: 1-11.
- [12] 吕宗平, 倪育德, 陈君, 等. 基于 GNSS 完好性的 ADS-B 防欺骗[J]. 雷达科学与技术, 2018, 16(4): 359-365.
LYU Zongping, NI Yude, CHEN Jun, et al. Anti-spoofing for ADS-B based on GNSS integrity [J]. Radar Science and Technology, 2018, 16(4): 359-365. (in Chinese)
- [13] 陈蕾, 吴仁彪, 卢丹, 等. 利用多普勒效应的 ADS-B 欺骗式干扰检测方法[J]. 信号处理, 2018, 34(6): 722-728.
CHEN Lei, WU Renbiao, LU Dan, et al. ADS-B spoofing detection method using Doppler effect[J]. Journal of Signal Processing, 2018, 34(6): 722-728. (in Chinese)
- [14] KIM Y, JO J, LEE S. ADS-B vulnerabilities and a security solution with a timestamp[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2017: 32(11): 52-61.
- [15] YANG Haomiao, ZHOU Qixian, YAO Mingxuan, et al. A practical and compatible cryptographic solution to ADS-B security[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2):

- 3322-3334.
- [16] THABET K, DUMINDA W, COSTA P, et al. Secure ADS-B framework “ADS-Bsec”[C]// IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation System. Rio de Janeiro: IEEE, 2016: 2681-2686.
- [17] LEONARDI M, GERARDI F. Aircraft mode S transponder fingerprinting for intrusion detection[J]. Aerospace, 2020, 30(7): 1-16.
- [18] 陈曦. 一种 S 模式应答机及其 ADS-B 报文加密传输设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
CHEN Xi. The design and implementation of an mode S transponder and its ADS-B message encryption transmission [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [19] 梁韬. 基于 TDOA 与 TSOA 的 ADS-B 防欺骗技术研究及实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
LIANG Tao. Research and implementation of ADS-B anti-fraud technology based on TDOA and TSOA[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [20] CHIOCCHIO S, PERSIA A, SANTUCCI F, et al. Modeling and performance analysis of advanced detection architectures for ADS-B signals in high interference environments [C]// 2017 32nd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS). Montreal: IEEE, 2017: 1-4.
- [21] SOPATA M, KEJIK P. Enhanced techniques for improved ADS-B messages reception [C]// 2015 IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Prague: IEEE, 2015: 2-8.
- [22] 周思遥. 基于压缩感知的 ADS-B 信号多种干扰抑制研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
ZHOU Siyao. Research on multi-interference suppression to ADS-B signal based on compressive Sensing [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [23] LEONARDI M, PIRACCI E, GALATI G. ADS-B jamming mitigation: a solution based on a multichannel receiver[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2017, 32(11): 44-51.
- [24] LEONARDI M, PIRACCI E, GALATI G. ADS-B degarbling and jamming mitigation by the use of blind source separation [C]// 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC). London: IEEE, 2018: 44-51.
- [25] 王文益, 朱特, 吴仁彪, 等. 低复杂度的 ADS-B 抗干扰阵列天线无源校正算法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(9): 1915-1920.
WANG Wenyi, ZHU Te, WU Renbiao, et al. Low complex passive calibration algorithm for ADS-B anti-jamming antenna arrays [J]. System Engineering and Electronics, 2017, 39(9): 1915-1920. (in Chinese)
- [26] GALATI G, PIRACCI E G, PETROCHILOS N, et al. 1 090 MHz channel capacity improvement in the air traffic control context [C]// Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications-Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles. Capri: IEEE, 2008: 1-5.
- [27] 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. A research of 1090ES capacity extending technology based on phase modulation [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)

作者简介:

邓晓波(1982—),男,博士,研究员。主要研究方向:雷达系统、综合监视系统、信号与信息处理。

王飞(1987—),男,硕士,工程师。主要研究方向:综合监视系统。

杨光曜(1993—),男,硕士,工程师。主要研究方向:综合监视系统。

(编辑:马文静)