

基于正确解码率的 ADS-B 天线配置模型分析

李家蓬, 安强, 陈琴*, 冯涛

(四川九洲空管科技有限责任公司, 四川 绵阳 621000)

摘要: 提出一种广播式自动相关监视(ADS-B)天线配置分析模型, 该模型可实现基于本地具体情况获得满足空管管制要求的 ADS-B 天线部署方案, 为后续 ADS-B 站点部署实施时选择定向/全向天线提供决策工具。本文以报文正确解码率作为评估定向/全向天线效果的直接指标, 从飞机数量、雷达/TCAS 部署情况、飞机应答/广播速率等 3 个角度出发, 获得空域单目标每秒发送报文的数量, 分析其与定向/全向 ADS-B 接收设备报文解码率的关联性, 从而得到定向天线与全向天线配置下报文解码率分析模型, 然后设置模型相关参数, 通过模型解算获得相应的正确解码率。通过实际录取数据对该模型正确性进行相关验证, 结果与理论模型基本保持一致, 证明 ADS-B 天线配置分析模型是正确有效的。

关键词: ADS-B; 天线配置; 解码率; 分析模型

中图分类号: V243; V355.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2024)01-0036-05

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.5169

Analysis of ADS-B Antenna Configuration Model Based on Correct Decoding Rate

LI Jiapeng, AN Qiang, CHEN Qin*, FENG Tao

(Sichuan Jiuzhou Air Traffic Control Technology Co., Ltd, Mianyang 621000 China)

Abstract: This paper introduces an ADS-B antenna configuration analysis model. It is designed to determine ADS-B antenna deployment solutions that meet air traffic control requirements based on local circumstances. The model employs message decoding accuracy as an evaluation metric and takes into account factors such as aircraft quantity, radar/TCAS deployment status, and aircraft response/broadcast rates. It analyzes message decoding rates for directional and omnidirectional antenna configurations while verifying the model's accuracy. The correctness of the model is verified by the actual data, and the results are basically consistent with the theoretical model, which proves that the ADS-B antenna configuration analysis model is correct and effective.

Keywords: ADS-B; antenna configuration; decoding rate; analysis model

收稿日期: 2023-08-01

第一作者: 李家蓬(1989—), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为空管监视。

ORCID: 0000-0003-1767-4688 E-mail: 944817409@qq.com

*通信作者: 陈琴(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为空管监视。

ORCID: 0000-0001-8535-7890 E-mail: 2632546914@qq.com

引用格式: 李家蓬, 安强, 陈琴, 等. 基于正确解码率的 ADS-B 天线配置模型分析[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2024, 43(1): 36-40.

LI Jiapeng, AN Qiang, CHEN Qin, et al. Analysis of ADS-B Antenna Configuration Model Based on Correct Decoding Rate[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2024, 43(1): 36-40.

ADS-B 系统因精度高、数据更新快等优势被国际民航组织确定为未来主要监视手段之一^[1-2]。该系统使用 1 090 MHz 的工作频率,并包括应答信号和广播信号。因为 ADS-B 报文的解码率会受到其他飞机信号的干扰影响,所以 Zhao^[3]提出基于 RLS 算法的多重叠 1090ES ADS-B 信号分离算法来提升 ADS-B 解交织能力;唐鹏^[4]通过分析 ADS-B 监视性能评估技术原理建立了监视性能评估指标体系。但定向、全向天线的配置决策一直未得到解决。为了提高解码率,在复杂环境和高飞机目标密度的情况下,部署定向天线是一个有效的解决方案。目前,ADS-B 监视性能方面取得了提升,但定向天线与全向天线的配置难以决策的问题仍然存在。因此本文旨在通过分析飞机数量、雷达/空中防撞系统(简称“TCAS”)部署情况和应答/广播内容及速率、报文解码率要求等多种因素,建立定向/全向天线配置下的报文正确解码率分析模型,为 ADS-B 站点部署选择提供决策工具。

1 ADS-B 天线配置模型概述

ADS-B 天线配置模型如图 1 所示。

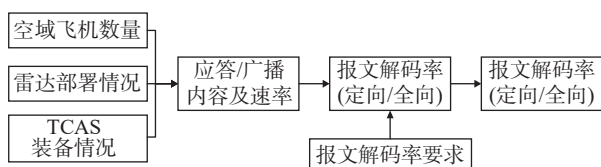


图 1 ADS-B 天线配置模型概述

Fig. 1 Overview of ads-b antenna configuration model

ADS-B 工作频率为 1 090 MHz,主要存在应答信号和广播信号。应答信号由地面二次雷达和空中飞机的 TCAS 系统询问触发;广播信号则包含 DF11 和 ADS-B 两类^[5]。应答信号、广播信号的数量和分布受空域飞机数量、雷达部署情况、TCAS 装备情况的影响。本文用报文正确解码率作为评估定向/全向天线效果的直接指标,建立理论模型,研究飞机数量、雷达/TCAS 部署情况、飞机应答/广播速率与定向/全向 ADS-B 接收设备报文解码率的关联性。选择典型站点的实际录取数据对模型进行调整和验证。当通过理论模型有效性、准确性验证后,形成飞机数量、雷达部署、TCAS 部署情况和天线配置关系的对照关系,为后续 ADS-B 站点部署实施提供决策工具。

2 建立分析模型

2.1 ADS-B 天线配置模型分析

空域目标要响应周边飞机 TCAS、地面二次雷达的询问,还要自身完成周期性广播,因此需要从雷达部署、TCAS 部署和广播情况来对单目标报文发送数量进行分析,进而建立解码率分析模型。

2.1.1 雷达部署情况与飞机应答的关系

任意飞机在单个雷达覆盖范围根据询问格式产生应答信号;当存在多个雷达,则应答数量和雷达分布、雷达询问模式相关。典型的 A/C 模式二次雷达波束扫描周期为 4 s,询问重复频率为 150~450 Hz^[6]。按照 8 m 天线 3 dB 波束宽度最大 2.7° 的波束宽度计算,飞机在 1 个波束内停留的时间约 30 ms。对应询问次数为 4.5~13.5 次。在实际运行中,根据空域运行场景,每架飞机按照 10 次计算。对于 S 模式询问,根据雷达设置与飞机运行的实际情况,分为全呼和点呼。全呼采用 DF11 的格式应答;点呼采用二次雷达的具体询问策略。考虑典型的情况,按照每秒 1 短 3 长的分布进行计算。雷达覆盖不会全交叠,计算需乘交叠系数 α (交叠系数根据重复覆盖比率决定),如图 2 所示。只有在多雷达部署覆盖范围内时,才会多次响应。

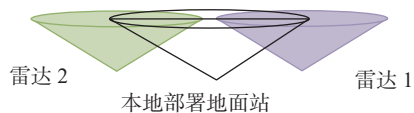


图 2 响应多重应答的情况

Fig. 2 Response to multiple responses

2.1.2 TCAS 部署情况与飞机应答的关系

TCAS 防撞系统包括 TCAS 主机(询问)和 S 模式应答机两个子系统(应答)。根据空域运行场景,TCAS 系统具备 C 模式、DF0(S 模式短)与 DF16(S 模式长)3 种应答模式^[7-8]。

按照 TCAS 运行规则,TCAS 针对周围空域内飞机进行监视,他将水平面分为 4 个象限^[9],在每个象限内采用小声呼叫的方式进行询问(可以控制在一定距离环之内的飞机应答),如图 3 所示。

按照 RTCA/DO185 标准规定,一般情况下,当飞机按照民航管制间隔飞行时(即不产生 TCAS 告警),TCAS 依次在 1 象限内产生 24 次 C 模式询问(小声呼叫模式,下同),在 3 象限内产生 15 次 C 模

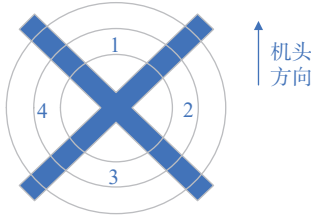


图3 TCAS 询问示意图

Fig. 3 Schematic diagram of TCAS inquiry

式询问,在2和4象限内各产生20次C模式询问;对于每个目标,每6s产生1次UF0询问(点呼),每8s产生1次S模式长询问(广播询问)。因此,可以假设在典型的覆盖空域内有 A 架飞机,则每架飞机产生以下数量应答:C应答为 $A \times 1$ 次,短S模式为 $A/6$ 次,长S模式为 $A/8$ 次。

由于TCAS标准要求其只对附近空域(80 km)内的目标进行监视、跟踪和告警,上限要求为50,其显示上限要求为30,实际运行中,一般监视目标数量为20。因此,按照20计算,则TCAS产生的A/C模式应答约为20次,短S模式应答约为3次,长S模式约为2次。

2.1.3 S模式广播和单目标发送报文总数量

S模式广播主要包括DF11、DF17(DF18和DF19对广播速率无影响,因此都采用DF17计算)^[10-11]。目前的应答机配置情况,每个目标广播频率为:短S模式为1次/s;长S模式为4次/s。在典型高密度空域内,飞机装备TCAS系统具备广播能力,地面部署 M 部A/C二次雷达和 N 部S二次雷达,对任意目标,则应答、广播报文总数量为:AC应答: $10 \times (M+N) \times \alpha + 20 + 0$;短S模式: $N \times 1 \times \alpha + 3 + 1$;长S模式: $N \times 3 \times \alpha + 2 + 4$ 。在典型的运行场景下,单个飞机应答报文数量主要受地面二次雷达数量(有效覆盖)及类型影响。

2.2 解码率计算模型

由于空域内所有飞机机载应答机广播信号完全随机产生,所以引入泊松分布模型计算地面站能够正确接收ADS-B信号概率^[12]的计算方法: $P[n] = (e^{-\lambda}) \times ((\lambda \times t)^n) / n!$,其中: λ 是每秒A/C、短S、长S模式的干扰信号的总次数,由飞机数量和每秒每架飞机产生的干扰信号数量相乘获得; t 为时间窗口; n 为发生次数, n 为0或者1,0代表在该时间窗内添加相应干扰不能成功解码,1则反之。

选取干扰信号时间窗大小及允许干扰次数,其中A/C、短S、长S的时间窗口分别为20.3、64、120 μ s;其允许的干扰次数分别为1,0,0。分别添加A/C模式、短S和长S模式干扰后ADS-B信号的正确接收概率为:

$$P(A/C) = P[0] + P[1] = e^{-\lambda_1 t_1} + e^{-\lambda_1 t_1} \times (\lambda_1 t_1) \quad (1)$$

$$P(\text{Short}) = P[0] = e^{-\lambda_2 t_2} \quad (2)$$

$$P(\text{Long}) = P[0] = e^{-\lambda_3 t_3} \quad (3)$$

时间窗大小定义为 $t_1=20.3+120$, $t_2=64+120$, $t_3=120+120$ 。 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为每秒飞机数量与每秒每架飞机产生的A/C、短S、长S模式数量干扰信号数量的乘积,若全向天线则系数为1;若为多通道定向天线,则需除以相应的系数,例如为4通道ADS-B设备,需要除以1.67。

添加3种干扰后的正确应答概率为 $P = P(A/C) \times P(\text{Short}) \times P(\text{Long})$;对于每秒两次扩展断续震荡的情况下,连续 n 秒内至少有一次可以正确解码ADS-B报文概率为 $P_x = 1 - (1 - p)^{2 \times n - 1}$ 。

2.3 模型参数设置

根据解码率模型及实际情况,选取两个空域繁忙地区(场景1、2),以其周边A/C、S模式二次雷达分布为基础,结合雷达覆盖情况,计算覆盖系数,设置模型参数,具体参数设置情况如表1所示。

表1 模型参数设置
Tab. 1 Model parameter settings

覆盖系数类型	场景1			场景2		
	A/C	短S	长S	A/C	短S	长S
AC模式雷达部数 M	6			3		
S模式雷达部数 N	5			3		
多重覆盖系数 α	0.32			0.34		
SSR	35	1.5	4	20	1	3
广播	0	1	4	0	1	4
TCAS	20	3	2	20	3	2
总计	55	5.5	0	40	5	9

3 仿真与分析

以场景1、2为例,利用上述模型对ADS-B报文正确解码率进行仿真分析。1秒刷新率下正确解码率代表每两次接收到广播信号至少能成功实现一次解码的概率。4秒刷新率下正确解码率代

表每 8 次接收到广播信号至少有一次能成功实现解码的概率。图 4(a)、图 4(b) 为两种场景中单通

道全向、四通道定向天线 ADS-B 正确解码率在 1、4 s 刷新率下随目标数量增多的变化趋势。

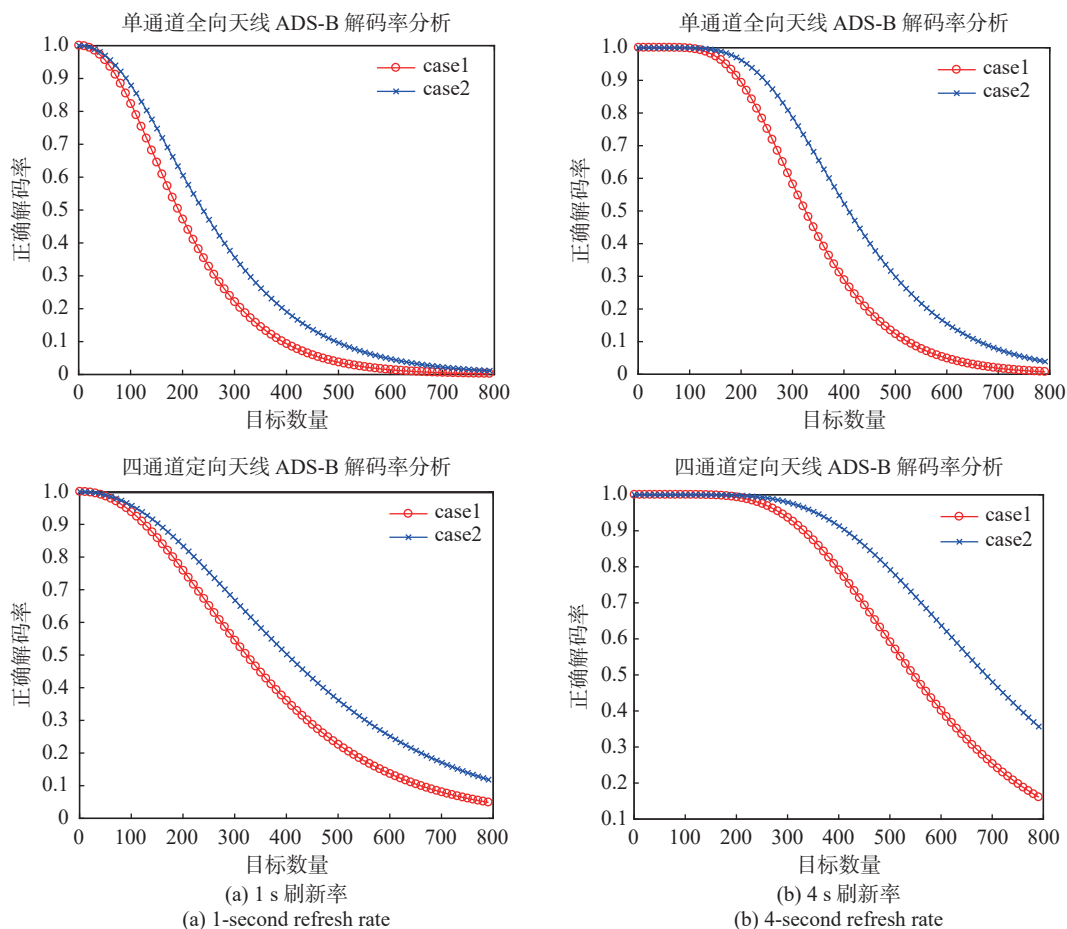


图 4 全向/定向天线正确解码率

Fig. 4 Correct decoding rate of omnidirectional/directional antenna

两种场景下 1、4、5、8 s 更新间隔时, 达到 95% 航迹更新率(正确解码率)的目标容量如表 2 所示。其中, 5、8 s 常用于终端区和航路。根据二次雷达等情况分布进行模型数据分析: 在 1 s 更新间隔, 达到 95% 的航迹更新率情况下全向天线、定向天线分别可容纳的目标数量为 60 个左右和

91~115 个; 在 4 s 更新间隔, 达到 95% 的航迹更新率情况下全向天线、定向天线分别可容纳的目标数量为 165~210 个和 281~343 个; 在 8 s 更新间隔, 达到 95% 的航迹更新率情况下全向天线、定向天线分别可容纳的目标数量为 242~313 个和 415~520 个。

表 2 目标数量统计

Tab. 2 Target quantity statistics

场景	1s95%	4s95%	5s95%	8s95%	场景	1s95%	4s95%	5s95%	8s95%
场景一全向	56	165	193	242	场景一定向	91	281	324	415
场景二全向	58	210	254	313	场景二定向	115	343	410	520

4 实际数据验证

持续 3 天 24 小时无中断录取场景 1 对应

ADS-B 地面站的输出报文数据, 对每小时目标数量进行分析, 选取不同目标数量级典型 6 个小时时间段, 使用滑窗法对 ADS-B 航迹更新率进行分析。

对 1、4 s 更新间隔各时段航迹更新率数据(见表 3)进行分析可知,实际情况下,在 1 s 更新间隔、4 s 更新间隔达到 95% 航迹更新率(正确解码率)的目标容量与第 3 章仿真分析的目标容量基本

一致,验证了该分析模型的可用性;通过仿真分析与实际验证,场景 1 若要达到比较高的点迹刷新率(在 1 s 更新周期下达到 95% 的航迹更新率),当目标数量大于 60 的情况下建议使用定向天线。

表 3 1 s 和 4 s 更新间隔各时段航迹更新率

Tab. 3 Track update rates for each time interval between 1 s and 4 s updates

时段/h	1s更新间隔		航迹数	时段/h	4s更新间隔		航迹数
	全向	定向			全向	定向	
[0, 1)	79.32%	88.90%	254	[0, 1)	91.98%	95.74%	343
[1, 2)	83.06%	91.13%	224	[1, 2)	90.54%	94.87%	290
[15, 16)	93.62%	97.65%	90	[15, 16)	96.37%	98.89%	210
[16, 17)	96.41%	98.43%	37	[16, 17)	96.90%	99.42%	163
[19, 20)	95.75%	98.06%	64	[19, 20)	96.96%	99.57%	123
[22, 23)	91.37%	93.92%	150	[22, 23)	95.19%	98.45%	237

5 结论

本文针对在空域 1 090 MHz 情况下, ADS-B 的主要干扰因素,如 A/C、短 S、长 S 模式数据并结合二次雷达、TCAS、ADS-B 发送频率,对 1 090 MHz 的接收解码概率建模,根据实际场景调整参数,通过计算得出 A/C、S 模式应答次数的增加明显降低了信号接收的概率,并从理论上得到满足实际管控要求和 ED-126 规定场景下正确探测率的全向天线以及定向天线可容纳最大目标数量。同时,通过对某地面站 1 090 MHz 接收处理后的记录数据进行分析,采用时间窗口法对某区域内真实数据进行分析,对该地区安装的全向、定向地面站正确解码率进行统计,得到的结果与理论模型基本保持一致,并根据理论模型和实际数据分析,给出了天线部署建议。

参 考 文 献

- [1] KOSIANCHUK V V. An overview of the main ways to improve the ads-b system security overview[J]. *Civil Aviation High Technologies*, 2019, 22(1): 39 – 50.
- [2] 程凌舟. ADS-B 技术在杭州空管自动化系统中的应用[J]. *民航学报*, 2021, 5(5): 37 – 40.
- CHENG L Z. Application of ADS-B technology in Hangzhou air traffic control automation system[J]. *Journal of Civil Aviation*, 2021, 5(5): 37 – 40.
- [3] ZHAO Z Y. Performance analysis of ADS-B overlapping signal separation algorithm based on RLS[J]. *Inter-*

national Journal of Performability Engineering, 2018, 14(3): 142 – 147.

[4] 唐鹏. 基于 ADS-B 数据监视性能评估技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2015.

TANG P. Research on performance evaluation technology for ADS-B data monitoring [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2015.

[5] 李云双, 杨宁, 李冬霞, 等. ADS-B 系统监视性能评估研究与验证[J]. *现代电子技术*, 2022, 45(5): 19 – 24.

LI Y S, YANG N, LI D X, et al. Research and verification of ADS-B system monitoring performance evaluation[J]. *Modern Electronic Technology*, 2022, 45(5): 19 – 24.

[6] 龚凯峰. 二次雷达集群目标应答方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.

GONG K F. Research on secondary radar cluster target response method [D]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology, 2021.

[7] 魏航科. TCAS 和 S 模式应答机数据接口标准的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.

WEI H K. Research on the data interface standards for TCAS and S-mode responders [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2018.

[8] 林鹏. 综合化防撞系统数字化 S 模式应答模块的设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.

LIN P. Design of a DIGital S-mode response module for a comprehensive collision avoidance system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2018.

(下转第 77 页)

tion of MEMS-IMU based on fuzzy robust adaptive CKF algorithm[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2022, 30(3): 296 – 303.

[7] 马也驰, 刘晓昂, 周志革. 应用卡尔曼滤波的激振力时域识别方法研究[J]. *机械科学与技术*, 2021, 40(8): 1214 – 1224.

MA Y C, LIU X A, ZHOU Z G. Research on time-domain identification method of excitation force using Kalman filter[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2021, 40(8): 1214 – 1224.

[8] IMPRAIMAKIS M, SMYTH A W. An unscented Kalman filter method for real time input-parameter-state estimation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 162: 108026.

[9] LIU Y R, WANG L, QIU Z P, et al. A dynamic force reconstruction method based on modified Kalman filter using acceleration responses under multi-source uncertain samples[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 159: 107761.

[10] FENG W, LI Q F, LU Q H. Force localization and reconstruction based on a novel sparse Kalman filter[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 144: 106890.

[11] 陈清华, 閻鑫, 王开云. 基于 SRCKF 算法的轨道车辆轮轨垂向力识别 [J/OL]. *西南交通大学学报*, 1-9[2023-08-19] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20230511.1354.006.html>.

[20230511.1354.006.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20230511.1354.006.html).

CHEN Q H, GE X, WANG K Y. Identification of wheel-rail vertical forces of rail vehicles based on the SR-CKF algorithm[J/OL]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 1-9[2023-08-19] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20230511.1354.006.html>.

[12] LEI Y, XIA D D, ERAZO K, et al. A novel unscented Kalman filter for recursive state-input-system identification of nonlinear systems[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 127: 120 – 135.

[13] ARASARATNAM I, HAYKIN S. Cubature Kalman filters[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(6): 1254 – 1269.

[14] 穆静, 蔡远利. 平方根容积卡尔曼滤波算法及其应用[J]. *兵工自动化*, 2011, 30(6): 11 – 13.

MU J, CAI Y L. Square root cubature Kalman filter algorithm and application[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2011, 30(6): 11 – 13.

[15] 肖仁鑫, 李斌, 黄志强, 等. 基于 SRCKF 的电动汽车锂离子电池荷电状态估计[J]. *电源技术*, 2021, 45(11): 1443 – 1447.

XIAO R X, LI B, HUANG Z Q, et al. State of charge estimation of electric vehicle lithium ion battery based on SRCKF[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2021, 45(11): 1443 – 1447.

(编校: 饶莉)

(上接第 40 页)

[9] 卢允娥, 刘远光. 基于 ADS-B 和 TCAS II 机载综合防撞系统设计研究[J]. *通讯世界*, 2017(19): 10 – 11.

LU Y E. Design and research of airborne integrated collision avoidance system based on ADS-B and TCAS II[J]. *Communication World*, 2017(19): 10 – 11.

[10] 毕子文. ADS-B 抗干扰接收机系统增强的设计与实现 [D]. 天津: 中国民航大学, 2021.

BI Z W. Design and implementation of ADS-B anti interference receiver system enhancement [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2021.

[11] 刘通. 多通道 ADS-B 报头检测技术研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2021.

LIU T. Research on multi-channel ADS-B header detection technology [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2021.

[12] 孟真真. ADS-B 单天线交织位置检测及其应用 [D]. 天津: 中国民航大学, 2020.

MENG Z Z. ADS-B single antenna interleaved position detection and its application [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.

(编校: 叶超)