

ADS-B 航迹掉点分析方法的研究

谢莉,李家蓬,陈琴

(四川九洲空管科技有限责任公司,四川 绵阳 621000)

摘要:广播式自动相关监视(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B)是安全、高效的空中交通监视手段。针对安装全向天线的 ADS-B 地面站存在航迹掉点问题,提出了一种四通道定向天线的 ADS-B 地面站的模型。首先,从站点和环境等多角度初步判定大量的空域信号交织干扰会造成信道拥挤、多重信号交织;然后,通过对信号实时捕获、现场录取数据等进行航迹确认;最后,建立目标交叠模型验证空域交叠信号与 ADS-B 航迹掉点的相关性。实验结果表明,空中存在大量的空域应答信号交织干扰情况,最终造成信道拥挤、多重信号交织而导致信号解码率下降,因此产生 ADS-B 掉点现象,多通道天线在一定情况下可改善 ADS-B 地面站性能,解决航迹掉点问题。

关键词:广播式自动相关监视;航迹掉点;定向天线;信道拥挤;目标交叠

中图分类号:TP302.7

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2022)0142-05

Research on ADS-B Track Drop Analysis Method

XIE Li, LI Jia-peng, CHEN Qin

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

Abstract: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast is a safe and efficient air traffic monitoring method. Aiming at the track drop problem of ADS-B ground station with omnidirectional antenna, a model of ADS-B ground station with four-channel directional antenna is proposed. Firstly, it is judged from multiple perspectives such as site and environment that a large number of spatial signal interleaving interference will cause channel congestion and multiple signal interleaving. Secondly, track confirmation is through real-time capture of signals and on-site data acquisition. Finally, a target overlap model is established to verify the correlation between the airspace overlap signal and the ADS-B track drop point. The experimental results show that there are a large number of airspace response signal interleaving interference in the air, which will eventually cause channel congestion and multiple signal interleaving, resulting in a decrease in the signal decoding rate. Therefore, the phenomenon of ADS-B drop points occurs. Under certain circumstances, multi-channel antenna can improve the performance of the ADS-B ground station to solve the problem of track drop.

Key words: automatic dependent surveillance-broadcast; track drop; omnidirectional antenna; channel congestion; target overlap

0 引言

广播式自动相关监视是国际民航组织确定的未来主要的监视技术^[1-2]。ADS-B 基于卫星定位和地/空数据链通信,提供了更安全、更高效的空中交通监视^[3-4],有效提高管制员和飞行员的运行态势感知能力,扩大监视范围,提高空中交通安全水平、空域容量与运行效率。但是,随着飞行流量增长 10% 导致空域无线电资源日趋紧张,在接收 ADS-B 信号过程中会出现航迹掉点问题。

ADS-B 技术为中国空管监视的发展重点,已成为中国空管监视系统发展的趋势。中国民航大力推进监视系统变革,努力构建天、空、地一体化 ADS-B 运行体系^[5],推动 ADS-B 建设和运行。2017 年底,中国基本完成 ADS-B 地面布局,开始初始运行;2020 年底,

全面完成机载设备改装和地面 ADS-B 网络建设,构建完善的民航 ADS-B 运行监视体系和信息服务体系,为空中交通提供全空域监视,为航空企业提供全面信息服务;预计至 2025 年底,根据 ADS-B 实施经验,不断完善 ADS-B 地面设施和地面 ADS-B 网络布局,从整体上提高民航安全水平、空域容量、运行效率和服务能力,为实现民航强国提供技术支撑^[6]。但在 ADS-B 设备运行期间,某些安装全向天线的 ADS-B 地面站存在航迹掉点情况,该文选取两个 ADS-B 安装站点(以下简称为站点 A 和站点 B)对其航迹掉点原因进行了详细分析。

1 航迹掉点情况分析

从 ADS-B 地面站本身设计、地面站安装周边环

收稿日期:2021-11-30

作者简介:谢莉(1984-),女,高级工程师,硕士,研究方向为航电系统;通讯作者:陈琴(1995-),女,硕士研究生,研究方向为空管监视。

境等角度对航迹丢失的原因进行分析,其航迹掉点可能存在三个因素:

(1)由于航迹丢点现象与目标方位、距离不相关,并且在不同站点出现同类现象。通过观察现场安装天线位置以及环境,没有明显的遮挡。因此初步排除全向设备因遮挡造成干扰的原因。

(2)定向、全向天线内部对单个通道的处理机制完全一致^[7],相同站点的定向设备航迹连续性好,因此初步排除软硬件处理机制造成的丢点原因。

(3)进一步,出现该类现象的区域属于典型的高密度区域,航班数量基本稳定维持在180~220左右。区域类有多套二次雷达设备,机载应答机频繁响应地面多套雷达询问;飞机与飞机之间互相响应TCAS的询问;空中形成大量的应答信号交织干扰。因此初步判定为是因为信道拥挤、多重信号交织造成信号解码率下降,最终表现为航迹断点。

因此,针对航迹掉点问题,该文分别从该站点信号情况、解交织分析、数据分析情况对某地区雷达站交织情况进行了详细分析。

2 空域干扰交织情况

在ADS-B安装站点使用逻辑分析工具对站点A的ADS-B地面站射频接收机信号进行实时捕获,该ADS-B安装站点周边空中电磁环境复杂对1090MHz的解码干扰严重,主要包括AC模式干扰、DME干扰、S模式干扰等^[8-11]。随着飞行器数量的增加单次解码受到干扰的概率也越高,具体情况如下:

2.1 干扰情况

(1)A/C干扰。

该站ADS-B设备作用距离内的航空器被多部雷达覆盖,应答机产生大量A/C模式应答信号^[8]。

(2)DME干扰。

该站ADS-B设备作用距离内的航空器被DME覆盖,机载设备产生DME应答信号^[9]。

(3)S干扰。

S模式干扰主要来自机载航空器的断续震荡信号、扩展断续震荡信号、TCAS信号、S模式应答信号^[10-11]。

2.2 交织情况

为了验证ADS-B信号干扰情况随着航空器数量的增加而加重,通过对一天之内的ADS-B原始数据进行分析,统计出航班流量变化情况。然后分别计算不同时间段内译码过程中低置信度报文数量、重触发报文数量、一次解码成功的报文比例表征了ADS-B信号干扰程度。情况如下:

(1)飞机数量变化。

1090地面接收范围内飞机数量随时间的变化关系,图1可以看出该面站覆盖区域内航班流量最大为500~600架次/小时,最低航班流量为100~200架次/小时,从每天早上8点到晚上11点均为航班繁忙时间段。

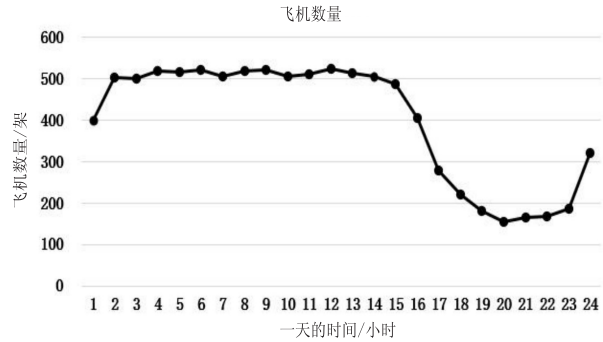


图1 飞机数量变化

(2)一次成功解码比例。

解码一次通过率情况,如图2所示,交织情况越严重,一次解码成功率越低。校验成功与校验失败比例越高,即与目标变化成反比。

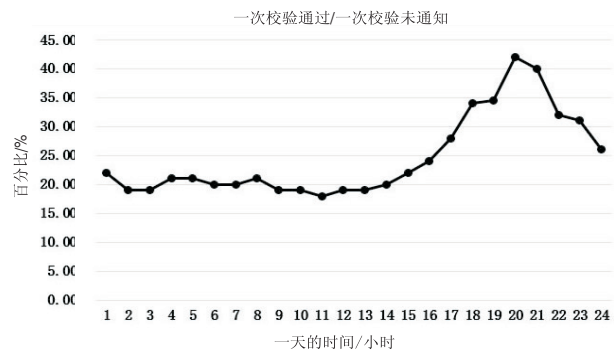


图2 解码一次通过率

(3)低置信度报文数量变化。

置信度比例:信号越密集,产生交叠的概率、低置信度的概率越高,后续能够正确检错的概率越低,与目标变化成正比。

(4)重触发报文数量。

重触发情况:S模式信号越密集,S模式交叠的概率越高,重触发的概率越高,与目标变化成正比。

3 数据录取与分析

在站点A的现场录取数据如表1所示,站点B第一时间段的录取数据如表2所示,站点B第二时间段的录取数据如表3所示。

表1~表3是不同站点和不同的时间的现场数据,分析可知:同一个站点内部的全向设备、定向设备位置报文:位置报文:身份报文比例接近10:10:1,是符合空中广播位置报文、速度报文、身份报文比例10:10:1的关系,进一步排除了全向设备因为设计问题丢失报文的可能性。

表 1 站点 A 的数据

	定向	全向	全向/定向
选取时间	2020 年 09 月 16 日 16 点 ~ 17 点		
累计目标数量	540	513	0.95
平均目标数量	212	183	0.863
累计位置报文	1 061 795	634 411	0.597
累计 021 报告	1 061 462	633 874	0.597
全向和定向共有的目标情况进行对比分析			
原始报文数量	2 339 819	1 402 606	0.599
位置报文数量	1 061 396	634 411	0.598
速度报文数量	1 019 346	614 515	0.603
身份报文数量	105 361	62 751	0.596
其他报文数量	153 716	90 929	0.506
位置/速度/身份	1/0.96/0.09	1/0.97/0.10	/

表 2 站点 B1 的数据

	定向	全向	全向/定向
选取时间	2020 年 09 月 14 日 05 点 ~ 06 点		
累计目标数量	498	450	0.904
平均目标数量	170	150	0.882
累计位置报文	823 681	548 495	0.666
累计 021 报告	823 264	558 347	0.667
全向和定向共有的目标情况进行对比分析			
原始报文数量	1 794 084	1 192 191	0.665
位置报文数量	821 653	548 495	0.668
速度报文数量	773 208	514 608	0.665
身份报文数量	82 958	55 963	0.675
报文数量	116 265	73 125	0.64
位置/速度/身份	1/0.94/0.1	1/0.93/0.1	/

表 3 站点 B2

	定向	全向	全向/定向
选取时间	2020 年 09 月 14 日 06 点 ~ 07 点		
累计目标数量	504	468	0.928
平均目标数量	180	145	0.806
累计位置报文	874 586	565 532	0.647
累计 021 报告	874 084	565 159	0.647
全向和定向共有的目标情况进行对比分析			
原始报文数量	1 918 815	1 234 232	0.643
位置报文数量	873 513	565 532	0.647
速度报文数量	830 199	532 492	0.641
身份报文数量	88 288	56 973	0.645
其他报文数量	126 815	79 235	0.639
位置/速度/身份	1/0.95/0.1	1/0.94/0.1	/

在不同站点、不同时间的情况下,全向设备报文总数量/定向设备报文总数量平均数约为 0.65,全向设

备位置报文总数量/定向设备位置报文总数量平均数约为 0.65,各站点全向接收报文与定向接收报文的数量比例基本一致,排除了站点因为遮挡等原因造成全向接收报文数量偏少等原因。

不同站点相同时间,全向/定向的报文接收率、报文分布情况基本一致。因此通过建立信号交织模型,对接收概率进行分析。

4 ADS-B 信号交织模型

一般情况下,应答机每秒对外发送以下信号:

(1) AC 模式应答,响应地面 AC 模式二次雷达。

(2) S 模式应答信号,响应 TCAS 的询问和地面 S 模式二次雷达的询问。

(3) S 模式断续振荡 DF11 以及扩展断续振荡 DF17。

ADS-B 广播^[12-13]是典型的随机广播模式,因此,报文分布符合泊松分布。其解码率计算公式为: $P[n] = (e^{-\lambda}) * ((\lambda * t)^n) / n!$,其中 λ 代表飞机个数与单位时间内干扰信号个数的乘积, t 代表时间窗口, n 代表发生次数。空域信号对 ADS-B 信号干扰后 ADS-B 信号的正确接收可通过如下公式获得。

A/C 信号干扰后 ADS-B 的正确接收概率为:

$$P(\text{ATC}) = P[0] + P[1] = (e^{-\lambda t_1}) + (e^{-\lambda t_1}) * (\lambda * t_1) \quad (1)$$

短 S 模式信号干扰后 ADS-B 的正确接收概率为:

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

长 S 模式信号干扰后 ADS-B 的正确接收概率为:

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

连续 n 秒没有接收到 ADS-B 报文概率为:

$$p_x = 1 - (1 - p)^{2 * n} \quad (4)$$

根据 A/C 信号格式,短 S 模式信号格式以及长 S 模式信号格式,其时间窗大小定义为:

$$t_1 = 20 + 120, t_2 = 64 + 120, t_3 = 120 + 120$$

要想完成 ADS-B 信号的正确接收,其允许的干扰次数分别为 1,0,0。

5 仿真与分析

5.1 仿真环境

实验使用的计算机配置为 window10 操作系统, Intel Core i5 处理器,内存为 8 GB,开发环境使用 Matlab2017。

5.2 仿真结果及分析

两个 ADS-B 安装站点周边区域作为典型的高密度区域,在本场及周边分别大约分别有 10 部和 6 部二

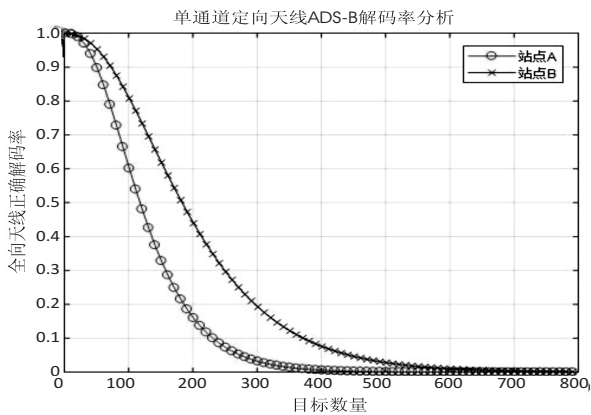
次雷达同时工作。根据二次雷达询问规律、应答机应答规律、应答机广播过滤以及TCAS询问规律,其周边每架飞机每秒产生的A/C模式应答信号、短S模式报文、长S模式报文数量如表4所示。

表4 高密度空域交织场景

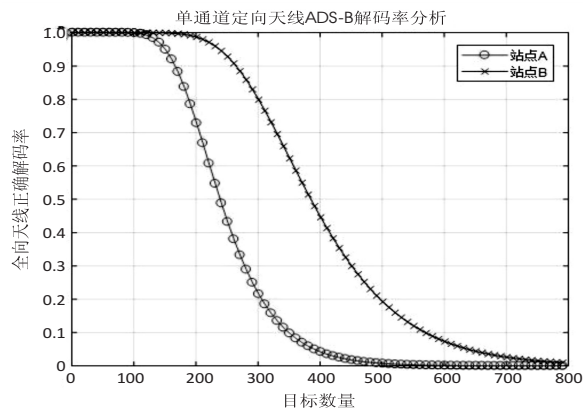
站点	每个飞机每秒		
	A/C 应答	S 模式短报文	S 模式长报文
A	120	8	6
B	60	8	8

当目标数量为180时,站点A全向设备每0.5s能够正确接收位置报文的概率是0.35左右;站点B全向设备每0.5s能够正确接收位置报文的概率是0.45左右。站点A全向设备每8s能够正确接收位置报文的概率是0.95左右;站点B全向设备每8s能够正确接收位置报文的概率是0.98左右。

根据单通道全向天线0.5s和8s更新率下ADS-B正确解码概率仿真图3(a)、图3(b)可知,因为A站点周边雷达个数高于B站点雷达个数,而雷达个数越多询问次数越多,接受周边数据的询问次数越多,干扰越大,解码率越低,因此A站点的下降率早于B站点的下降率。



(a) 全向天线0.5s更新率下ADS-B正确解码率



(b) 全向天线8s更新率下ADS-B正确解码率

图3 全向天线ADS-B正确解码率

单通道全向天线0.5s更新率下,对于A站点,当

目标数量达到60个以上时,更新率会急剧下降,当目标数量达到400左右时,全向天线解码率接近于0;对于B站点,当目标数量也是达到80个以上时,更新率会急剧下降,但目标数量达到600左右时,全向天线解码率才接近于0。

单通道全向天线0.5s更新率下,对于A站点,当目标数量达到60个以上时,更新率会急剧下降,当目标数量达到400左右时,全向天线解码率接近于0;对于B站点,当目标数量也是达到80个以上时,更新率会急剧下降,但目标数量达到600左右时,全向天线解码率才接近于0。

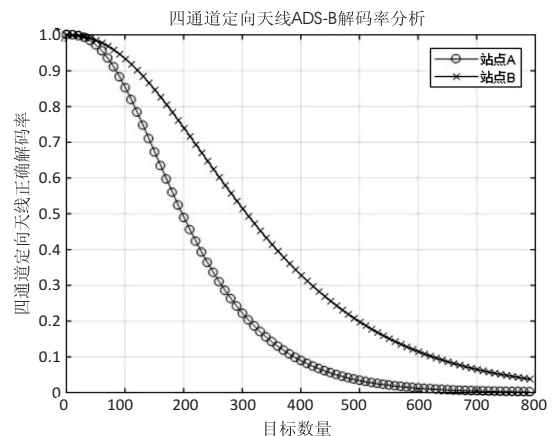
单通道全向天线8s更新率下,对于A站点,当目标数量达到170个以上时,更新率会急剧下降,当目标数量达到500左右时,全向天线解码率接近于0;对于B站点,当目标数量也是达到300个以上时,更新率会急剧下降,但目标数量达到600左右时,全向天线解码率才接近于0。

依据当前周边雷达覆盖及空域情况分析,雷达覆盖率越大,目标数量越多,ADS-B正确解码率越低,解码率越低表现出来的实际现象则为目标航迹掉点。

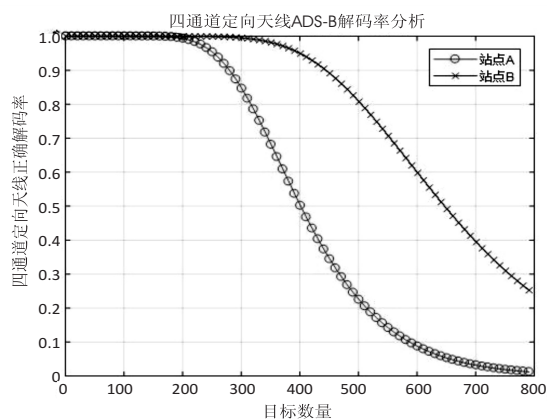
由于ADS-B地面站安装完成以后,其周边环境、雷达部署、空域目标数量等均无法改变,只能通过提升ADS-B地面站本身天线灵敏度来提升目标的解码率,采用全向天线换成四通道定向天线来实现提升天线灵敏度,进而减少目标航迹掉点现象的发生。

实验过程中,A站点和B站点的周边雷达数目不变,根据四通道全向天线0.5s和8s更新率下ADS-B正确解码概率仿真如图4(a)、图4(b)所示。

四通道定向天线0.5s更新率下,对于A站点,当目标数量达到130个以上时,更新率会急剧下降,当目标数量达到600左右时,全向天线解码率接近于0;对于B站点,当目标数量达到210个以上时,更新率会急剧下降,但目标数量达到900左右时,全向天线解码率才接近于0。



(a) 四通道定向天线0.5s更新率下ADS-B正确解码率



(b) 四通道定向天线 8 s 更新率下 ADS-B 正确解码率

图 4 四通道定向天线 ADS-B 正确解码率

全向天线 8 s 更新率下,对于 A 站点,当目标数量达到 350 个以上时,更新率会急剧下降,当目标数量达到 800 左右时,全向天线解码率接近于 0;对于 B 站点,当目标数量也是达到 540 个以上时,更新率会急剧下降,但目标数量达到 1 600 左右时,全向天线解码率才接近于 0。

综上所述,在相同目标数量下,四通道定向天线在 0.5 s 更新率下和 8 s 更新率下,ADS-B 能获得正确解码率的概率均优于单通道全向天线。因此,当 ADS-B 地面站周边部署雷达数量较多,空域飞机数量较多时,可以通过四通道定向天线来提升地面站性能,减小 ADS-B 航迹掉点的概率。

6 结束语

针对某些站点存在掉点现场,从 ADS-B 地面站本身设计、地面站安装周边环境等角度出发,逐步分析 ADS-B 航迹掉点的原因,初步判定空中存在大量的应答信号交织干扰情况,最终造成信道拥挤、多重信号交织而导致信号解码率下降,并产生了掉点现象。通过使用对信号实时捕获、现场录取数据等多种方式进行确认,并通过建立目标交叠模型以及模型仿真的方式对此进行验证。最后,实验结果表明四通道定向天线性能远远大于单通道全向天线性能,因此,利用四通道

定向天线性可以提升地面站性能,减少 ADS-B 航迹掉点的概率。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] STROHMEIER M,SCHAFER M,LENDERS V,et al. Realities and challenges of nextgen air traffic management: the case of ADS-B[J].IEEE Communications Magazine,2014,52(5):111-118.
- [3] ZENG Zhigang,DING Yajing,YAN Jun. Transmission of meteorological information to a cockpit and application of ADS-B[J].Meteorological and Environmental Research,2016,7(1):19-22.
- [4] KNUDSEN B G,JENSEN M,BIRKLYKKE A,et al. ADS-B in space:decoder implementation and first results from the GATOSS mission [C]//Electronic conference. Tallinn: IEEE,2015:135-142.
- [5] 黄 飞.建设空基 ADS-B 系统提升空管监视能力[J].中国民用航空,2016(6):41-43.
- [6] 孟祥宇.用于航空安全监视的 ADS-B 数据质量评估[D].天津:中国民航大学,2019.
- [7] 刘 宁,胡永鑫.基于定向天线与全向天线信号融合的室内定位方法:CN110769370A[P].2020.
- [8] 武 萍.ADS-B 数据链路干扰分析[D].长春:吉林大学,2019.
- [9] 刘海涛,张智美,成 玮,等.联合压缩感知与干扰白化的脉冲干扰抑制方法[J].北京航空航天大学学报,2015(8):1367-1373.
- [10] 李广雪.宽带航空数据链空域自适应干扰抑制方法[D].天津:中国民航大学,2020.
- [11] 李冬霞,王 召,刘海涛.联合两级滤波与压缩感知的测距仪干扰抑制方法[J].信号处理,2020(7):1118-1126.
- [12] 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.
- [13] 胡 飞.ADS-B 系统的安全冗余度与风险对策研究[D].成都:西南交通大学,2017.