航　空　学　报　　Apr. 25 2020 Vol. 41 No. 4
Acta Aeronautica et Astronautica Sinica　　ISSN 1000-6893 CN 11-1929/V
http://hkxb.buaa.edu.cn hkxb@buaa.edu.cn

引用格式：宫峰勋，李丽桓，马艳秋. ADS-B监视报文参数统计及其所需性能[J].航空学报，2020，41(4):323378. GONG F X, LI L H, MA Y Q. Statistics and required surveillance performance of ADS-B message parameters[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(4): 323378 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000.6893.2019.23378

ADS-B监视报文参数统计及其所需性能

宫峰勋[1,*]，李丽桓[2]，马艳秋[1]

1. 中国民航大学 电子信息与自动化学院，天津 300300
2. 中国民用航空三亚空中交通管理站，三亚 572000

摘　要：基于广播式自动相关监视(ADS-B)报文的位置导航不确定性指标(NUC_P)的监视质量备受关注。针对位置导航不确定性参数好、监视质量却不高的问题，深入研究广播式自动相关监视报文数据项及其与基于性能的通信与监视的相关性。在充分考虑通信导航监视相关性及全球卫星导航系统(GNSS)广域增强等因素基础上，推导、构建了监视所需性能估计模型，并给予合理简化。在测试空域利用2个具有运行资质的生产商ADS-B接收站，连续采集近2亿条ADS-B报文，统计分析报文各信息项的状态参数，并应用到所需性能估计模型评估计算这两个ADS-B站的所需监视性能。此外还将参考文献报文参数代入模型评估所需性能。结果显示，当考虑报文各信息项统计状态及具备广域增强服务支撑时，ADS-B所需监视性能参数估计值未达到99.9%要求。若缺乏广域增强服务及相关性因素等，系统所需性能与国际民航组织(ICAO)监视要求的差距则更大。

关键词：位置导航不确定性指标；ADS-B报文；报文项统计；所需监视性能(RSP)；可用性；广域增强系统

中图分类号：V355.1　**文献标识码**：A　**文章编号**：1000-6893(2020)04-323378-09

广播式自动相关监视(ADS-B)为空域非雷达监视提供技术基础，为空中交通管制能与交通容量提升提供可能。国际民航成员启动了ADS-B地面系统装备工程，且将逐步实施基于ADS-B的非雷达管制。澳大利亚是国际民航组织(ICAO)成员中率先宣布完全采用ADS-B实施空域监视的国家[1]。该国空管部门陆续公布一些ADS-B航迹信息，图片显示ADS-B航迹存在不连续现象[2]。近年来，该国宣布还将陆续装备陆基空管二次雷达等监视设备。2019年3月，美国联邦航空局发布ADS-B性能用户指导报告[3]，要求用户报告ADS-B数据质量，并采用位置导航精确度分类值(NAC_P)标示ADS-B可用性。可见，美国联邦航空局也开始担心ADS-B数据质量问题。ADS-B技术已广泛应用于空域监视，基于报文质量及其位置数据质量的跟踪与分析得到国内外研究者普遍关注[4-9]。

目前，数据质量研究多从报文的导航不确定性类别指标统计出发，即提取每份ADS-B报文的位置导航不确定性指标(NUC_P)，汇总NUC_P数据得到统计分布状态，当$NUC_P \geqslant 5$的比例超过95%即认为符合监视性能要求[10-11]。现有NUC_P统计分布状态研究结果显示，几乎所有ADS-B报文的位置参数分布都符合ICAO基于通信监视性能(PBCS)[12]要求。因此，对ADS-B系统快速推广及星基ADS-B技术进行深入研究，综合分析ADS-B报文信息项及其数据质量参数的变化状态，揭示在PBCS与卫星导航广域增强服务下的

收稿日期：2019-08-13；**退修日期**：2019-09-19；**录用日期**：2019-12-20；**网络出版时间**：2020-01-13 15:54
网络出版地址：http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20200415.html
基金项目：国家重点研发计划(2018YFC0809500)
* **通信作者**. E-mail: fxgong@cauc.edu.cn

ADS-B 监视性能非常重要。

1 问题描述

ADS-B 航迹普遍存在不连续和跳点现象，导致其空管服务能力受到质疑。

澳大利亚空管服务商 Airservces 发布了 ADS-B 监视数据，但未见其发布具体的 NUC_P 统计数据信息。故采用如图 1 所示 Airservces 给出的 NUC_P 数据及异常数据[2]形式。可见，其中既有 $NUC_P=6$ 的优秀状态，也有 $NUC_P=0$ 的异常状态。

Time_UTC	ES_Msg	MsgType	AcftAddress	MsgFormat	Ident	NUC_P	NUC_R	Longitude	Latitude	Altitude
23:13:52	8C71BF393F9FC178F49D41000000	Surface Position	71BF39	EVEN		7		151.1764	-33.9478	
23:13:52	8C71BF393F9FC179289D3B000000	Surface Position	71BF39	EVEN		7		151.1763	-33.9475	
23:13:53	8C71BF393FAFC6FBB5412D000000	Surface Position	71BF39	ODD		7		151.1762	-33.9471	
23:13:53	8D71BF393FAFC6FBE94127000000	Surface Position	71BF39	ODD		7		151.1761	-33.9468	
23:13:54	8D71BF395807015E7F2749000000	Airborne Position	71BF39	EVEN		7		151.176	-33.9463	200
23:13:54	8D71BF3999442514C01486000000	Airborne Velocity	71BF39				0			
23:13:54	8D71BF39580705BF225045000000	Airborne Position	71BF39	ODD		7		151.1758	-33.9458	200
23:13:54	8D71BF3999442514C01486000000	Airborne Velocity	71BF39				0			
23:13:55	8D71BF39580705BF2E5044000000	Airborne Position	71BF39	ODD		7		151.1758	-33.9456	200
23:13:55	8D71BF3999442615001C86000000	Airborne Velocity	71BF39				0			
23:13:55	8D71BF395807015EB52743000000	Airborne Position	71BF39	EVEN		7		151.1756	-33.9451	200
23:13:55	8D71BF3999442615001C86000000	Airborne Velocity	71BF39				0			
23:13:56	8D71BF3999442615402C85000000	Airborne Velocity	71BF39				0			
23:13:56	8D71BF39580705BF58503F000000	Airborne Position	71BF39	ODD		7		151.1755	-33.9446	200
23:13:56	8D71BF39580705BF64503E000000	Airborne Position	71BF39	ODD		7		151.1754	-33.9443	200
23:13:56	8D71BF39200414B6C32820000000	Identification	71BF39		AAR602					
23:13:56	8D71BF3999442615402C86000000	Airborne Velocity	71BF39				0			
23:13:57	8D71BF39580705BF72503D000000	Airborne Position	71BF39	ODD		7		151.1754	-33.944	200
23:13:57	8D71BF3999442615803C86000000	Airborne Velocity	71BF39				0			
23:13:57	8D71BF39580715BF80503B000000	Airborne Position	71BF39	ODD		7		151.1753	-33.9437	225
23:13:57	8D71BF3999442615803C86000000	Airborne Velocity	71BF39				0			
23:13:58	8D71BF395807215F09273A000000	Airborne Position	71BF39	EVEN		7		151.1751	-33.9432	250
23:13:58	8D71BF3999442715A05486000000	Airborne Velocity	71BF39				0			
23:13:58	8D71BF395807215F172739000000	Airborne Position	71BF39	EVEN		7		151.1751	-33.9429	250
23:13:58	8D71BF3999442715A05487000000	Airborne Velocity	71BF39				0			
23:13:59	8D71BF39580735BFB85035000000	Airborne Position	71BF39	ODD		7		151.1749	-33.9424	275
23:13:59	8D71BF3999442615C06886000000	Airborne Velocity	71BF39				0			
23:13:59	8D71BF39580735BFC45034000000	Airborne Position	71BF39	ODD		7		151.1749	-33.9421	275
23:13:59	8D71BF3999442615C06886000000	Airborne Velocity	71BF39				0			
23:13:59	8D71BF39580735BFD25032000000	Airborne Position	71BF39	ODD		7		151.1747	-33.9417	275
23:14:00	8D71BF3999442615C07C85000000	Airborne Velocity	71BF39				0			
23:14:00	8D71BF395807315F5D2731000000	Airborne Position	71BF39	EVEN		7		151.1746	-33.9413	275
23:14:00	8D71BF3999442615C07C86000000	Airborne Velocity	71BF39				0			

图 1 澳大利亚公布的 $NUC_P=0$ 的数据分布[2]

Fig. 1 Data distribution of $NUC_P=0$ published in Australia[2]

图 2 为澳大利亚 Airservces 公布的采用 ADS-B 监视的动态航迹显示图[2]。如图 1 和图 2 所示，澳大利亚 ADS-B 监视覆盖空域上飞机航迹的线性偏离度很小，但动态航迹上还是有明显的间断现象。NUC_P 是否 0 与动态航迹的间断、跳点和偏差存在对应关系。

图 3 为美国霍尼韦尔所属 HTSI 公司公布 ADS-B 报文数据测试研究报告[13]中给出的 NUC_P 数据统计分布状态，其中 $NUC_P \geq 5$ 是其主要分布区间，但也有为数不少的 $NUC_P=0$ 的状态。图 4 为从 Flightradar24 网站随机抓取的美国国内航线 ADS-B 监视航迹状态。如图 3 和图 4 所示，

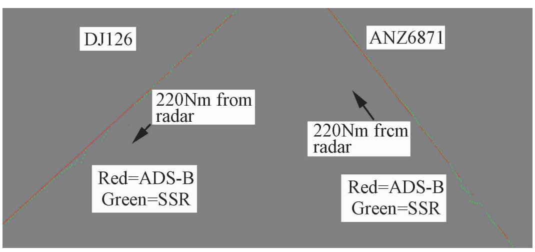


图 2 澳大利亚空域 ADS-B 动态航迹[2]

Fig. 2 ADS-B dynamic track in Australian airspace[2]

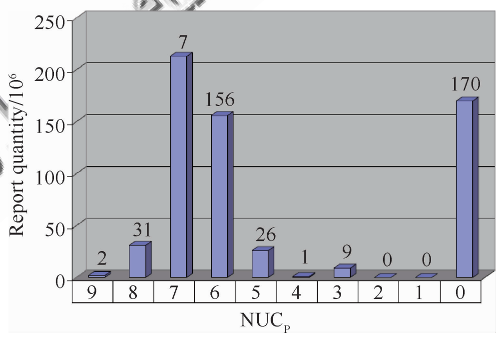


图 3 霍尼韦尔公司公布的 NUC_P 数据统计分布[13]

Fig. 3 Data distribution of NUC_P published by Honeywell Co.[13]

美国空域内 ADS-B 报文给出的航迹偏离度虽然很小，但也存在航迹间断，同时 $NUC_P=0$ 的情况竟然超过 10%。

图 5 为文献[9]研究者给出的国内某终端区 ADS-B 报文 NUC_P 数据统计分布状态。图 6 为本文所获取的中国某航路/航线 ADS-B 监视空域的动态航迹。可见，ADS-B 监视的航迹偏差较大，且存在明显的航迹间断现象，但是 $NUC_P=0$

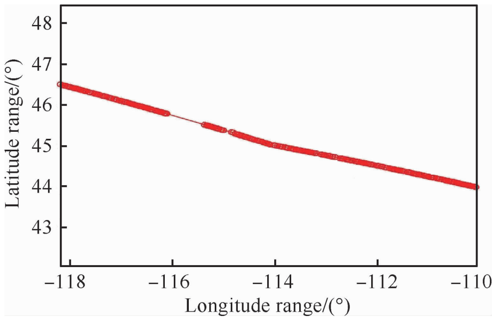


图 4 美国国内航线 ADS-B 监视航迹状态

Fig. 4 ADS-B track status on domestic airlines in the US

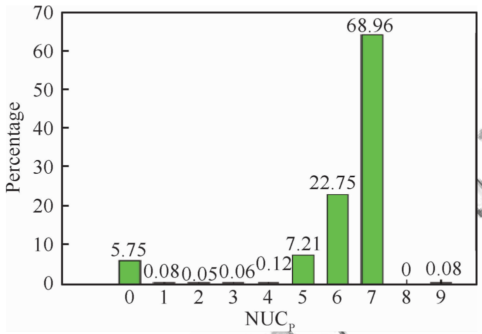


图 5 文献[9]公布的 NUC_P 数据分布状态

Fig. 5 Data distribution of NUC_P published in Ref. [9]

的情况却仅超过 5%。

如图 1、图 3 和图 5 所示，从 ADS-B 报文所提取的位置导航不确定性指标（NUC_P）基本围绕 $NUC_P \geqslant 7$ 呈现近似正态分布状态。同时，也存在一定数量 $NUC_P=0$ 的异常状态出现。如图 2、图 4 和图 6 所示，ADS-B 动态航迹均存在比较明显的不连续现象。

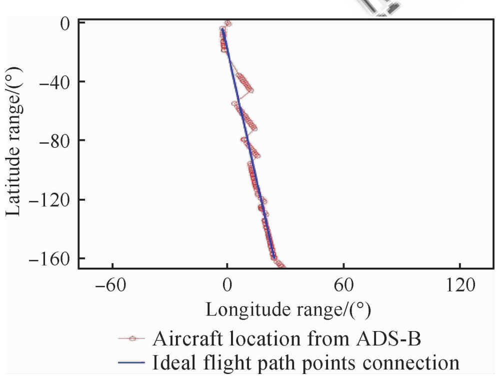


图 6 中国航线 ADS-B 监视航迹状态

Fig. 6 ADS-B track status in the China airlines

综上所述，从基于性能监视及航迹质量考虑，ADS-B 监视可能不符合所需监视性能要求，即 NUC_P 等作为评估 ADS-B 监视性能的主要指标，达到 DO-260B 要求，却存在 ADS-B 航迹无法同时满足 ICAO 的 PBCS 规范性要求的问题。

2 所需性能模型构建

在 2010 年亚太经合组织全球导航卫星系统实施小组第 14 次会议上，Deborah 博士代表美国联邦航空局确认，在具备广域增强服务（WAAS）且当全球导航卫星系统（GNSS）具备 99.9%可用性时，存在如图 7 所示的导航所需性能（RNP）与监视所需性能（RSP）之间基于航班安全间隔的对应关系[14]。ADS-B 应符合这个要求。

ADS-B 被视为由导航卫星、机载设备、空地通信链路和地面设备等组成的多部件复杂系统，各部件之间存在相依性，其所需性能则由部件数量及部件间耦合关系决定。因此，任一部件性能下降都将导致 ADS-B 系统整体性能无法达到监视所需性能要求。根据 ICAO 基于性能的通信和监视手册可得如图 8 所示的 RNP、所需通信性能（RCP）、RSP 与空中交通管理（ATM）之间的协作支撑关系（T 为传输时延）。其中较明确刻画了 RNP、RCP、RSP 三者之间的相关性支撑关系[15-16]。

于是，ADS-B 系统可被视为一个由 3 个部件组成的二终端（单输入节点单输出节点）式串联系统[17]，且 3 个部件性能应分别满足 RNP、RCP、RSP 要求。则基于 ADS-B 报文的监视质量由 RNP、RCP、RSP 及其相关性制约函数 C_R 综合决定，即 ADS-B 系统所需性能对应的性能模型可表述为

$$R_{ADS\text{-}B}(x)=R_{RNP}(x)R_{RCP}(x)R_{RSP}(x)\times C_R(rnp,rcp,rsp) \tag{1}$$

式中：$R_{RNP}(x)$、$R_{RCP}(x)$和 $R_{RSP}(x)$为 ADS-B 系统组成部件对应的导航、通信和监视的可用性函数；$C_R(rnp, rcp, rsp)$为导航、通信和监视系统之间的互相关函数。

目前默认 ADS-B 系统导航、通信和监视的可用性函数不相关，即 $C_R(rnp, rcp, rsp)=1$。

1）当 $R_{RNP}(x) \geqslant 99.9\%$，条件得到满足，即 $R_{RNP}(x)$接近常数 1 且与其他不相关时，式(1)可简化为

$$R_{ADS\text{-}B}(x)=R_{RCP}(x)R_{RSP}(x)C_R(rcp,rsp) \tag{2}$$

	Navigation (≥99.0% Availability)		Surveillance (≥99.9% Availability)			Positioning
	Accuracy (95%)	Containment (10^{-7})	Separation	NACp (95%)	NIC (10^{-7})	GNSS PNT (99.0 – 99.999%)
En Route	*10 nm	20 nm	5 nm	0.1 nm (7)	1 nm (5)	GPS
	*4 nm	8 nm				
	*2 nm	4 nm				
Terminal	*1 nm	2 nm	3 nm	0.05 nm (8)	0.6 nm (6)	SBAS
LNAV	*0.3 nm	0.6 nm				
RNP (AR)	*0.1 nm	**0.1 nm	2.5 nm DPA	0.05 nm (8)	0.2 nm (7)	
LPV	16m/4m	40m/50m	2.5 nm DPA	0.05 nm (8)	0.2 nm (7)	
LPV-200	16m/4m	40m/35m				
GLS Cat-I	16m/4m	40m/10m	2.0 nm IPA	121 m (8)	0.2 nm (7)	GBAS
GLS Cat-III	16m/2m	40m/10m				

图 7　导航所需性能与监视所需性能的对应关系

Fig. 7　Relationship between RNP and RSP

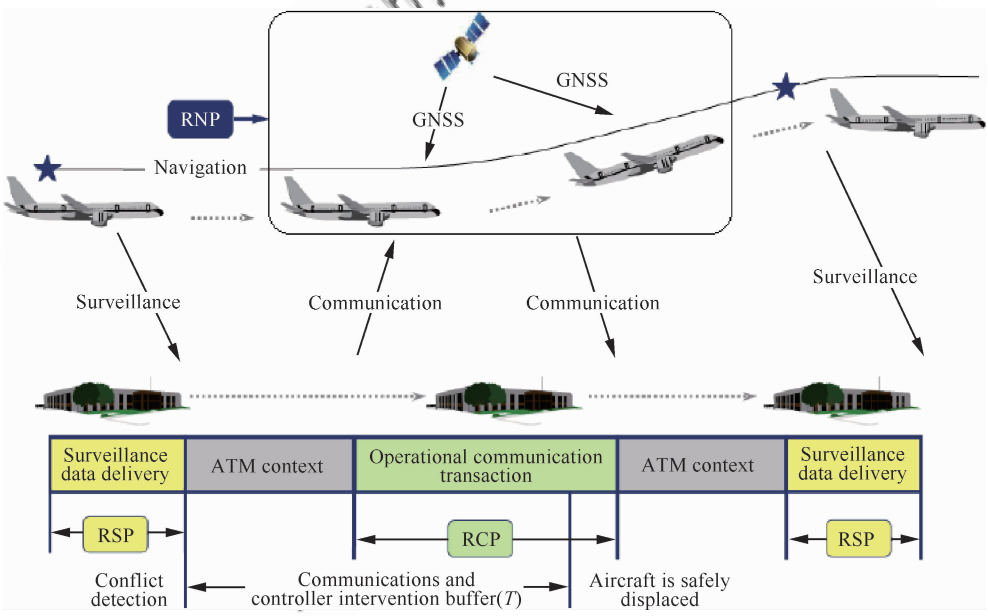


图 8　RNP、RCP、RSP 与 ATM 相关性支撑关系

Fig. 8　Relationship between RNP, RCP, RSP, and ATM

2）当 $R_{RCP}(x)\geqslant 99.9\%$，条件得到满足，令 $R_{RCP}(x)$接近常数 1 且与其他不相关时，式(2)简化为

$$R_{ADS\text{-}B}(x)=R_{RSP}(x)C_R(rsp) \tag{3}$$

由式(3)可见，由于 $R_{RNP}(x)$、$R_{RCP}(x)$接近常数 1 且彼此不相关，从 ADS-B 报文获得的位置数据等信息可用性也就为 ADS-B 监视可用性。故实际数据分析中多直接用位置导航不确定性等指标替代可用性指标，则式(3)再被简化为

$$R_{ADS\text{-}B}(x)=R_{RSP}(\mathrm{nuc_p})C_r(\mathrm{rsp})=R_{RSP}(\mathrm{nuc_p}) \tag{4}$$

式中：$C_R(\mathrm{rsp})$为自相关函数，令其取 1。

因此，目前分析认为只要 ADS-B 报文中提取的 $\mathrm{NUC_P}\geqslant 5$，则认为 ADS-B 监视性能达到 ICAO 相关规范要求。显然，即便是采用式(4)的形式分析 ADS-B 监视性能，$R_{RSP}(x)$函数中变量也不应

该仅含有 $\mathrm{NUC_P}$，还应该包含 ADS-B 报文中其他参数。即当 $R_{\mathrm{RNP}}(x)$、$R_{\mathrm{RCP}}(x)$ 接近常数 1 且导航、通信和监视系统之间不相关时，式(4)应修正为

$$R_{\text{ADS-B}}(x) = K_{\mathrm{WA}} K_{\mathrm{C}} R_{\mathrm{RSP}} \times (\text{accuracy},\text{integrity},\text{continuity},N) = K_{\mathrm{WA}} K_{\mathrm{C}} R_{\mathrm{RSP}}(\mathrm{nuc_p},\text{rept},\text{leak},\text{hop},n) \tag{5}$$

式中：$R_{\text{ADS-B}}(x)$ 的变量 accuracy、integrity 和 continuity 表示报文定位的准确性、完好性和连续性指标。根据 DO-260 规范的 ADS-B 报文用于定位、监视完好性要求，采用 $\mathrm{nuc_p}$ 表征 accuracy 变量，位置质量指标报告率(rept)、漏点率(leak)和跳点率(hop)等表征 integrity 和 continuity 变量；N 为空管自动化系统屏幕刷新周期内报文次数，用 n 表征。K_{WA} 为导航卫星增强状态参数；K_{C} 为通信链路性能参数。则式(5)可简化为

$$R_{\text{ADS-B}}(x) = K_{\mathrm{WA}} K_{\mathrm{C}} R_{\mathrm{RSP}}(\mathrm{nuc_p},\text{rept},\text{leak},\text{hop},n) \tag{6}$$

可见，ADS-B 监视准确性、完好性和连续性同时达标，才有可能达到 ICAO 监视规范要求。

3 所需性能模型仿真分析

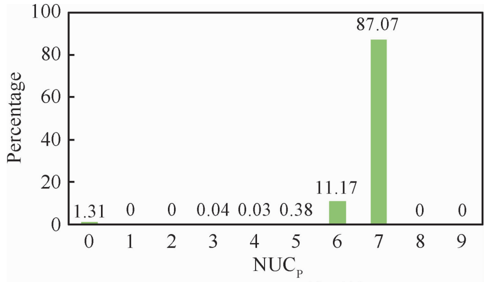
空中交通管制(ATC)系统的屏幕刷新周期为 5 s，ADS-B 报文更新率为 1 s[18]，则 ATC 屏幕刷新周期内有 4 份 ADS-B 报文。由于报文间隔时间短，可视 1 份 ADS-B 报文重复 4 次。设每份 ADS-B 报文各项参数满足串联形式，式(6)表示为[17]

$$R_{\text{ADS-B}}(x) = K_{\mathrm{WA}} K_{\mathrm{C}} \{1 - [R(\mathrm{nuc_p}) \times R(\text{rept}) \times R(\text{leak}) \times R(\text{hop})]^4\} \tag{7}$$

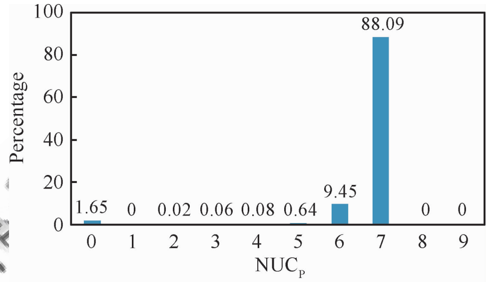
启动 ADS-B 监视性能测试实验，设置编号为 1# 和 2# 的 2 个间隔 20 km、不同生产商的 ADS-B 地面站，对覆盖空域内航班 ADS-B 报告持续监视。连续采集 3 个月的 ADS-B 报文，总数量分别达到 94,371,820 和 104,203,710 条。提取每一份报文中包括 $\mathrm{NUC_P}$、NIC、标识等信息项，统计分析它们数据的分布状态。

3.1 位置质量指标统计

从每份 ADS-B 报文数据中提取位置质量指标($\mathrm{NUC_P}$)数值，汇总得到 $\mathrm{NUC_P}$ 数据归一化相对分布状态如图9所示。计算 $R(\mathrm{nuc_p})$ 时，仅考虑位置



(a) 1# ADS-B地面站



(b) 2# ADS-B地面站

图 9 ADS-B 地面站 $\mathrm{NUC_P}$ 统计分布

Fig. 9 Statistical distribution of $\mathrm{NUC_P}$ in ADS-B stations

导航不确定性 $\mathrm{NUC_P} \geqslant 5$ 的情形。此时，$R(\mathrm{nuc_p})$ 分别取为(87.07＋11.17＋0.38)%＝98.62%和(88.09＋9.45＋0.64)%＝98.18%。

3.2 质量指标报告率统计

所需数据项数据完好性是指报文中所包含的用户数据项中实施 ADS-B 监视的最低要求的数据项完好性[19-20]，包括二次代码等共 8 项。

以位置质量指标为例，采用：位置质量指标报告率＝含位置质量指标信息的航迹点总数/航迹总点数×100%，可得位置质量指标报告率。

ADS-B 报文的航迹数据完好性分析的统计结果如图 10 所示。计算 $R_{\mathrm{RSP}}(\text{rept})$ 时，仅考虑航迹数据完好性分布中的最小值。故 $R(\text{rept})$ 分别取为 91.09%和 95.16%。

3.3 报文漏点率统计

从离港航班中选择一个固定航班，统计该航班在不同飞行阶段的 ADS-B 报文漏点率。实际统计中将漏点阈值设为 2 s。即若连续 $n(n \geqslant 2)$ s 未收到航迹点，则认为 ADS-B 报文出现 $n-1$ 个漏点，漏点数增加 $n-1$。ADS-B 报文数据漏点率的统计结果如图 11 所示。

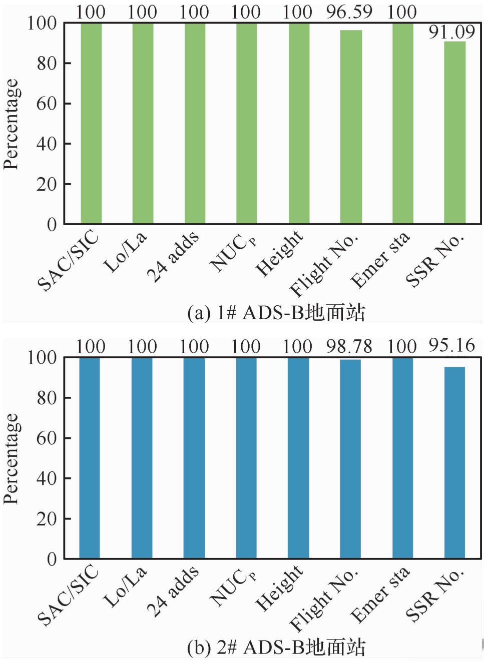


图 10 ADS-B 报文的航迹数据完好性分布

Fig. 10 Integrity distribution of track data in ADS-B messages

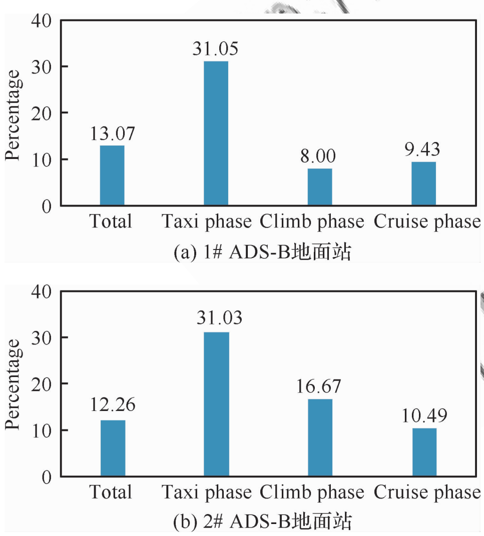


图 11 ADS-B 报文的航班漏点率统计图

Fig. 11 Leakage rate statistics of ADS-B message

可见，1# ADS-B 地面站离港航班实际数据的平均漏点率接近 13.07%，2# ADS-B 地面站离港航班实际数据的平均漏点率接近 12.26%。

计算 $R_{\mathrm{RSP}}(\mathrm{leak})$时，取飞行 4 个阶段的平均值，故 $R(\mathrm{leak})$ 分别取为 $(100-13.07)\%=86.93\%$ 和 $(100-12.26)\%=87.74\%$。

3.4 数据跳点率统计

ADS-B 报文的数据跳点率包含水平跳点率和高度跳点率 2 个方面。当水平位置误差和垂直位置误差大于预先设定阈值(一般设置为 300 m)时，则认为该目标为跳点[20]。分别跟踪一个离港航班和一个进港航班的航迹数据，它们水平和垂直向位置误差分布如图 12 所示。可见，ADS-B 报文的水平和垂直方向位置误差主要集中在 0～100 m 范围内。

计算跳点率 $R_{\mathrm{RSP}}(\mathrm{hop})$时，仅考虑误差小于 100 m 的情况(①因为前面 $\mathrm{NUC_P}\geqslant 5$，②因为航路高度层间隔仅为 300 m)，故 $R(\mathrm{hop})$分别取其中最小值，即 $\min\{78.12\%, 88.57\%\}=78.12\%$ 和 $\min\{75.02\%, 82.73\%\}=75.02\%$。

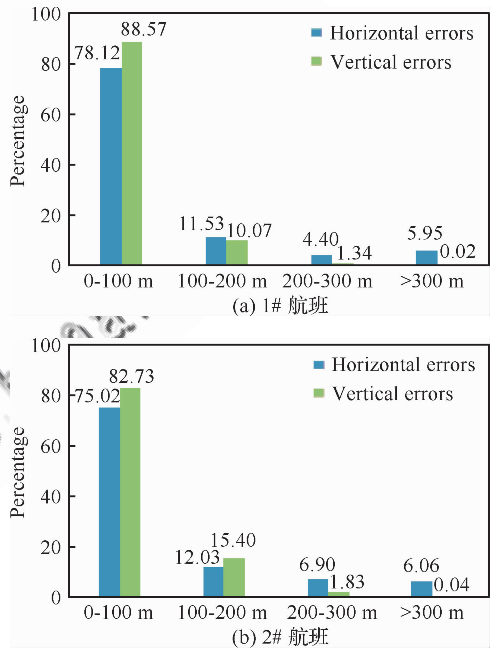


图 12 航班水平误差和垂直误差分布

Fig. 12 Distribution of horizontal and vertical errors of flight

3.5 报文所需性能估算

ADS-B 报文漏点率是将漏点阈值设为 2 s 时计算得到的。在 ATC 屏幕刷新周期 5 s 内，被统计检测不超过 3 次，参照二终端式串联系统可靠性计算原理[17]，式(7)简化修正为

$$R_{\mathrm{ADS\text{-}B}}(x)=K_{\mathrm{WA}}K_{\mathrm{C}}\{1-4[1-R(\mathrm{nuc_p})\times R(\mathrm{rept})\times R(\mathrm{hop})]^2\times[1-R(\mathrm{leak})]^2\} \quad (8)$$

假设 ADS-B 地面站运行环境满足要求，可令 $K_{WA}=K_C=1$，于是 1# ADS-B 地面站所需性能为

$$R_{ADS\text{-}B1}(x)=1-4[1-R(nuc_p)\times R(rept)\times R(hop)]^2\times[1-R(leak)]^2=1-4[1-0.986\,2\times0.910\,9\times0.781\,2]^2\times[1-0.869\,3]^2=0.993\,9=99.39\% \tag{9}$$

2# ADS-B 地面站所需性能为

$$R_{ADS\text{-}B2}(x)=1-4[1-R(nuc_p)\times R(rept)\times R(hop)]^2\times[1-R(leak)]^2=1-4[1-0.981\,8\times0.951\,6\times0.750\,2]^2\times[1-0.877\,4]^2=0.994\,6=99.46\% \tag{10}$$

由式(9)和式(10)计算结果可见，在 ATC 屏幕刷新的单个周期内，2 个 ADS-B 地面站监视性能均未达到 ICAO 的 PBCS 规范性中的最低要求。也就是，在默认 WAAS 服务存在、系统导航通信所需性能为 1、导航通信和监视的可用性相关函数为 1 的情形下，2 个 ADS-B 地面站监视所需性能估计值均未达到图 7 所示的监视可用性需达到 99.9%的数值要求。

用式(5)估算捷克理工大学 2017 年公布的 ADS-B 报文数据[21]所用 ADS-B 地面站的所需性能。该文献采用 ICAO 的 ADS-B 性能认证版本 2 统计 ADS-B 报文数据，参数包含导航完好性等级(NIC)、监视完好性等级(SIL)和导航精确度等级(NAC)等参数，直接给出 accuracy、integrity 和 continuity 的对应参数，且统计独立时，参照二终端式串联系统可靠性计算原理[17]及典型串联二终端系统，式(5)可改写为

$$R_{ADS\text{-}B}(x)=K_{WA}K_C R_{RSP}(\text{accuracy},\text{integrity},\text{continuity},N)\approx K_{WA}K_C R_{RSP}(nac_p,nic,sic,n)\approx K_{WA}K_C[R(nac_p)R(nic)R(sic)]^n \tag{11}$$

取 $NAC_P\geqslant5$ 情形，$R(nac_p)=(0.08+42.91+50.59+3.93)\%=97.51\%$；取 $NIC\geqslant5$ 情形，$R(nic)=(0.03+2.38+88.23+7.25)\%=97.89\%$；取 $SIC\geqslant3$ 情形，$R(sic)=(1.09+95.60)\%=96.69\%$。由于文献[21]未提供屏幕刷新频率，故分 2 种情形估算：

1) ADS-B 报文每秒刷新 1 次。令 $K_{WA}=K_C=1$，由式(11)可得

$$R_{ADS\text{-}B}(x)=R(nac_p)R(nic)R(sic)=0.975\,1\times0.978\,9\times0.966\,9=0.922\,9=92.29\% \tag{12}$$

2) ADS-B 报文每秒刷新 2 次，

$$R_{ADS\text{-}B}(x)=[R(nac_p)R(nic)R(sic)]^2=(0.975\,1\times0.978\,9\times0.966\,9)^2=0.851\,8=85.18\% \tag{13}$$

在不考虑 WAAS 服务及通信性能影响时，捷克理工大学所用 ADS-B 地面站所需性能的估计值为 92.29%。由式(9)、式(10)和式(12)结果所示，通过报文方式实现监视，各类 ADS-B 地面站所需性能不一，但均未能达到图 7 要求的 99.9%。

ADS-B 运行依托卫星导航，其应用需考虑 WAAS 服务影响。图 13 所示为美国 FAA 公布的每日实时广域增强系统覆盖区域服务状态[22]，其中 HPL 为水平保护限值。

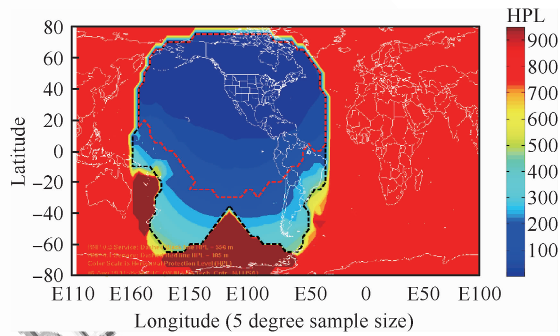


图 13 北美地区空域具有广域增强实时覆盖图

Fig. 13 Real-time WAAS coverage in North American

可见，仅北美地区空域有 WAAS 服务且等级最高，亚欧非地区没有覆盖服务，故 3.5 节估算中令 $K_{WA}=1$ 不合适，即 K_{WA} 的实际数值要小于 1，且标示 1 090 MHz 通信链路状态的 K_C 也要小于 1。因此，再考虑上述因素及系统初始可用性时，式(9)、式(10)和式(12)计算结果都将更小，都无法达到 ICAO 的 Doc9684[23] 关于应答检测概率 99%和图 7 所示可用性要求。

4 结 论

通过对 2 个 ADS-B 地面站接收到的近 2 亿条 ADS-B 报文数据项统计分析结果，并利用构建的 ADS-B 系统监视所需性能模型，估算了 2 个 ADS-B 地面站以及捷克理工大学所用 ADS-B 地面站的所需性能参数，结论如下：

1）测试空域 ADS-B 报文 NUC$_P$ 指标统计分布峰值基本出现于 NUC$_P$=7 时，且 NUC$_P$=6 和 NUC$_P$=7 两项之和都超过 95%，但漏点率仍以较高概率出现。

2）在缺少 WAAS 服务下，ADS-B 监视所需性能会下降。与具有 WAAS 服务的美国空域相比，航迹偏离程度大且间断明显增多。

3）默认 WAAS 服务存在，1# 和 2# ADS-B 站以及捷克理工大学的监视所需性能均未达到图 7 所示可用性的要求。

4）ADS-B 报文中数据项较多，是导致 ADS-B 监视所需性能下降、未能达到图 7 所示可用性要求的主要原因之一。

5）ATC 系统单位刷新周期内 ADS-B 报文的广播次数或者报文重复率增多，未能有效提升 ADS-B 监视所需性能。

6）单纯提升 NUC$_P$ 指标或 NAC$_P$ 指标，对 ADS-B 监视系统性能的提升效果有限。

综上所述，ADS-B 系统监视性能各异，同时 ADS-B 监视系统在独立承担空中交通管制所需的空域监视性能方面需要进一步提升。建议与其他监视手段配合实现管制空域的可靠、连续、无缝监视。

致　谢

本论文中部分航迹数据采集工作得到团队成员汪瀚森、杨琳和曹雅茹等研究生的协助，特此感谢。

参 考 文 献

[1] AIRSERVICES Australia. Surveillance equipment mandates[EB/OL]. (2017-02-01)[2019-08-11]. Australia: Airservices Australia, 2017. http://www.airservicesaustralia.com/projects/ads-b/other-mandates-2014-2017/.

[2] BOB P. The Australian ADS-B proram[C]//Proceedings of CNS/ATM Conference, 2007: 1-62.

[3] FAA. Public ADS-B performance report (PAPR) user's guide[S]. Washington, D. C.: Flight Standards Service, Aircraft Maintenance Division, Avionics Branch (AFS-360), 2018.

[4] ROBERT K M. Quality of reported NAC$_P$ in surveillance and broadcast services systems[C]//28th AIAA IEEE Digital Avionics Systems Conference Proceedings, 2009: 6.E.31-6.E.38.

[5] ASMA T, NICHOLAS A, WILLIAM S. ADS-B message contents evaluation and breakdown of anomalies[C]//36th AIAA IEEE Digital Avionics Systems Conference, 2017: 1-8.

[6] CAAS. ADS-B equipage analysis[EB/OL]. (2014-08-14)[2019-08-11]. Singapore: Civil Aviation Authority of Singapore (CAAS), 2014. https://www.slideserv-e.com/sue/ads-b-equipage analysis.

[7] SATISH C M, GANGHUAII W. Modeling ADS-B position and velocity errors for airborne merging and spacing in interval management application[EB/OL]. (2010-09-01)[2019-08-11]. Massachusetts: The MITRE Corporation, 2010, https://www.mitre.org/ publications /technical-papers/modeling-adsb-position-and-velocity-errors-for-airborne-merging-and-spacing-in-interval-management-application.

[8] MICHAEL R G, STANLEY R J, GREGORY L O, et al. ADS-B surveillance system performance with small UAS at low altitudes[EB/OL]. (2017-01-01)[2019-08-11]. Massachusetts: The MITRE Corporation, 2017. https://www.mitre.org/publications technical papers/modeling-adsb-position-and-velocity-errors-for-airborne-merging-and-spacing-in-interval-management-application.

[9] 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 X Y, TANG P, ZHANG S Y, et al. Quality analysis of navigation uncertain category for position based on ADS-B statistical data[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(9): 3128-3136(in Chinese).

[10] RTCA. Minimum operational performance standards for 1090MHz extended squitter automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) and traffic information service-broadcast (TIS-B): DO-260B[S]. Washington, D. C.: Radio Technical Commission for Aeronautics, 2009: 50-240.

[11] ZHANG Q Z, ZHANG J, ZHU Y B, et al. Navigation accuracy category-position models and estimate position uncertainty calculations for TIS-B system[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(4): 419-425.

[12] ICAO. Performance-based communication and surveillance (PBCS) manual ed2: Doc9869[S]. Montréal: International Civil Aviation Organization (ICAO), 2017: 39-59.

[13] WG-D. DO-260 study for ADS-B aviation rulemaking committee (ARC): DTRS57-03-R-20038[R]. Washington, D. C.: Avionics Transition Working Group Delta (WG-D) and Honeywell Technology Solutions Inc., 2008.

[14] DEBORAH L. FAA satellite navigation status[R]. Seattle: 14th APEC Global Navigation Satellite System Implementation Group in 2010, 2010.

[15] VERBRAAK T L, ELLERBROEK J, SUN J, et al. Large-scale ADS-B data and signal quality analysis[C]//12th USA/Europe Air Traffic Management R and D Seminar Conference. Reston, VA: AIAA, 2017.

[16] SUBRANMANIAN R, ROBERTO S. Communication, navigation and surveillance performance criteria for safety-

critical avionic systems: SAE-2015-01-2544[C]// SAE 2015 AeroTech Congress and Exhibition. Seattle: Society of Automotive Engineers International, 2015: 1-9.

[17] 张永进. 复杂系统可靠性设计的若干关键问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016: 150-170.
ZHANG Y J. Research on some key problems of reliability design for complex system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016: 150-170.

[18] 中国民航局. 民用航空空中交通管制自动化系统, 第2部分: 技术要求: MH/T4029. 2-2012[S]. 北京: 中国民航出版社, 2012: 10-11.
CAAC. Civil aviation air traffic control automation system-Part 2: Technical requirement: MH/T4029. 2-2012 [S]. Beijing: China Civil Aviation Press, 2012: 10-11.

[19] SMITH A, CASSELL R, BREEN T, et al. Methods to provide system-wide ADS-B back-up, validation and security[C]// 25th AIAA IEEE Digital Avionics Systems Conference Proceedings. Reston, VA: AIAA, 2006: 3D1-1-3D1-7.

[20] 唐鹏. 基于ADS-B数据监视性能评估的技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2015: 18-27.
TANG P. Research on evaluation techniques of surveillance performance based on ADS-B data[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2015: 23-50.

[21] SIMON T, STANISLAV P. Analysis of quality indicators in ADS-B messages[J]. Magazine of Aviation Development, 2017, 5(3): 6-12.

[22] FAA. Current WAAS RNP 0. 3 navigation service display [EB/OL]. (2019-08-12) [2019-08-12]. New Jersey: William J Hughes Technical Center, 2019. https://www. nstb. tc. faa. gov/RT_NPACoverage. htm.

[23] ICAO. Manual on the secondary surveillance radar (SSR) systems (Third Edition): Doc9684[S]. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2004: 6-19-6-21.

(责任编辑: 苏磊)

Statistics and required surveillance performance of ADS-B message parameters

GONG Fengxun[1,*], LI Lihuan[2], MA Yanqiu[1]

1. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China
2. Sanya Air Traffic Management Station, CAAC ATMB, Sanya 572000, China

Abstract: ADS-B technology is widely used in airspace surveillance. The surveillance quality of NUC_P based on its messages has attracted much attention. It has good NUC_P parameters but poor surveillance quality. To address this problem, the correlation between the ADS-B data items and the performance-based communication and monitoring are analyzed. On the basis of fully considering the correlation between the communication, navigation, and surveillance, as well as the wide area augmentation of GNSS satellite navigation, the performance estimation model of the ADS-B surveillance system is deduced and constructed. And then a reasonable simplification had been carried out. In the experimental test airspace, two ADS-B receivers with operational qualification from different manufacturers are installed and operated. Almost 200 million ADS-B messages are collected in three months. The statistical distribution of each information item in the message is analyzed and calculated in detail. These results are applied to the estimation model to evaluate and calculate the required surveillance performance of the two ADS-B stations. And the parameters of message items in the references are applied in the model to evaluate the required performance. The results show that when considering the statistical distribution of each message item and the supporting of wide area augmentation, the surveillance performance of ADS-B systems do not meet the requirement of 99.9%. In the absence of wide area augmentation and the related factors, the required performance of the system is further from the ADS-B surveillance performance specifications required by ICAO.

Keywords: NUC_P; ADS-B message; items statistics; Required Surveillance Performance (RSP); availability; Wide Area Augmentation System (WAAS)

Received: 2019-08-13; **Revised**: 2019-09-19; **Accepted**: 2019-12-20; **Published online**: 2020-01-13 15:54
URL: http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20200415.html
Foundation item: National Key R&D Program of China (2018YFC809500)
* **Corresponding author.** E-mail: fxgong@cauc.edu.cn