

文章编号: 1001 - 893X(2012)08 - 1227 - 05

中国实施 ADS-B 监视的地面站部署分析*

程 擎

(中国民航飞行学院 空中交通管理学院, 四川 广汉 618300)

摘要: 基于我国对 ADS-B 监视的发展策略, 通过对影响 ADS-B 地面站覆盖范围因素的分析, 提出了 ADS-B 信号在我国东部空域和西部主要航路实施单重覆盖地面站不同的部署模型, 并利用该模型计算了东部空域在不同飞行高度层以上对地面站数量的要求和西部 B213、B215 航路高空 6 600 m 以上实现单重覆盖 ADS-B 地面站的部署情况。证明利用该模型对地面站进行部署, 在我国东部空域和西部主要航路将实现 ADS-B 单重覆盖。

关键词: 广播式自动相关监视; 地面站; 最大作用距离; 视距波; 单重覆盖; 部署

中图分类号: TN967.5 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.08.001

Ground Station Deployment Analysis of Implementing ADS-B Surveillance in China

CHENG Qing

(Air Traffic Management Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618300, China)

Abstract: Based on China's ADS-B (Automatic Dependent Surveillance Broadcast) development strategy, by analysing factors influencing ADS-B ground station coverage, different deployment models of ADS-B ground station single coverage in China's eastern airspace and western main routes are proposed, and the required number of ADS-B ground stations achieving single coverage for different flight levels in the eastern airspace is calculated, and the ADS-B ground station deployment for upper airspace above 6 600 m in China's western main routes is discussed. The result shows ADS-B ground station single coverage can be achieved using this kind of deployment model in China's eastern airspace and western main routes.

Key words: automatic dependent surveillance broadcast; ground station; maximum range; sight wave; single coverage; deployment

1 引言

在过去几十年, 世界各国的空中交通管制监视系统主要是一次监视雷达和二次监视雷达。但随着全球卫星导航系统和数据链通信系统的广泛应用, 一种新颖的监视系统应运而生, 它就是广播式自动相关监视系统 (Automatic Dependent Surveillance Broadcast, ADS-B)。ADS-B 是一种协作相关的监视

系统, 它采用机载导航系统获得飞机精确的位置和速度等信息, 利用机载 ADS-B 设备广播飞机的位置信息和其他一些参数^[1]。

当前, 世界各地广泛发展 ADS-B 监视: 澳大利亚实施了“高空空域计划”, 其核心是 ADS-B 技术; 美国制定了 ADS-B 技术发展的近期、中期和远期规划, 把 ADS-B 作为下一代交通运输系统的核心技术^[2]; 欧洲提出的“欧洲一体化空管计划”(SEASA), 其核心技术也是发展 ADS-B。基于我国当前的监视

* 收稿日期: 2012 - 02 - 20; 修回日期: 2012 - 04 - 24

状况和地理地形,我国也正在积极开展 ADS-B 的应用研究。我国对监视系统的发展策略是:西部地区以 ADS-B 监视为主、雷达监视为辅的监视策略,首先在主要航路实现 ADS-B 的单重覆盖;东部雷达管制地区雷达覆盖较好,继续完善雷达覆盖,另外,考虑到 ADS-B 建设费用低、精度高、更新率快等特点,也可以发展 ADS-B 航迹处理的应急备份系统。

在世界各国发展以 ADS-B 为核心技术的同时,都提出了实施单重覆盖或两重覆盖的 ADS-B 地面站部署情况。澳大利亚建立了 28 个 ADS-B 地面站,实现了无雷达监视区域 9.144 km 以上高空空域的 ADS-B 单重覆盖。美国也提出了逐步建设覆盖美国和加拿大的地面站部署,美国联邦航空局 (FAA) 计划 2014 年之前在美国本土安装 400 套 ADS-B 地面站设备。对于地面站的单重覆盖, J. B. Melissen 和 P. C. Schuur 利用圆来对一个长方形区域进行覆盖进行了研究^[3]。根据我国的飞行流量是东重西轻和我国的监视发展策略,本文提出了 ADS-B 信号在我国东部空域实施单重覆盖地面站的部署模型,利用该模型计算了中国东部空域在不同飞行高度层以上实现单重覆盖对地面站数量的要求,对我国西部主要航路 B213 和 B215 实现单重覆盖,提出了两个地面站的重叠模型,并根据航线数据讨论了高空 6 600 m 以上实现单重覆盖地面站的部署情况。

2 ADS-B 地面站的覆盖范围

2.1 ADS-B 电磁波最大作用距离

ADS-B 报告是通过机载 ADS-B 设备广播式发送,ADS-B 地面站或其他飞机的 ADS-B 设备接收。根据机载 ADS-B 发射机的发射功率、ADS-B 地面站接收机的灵敏度,及其天线特性和电磁波的传输损耗,可以计算电磁波传输的最大距离,其计算公式为

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 L_s}{16\pi^2 S_{r(\min)}}} \quad (1)$$

式中, P_t 是 ADS-B 发射机发射功率, $S_{r(\min)}$ 是接收机接收功率最小检测门限, G_t 是发射天线增益, G_r 是接收天线增益, L_s 是电波在空间的损耗, R_{\max} 是电磁波最大作用距离。

如果 $S_{r(\min)} = -120$ dBW, $P_t = 200$ W (23 dBW), $L_s = 3$ dB, $G_t = G_r = 3$ dB, 采用 1090SE 作为传输数据链,其频率是 1 090 MHz, 波长是 27 cm, 计算最大作用距离

$$\begin{aligned} (R_{\max})^2 &= P_r + G_t + G_r + \lambda^2 + L_s - 16\pi^2 - S_{r(\min)} = \\ &= 23 \text{ dBW} + 3 \text{ dB} + 3 \text{ dB} - 11.37 \text{ dB} - \\ &= 3 \text{ dBW} - 22 \text{ dB} + 120 \text{ dBW} = 112.63 \text{ dB} \end{aligned}$$

所以, $R_{\max} = 428$ km。根据机载 ADS-B 设备和地面 ADS-B 接收机的性能情况,由计算可知,ADS-B 电磁波最大作用距离可达到 400 km。

2.2 ADS-B 电磁波的传播方式和传播距离

当前,ADS-B 技术可选的数据链有以下 3 种: 1090 ES (1 090 MHz Extended Squitter)、UTA (Universal Access Transceiver) 和 VDL MODE 4 (VHF Data Link MODE 4)^[4]。3 种频率无线电波的传播方式都是空间波,即视距波。由于地球的曲率使空间波传播存在一个最大直视距离,由收发天线的高度、地球的曲率和大气层对电波的折射作用决定,如图 1 所示^[5]。

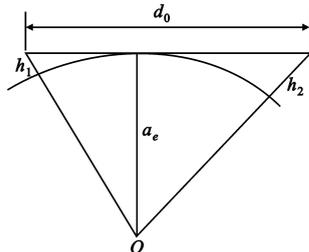


图 1 ADS-B 的直视距离
Fig.1 Viewing distance of ADS-B

在标准大气条件下的地球等效曲率半径 $a_e = (4/3) \cdot a = 8 490$ km,所以,ADS-B 电波的直视距离为

$$\begin{aligned} d_0 &= \sqrt{(a_e + h_1)^2 - a_e^2} + \sqrt{(a_e + h_2)^2 - a_e^2} \approx \\ &= 4.1(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (2) \end{aligned}$$

式中, h_1 是 ADS-B 地面站的天线高度(单位 m), h_2 是飞机的飞行高度(单位 m)。要让地面接收机能接收到机载 ADS-B 的信号并正常工作,需要考虑电波最大作用距离和最大直视距离,其条件是 $d_0 \leq R_{\max}$ 。

3 东部空域 ADS-B 单重覆盖的部署

我国东部空域主要指昆明、成都、兰州以东的区域,该区域包括沈阳、北京、上海、广州、中国台北、香港、三亚、武汉全部和兰州、昆明部分飞行情报区。讨论该区域的 ADS-B 地面站的部署,需要计算单个 ADS-B 地面站在该区域的覆盖半径和实现单重覆盖的地面站之间的距离,最后根据该区域的地面面积粗略计算 ADS-B 地面站的数量。

3.1 ADS-B 地面站的覆盖半径

我国东部大部分区域的海拔高度低于 500 m。ADS-B 地面站设置在该区域,假设平均海拔高度为 400 m,地面站天线相对于地面的高度假设为 15 m。对于不同的飞行高度层 (FL),电磁波的最大直视距离是不同的,由于飞行高度比最大直视距离小很多,可以认为最大直视距离就是 ADS-B 地面站的覆盖半径。如果要求飞行高度层 1 000 m 以上的覆盖,其覆盖半径为

$$d_0 \approx 4.1(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) = 4.1(\sqrt{1000 - 400} + \sqrt{15}) \approx 116 \text{ km}$$

同样,可计算飞机在飞行高度层 3 000 m、6 600 m 和 9 200 m 以上的 ADS-B 覆盖半径,如表 1 所示。

表 1 不同飞行高度层的覆盖半径

FL/m	d_0/km
1 000	116
3 000	225
6 600	338
9 200	400

可见,随飞机飞行高度的增加,ADS-B 地面站覆盖半径随着增加,在高空空域 9 200 m 以上,其覆盖半径达到 400 km,即可达到 ADS-B 工作的最大距离。

3.2 东部实现单重覆盖的地面站配置模型

为了在东部地区实施 ADS-B 无缝隙的连续监视,需要 ADS-B 地面站覆盖区域至少实现单重覆盖。要实现 ADS-B 单重覆盖,地面站的配置模型如图 2 所示, O_1 、 O_2 、 O_3 和 O_4 是 4 个 ADS-B 地面站,地面站的覆盖半径是 d_0 。圆 O_1 和 O_3 相切, O_2 和 O_4 相切,地面站 O_1 、 O_2 、 O_3 和 O_4 构成一个正方形,正方形的对角线长度是 2 倍覆盖半径 $2d_0$,地面站 O_1 和 O_4 , O_1 和 O_2 的距离是 D ,其中 $D = \sqrt{2}d_0$ 。

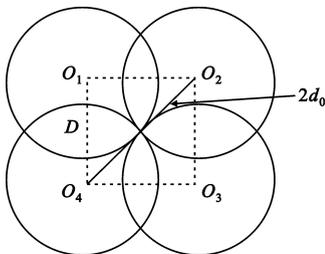


图 2 ADS-B 单重覆盖地面站的配置

Fig.2 The configuration of the ground station single coverage

根据不同飞行高度层的地面站的覆盖半径,可以计算相邻地面站的距离 D ,如表 2 所示。

表 2 不同飞行高度层的覆盖半径和地面站距离
Table 2 Coverage radius and ground station distance of different flight level

FL/m	d_0/km	D/km
1 000	116	164
3 000	225	318
6 600	339	479
9 200	400	565

3.3 东部不同飞行高度层的地面站数量

根据 ADS-B 单重覆盖的地面站配置模型,4 个地面站能实施单重覆盖的区域如图 3 所示。4 个地面站覆盖的区域是边长为 D_1 的正方形, $D_1 = 2D$,其覆盖面积 $S = D_1 \times D_1$ 。如果所需覆盖区域形状近似长方形,边长为 D_1 和 D_2 ,根据该模型,可以粗略计算地面面积 S 区域内需要地面站数量

$$N = \frac{D_1}{D} \times \frac{D_2}{D} \tag{3}$$

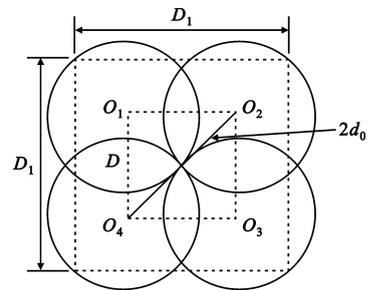


图 3 地面站数量的计算模型

Fig.3 The calculation model of ground station number

按照昆明、成都、兰州航线将我国的空域划分为东部空域和西部空域。东部空域可以分为两个长方形区域,即东北区域和东部区域。其中东北区域主要为沈阳飞行情报区,东西约 1 150 km,南北约 1 300 km;东部区域主要包括北京、上海、武汉、广州飞行情报区和部分兰州、昆明飞行情报区,东西长约 1 850 km,南北约 2 100 km。三亚飞行情报区位于海南省,海南省远离大陆,可单独设置一个 ADS-B 地面站。

要实现高空航路的 ADS-B 覆盖,即飞行高度层 6 600 m 以上的覆盖,其覆盖半径是 $d_0 \approx 339 \text{ km}$, $D = \sqrt{2}d_0 = 479 \text{ km}$,东北区域需要的 ADS-B 地面站的数量为

$$N_1 = \frac{D_1}{D} \times \frac{D_2}{D} = \frac{1\ 150}{479} \times \frac{1\ 300}{479} \approx 3 \times 3 = 9$$

东部区域需要的 ADS-B 地面站的数量为

$$N_2 = \frac{D_1}{D} \times \frac{D_2}{D} = \frac{1\ 850}{479} \times \frac{2\ 100}{479} \approx 4 \times 5 = 20$$

东部空域需要的 ADS-B 地面站的数量是： $N = N_1 + N_2 + 1 = 30$ 。所以，根据不同的飞行高度层覆盖要求，地面站的覆盖半径不同，所要求的地面站的数量和位置情况也是不同的，表 3 是我国东部区域不同飞行高度层覆盖所需的地面站数量。

表 3 我国东部区域不同空域的地面站数量

Table 3 The ground station number of different airspace in

China eastern airspace

飞行高度层 /m	覆盖半径 /km	地面站间距离 /km	东北区地面站/个	东部区地面站/个	三亚地面站/个	东部总地面站/个
1 000	116	164	56	169	1	226
3 000	225	318	16	42	1	58
6 600	339	479	9	20	1	30
9 200	400	565	6	16	1	23

此处的计算没有考虑东北区域和东部区域的重叠覆盖情况和邻近区域存在共同使用地面站的情况，也没有考虑东部沿海地区地面站的地面站具体情况。在实际设置地面站的时候，还会考虑地面的具体情况和该区域航线的实际分布情况，所以实际的地面站数量会有所变化。

4 西部主要航路实现单重覆盖的 ADS-B 监视部署

西部空域主要指昆明、成都、兰州以西的空域，包括乌鲁木齐情报区和昆明、兰州部分情报区。中国西部的地形是青藏高原，其海拔高度平均超过 4 500 m，很多地区是无人区域。根据航线分布情况和飞行流量的发展，首先考虑在主要航路，成都—拉萨(B213)，银川—乌鲁木齐(B215)航线发展高空空域单重覆盖的 ADS-B 监视。

4.1 B213 航线 ADS-B 地面站的配置

成都—拉萨航线的规划是建立平行航路，航路之间的间距是 65 km。其中，我国的航线宽度是左右 25 km，因此，整个平行航路的宽度是 115 km，ADS-B 地面站信号需要保证重叠区域 d_1 达到 115 km。

图 4 两个地面站重叠模型，图中 O_1 和 O_2 是两个地面站， O_1 和 O_2 之间的距离是 D ，重叠距离是 d_1 。对于成都—拉萨航线，航线地面平均海拔高度超过 4 500 m，假设地面站天线相对地面高度 15 m；如果要求对高空航路实现单重连续覆盖，即飞行高度层 6 600 m 以上实现单重连续覆盖，其地面站覆盖半径 d_0 为

$$d_0 \approx 4.1(\sqrt{6\,600 - 4\,500} + \sqrt{15}) \approx 203 \text{ km}$$

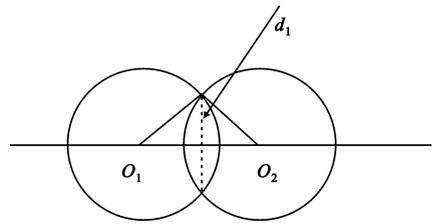


图 4 地面站的重叠模型

Fig. 4 The overlap model of the ground station

根据图 4 的地面站重叠模型，地面站覆盖距离 D 为

$$D = 2\sqrt{d_0^2 - (d_1/2)^2} = 2\sqrt{203^2 - 57.5^2} \approx 389 \text{ km}$$

根据《中国民用航空航行手册》，成都—拉萨航线(B213)的航线数据如表 4 所示。

表 4 成都—拉萨(B213)航线数据

Table 4 Chengdu—Lhasa(B213) route data

航路点	航线角/(°)	航线距离/km
ZUUU		
CZH	287	14
MIKOS	275	70
KAMAX	276	101
PEXUN	276	182
CHANGDU	276	270
TAPUN	253	412
LHASA	249	215

根据表 4 中成都—拉萨 B213 航线数据，ZUUU 到 CHANGDU 的航线角基本相同，其总航线距离 $D_1 = 637 \text{ km}$ ，地面站覆盖距离是 $D = 389 \text{ km}$ ， $n = D_1/D = 637/389 \approx 2$ ，所以需要 3 个 ADS-B 地面站，考虑到航线的具体情况，我们可以在成都机场(ZUUU)、昌都机场(CHANGDU)和航线上的适当位置设置 ADS-B 地面站。CHANGDU—TAPUN 的距离 412 km，航线角 253° ，TAPUN—LHASA 的距离是 215 km，航线角 249° 。可以认为 CHANGDU、TAPUN 和 LHASA 在一条航线上，距离是 $D_2 = 627 \text{ km}$ 。在该航线上需要 3 个地面站，在昌都机场(CHANGDU)已经设置 ADS-B 地面站，在拉萨机场(LHASA)设置一个地面站，在昌都和拉萨机场之间的航路上可设置一个地面站。考虑具体情况，该地面站可以设置在林芝米林机场。其配置情况如图 5 所示。

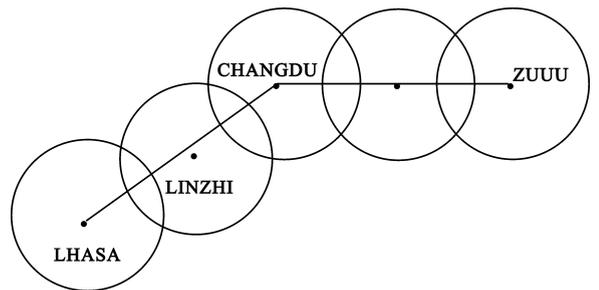


图 5 B213 航线的 ADS-B 地面站的配置

Fig. 5 ADS-B ground station configuration of the B213 route

4.2 B215 航线 ADS-B 地面站的配置

对于银川—乌鲁木齐航线, ZLIC—HAMI 的最低安全高度是 2 983 m, HAMI—ZWWW 的最低安全高度是 4 955 m, 假设平均海拔高度 4 500 m, 地面站天线相对地面高度 15 m。要求地面站能覆盖 6 600 m 以上, 其地面站覆盖距离是 203 km。

该航线宽度 50 km, 即要求地面站重叠区域宽度 50 km, 两个地面站距离为

$$D = 2 \sqrt{d_0^2 - \left(\frac{d_1}{2}\right)^2} = 2 \sqrt{203^2 - 25^2} \approx 402 \text{ km}$$

银川—乌鲁木齐航线(B215)的航线数据如表 5 所示。

表 5 银川—乌鲁木齐航线数据
Table 5 Yingchuan—Urumqi route data

航路点	航线角/(°)	航线距离/km
ZLIC		
YABRAI	294	337
JIAYUGUAN	279	382
MUKTI	310	345
HAMI	310	168
GURVO	286	255
FUKANG	286	225
ZWWW	232	50

根据航线数据和地面站安装的便利性, 按照 B213 航线 ADS-B 地面站的配置方法, 可以在 ZLIC 机场、YABRAI、JIAYUGUAN、HAMI、JIAYUGUAN 和 HAMI 之间某个位置、GURVO 和 ZWWW 机场分别设置一个 ADS-B 地面站, 如图 6 所示。

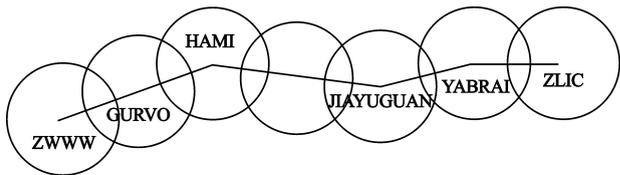


图 6 B215 航线的 ADS-B 地面站的配置

Fig. 6 ADS-B ground station configuration of the B215 route

5 结 论

ADS-B 作为一种全新的监视技术, 具有航迹精度高、投资成本低、数据更新快等特点, 虽然这种技术目前还处于发展过程中, 但作为未来主用监视系统已是大势所趋, 特别是在无雷达空域和边远地区, 如我国的西部空域将具有很大的发展前景。本文分析了影响 ADS-B 地面站覆盖范围的因素, 包括最大

作用距离、视距波和地球的曲率, 并计算了不同飞行高度层 ADS-B 地面站的覆盖半径, 根据在一个空域利用多个圆实现单重覆盖的要求提出了单重覆盖的地面站配置模型, 并把我国东部空域划分为东北区域和东部区域, 利用单重覆盖模型分析了地面站的部署。对西部区域提出了两个地面站的重叠模型, 并根据 B213 和 B215 航线具体情况讨论了高空 6 600 m 以上实现单重覆盖地面站的部署情况。本文提出的 ADS-B 地面站单重覆盖模型表明, 在我国西部主要航路和东部空域, 按照模型中的地面站配置来建设, 将实现这些空域的 ADS-B 单重覆盖, 但本文论证没有考虑建设地面站的实际情况、地面站周围的实际地形和该区域航线的实际分布情况, 这些都将是下一步的研究内容。

参考文献:

- [1] 张军. 现代空中交通管理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005:210-223.
ZHANG Jun. Modern Air Traffic Management[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005:210-223. (in Chinese)
- [2] 王鲁杰. 中国民航应优先发展 ADS-B 应用技术[J]. 中国民用航空, 2006(1):27-30.
WANG Lu-jie. China Should Put Priority on Development of ADS-B Technology[J]. China Civil Aviation, 2006(1):27-30. (in Chinese)
- [3] Melissen J B M, Schuur P C. Covering a rectangle with six and seven circles[J]. Discrete Applied Mathematics, 1999(1-3):149-156.
- [4] RTCA DO-242A, Minimum Aviation System Performance Standards for Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B)[S].
- [5] 魏光兴. 通信导航监视设施[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2004, 156-157.
WEI Guang-xing. The communication, navigation and surveillance facilities[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2004:156-157. (in Chinese)

作者简介:

程 擎(1972—), 男, 四川广汉人, 2003 年于西南交通大学获硕士学位, 2011 年于法国民航学院获硕士学位, 现为副教授、硕士研究生导师, 主要研究方向为民航通信、导航和监视、空中交通管理自动化。

CHENG Qing was born in Guanghan, Sichuan Province, in 1972. He received the M.S. degree from Southwest Jiaotong University in 2003 and the Civil Aviation College of French in 2011. He is now an associate professor and also the instructor of graduate students. His research interests include communication, navigation, surveillance and air traffic management automation.

Email: degleq@163.com