

甚高频航空自组网的组网概率及连通性研究

郑博, 黄国策, 张衡阳, 任清华

(空军工程大学电讯工程学院, 710077, 西安)

摘要: 针对目前航空电信网存在的如飞行器之间不能直接通信、难以接入 Internet 等问题, 提出了一种甚高频航空自组织网络的组网方案. 在计算飞行器通信半径的基础上, 基于泊松分布模型, 推导出航空自组网组网概率的数学表达式, 并利用中国各航空公司的航班信息仿真分析了中国大陆空域内航空自组网的组网概率及网络连通性. 仿真结果表明: 每天 8:00~24:00, 中国东、西部空域都可建立航空自组网; 设置北京、上海和广州 3 个地面站点, 飞行器的通信半径为 500 km, 可使 8:00~24:00 间全网连通性基本达到 100%, 全天时间内所有航班可接入地面站点的平均时长超过总飞行时长的 99%.

关键词: 航空自组网; 飞行器; 甚高频; 组网概率; 网络连通性

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)08-0024-06

Probability and Connectivity of a Very High Frequency Aeronautical Ad Hoc Network

ZHENG Bo, HUANG Guoce, ZHANG Hengyang, REN Qinghua

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: A very high frequency (VHF) aeronautical Ad hoc network (AANET) is introduced to study problems in the existing aeronautical telecommunication network, such as aircrafts can not be communicated with each other and can not be connected to Internet, etc. The feasibility of AANET is studied in the airspace of the mainland of China. An analytical expression for the network probability is derived based on a calculated aircraft communication radius and the Poisson distribution. Then, the probability and connectivity of the network are simulated using the information of the scheduled flights from all airline companies in China. The results show that from 8 a. m. to 24 p. m., AANET is feasible in both the Eastern and Western airspaces of China; when 3 ground stations with communication radius of 500 km are located in Beijing, Shanghai and Guangzhou, respectively, and the aircraft communication radius is 500 km, the network connectivity maintains almost 100% from 8 a. m. to 24 p. m., and that the average percentage of all aircrafts reaching one ground station during one day's flight duration exceeds 99%.

Keywords: aeronautical Ad hoc network; aircraft; very high frequency; network probability; network connectivity

在民用航空通信中, 目前广泛使用的航空电信网 (Aeronautical Telecommunication Network,

ATN) 存在一些问题, 如无法满足飞机自由飞行的需求、飞机之间不能相互通信、无法分发环境感知信

收稿日期: 2011-02-28. 作者简介: 郑博(1982—), 男, 博士生; 黄国策(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972042); 航空科学基金资助项目(20095596016); 陕西省自然科学基金资助项目(2009JM8010, 2010JQ8010).

网络出版时间: 2011-05-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20110524.1151.005.html>

息、难以接入 Internet、体系结构较复杂等^[1]。克服这些缺陷,研究实时、高效、适应未来发展需求的航空通信方式,已成为民航通信亟待解决的问题。航空自组网(Aeronautical Ad hoc Network, AANET)^[2]的概念就是在这种需求背景下提出的,它是由一定空域内飞行中的航空飞行器连接建立的移动 Ad hoc 网络(Mobile Ad hoc Network, MANET)。在该网络中,飞行器之间可以互相转发来自地面站点的控制指令信息,交换各自的飞行状态、感知信息等数据,也可通过单跳或多跳通信接入地面 Internet 网关。因此,每个飞行器不仅是一个收发器,而且还是一个路由器,可以采用多跳的方式把数据转发给更远的飞行器,其概念如图 1 所示。航空自组网具备自组织、自修复的能力和快速、高效组网的优势,具有广阔的应用前景,可为空中交通管理提供新的技术手段^[3],为越洋飞行的航班提供有效的通信保障^[4],也可使飞行的航班接入 Internet,为旅途中的乘客提供上网服务^[5-6]等。目前,航空自组网研究与应用的代表项目有澳大利亚悉尼大学的 AANET^[7]、欧盟的 NEWSKY^[8] 和 ATENAA^[1]等。此外,美国堪萨斯大学^[9-10]、日本东京早稻田大学^[4]、韩国浦项科技大学^[11],以及国内的北京航空航天大学^[12-13]等机构也在该领域开展了一些研究。

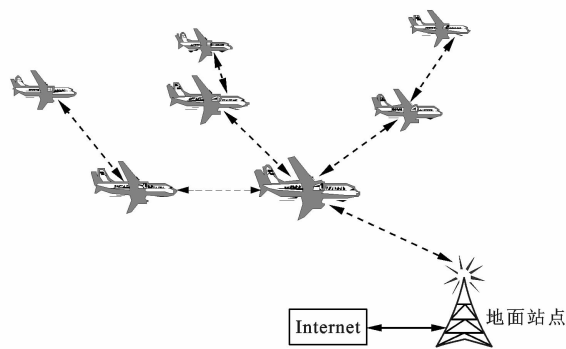


图 1 航空自组网概念示意图

由于航空自组网具有大尺度、高动态、临时性、无中心节点、时变信道和节点密度小等特点,因此比传统地面上的 MANET 复杂得多,尤其在高速移动环境中存在许多尚待解决的问题,给其研究和发展不断提出新的挑战。其中,组网概率和网络连通性分析是该领域中一个重要的基础性课题,前人已进行过一些研究。SAKHAEI 等人^[5]对美国国土上空 AANET 的可行性进行了简要的分析,利用估算的飞机密度值计算了 AANET 的组网概率,但缺乏系统的理论支撑,方法过于简单。MEDINA 等人^[6,14]

对两种典型空域中航空自组网的连通性进行了较为深入的研究。文献[6]以北大西洋空中走廊(North Atlantic Corridor, NAC)为例,利用实际航班数据研究了偏僻地区(如海洋和极地地区)空域中航空自组网的网络连通性。文献[14]以欧洲空域为例,利用实际航班数据研究了高密度空域中航空自组网的网络连通性及其拓扑特征。上述研究有较强的代表性,不足之处在于仅研究了这两个空域内航空自组网的网络连通性,并未讨论组网的概率。KINGSBURY^[15]和 BESSE 等人^[16]也分别以此方法论证了航空自组网在 NAC 和法国空域内的连通性。

本文对中国大陆空域内甚高频(VHF)航空自组网的组网概率以及网络连通性进行研究。在计算航班 VHF 信道通信半径的基础上,通过建立泊松分布模型,推导出了航空自组网组网概率的数学表达式,并利用中国民航的实际航班数据仿真分析了中国大陆空域内甚高频航空自组网的组网概率及网络连通性。研究结果对该领域的发展具有一定的参考价值。

1 航班 VHF 信道通信半径计算

目前航空自组网的项目^[4-10]一般采用 VHF 频段,频率介于 118~137 MHz,为视距通信方式。图 2 为理想状态下的航班通信半径, A_1 、 A_2 和 A_3 为 3 架飞行中的航班,飞行高度 h 都为 10 km。设地心为 O ,地球半径 $R_0=6\,378\text{ km}$,则 A_1 和 A_2 之间的最大通信距离为

$$d_{A_1A_2} = 2(d_{OA_1}^2 - d_{OH}^2)^{1/2} = 2[(R_0 + h)^2 - R_0^2]^{1/2} = 715\text{ km} \tag{1}$$

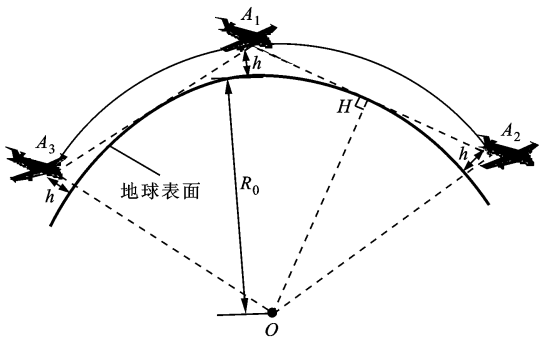


图 2 理想情况下的航班通信半径

因此,理想情况下的航班通信半径为 715 km。但是,在实际应用中,航空 VHF 通信受信道衰落等物理层因素的影响,可用通信半径小于理想通信半径。由于航空 VHF 信道属于瑞利(Rayleigh)衰落

信道,其链路误码率可表示为^[17]

$$\epsilon_{\text{BER}} = 0.5 - \frac{[0.5(2\sigma_f^2 P_t G_t G_r c^2)^{1/2}]}{[P_{\text{therm}}(4\pi f_c R)^2 + (2\sigma_f^2 P_t G_t G_r c^2)]^{1/2}} \quad (2)$$

式中: P_t 为发射功率; G_t 和 G_r 分别为发射天线和接收天线的增益; f_c 为载波频率; c 为光速; R 为通信半径; $2\sigma_f^2$ 为瑞利分布中信号包络的均方值; P_{therm} 为热噪声功率

$$P_{\text{therm}} = FkT_0R_b \quad (3)$$

其中 F 为噪声值, $k=1.38\times10^{-23}$ J/K 为 Boltzmann 常数, T_0 为常温, R_b 为数据传输速率. 根据目前航空通信的现状,各参数取值为 $P_t=50$ W, $f_c=131.450$ MHz, $G_t=G_r=1$, $F=6$ dB, $T_0=300$ K, $\sigma_f^2=1$, $R_b=31.5$ kb/s.

根据式(2)和式(3)可得通信半径 R 与链路误码率 ϵ_{BER} 之间的关系,如图3所示. 当 $\epsilon_{\text{BER}}\in[10^{-6}, 10^{-5}]$ 时, $R\in[160, 500]$ km. 本文将以此对甚高频航空自组网的组网概率及连通性进行研究.

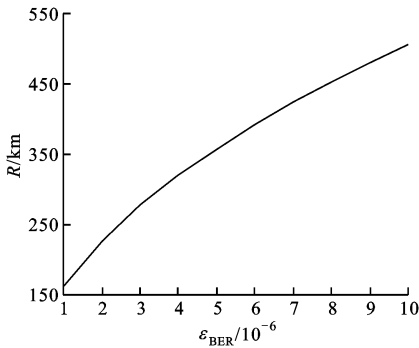


图3 可用通信半径与链路误码率的关系

2 中国大陆空域内的航班密度分析

每天美国空域内的航班数量介于600~5 000架^[5],欧洲空域内白天时段的航班数量也能维持在

2 000架左右^[14]. 利用中国各航空公司提供的2010年10月份的航班信息(部分航班信息见附录A),根据所有航班起飞、降落的时间和地点,在Matlab平台中对周一至周日每天中国大陆空域在飞的航班数量进行统计平均,如图4所示. 由图4可知:每天8:00~22:00,中国大陆空域内的航班数量保持在1 000架以上,其中14:00~18:00为最高峰时段,航班数量约为1 600架;22:00以后,航班数量急剧减少,在凌晨2:00~7:00,只有少量国际航班在飞行. 图5所示为每天8:00、14:00和24:00中国大陆空域内航班的分布情况.

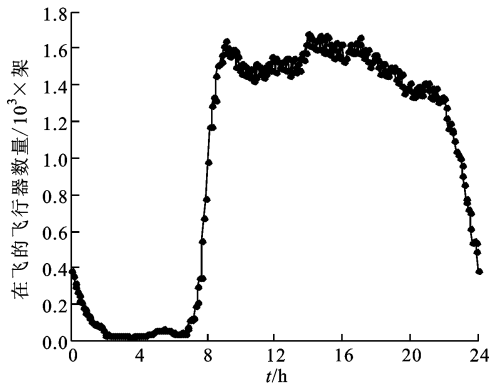


图4 中国大陆空域航班数量的变化

在中国,东部地区机场多,航线密集,西部地区机场少,航线稀疏. 以东经 110° 经线为界可将大陆分为东、西两部分,经过计算可得,东部国土面积约为360万平方公里,西部国土面积约为600万 km^2 . 分别对东、西部空域内的飞机数量和飞机密度进行统计,如图6、图7所示. 由图6、图7可知,东部空域的航班数量和密度都要远远高于西部,全天时间东部空域的航班数量和密度的变化比较剧烈,白天和夜间的差距较大,而西部空域的变化相对较小.

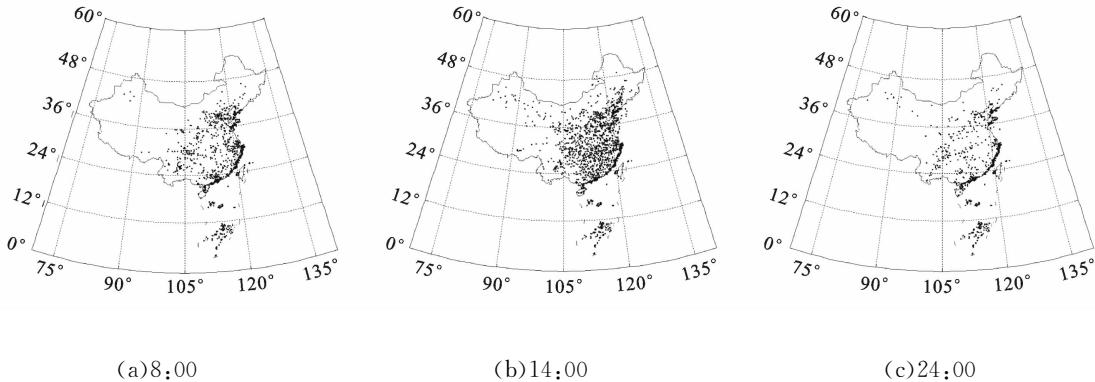


图5 每天不同时刻中国大陆空域内航班的分布

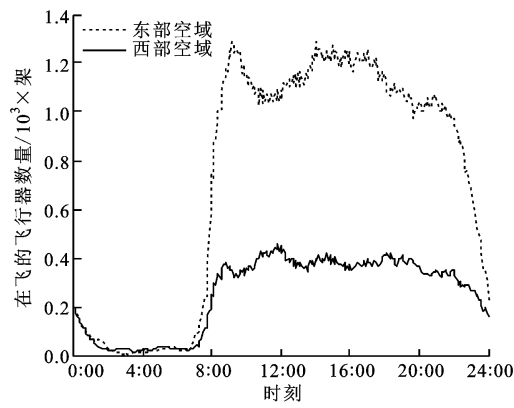


图 6 中国东、西部空域航班数量的变化

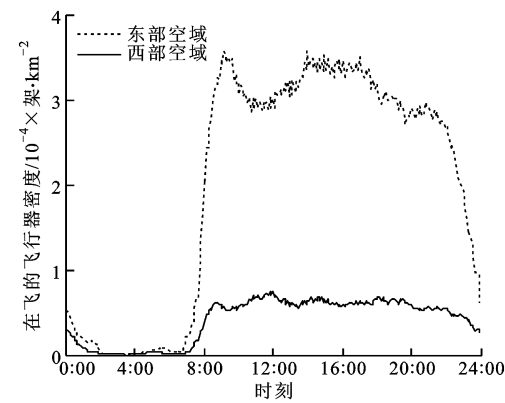


图 7 中国东、西部空域航班密度的变化

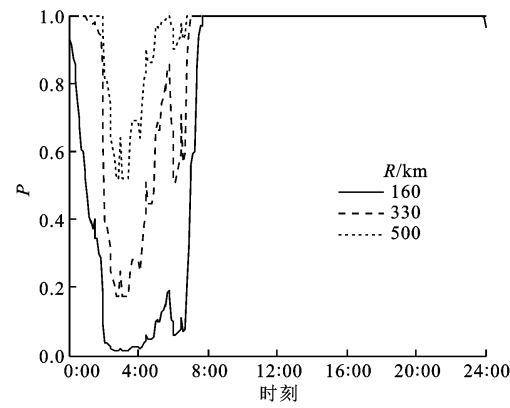


图 8 东部空域组网概率

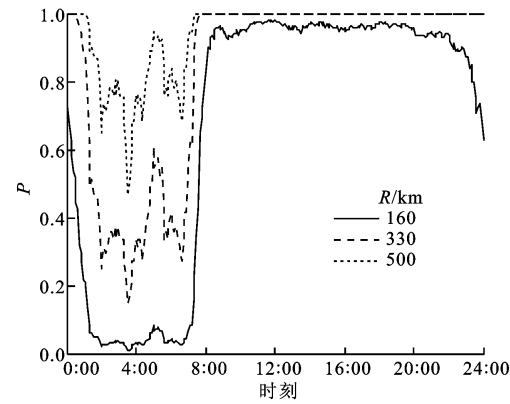


图 9 西部空域组网概率

3 组网概率分析

下面利用概率模型推导航空自组网的组网概率。在航空自组网中,如果在每架飞机的通信覆盖区域 D 内,至少存在另外一架或一架以上的飞机,那么该网络就是可行的。因此,航空自组网的组网概率取决于该空域内飞机密度和通信半径。设飞机密度为 δ ,则在空域 D 内存在 $n(n=0,1,2,\cdots)$ 架飞机的概率 $p(n)$ 服从泊松分布^[5]

$$p(n) = \frac{(\delta S_D)^n e^{-\delta S_D}}{n!} \tag{4}$$

式中: $S_D = \pi R^2$ 为空域 D 的面积。因此,组网概率 P 与飞机密度 δ 的函数关系为

$$P(\delta) = 1 - p(0) - p(1) = 1 - e^{-(\delta S_D)} - (\delta S_D) e^{-(\delta S_D)} = 1 - e^{-\pi \delta R^2} - (\pi \delta R^2) e^{-\pi \delta R^2} \tag{5}$$

当通信半径分别为 160、330 和 500 km 时,根据式(5)和中国东、西部空域的航班密度值,计算东、西部空域中航空自组网的组网概率,得到图 8、图 9。由图 8、图 9 可知:在东部空域,由于航班密度较高,160 km 的通信半径即可保证每天 8:00~24:00 的

组网率达到 100%;在西部空域,由于航班密度较低,330 km 的通信半径可保证每天 8:00~24:00 的组网概率为 100%;无论在东、西部,由于每天 0:00~8:00 在飞的航班数量过少,因此航空自组网难以建立。

4 网络连通性分析

由于构建航空自组网的目标是为空中飞机与地面站点之间提供一种有效的通信方式,因此下面的分析主要针对空中飞机与地面站点之间的连通状况。航空自组网的网络连通性通常采用以下 2 个指标来衡量^[6]

$$C(t) = \frac{t \text{ 时刻可接入地面站点的飞机数量}}{t \text{ 时刻空中的飞机数量}} \tag{6}$$

$$\mu = \frac{\text{可接入地面站点的时长}}{\text{总飞行时长}} \tag{7}$$

式中: $C(t)$ 是从全网角度衡量连通性的指标,指通过单跳或多跳通信可接入任一地面站点的飞机数量占此时此刻空中飞机总数的比例; μ 是从单个节点角度衡量连通性的指标,指某航班可接入地面站点的飞

行时长占总飞行时长的比例。

由于绝大多数航线轨迹为出发地与目的地之间的大圆弧,因此仿真中可假定所有航班都沿出发地与目的地之间的大圆弧飞行。对于网络中的节点 k 和 j ,设其经、纬度坐标分别为 (θ_k, ϕ_k) 和 (θ_j, ϕ_j) ,则二者之间的弧长为

$$d_{kj} = \arccos[\sin\theta_k \sin\theta_j + \cos\theta_k \cos\theta_j \cos(\phi_k - \phi_j)]$$

(8)

目前,中国的三大航空枢纽是北京首都国际机场、上海浦东国际机场和广州白云国际机场。下面采用以上 3 个地面站点,根据所有航班信息,在 Matlab 平台中仿真全天时段内所有航班的飞行,并根据式(6)和式(7)计算网络连通性,结果如图 10 和表 2 所示。

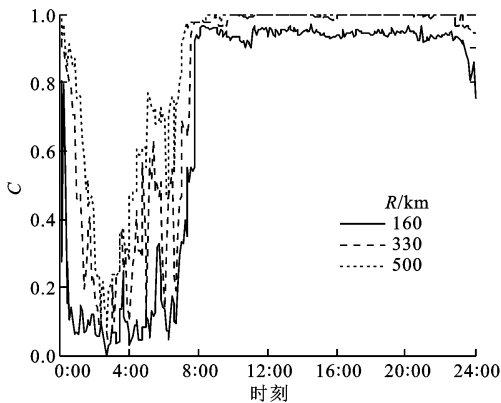


图 10 全网连通性的仿真结果

表 2 单个航班连通性的仿真结果

R/km	$\bar{\mu}/\%$	$P(\mu>0.99)/\%$
160	92.279	79.980
330	97.994	94.574
500	99.108	97.463

注: $\bar{\mu}$ 为所有飞机的平均值, $P(\mu>0.99)$ 为 $\mu>0.99$ 的飞机数量占飞机总数的比例。

由图 10 和表 2 可得,随着航班通信半径的增大,网络连通性增强。当通信半径为 500 km 时,每天 8:00~24:00 间全网连通性基本可达 100%;在全天时间内,所有航班可接入地面站点的平均时长超过总飞行时长的 99%,而且超过 97%的航班与地面可连通的时长高于其飞行时长的 99%。这一结果说明,在中国大陆只需设置北京、上海和广州 3 个地面站点,通信半径为 500 km,即可保证航空自组网达到较高的连通状态。

5 结 论

本文研究了中国大陆空域内甚高频航空自组网的组网概率及网络连通性。在计算航班 VHF 信道通信半径的基础上,通过建立泊松分布模型,推导出了航空自组网组网概率的数学表达式;利用国内所有航空公司的航班信息得出了中国东、西部空域内航班密度全天的变化情况,仿真分析了东、西部空域中的组网概率;根据实际情况,设置了北京、上海和广州 3 个地面站点,仿真计算了网络连通性的 2 个指标,结果表明,每天 8:00~24:00,东、西部空域均可建立航空自组网,但由于 0:00~8:00 间飞行的航班数量过少,航空自组网的组网概率很低;设置北京、上海和广州 3 个地面站点,飞行器的通信半径为 500 km,可使 8:00~24:00 间全网连通性基本达到 100%,全天时间内所有航班可接入地面站点的平均时长超过总飞行时长的 99%。本文的研究证明,目前航空自组网在中国大陆空域内是完全可行的,而且随着未来航空交通运输业的发展,航班数量会不断增多,航空自组网的组网概率和网络连通性也会进一步增大。下一步的研究工作是为航空自组网设计适用的路由协议。

参考文献:

[1] KARRAS K, KYRITSIS T, AMIRFEIZ M, et al. Aeronautical mobile Ad hoc networks [C]// Proceedings of 14th European Wireless Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 3972-3977.

[2] 郑博, 张衡阳, 黄国策, 等. 航空自组网的现状与发展 [J]. 电信科学, 2011, 27(5): 38-47.
ZHENG Bo, ZHANG Hengyang, HUANG Guoce, et al. Status and development of aeronautical Ad hoc networks [J]. Telecommunications Science, 2011, 27 (5): 38-47.

[3] CHENG M X, ZHAO Yiyuan. Connectivity of Ad hoc networks for advanced air traffic management [J]. Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, 2004, 1(5): 225-238.

[4] TU H D, SHIMAMOTO S. A proposal of relaying data in aeronautical communication for oceanic flight routes employing mobile Ad-hoc network [C]// Proceedings of 2009 First Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 436-441.

[5] SAKHAE E, JAMALIPOUR A. The global in-flight Internet [J]. IEEE Journal on Selected Areas in

Communications, 2006, 24(9): 1748-1757.

[6] MEDINA D, HOFFMANN F, AYAZ S, et al. Feasibility of an aeronautical mobile Ad hoc network over the North Atlantic Corridor [C] // Proceedings of IEEE SECON. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 109-116.

[7] SAKHAE E, JAMALIPOUR A, KATO N. Aeronautical Ad hoc networks [C] // Proceedings of the IEEE Wireless Communications & Networking Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 246-251.

[8] SCHNELL M, SCALISE S. NEWSKY: a concept for networking the sky for civil aeronautical communications [J]. Space Communications, 2008, 21(3/4): 157-166.

[9] ROHRER J P, JABBAR A, CETINKAYA E K, et al. Airborne telemetry networks: challenges and solutions in the ANTP suite [C] // Proceedings of IEEE Military Communications Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 74-79.

[10] ROHRER J P, JABBAR A, CETINKAYA E K, et al. Highly-dynamic cross-layered aeronautical network architecture [EB/OL]. (2010-09-10) [2010-12-21]. <http://www.ittc.ku.edu/resilients/papers/Rohrer-Jabbar-Cetinkaya-Perrins-Sterbenz-2010.pdf>.

[11] SEO D W, KIM S H, SUH Y J. System integration of GPSR and ADS-B for aeronautical Ad hoc networks [C] // Proceedings of IEEE Military Communications Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1-6.

[12] 刘慧, 张军. 高动态自适应移动网络模型及其性能分析 [J]. 中国科学: E 信息科学, 2008, 38(2): 267-277.

LIU Hui, ZHANG Jun. Highly dynamic self-adaptive mobility model and analysis of its performance [J]. Science in China: Series E Information Sciences, 2008, 38(2): 267-277.

[13] 陈灼, 刘凯, 张军. 一种新的基于位置信息的路由算法研究 [J]. 航空学报, 2007, 28(4): 901-906.

CHEN Zhuo, LIU Kai, ZHANG Jun. Study on a novel location-based routing algorithm [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2007, 28(4): 901-906.

[14] MEDINA D, HOFFMANN F, AYAZ S, et al. Topology characterization of high density airspace aeronautical Ad hoc networks [C] // Proceedings of 5 th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 295-304.

[15] KINGSBURY R W. Mobile Ad hoc networks for oceanic aircraft communications [D]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2009.

[16] BESSE F, GARCIA F, PIROVANO A. Wireless Ad hoc networks access for aeronautical communications [C] // Proceedings of 28th AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2010: 1-15.

[17] HAYKIN S, MOHER M. Modern wireless communications [M]. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 2004.

附录 A

表 A1 2010 年 10 月北京首都国际机场部分起、降航班信息

序号	航班号	起飞时间	降落时间	出发地	目的地	班期
1	MU8739	16:40	21:00	北京	东京	1234567
2	CA983	21:00	17:30	北京	洛杉矶	1234567
3	LH7323	1:20	5:50	北京	法兰克福	1234567
4	CZ310	8:45	12:20	北京	香港	1234567
5	CA953	8:55	10:20	北京	大连	1234567
6	MU5717	8:55	14:10	北京	腾冲	1234567
7	HU7198	21:00	23:10	北京	宁波	1234567
8	MU5134	20:50	23:20	北京	温州	1234567
9	CZ3907	8:55	10:50	北京	上海	1234567
10	MU2104	14:55	16:50	北京	西安	1234567
11	KL897	17:40	9:55	阿姆斯特丹	北京	1234567
12	NX002	12:10	15:10	澳门	北京	1234567