

基于一维航线的航空自组网连通性研究

宋玉龙¹, 罗长远¹, 张运², 程佳佳²

(1. 解放军信息工程大学, 郑州 450004; 2. 中国人民解放军 73233 部队, 浙江 舟山 316000)

摘要: 为了研究航空自组网的网络连通性问题, 针对部分空域航线单一、航班较少的情况, 提出一种基于一维航线的连通性研究方法。该方法考虑了飞机航线分层、双向飞行等特点, 据此建立适当的飞机分布模型, 运用整体思想推导出可以衡量一维航线实际连通性的数学表达式, 并通过实验证明了理论计算结果的正确性。根据实际航班数据仿真得到了我国部分空域上航空自组网的连通概率, 实例仿真结果表明, 利用反向飞机的转发作用, 一维双向航线的连通率可以满足航空自组网的组网要求。

关键词: 航空自组网; 一维航线; 单、双航线; 连通性

中图分类号: TP 393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2014)02-0515-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.02.046

Connectivity on one-dimensional flight route in aeronautical Ad hoc network

SONG Yu-long¹, LUO Chang-yuan¹, ZHANG Yun², CHENG Jia-jia²

(1. PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450004, China; 2. PLA Unit 73233, Zhoushan Zhejiang 316000, China)

Abstract: In order to research on the connectivity of aeronautical Ad hoc, this paper proposed a method based on the connectivity of single-dimensional airline for the problems of airline routes singleness and the lack of flights. Considering the features of flight delamination and two-way directions, it built an appropriate airplane distribution model, and deduced the mathematical expression which could measure the actual connectivity of single-dimensional airline with the whole idea. Meanwhile, it proved the correctness of theoretical calculation results via experiments. At last, it calculated the connection probability of aeronautical Ad hoc network in parts of Chinese aerospace based on the real flight data. The results show that the connectivity of one-dimensional bidirection flight can meet the requirements of aeronautical Ad hoc network in advantages of the reverse airplanes transitions.

Key words: aeronautical Ad hoc network (AANET); one-dimensional flight route; one-and two-way of flight routes; connectivity

0 引言

航空自组网(AANET)是移动自组网(mobile Ad hoc network, MANET)在航空领域的拓展与应用。因其具备自组织、自修复的能力和快速、高效组网的优势,故可发挥为空中交通管理提供新的技术手段、为越洋飞行的航班提供有效的通信保障等作用^[1]。目前,美国的 TTNT、欧盟的 NEWSKY^[2]以及国内的空军工程大学^[3]等项目及单位在航空自组网方面均有了一定的研究。

国际民航组织规定,航空飞机通信使用甚高频(VHF)通信系统,由于其传播方式主要是视距传播,因此当飞机飞临大洋、沙漠等无地面站转发的区域时,依靠卫星通信不仅价格昂贵,而且有很大的延迟,不能满足日益增长的航空通信需要;针对航空通信大尺度、临时性、高动态和节点稀疏的特点^[3],只有满足一定的条件,达到较高的连通状态,才能通过 AANET 进行组网通信,所以网络连通性的研究便成为重要的基础性课题之一,特别是随着我国航空事业的发展,对高效、快捷的 AANET 便有了迫切的需要^[4]。

目前,尽管有大量文献研究 AANET 的信道接入、路由协议、

安全认证^[5]等技术,对网络可行性与连通性问题研究较少。可行性与连通性是网络的一个基本而重要的特性,是组网研究的前提,同样也是路由研究的基础。因此,通过网络连通性的研究可以在为安全组网提供判定依据、为路由协议提供路径选择等方面发挥作用。

文献[6]通过建立适当的模型用来分析节点密度与连通性的关系,但通过节点连通度的指标不足以衡量其他节点的连通性能;文献[7]运用实际航班数据对北大西洋空中走廊进行仿真分析,并得到仅适合该区域的连通性分析结果,不具有普遍性;文献[8,9]对首尾飞机连通性的分析是建立在预先知道中间飞机数量等参数的基础上,而没有考虑飞机的动态性和变化性;文献[10]运用群可覆盖面积和群可连通节点数两个连通性指标对飞机编队的连通性进行仿真,但缺乏理论支撑;文献[11]结合中国大陆空域航班分布情况对组网可行性进行了分析,并对整体网络的连通性进行了仿真,但没有给出具体的表达式;文献[12]从分层的角度得到一维航线连通概率的数学表达式,但未考虑双向飞行的特点;文献[13]从理论上推导出单、双航线连通概率的数学表达式,并仿真北太平洋航线上连通概率,但没有考虑反向飞机存储—运载—转发过程中产生的时延对连通性的影响。文献[14]考虑了多普勒效应并给出了二维航空自组网中存

收稿日期: 2013-05-08; 修回日期: 2013-06-13

作者简介: 宋玉龙(1988-),男,黑龙江大庆人,硕士研究生,主要研究方向为无线网络安全(sylwysx@163.com);罗长远(1973-),男,河南信阳人,副教授,博士,主要研究方向为无线通信系统安全、装备工程;张运(1977-),男,江苏南通人,学士,主要研究方向为信息安全;程佳佳(1989-),男,浙江金华人,学士,主要研究方向为网络安全。

在孤立节点的概率数学表达式,然而飞机孤立概率并不能完全准确地描述网络连通性。

针对上述问题,本文根据实际情况结合飞机双向、分层的特点建立适合一维航线单、双向飞行的飞机分布模型推导出包含飞机密度、航线长度、通信半径等参数的一维单向航线连通概率表达式,并通过整体思想利用反向飞机对的信息转发作用得到可以衡量一维双向航线实际连通性的数学表达式。

1 模型建立

1.1 单向航线的飞机分布模型

通常飞机航线的宽度一般为 20 km,而其长度远大于宽度,因此可以将航线等效为一条直线,特别是当同一方向的航线数量较少时,将其称为一维航线。此时的航线呈狭长、单一的特点。在实际中,一维航线常见于国际航班、跨洋航班等,如北京—纽约、上海—悉尼等航线。由于实际航空网络中飞机节点的动态性,网络中节点数量往往不是常量。Ehssan 等人在对实际数据的分析后,得出了飞机节点在航线上的数量分布具有泊松分布特点的结论,因此,本文将采用泊松分布对单向航线的飞机节点空间分布进行模型的建立。假设飞机节点在航线长度为 L 的线段上服从参数为 λ (飞机密度) 的一维泊松分布,如图 1 所示。

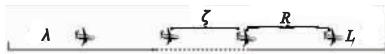


图1 单向航线的飞机分布模型

1.2 双向航线的飞机分布模型

同一航线上的飞机为双向飞行,若令其中一个方向为单向航线,则另一方向为反向航线;若两个方向同时考虑,则该航线为双向航线。在实际中,同一航线会将航线的高度按照飞机飞行的方向划分为奇偶高度层,相邻两层的飞机飞行方向相反。另外,航线上单向与反向飞行的飞机数量均服从泊松分布且相互独立。

现令航线上单向飞行的飞机密度为 λ₁,反向飞行的飞机密度为 λ₂,由于单、双向航线上的飞机数量均服从泊松分布,根据泊松分布的可叠加性,得出一维双向航线的飞机数量服从参数为 λ₁ + λ₂ 泊松分布的结论。

根据以上分析建立的一维双向航线空间分布模型,如图 2 所示。

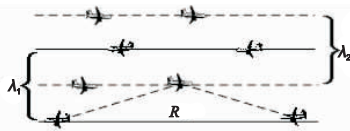


图2 双向航线的飞机分布模型

2 一维航线连通概率

2.1 假设条件

通过上述单、双向航线飞机分布模型的建立,结合现阶段民航飞机通信的实际环境,为方便对一维航线连通概率进行研究与分析,假设条件如下:

- a) 飞机节点的感知半径与传播半径相等,且均称为通信半径。
- b) 假设所有的飞机通信半径均为 R,只要在通信半径范围内的飞机便可直接通信^[13]。

c) 由于飞机的通信半径通常为几百千米,而根据民航相关规定,飞机飞行的高度层间距离为 1 km,前者远大于后者。因此忽略航线上层与层之间的间距,即认为不同层上的飞机均在同一平面上。

2.2 单向航线 L 的连通概率

由单向航线飞机的分布模型可知,在 L 上分布 n 架飞机的概率为

$$P(n) = \frac{(\lambda L)^n}{n!} e^{-\lambda L} \tag{1}$$

因为航线上飞机数量服从泊松分布,所以两架相邻飞机的距离 ζ 服从负指数分布,其累积分布函数为

$$F(\zeta) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda \zeta}, & \zeta \geq 0 \\ 0, & \zeta < 0 \end{cases} \tag{2}$$

由式(2)知,两架相邻飞机的距离小于通信半径 R 时的概率为

$$P(\zeta \leq R) = 1 - e^{-\lambda R} \tag{3}$$

当航线 L 上有 n 个节点时,若保证航线网络的畅通,只需要相邻的飞机间距离小于通信半径 R,并且一直延续到整个航线的长度即可,所以当航线 L 有 n 个节点并保持网络连通的概率为

$$P(L|n) = \begin{cases} \prod_{i=2}^n P(\zeta \leq R) & n \geq 2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{4}$$

由于航空自组网的连通是指飞机之间的连通,因此若航线保持网络连通,则其内的飞机数量至少为 2 架,结合泊松分布的假设可求得段内网络连通概率为

$$P(L) = P(n \geq 2) \sum_{n=0}^{\infty} (P(L|n) \cdot P(n)) \tag{5}$$

根据式(1)(4)(5)及泰勒公式: $e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$,可以得到单向航线的连通概率为

$$P(\lambda, R, L) = (1 - P(n < 2)) \sum_{n=0}^{\infty} (P(L|n) \cdot P(n)) = (1 - e^{-\lambda L} - \lambda L e^{-\lambda L}) \cdot \frac{e^{-\lambda L}}{1 - e^{-\lambda R}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{[\lambda L(1 - e^{-\lambda R})]^n}{n!} = \frac{(1 - e^{-\lambda L} - \lambda L e^{-\lambda L}) e^{-\lambda L e^{-\lambda R}}}{1 - e^{-\lambda R}} \tag{6}$$

2.3 双向航线 L 的连通概率

受航线上飞机密度 λ 及航线长度 L 的影响,单向航线上相邻两架飞机可能会存在无法连通的情况,则该航线便会出现许多通信盲区,甚至会被分割为多个子网,进而难以达到全连通状态。而由飞机航线的分层特点可知,若利用航线上反向飞行的飞机进行信息转发即可提高航线的整体连通性。

如果运用局部思想对反向飞机进行具体分析,不仅需要考虑反向飞机的飞行速度、飞行高度等因素,而且需要寻找单、反向飞机在同一时刻的相对距离等位置关系,以便确定是否可以通过反向飞机的中转完成信息的传递。另外,无论是对实际场景的构建还是对各影响因素的分析,都不可避免地引入一些不确定性因子,从而增加了理论推导的难度,而且据此所推导出的连通概率表达式的准确性必然会受到影响。但根据假设条件,结合同一航线单、反向飞机的分布规律,只需要从整体角度考虑双向飞机数量的服从参数为 λ₁ + λ₂ 的泊松分布的特点,在双向航线飞机分布模型的基础上,运用单向航线的连通概率表达式便可得到双向航线 L 的连通概率。

通过上述分析及式(6)可知,一维双向航线 L 的联通概率

$P'(\lambda_1, \lambda_2, R, L)$ 为

$$P'(\lambda_1, \lambda_2, R, L) = \frac{(1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)L} - (\lambda_1 + \lambda_2)Le^{-(\lambda_1 + \lambda_2)L})e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)L} \cdot e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)R}}{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)R}} \quad (7)$$

定理 任意一维航线,如果飞机通信半径 R 、航线长度 L 相同,则双向航线的连通概率大于单向航线的连通概率。

证明 设单、双向航线的飞机密度分别为 λ_a, λ_b , 连通概率分别为 $P(\lambda_a), P(\lambda_b)$ 。由于双向航线相对于单向航线考虑了反向飞机对信息的转发作用,因此飞机密度 $\lambda_b > \lambda_a$ 。在验证飞机密度 λ 对连通性的影响时,令 R, L 为大于 0 的定值后并对连通概率 $P(\lambda, R, L)$ 进行求导,得到导函数 $f(\lambda) > 0$, 即 $P(\lambda_b) > P(\lambda_a)$, 定理得证。

另外,可以从通信半径的角度对定理进行证明。由于反向飞机的存在,使双向航线上的飞机可以与距离更远的飞机通信,即相对于单向航线增加了飞机的通信半径。因此,令 λ, L 为大于 0 的定值并对连通概率 $P(\lambda, R, L)$ 进行求导,得到导函数 $g(R) > 0$, 故 $P(\lambda_b) > P(\lambda_a)$, 定理得证。

3 仿真结果

3.1 仿真环境

通过对航班数据的统计分析发现,航线上的飞机密度 λ 通常在 $[0, 5 \times 10^{-2}]$ 架/km 之间;由于受地球曲率、信道衰落及传播损耗的影响,航线上的飞机通信半径 R 通常在 $[160 \text{ km}, 500 \text{ km}]$ 之间;航线是指飞机飞行的路线,其长度从几百千米的支线航线到上万千米的国际航线不等,在国内,航线长度 L 通常在 $[500 \text{ km}, 4000 \text{ km}]$ 之间。

因此,可设仿真环境为:飞机的飞行区域面积为 $400 \text{ km} \times 6000 \text{ km}$ 的矩形区域,航线长度在 $[1000 \text{ km}, 6000 \text{ km}]$ 之间;飞机节点的通信半径取值为 $200 \text{ km}, 400 \text{ km}$;飞机密度的范围在 5×10^{-3} 架/km 到 5×10^{-2} 架/km 之间。

实验首先设定长度为 L 的航线和通信半径为 R 的飞机,然后在 MATLAB 2009 平台上构建飞机密度为 λ 的泊松分布模型,结合航线方向及适当的飞行速度模拟飞机的飞行场景,其中,飞机的速度由航线长度和飞行时间确定,并根据速度生成飞机位置坐标,最后计算飞机间距离与半径的大小关系,进而求出航线上飞机的连通概率。

3.2 结果与分析

由于某一航线的连通率受飞机的密度 λ 、飞机通信半径 R 、航线长度 L 的影响,因此,需要采用控制变量法进行数据统计及数值分析,最终得到实验结果。具体理论及实验结果如图 3、4 所示。

根据图 3 和 4 可以得到理论与实验结果基本吻合的结论,从而验证了一维航线连通概率理论的正确性。另外,通过对曲线图的分析可知连通概率随通信半径和飞机密度的增加而增加,当飞机通信半径为 400 km 时,只需要飞机密度为 1.5×10^{-2} 架/km 时,连通概率便可达到 90% 以上;当飞机密度达到 3×10^{-2} 架/km 时,即使航线长度为 4000 km ,连通概率也可保持在 80% 以上,但当航线长度大于 6000 km 时,连通概率会较低。因此,可得到以下结论:当飞机通过加大发射功率提高通信半径或增加航班数量时,网络能保持较高的连通性,但航线长度很大

时,即使增加航班数量和通信半径,其连通率也较低甚至会出现很多通信盲区,此时应该采用卫星转发、增加地面基站等其他手段进行通信保障。

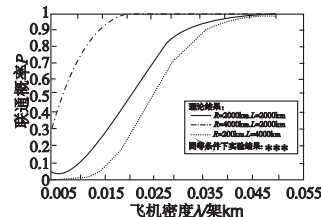


图3 $p-\lambda$ 曲线图

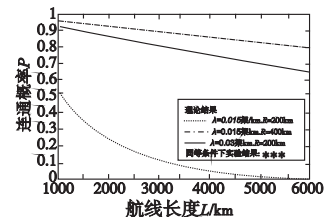


图4 $P-L$ 曲线图

4 实例分析

为判断我国在一维航线上航空自组网是否具有现实可行性,本文将根据部分实际航线的航班信息,运用一维连通性数学表达式对单、双向航线的连通性进行仿真分析。

按照 2013 年北京与三亚之间南北方向部分航线的航班信息,根据全天时间内所有航班起飞和降落的时间、地点及其飞行路线,用 MATLAB 仿真其飞行过程,对其中部分航线上的飞机数量进行统计计算,其仿真结果如图 5 所示。由图 5 知,南北航线的飞机数量均呈波动形态,全天中飞机数量可以存在几个高峰段。另外,根据南北航线可以推断出双向航线 0:00 ~ 8:00 之间几乎没有航班,而在 20:00 ~ 22:00 之间航班数量出现峰值。由于 3.2 节的实验证明了一维连通性理论的正确性,因此可以利用所得到的一维航线连通性理论对北京与三亚之间南北方向的部分实际航线进行仿真分析,其仿真结果如图 6 ~ 8 所示。

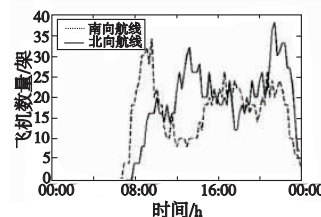


图5 全天时间飞机数量的变化

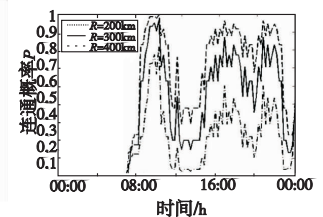


图6 南向航线连通概率

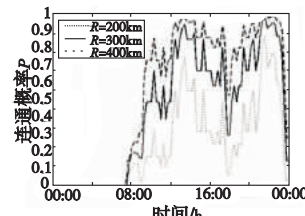


图7 北向航线连通概率

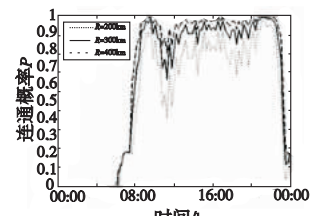


图8 双向航线连通概率

仿真结果表明,单向航线的连通概率与该时刻的航班数量有密切关系,且连通概率曲线与航班数量曲线基本保持一致,如图 5 中南向航线在 10:00 ~ 14:00 之间的飞机数量较少,图 6 则表现出在对应的时间内连通概率较低;根据图 8 知,在同等条件下,由于双向航线可以利用反向飞机进行信息的中转,所以双向航线的连通率要大于单向航线的连通率,特别是当 $R \geq 300 \text{ km}$ 时,全天 24 h 中,北京与三亚之间在 8:00 ~ 22:00 之间有 14 h 的连通概率保持在 90% 以上,甚至部分时间段连通概率达到 100%。因此,可得到以下结论:双向航线对于提高网络的连通概率有很大作用,所以可以通过合理安排不同方向的航班起降时间以保证同一时间内航线上的飞机密度处于较大值。另外,从连通性角度证明了在一维航线的 (下转第 531 页)

- [3] SHAFER I, REN Kai, BODDETI V N, *et al.* Rainmon: an integrated approach to mining bursty timeseries monitoring data[C]//Proc of the 18th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2012;1158-1166.
- [4] TAL L, MUNTEAN G. User-oriented cluster-based solution for multimedia content delivery over VANETs [C]//Proc of IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. 2012;1-5.
- [5] LU Zheng, YANG Xiao-kang, LIN Wei-yao, *et al.* Inferring user image-search goals by mining query logs with semi-supervised spectral clustering[C]//Proc of IEEE Visual Communications and Image Processing. 2012;1-6.
- [6] ZHENG Kai, XIONG Hai-ling, CUI Yu-jie, *et al.* User clustering-based Web service discovery[C] //Proc of the 6th International Conference on Internet Computing for Science and Engineering. 2012; 276- 279.
- [7] WU Liang, CHIN A, ZHOU Yuan-chun, *et al.* Context-aware prediction of user's first click[C]//Proc of the 1st International Workshop on Context Discovery and Data Mining. 2012;7.
- [8] SPIEGEL S, GAEBLER J, LOMMATZSCH A, *et al.* Pattern recognition and classification for multivariate time series[C]//Proc of the 5th International Workshop on Knowledge Discovery from Sensor Data. 2011;34-42.
- [9] BO Han, HAO Xing-wei, LIU Chao-feng. The design and implementation of user behavior mining in E-learning system [C]//Proc of International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence. 2012;2078-2081.
- [10] CASTIGLIONE A, CATTANEO G, MAIO G D, *et al.* SEC3T: secure end-to-end communication over 3G telecommunication networks [C]//Proc of the 5th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing. 2011;520-526.
- [11] CHENEAU T, SAMBRA A V, LAURENT M. A trustful authentication and key exchange scheme (TAKES) for Ad hoc networks[C]//Proc of the 5th International Conference on Network and System Security. 2011;249-253.
- [12] ZHANG Wu-jun, ZHANG Yue-yu, CHEN Jie, *et al.* End-to-end security scheme for machine type communication based on generic authentication architecture[C]//Proc of the 4th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems. 2012;353-359.
- [13] 蒋艳凤, 赵强利. 机器学习方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009;249-251.
- [14] <http://www.ll.mit.edu/mission/communications/cyber/CSTcorpora/ideval/docs/index.html>[EB/OL].
- [15] LI Jiang-ping, YANG S X, GREGORI S. Combining top-down and Ncut methods for figure-ground segmentation [C]//Proc of International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis. 2008;216-219.
- [16] ALPERT S, GALUN M, BRANDT A, *et al.* Image segmentation by probabilistic bottom-up aggregation and cue integration [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34 (2);315-327 .
- [17] BIRDWELL J D, DJOUADI M S, PAN Yong-sheng. Efficient bottom-up image segmentation using region competition and the Mumford-Shah model for color and textured images[C]//Proc of the 8th IEEE International Symposium on Multimedia. 2006;376-390.
- [18] GATTAL A, CHIBANI Y. Segmentation and recognition strategy of handwritten connected digits based on the oriented sliding window [C]//Proc of International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition. 2012; 297-301.
- [19] 朱华. 分形理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [20] 郭帅, 马书根, 李斌, 等. VorSLAM 算法中基于多规则的数据关联方法[J]. 自动化学报, 2012, 38(1):1-12.

(上接第 517 页)条件下航空自组网具有一定的组网可行性。

5 结束语

本文结合一维航线的高度分层、双向飞行等实际情况,建立适当的飞机分布模型,并考虑反向飞机对信息转发的作用,推导出—维航线连通概率表达式。通过实验模拟航线上飞机速度、分布等环境,证明了本文连通概率表达式的正确性,并对北京与三亚之间部分实际航线飞行场景下的连通性进行了仿真分析。仿真结果表明:组建航空自组网在一维航线双向通信情况下是客观可行的。本文对航空自组网的研究和应用具有一定的参考价值,下一步主要研究飞机的多维航线及不固定航线的连通性以及将其应用在路由协议等技术上。

参考文献:

- [1] TU H D, SHIMAMOTO S. A proposal of relaying data in aeronautical communication for oceanic flight routes employing mobile Ad-hoc network[C]//Proc of the 1st Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems. 2009;436-441.
- [2] SCHNELL M, NEWSKY S S . A concept for networking the sky for civil aeronautical communications [J]. *Space Communications*, 2008, 21(3/4):157-166.
- [3] 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.
- [4] 党亚茹, 丁飞雅, 高峰. 我国航班流网络捣毁性实证分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(6):177-185.
- [5] 黄后彪, 罗长远, 宋玉龙. 航空自组网漫游接入认证方案[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(2):500-502.
- [6] BETTSTETTER C. On the minimum node degree and connectivity of a wireless multihop network [C]//Proc of the 3rd ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking & Computing. New York: ACM Press, 2002;80-91.
- [7] MEDINA D, HOFFMANN F, AYAZ S, *et al.* Feasibility of an aeronautical mobile Ad hoc network over the North Atlantic Corridor [C]//Proc of the 5th Annual IEEE Communication Society Conference on Sensor. San Francisco: IEEE Press, 2008;109-116.
- [8] DESAI M, MANJUNATH D. On the connectivity in finite Ad hoc networks [J]. *Communications Letters, IEEE*, 2006, 6 (10): 437-439.
- [9] GHASEMI A, NADER-ESFAHANI S. Exact probability of connectivity one-dimensional Ad hoc wireless networks [J]. *Communications Letters, IEEE*, 2006, 10(4): 251-253.
- [10] CHENG M X, ZHAO Y Y. Connectivity of Ad hoc networks for advanced air traffic management [J]. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 2004, 1(5):225-238.
- [11] 郑博, 黄国策, 张衡阳, 等. 甚高频航空自组网的组网概率及连通性研究[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(8):24-29.
- [12] YAN Jian-shu, SONG Ge, LI Hua, *et al.* Critical transmission range for connectivity in aeronautical Ad hoc networks [C]//Proc of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2012;4446-4451.
- [13] 郑博, 张衡阳, 孙鹏, 等. 航空自组网单、双向航路连通性研究 [J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(4):624-629.
- [14] LI Hua, YANG Bo, CHEN Cai-lian, *et al.* Connectivity of aeronautical Ad hoc networks[C]//Proc of IEEE GLOBECOM Workshops Aerial Vehicles. 2010;1788-1792.