

# 航空通信导航监视与空管新技术

——第九届中国航空学会通信导航监视及空管学术会议暨  
航电与空管分会2018年学术年会（CCATM2018）论文集

主 编 潘卫军 邹 伟

组编单位 中国航空学会航空电子与空中交通管理分会  
中国民用航空飞行学院  
国家海上空管关键技术重点实验室  
九洲空管科技有限责任公司



-----  
图书在版编目 ( C I P ) 数据

航空通信导航监视与空管新技术：第九届中国航空  
学会通信导航监视及空管学术会议暨航电与空管分会 2018  
年学术年会 ( CCATM2018 ) 论文集 / 潘卫军, 邹伟主编  
· 一成都: 西南交通大学出版社, 2019.3  
ISBN 978-7-5643-6729-9

I. ①航… II. ①潘… ②邹… III. ①航空通信—中  
国—学术会议—文集②空中交通管制—中国—学术会议—  
文集 IV. ①V243.1-53②V355.1-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 ( 2019 ) 第 018048 号  
-----

HANGKONG TONGXIN DAOHANG JIANSHI YU KONGGUAN XINJISHU

**航空通信导航监视与空管新技术**

——第九届中国航空学会通信导航监视及空管学术会议暨  
航电与空管分会 2018 年学术年会 ( CCATM2018 ) 论文集

主编 潘卫军 邹 伟

责任编辑 李华宇  
封面设计 何东琳设计工作室

出版发行 西南交通大学出版社  
( 四川省成都市二环路北一段 111 号  
西南交通大学创新大厦 21 楼 )

邮政编码 610031  
发行部电话 028-87600564 028-87600533  
网址 <http://www.xnjdcbs.com>  
印刷 四川煤田地质制图印刷厂

成品尺寸 210 mm × 285 mm  
印张 14.5  
字数 368 千  
版次 2019 年 3 月第 1 版  
印次 2019 年 3 月第 1 次  
定价 98.00 元  
书号 ISBN 978-7-5643-6729-9

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

## 编委会

主 编：潘卫军 邹 伟

副主编：程 擎 徐 楨 李海轮 周 漩 李诚龙

编 委：张晋武 江 波 仇争平 张丕旭

孙保明 王彦成 郑 超

中国航空学会航空电子与空中交通管理分会主任委员

李海轮

2018年10月



# 目 录 || CONTENTS

## 第一篇 航电与通信导航监视技术

|                          |                                   |    |
|--------------------------|-----------------------------------|----|
| 基于多条航线的民用航空自组网通信技术研究     | 刘康宇, 徐 楨, 徐 钊                     | 3  |
| 基于 IMM 的航迹一致性监测方法        | 王卓佳, 蔡开泉, 冯道中                     | 12 |
| 一种大批量运动目标尾迹在数字地球中的实时绘制方法 | 谈 心, 杨 光, 谈俊忠, 李坪泽                | 14 |
| ADS-B 导航数据源可用性分析         | 王秋拾, 张光明, 黄天宇                     | 22 |
| 无线电导航设备的电磁干扰分析           | 何松儒, 周 超, 张美红                     | 29 |
| 通航飞机飞行状态监视平台研究与设计        | 王尔申, 翟秋刚, 徐 嵩, 曲萍萍, 庞 涛, 王传云, 黄煜峰 | 34 |
| ADS-B 系统抗干扰技术综述          | 刘 飞, 林 琳, 徐文江, 侯宇杰                | 40 |
| 基于雷达图的管制系统运行中危险源识别       | 李佳威, 吴明功, 赵顾灏, 叶泽龙                | 47 |
| 一种基于北斗的无人机数据通信系统架构       | 翟珊瑚, 刘宏波, 刘 程, 陈 斌                | 56 |
| 基于全球空间网络的空域空间冲突检测机制研究    | 万路军, 戴江斌, 刘世豪, 沈 堤                | 64 |
| ADS-B 技术及其在空管中的应用研究      | 孙保明, 邹 伟                          | 71 |

## 第二篇 空中交通管理新技术

|                         |                         |     |
|-------------------------|-------------------------|-----|
| 大规模航迹规划的关键航迹识别方法        | 李 悦, 蔡开泉, 闫 素           | 79  |
| 大型机场机坪内航空器活动冲突预测与避免     | 朱新平, 罗晓艳, 徐海瑶           | 81  |
| 基于离散粒子群算法的航路修复研究        | 叶泽龙, 吴明功, 温祥西, 嵇慧明, 游航航 | 88  |
| 网络分解方法对比及其在航路网络鲁棒分析中的应用 | 冯道中                     | 95  |
| 管制员语音疲劳识别学习方法体系探究       | 李兆悦, 王洁宁                | 97  |
| 飞机尾涡的模式识别方法研究           | 张庆宇, 潘卫军, 张 强, 李直霖, 吴 晗 | 103 |
| 基于复杂网络的空中冲突探测与解脱研究      | 董 兵, 唐家文                | 109 |
| 快实时仿真在无滑行道机场容量分析中的应用    | 周云帆, 彭笑非, 李诚龙, 江 波      | 114 |

## 第三篇 军民航运行与安全

|                        |                    |     |
|------------------------|--------------------|-----|
| 基于 TSE 航迹误差的训练飞行侧向碰撞评估 | 徐开俊, 杨 泳, 吴佳益      | 123 |
| 基于运行数据的塔台管制员疲劳评估方法     | 张建平, 陈义友, 丁鹏欣, 陈振玲 | 133 |

|                                 |                        |     |
|---------------------------------|------------------------|-----|
| 美国海军航空管制人员资格管理及启示 .....         | 张丕旭, 邹伟, 李曙光           | 139 |
| 公海军事训练飞行航空管制组织实施若干问题研究<br>..... | 周璇, 王宏伟, 邹伟, 张晋武, 王建   | 144 |
| 通用航空事故调查辅助分析工具设计与研究 .....       | 杨昌其, 朱志童, 王博, 陈连亮      | 150 |
| 军民航管制指挥平战转换问题探析 .....           | 余付平, 沈堤, 戴江斌, 万路军      | 155 |
| 训练空域管理安全性的灰色综合评价研究<br>.....     | 甘旭升, 李双峰, 孙静娟, 李胜厚, 葛瑞 | 159 |
| 通用机场的目视飞行程序设计研究 .....           | 傅庆庆, 肖艳平, 潘建           | 168 |

## 第四篇 低空飞行服务保障与无人机空管技术

|                                     |                    |     |
|-------------------------------------|--------------------|-----|
| 基于 STPA 无人机在混合空域运行的安全分析研究 .....     | 李保桑, 王浩宁           | 175 |
| 基于萨斯塔莫宁-陆地电离层模型的 BD 低空精度分析<br>..... | 杨光, 程擎, 李建锋, 代言君   | 181 |
| 低空小飞行物视频追踪与识别关键技术研究 .....           | 赵士瑄, 刘为谦, 程志, 隋运峰  | 189 |
| 无人机感知与避让安全距离研究 .....                | 卢咏, 李亚娟, 王琦        | 191 |
| 低慢小航空器对军民航飞行安全的影响 .....             | 王泽坤, 吴明功, 温祥西      | 198 |
| 对我国低空空域安全管控的思考 .....                | 高阳阳, 余敏建, 嵇慧明, 游航航 | 204 |
| 对推进低空空域管理改革的几点思考 .....              | 沈堤, 张永顺, 余付平, 王艺菲  | 210 |
| 垂直视场的低空空域探测雷达及网络构想 .....            | 赵顾颖, 吴亚荣, 毛亿, 吴明功  | 215 |

## 附录 空中交通管制系统

|                    |               |     |
|--------------------|---------------|-----|
| 176 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 176 |
| 177 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 177 |
| 178 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 178 |
| 179 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 179 |
| 180 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 180 |
| 181 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 181 |
| 182 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 182 |
| 183 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 183 |
| 184 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 184 |
| 185 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 185 |
| 186 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 186 |
| 187 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 187 |
| 188 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 188 |
| 189 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 189 |
| 190 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 190 |
| 191 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 191 |
| 192 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 192 |
| 193 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 193 |
| 194 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 194 |
| 195 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 195 |
| 196 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 196 |
| 197 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 197 |
| 198 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 198 |
| 199 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 199 |
| 200 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 200 |
| 201 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 201 |
| 202 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 202 |
| 203 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 203 |
| 204 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 204 |
| 205 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 205 |
| 206 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 206 |
| 207 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 207 |
| 208 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 208 |
| 209 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 209 |
| 210 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 210 |
| 211 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 211 |
| 212 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 212 |
| 213 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 213 |
| 214 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 214 |
| 215 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 215 |

## 附录 空中交通管制系统

|                    |               |     |
|--------------------|---------------|-----|
| 216 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 216 |
| 217 空中交通管制系统 ..... | 张永顺, 余付平, 王艺菲 | 217 |

# CONTENTS

## Part 1 Avionics and Communication, Navigation & Surveillance(CNS)

|  |  |    |
|--|--|----|
| Research on Communication Technology of Civil Aviation Ad Hoc Network Based on Multiple Routes ..... | LIU Kangyu, XU Zhen, XU Zhao   | 3  |
| An Interacting Multiple Model based Aircraft Trajectory Conformance Prediction Method .....          | WANG Zhuojia, CAI Kaiquan, FENG Daozhong   | 12 |
| A Real-time Method about Rendering Massive Traces of Moving Objects in Digital Earth .....           | TAN Xin, YANG Guang, TAN Junzhong, LI Pingze   | 14 |
| ADS-B Navigation Data Source Availability Analysis .....   | WANG Qiushi, ZHANG Guangming, HUANG Tianyu   | 22 |
| Analysis of Electro Magnetic Interference of Aeronautical Radio Navigation Station .....             | HE Songru, ZHOU Chao, ZHANG Meihong  | 29 |
| Research and Design on General Aircraft Flight Status Surveillance Platform .....                    | WANG Ershen, ZHAI Qiugang, XU Song, QU Pingping, PANG Tao, WANG Chuanyun, HUANG Yufeng | 34 |
| The Summary of Anti-interference Technology of ADS-B System .....                                    | LIU Fei, LIN Lin, XU Wenjiang, HOU Yujie   | 40 |
| Identification of Hazard Sources in Operation of Control System Based on Radar Map .....             | LI Jiawei, WU Minggong, ZHAO Guhao, YE Zelong  | 47 |
| A Beidou-based UAV Data Communication System Architecture .....                                      | QU Shanhu, LIU Hongbo, LIU Cheng, CHEN Bin   | 56 |
| Research on Airspace Space Conflict Detection Mechanism Based on Global Spatial Grid .....           | WAN Lujun, DAI Jiangbin, LIU Shihao, SHEN Di   | 64 |
| Research on ADS-B Technology and Its Application in Air Traffic Control .....                        | SUN Baoming, ZOU Wei   | 71 |

## Part 2 New Technology for Air Traffic Management

|  |                                     |    |
|--|-------------------------------------|----|
| Critical Flight Trajectory Identification via Machine Learning for Large-scale Trajectory Management ..... | LI Yue, CAI Kaiquan, YAN Su         | 79 |
| Apron Conflict Prediction and Avoidance for Aircraft in Large Airport .....                                | ZHU Xinping, LUO Xiaoyan, XU Haiyao | 81 |

|  |     |
|--|-----|
| Study on Airline Network Repair Based on Discrete Particle Swarm Optimization  | 88  |
| ..... YE Zelong, WU Minggong, WEN Xiangxi, JI Huiming, YOU Hanghang  |     |
| A Comparative Analysis of Approaches to Network-dismantling and Application in Air Route Network Robustness Analysis | 95  |
| ..... FENG Daozhong  |     |
| Research on ATC's Speech Fatigue Recognition System with Machine Learning Method                                     | 97  |
| ..... LI Zhaoyue, WANG Jiening   |     |
| Research on Pattern Recognition Method of Aircraft Wake Vortex   | 103 |
| ..... ZHANG Qingyu, PAN Weijun, ZHANG Qiang, LI Zhilin, WU Han   |     |
| Research on Aircraft Conflict Detection and Resolution Based on Complex Network Theory                               | 109 |
| ..... DONG Bing, TANG Jiawen   |     |
| Application of Fast Real-time Simulation in Capacity Evaluation of Non-taxiway Airport                               | 114 |
| ..... ZHOU Yunfan, PENG Xiaofei, LI Chenglong, JIANG Bo  |     |

### Part 3 Military and Civil Flight Operations and Safety

|  |     |
|--|-----|
| Training Flight Lateral Collision Assessment under TSE Track Error   | 123 |
| ..... XU Kaijun, YANG Yong, WU Jiayi   |     |
| A Fatigue Evaluation Method for Tower Controllers Based on Operational Data  | 133 |
| ..... ZHANG Jianping, CHEN Yiyou, DING Pengxin, CHEN Zhenling  |     |
| Administration of Air Traffic Control Qualification for United States Navy and the Enlightenment                     | 139 |
| ..... ZHANG Pixu, ZOU Wei, LI Shuguang   |     |
| Research on the Organization and Implementation of Air Traffic Control for Military Training on international waters | 144 |
| ..... ZHOU Xuan, WANG Hongwei, ZOU Wei, ZHANG Jinwu, WANG Jian   |     |
| Assistance Analysis System for General Aviation Accident Investigation   | 150 |
| ..... YANG Changqi, ZHU Zhitong, WANG Bo, CHEN Lianliang   |     |
| Research on the Problem of Peacetime-wartime Conversion of Military Civil Aviation                                   | 155 |
| ..... YU Fuping, SHEN Di, DAI Jiangbin, WAN Lujun  |     |
| Research on Grey Comprehensive Evaluation of Training Airspace Management Safety                                     | 159 |
| ..... GAN Xusheng, LI Shuangfeng, SUN Jingjuan, LI Shenghou, GE Rui  |     |
| Research on Visual Flight Procedure Design of General Airport  | 168 |
| ..... FU Qingqing, XIAO Yanping, PAN Jian  |     |

### Part 4 Lower Airspace Flight Service and Air Traffic Management Technology of Unmanned Aircraft Vehicles

|  |     |
|--|-----|
| Safety Analysis of UAV in Mixed Airspace Operation Based on STPA                     | 175 |
| ..... LI Baoshen, WANG Jiening   |     |
| Analysis of BD Low-altitude Accuracy Based on the Saastamoinen-Land Ionosphere Model |     |

|   |  |     |
|---|--|-----|
| .....   | CHENG Qing, LI Jianfeng, DAI Yanjun, YANG Guang    | 181 |
| Tracking and Recognizing Low-Altitude Small Flying Object                           |  |     |
| .....   | ZHAO Shixuan, LIU Weiqian, CHENG Zhi, SUI Yunfeng  | 189 |
| Research on Well Clear for UAS Sense-And-Avoid Operations                           |  |     |
| .....   | LU Yong, LI Yajuan, WANG Qi                        | 191 |
| The Influence of Low and Slow Aircraft on Military and Civil aviation Flight Safety |  |     |
| .....   | WANG Zekun, WU Minggong, WEN Xiangxi               | 198 |
| Thoughts on Safety Control of Low Altitude Airspace in China                        |  |     |
| .....   | GAO Yangyang, YU Minjian, JI Huiming, YOU Hanghang | 204 |
| Research on the Problem of Promoting Low-altitude Airspace Management Reform        |  |     |
| .....   | SHEN Di, ZHANG Yongshun, YU Fuping, WANG Yingfei   | 210 |
| Vertical Field of View Low Altitude Airspace Detection Radar and Network Conception |  |     |
| .....   | ZHAO Guhao, WU Yarong, MAO Yi, WU Minggong         | 215 |

第一篇

航电与通信导航监视技术

---

# 基于多条航线的民用航空自组网通信技术研究

刘康宇, 徐 振, 徐 卓

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要: 民用飞机航线密集, 且分布广泛, 由于没有地面站等基础设施, 需要依靠卫星通信。然而一些小型民用飞机不具备卫星通信功能, 那么这类小型民用飞机将面临失联故障。为此, 提出一种基于多条航线的民用航空自组网通信系统, 该系统通过多条航线, 实现飞机之间的通信, 从而提高民用航空的通信能力, 降低失联故障率。

## 第一篇

## 航电与通信导航监视技术

中图分类号: TN915.9 文献标识码: A

### Research on Communication Technology of Civil Aviation Ad Hoc Network Based on Multiple Routes

LIU Kangyu, XU Zhen, XU Zhao

(College of Electronic Information Engineering, Beihang University, 100191)

Abstract: When civil aircraft fly over remote areas such as mountains and lakes, satellite

基金项目: 国家自然科学基金项目 (81571200)

作者简介: 刘康宇 (1993-)

liukangyu@buaa.edu.cn

徐振 (1993-), 女 (汉), 北京人, 硕士研究生。

徐卓 (1983-), 男 (汉), 湖南邵阳人, 博士研究生, 研究方向为航空通信与导航监视技术。

收稿日期: 2016-01-15



## 基于多条航线的民用航空自组网通信技术研究

刘康宇, 徐 桢, 徐 钊

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘 要:** 民用飞机飞越荒漠、戈壁等偏远地区时, 由于没有地面站等基础设施, 需要借助卫星通信。然而一些小型民航飞机不具有卫星通信功能, 那么这些小型民航飞机将处于失联状态。针对这一问题, 提出一种解决方法, 建立局域的航空自组网, 不具有卫星通信功能的小型民用飞机将通过航空自组网寻求周围具有卫星通信功能的大型民航飞机, 借助其中继转发完成卫星通信业务。根据我国西部地区部分实际航线进行场景仿真, 表明该方法可以较好地完成小型民用飞机的通信业务, 使其与外界取得通信联系。

**关键词:** 航空自组网; 通信; 小型民用飞机

**中图法分类号:** TN915.9 **文献标识码:** A

## Research on Communication Technology of Civil Aviation Ad Hoc Network Based on Multiple Routes

LIU Kangyu, XU Zhen, XU Zhao

(College of Electronic Information Engineering, Beihang University, 100191)

**Abstract:** When civil aircraft fly over remote areas such as deserts and Gobi, satellite

**基金项目:** 国家重点研究计划“2016YFB1200100”。

**作者简介:** 刘康宇, (1991—), 男(汉), 河南周口人, 在校学生, 硕士研究生, 主要研究领域为航空自组网、无线通信及网络协议, E-mail: kangyuliu@buaa.edu.cn。

徐桢, (1975—), 女(汉), 北京人, 副教授, 博士, 主要研究领域为航空自组网、无线通信及网络协议。

徐钊, (1995—), 男(汉), 黑龙江哈尔滨人, 在校学生, 硕士研究生, 主要研究领域为航空自组网、无线通信及网络协议。

communications are required because there are no infrastructure such as ground stations. However, some small civil aircraft do not have satellite communication functions, then these small civil aircraft will be in a state of loss of connection. In response to this problem, a solution is proposed to establish a local aviation ad hoc network. Those small civil aircraft without satellite communication function will seek large-scale civil aviation aircraft with satellite communication functions through the aviation ad hoc network, and complete satellite communication services by means of its relay forwarding. The scenario simulation based on some actual routes in western China shows that this method can better complete the communication service of small civil aircraft and make communication with the outside world.

**Key words:** aviation ad hoc network; communication; small civil aircraft

## 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。它具有自组织、自修复的能力和快速、高效组网的优点,所以可以为空中交通管理提供新的技术手段,同时可以为越洋飞行、越沙漠飞行以及偏远支路的航班提供有效的通信保障等作用<sup>[1]</sup>。因此,目前国内外一些研究机构在航空自组网方面均有一定的研究。

随着我国经济的发展,民航运输业也获得了飞速发展,不仅民航客机数量大幅度增加,同时开通了大量的新航线。根据国际民航组织规定,航空飞机通信使用甚高频(VHF)通信系统,由于它的传播方式主要是视距传播,因此当飞机飞越大洋、沙漠等无地面站转发的区域时,需要依靠卫星通信进行转发<sup>[2]</sup>。然而,很多民航支线小型客机并未安装相关卫星通信设备,不具备卫星通信功能,无法独立完成卫星通信业务。针对这一问题,航空自组网可以为我们提供解决思路。航空自组网是由一定空域内飞行的飞机通过甚高频频段连接建立,在该网络中,飞机可以通过单跳或多跳相互通信。于是,不具备卫星通信功能的小型飞机可以通过航空自组网寻求周围具有卫星通信功能的飞机,借助其进行中继转发,从而间接完成卫星通信业务,实现与外界的联系。

本文将主要研究多条航线上的飞机建立局域自组网,使得不具有卫星通信功能的飞机借助周围局域网中具有卫星通信功能的飞机中继转发,进而完成通信业务。同时,针对基础设施薄弱的西北偏远地区多条航线上的飞机进行仿真分析。

## 1 航空自组网概述

### 1.1 基本概念

航空自组网(AANET)也称为空中自组网,主要由大量飞机、地基站和卫星等组成。该网络中存在多种类型链路,例如,飞机与飞机之间的空-空链路、飞机与卫星之间的空-天链路以及飞机与地基站之间的空-地链路等。它是移动组织网(MANET)在航空领域的扩展应用<sup>[3]</sup>。处于航空组网的各节点之间可以以单跳或多跳的方式进行通信。

### 1.2 体系结构

航空自组网由多种不同具有不同需求和通信能力的节点组成,包括飞机、地面站和卫星。飞机是网络的基本组成单元,同时也是网络服务的主体对象<sup>[4]</sup>。飞机之间组成空对空(A2A)的空基网,利用该网络,飞机之间可以通过单跳或多跳直接进行通信。地面站包括地面空管通信站点、地面空管控

制站点和各种中继站等。地面站可以直接与其覆盖空域内的飞机进行通信,是地面网络和空中飞机信息交换的纽带。但是,地基站的建设需要大量的资金,并且地基站的建设受地理因素限制,如地基站不方便在偏远山区、沙漠、海洋等区域建立<sup>[5]</sup>。卫星主要用于为航空通信提供定位、气象感知、小数据量通信等辅助服务,然而,卫星通信价格昂贵、带宽受限,通信时延大,不适合在航空通信中大量使用。

根据网络架构的不同,航空自组网主要分为三类<sup>[6]</sup>:第一类,有地面站支持的航空网络,为了保证飞机的通信,该网络中的每一架飞机至少要被一个地面站覆盖;第二类,纯航空自组网,该网络中只存在飞机节点,飞机之间通过单跳或多跳转发的方式进行通信;第三类,混合航空网络,该网络综合前两种技术,并且可以用卫星通信作为辅助通信。

### 1.3 网络特点

航空自组网由移动自组网(MANET)演变而来,它不仅具有移动自组网的特点——自组织、无中心、多跳路由等,而且由于复杂多变的空域环境,还具有独特的网络特点。

(1) 网络尺度大,节点分布不均匀。

用于民航通信的航空自组网是一个全球一体化的网络系统。飞机节点运行在广阔的三维空域内,飞机之间单跳通信半径可以达到数百海里,所以航空组网具有潜在的大规模性。实际应用中,航空组网往往能够覆盖几十到几千平方公里的巨大空域。在规模和尺度上,航空组网要比一般移动自组网大得多<sup>[7]</sup>。由于飞机沿既定航线飞行,航线在不同区域的疏密程度决定了飞机节点的密度,例如,我国东部沿海经济发达地区航班数量较多,而西部偏远地区航班数量较少,因此飞机节点分布不均匀。

(2) 节点运动速度快、网络拓扑高动态变化。

民航飞机的巡航速度一般在 800 ~ 1 000 km/h 变化,同一航路上的飞机具有相近的速度,而不同航路上的飞机相对速度较大,导致网络拓扑频繁变化,节点之间的通信链路非常容易断裂。另外,而飞机节点在网络中的进入、移出同样会造成网络拓扑的改变,从而造成网络拓扑高动态变化。

(3) 节点运动可预测性。

在航空自组网中,飞机节点的运动具有一定的规律性,尤其是民航飞机,只能沿固定航线飞行,飞机的速度和方向在小范围内浮动变化,飞行状态相对稳定,能够预测其飞行航线<sup>[8]</sup>。通过节点当前运动状态信息和先验知识实现节点位置预测,对于路由算法的设计具有重大意义。

(4) 带宽资源受限。

航空自组网中飞机之间的无线链路带宽资源短缺,容易造成瓶颈现象。通常情况下,飞机节点在同一信道通信是会受到频率干扰与信道竞争,进而产生隐藏和暴露节点问题。

## 2 民用航空自组网的建立

### 2.1 模型和场景的建立

与一般移动自组网(MANET)中的节点不同,民用航空飞机大多沿已规划好的固定航线进行飞行,并且在巡航阶段几乎保持匀速<sup>[9]</sup>。航线的宽度一般为 20 公里左右,而其长度远远大于宽度,因此可以将航线等效为一条线,特别是当同一方向的航线数量较少时,可以将其称为一维航线<sup>[10]</sup>。如图 1 所示,选取了乌鲁木齐—成都、喀什—西安和拉萨—兰州三条航线,每条航线上分布 10 架民航飞机,其中有一些小型民用飞机不具有卫星通信功能。假设航线上飞机均处于巡航阶段,保持匀速飞行且速度相等。飞机的通信半径相等,当邻近飞机之间的距离小于等于通信半径时,彼此可以直接通信。类似于现

实中理想航班顺序起飞,从乌鲁木齐至成都的飞机以相等的时间间隔依次起飞,同时从成都至乌鲁木齐的飞机也以相等时间依次起飞。其他航线上的飞机与之雷同。

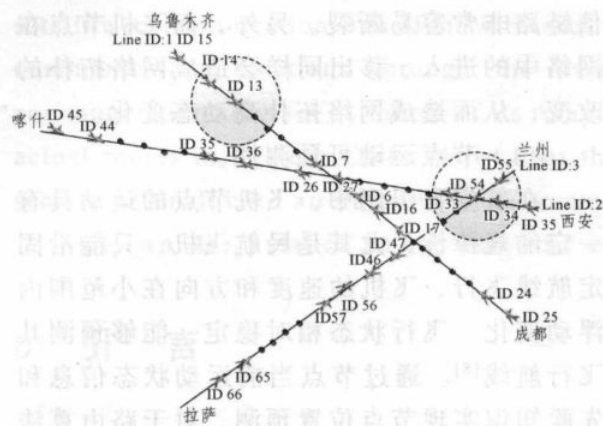


图 1 航线图

Fig.1 Route map

## 2.2 邻居发现与组网

为了使飞机节点能够与其周围的其他飞机节点交互信息,每个飞机节点周期性广播 Hello 分组,其格式如表 1 所示。只有在彼此通信半径以内的相邻节点才能接收到 Hello 分组。Hello 分组用于发现邻居节点、交换邻居节点的信息以及检测失效邻居节点,不能被转发,即只在一跳范围内发送。当节点接收到来自相邻节点的 Hello 分组时,从该分组中获取邻居节点信息,包括邻居节点的位置、速度、所处航线、是否具有卫星通信功能以及本地邻居节点信息等,然后建立本地邻居表,如表 2 所示。

表 1 Hello 分组格式

Table 1 Hello packet formate

| Head |        |     |   |           |        |          |         | Neighbor |
|------|--------|-----|---|-----------|--------|----------|---------|----------|
| ID   | LineID | Pos | V | DirVector | Enable | SendTime | ArrTime |          |

ID: 飞机节点自身编号;

LineID: 飞机节点所在航线编号;

Pos: 飞机节点实时位置坐标,如  $(x, y, z)$ ;

V: 飞机节点飞行速度(标量);

DireVector: 飞机节点的单位方向矢量,

如  $(a, b, c)$ ,我们把航线上的飞机节点均看成是匀速直线飞行;

Enable: 飞机节点自身是否具有卫星通信功能的标识位,若  $Enable=1$ ,则表示该飞机节点自身具有卫星通信功能,若  $Enable=0$ ,则表示该飞机节点自身不具有卫星通信功能;

SendTime: 该 Hello 分组的广播时间;

ArrTime: 飞机节点预期到达目的机场的时间;

Neighbor: 本飞机节点的邻居节点信息,其格式与邻居表相同,如表 2 所示。

表 2 邻居表

Table 2 Neighbor table

| NeighborListHead |              |                |           |         |                 |              |               |             |
|------------------|--------------|----------------|-----------|---------|-----------------|--------------|---------------|-------------|
| Neigh_ID         | Neigh_LineID | Neigh_SendTime | Neigh_Pos | Neigh_V | Neigh_DirVector | Neigh_Enable | Neigh_ArrTime | TwoHopNeigh |

飞机节点接收到邻居节点的 Hello 分组,将 Hello 分组头部信息存放在邻居表头部相应位置,将 Hello 分组 Neighbor 部分信息存放在邻居表的 TwoHopNeigh 中。同时,飞机节点根据 Hello 分组中的 SendTime 来更新邻居表中邻居节点信息,如果在 3 个 Hello 广播周期内,没有接收到邻居表中的某个邻居节点的下一个 Hello 分组,则认为该邻居节点已经飞出了通信范围,则将相应信息从邻居表中移除。这样,航线上的飞机节点都维护了一个两跳范围内的拓扑关系,建立起一个局部的组网。

## 3 民用航空自组网路由算法

由文献[11]可知,在飞机节点通信半径  $R$  为 150 km 和 Hello 分组广播周期  $T$  为 500 s 的时候,已经可以使组网到达不错的连通性。这时,我们就能够通过建立一个航空自组网来间接实现小型飞机的卫星通信。航空自组网是一种端到端的网络,采用常用的 5 层网络结构来实现,即应用层、传输层、网络层、链路层和物理层。网络中的每个飞机节点处于收发状态时,相当于终端;处于转发状态时,相当于路由器。每个飞机节点的

应用层具有两个程序端口——CBRClient 和 CBRServe, 分别负责收发数据。

### 3.1 链路生存时间计算

由于民用航空飞机的高速飞行, 网络拓扑结构频繁变化, 导致飞机节点之间的链路不稳定。针对这一问题, 设计了基于链路生存时间的民用航空自组网路由算法。飞机节点可以通过 GPS 等定位系统获取自身位置信息, 并且通过周期性广播 Hello 分组告知邻居节点自身的节点信息, 同时把接收到 Hello 分组信息更新记录在本地邻居表中。通过邻居表中的邻居节点信息, 计算与邻居节点之间的链路生存时间 (Lifetime)。链路生存时间表征一个飞机节点在另一个飞机节点通信范围内存在的时间。飞机节点的位置关系分为三类: 一是同一航线相同方向; 二是同一航线相反方向; 三是交叉航线。根据不同的位置关系, 分别计算飞机节点之间的链路生存时间。

#### 1. 同一航线相同方向

如图 2 所示, 同一航线上相邻两飞机节点, 它们飞行方向相同, 且处于彼此通信范围内, 即满足  $d \leq R$ 。由于假设所有飞机的巡航飞行速度相等, 在飞行过程中这两飞机节点之间的距离保持不变, 即相对静止。所以

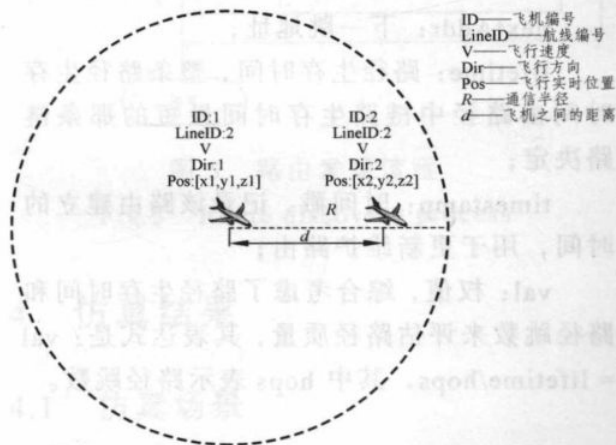


图 2 同一航线相同方向

Fig.2 Same direction on the same route

二者之间的链路始终保持连通, 直至其中一个飞机节点先行到达目的机场降落。其链路生存时间为:

$$\text{Lifetime} = \min(\text{ArrTime1}, \text{ArrTime2}) - \text{Current} \quad (1)$$

式中, Lifetime 是该两飞机节点之间的链路生存时间, ArrTime1 和 ArrTime2 分别是二者到达目的机场的预期时间, 可由邻居表中预期到场时间 Neigh\_ArrTime 获取, Current 是当前时间。

#### 2. 同一航线相反飞行方向

如图 3 所示, 同一航线上相邻两飞机节点, 飞行方向相反, 且处于彼此通信范围内, 即满足  $d \leq R$ 。其链路生存时间为:

$$\text{Lifetime} = (d + R) / 2V \quad (2)$$

式中,  $d$  是该两飞机节点之间距离, 可以通过邻居表中的位置信息 Neigh\_Pos 计算得到,  $R$  是飞机节点的通信半径,  $V$  是飞机节点的巡航飞行速度。

#### 3. 交叉航线

如图 4 所示, 交叉航线上两飞机节点, 位于彼此的通信范围内。通过交互 Hello 分组, 可以获知彼此的节点信息, 根据它们所在航线、飞行方向以及巡航飞行速度来计算其链路生存时间。假设经过一段时间  $t$  后, 两飞机节点之间的距离为  $R$ , 即:

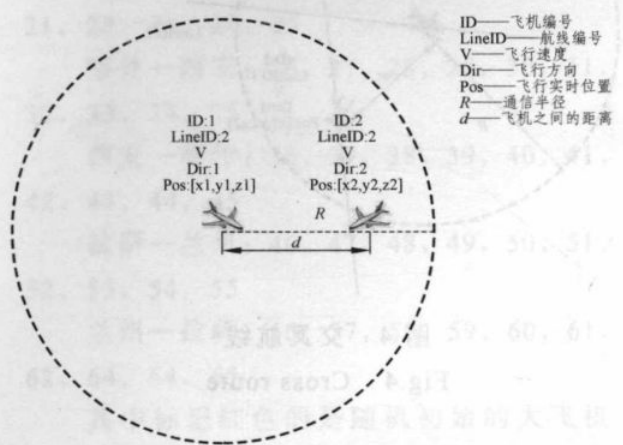


图 3 同一航线相反方向

Fig.3 The opposite direction of the same route