

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 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 communications are required because there are no infrastructure such as ground stations.

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。

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^[1]。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^[2]。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^[3]。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^[4]。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^[5]。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^[6]: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^[7]。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^[8]。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^[9]。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^[10]。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。

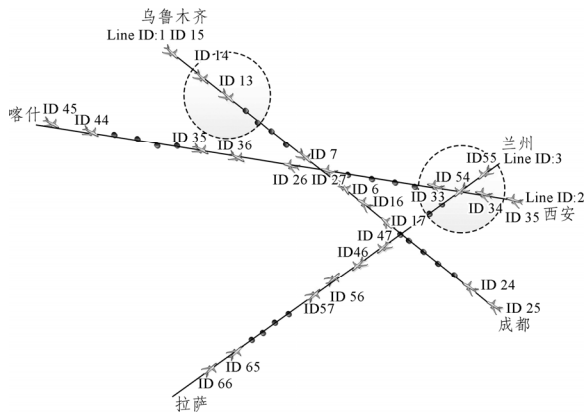


图 1 航线图

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 format

| 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）；

DirVector：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，建立起一个局域的组网。

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

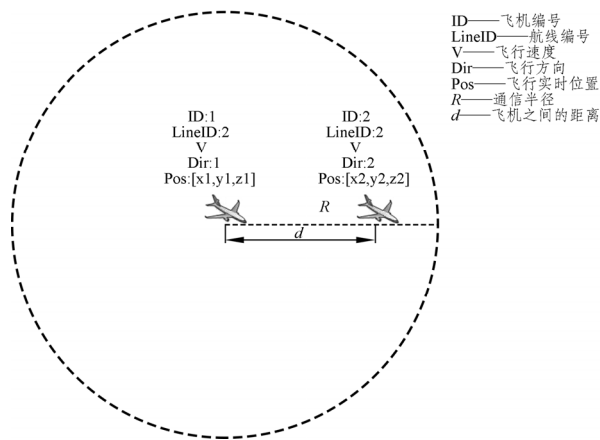


图 2 同一航线相同方向

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：

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

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：

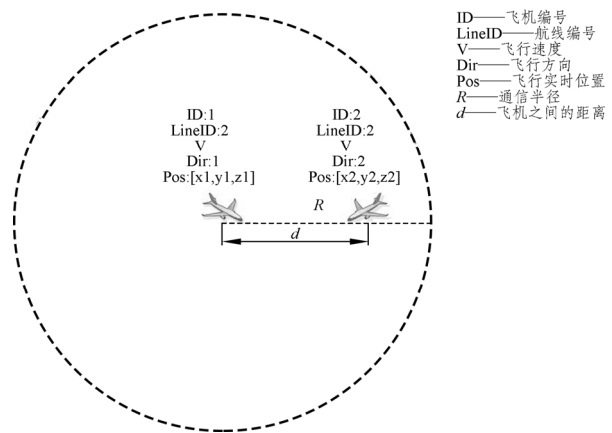


图 3 同一航线相反方向

Fig.3 The opposite direction of the same route

$$\begin{aligned} & [(x_1 + a_1tv_1) - (x_2 + a_2tv_2)]^2 + \\ & [(y_1 + b_1tv_1) - (y_2 + b_2tv_2)]^2 + \\ & [(z_1 + c_1tv_1) - (z_2 + c_2tv_2)]^2 = R^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, (a_1, b_1, c_1) 和 (a_2, b_2, c_2) 分别是两飞机节点飞行的单位方向矢量, 由邻居表中的 Neigh_DirVector 获知; v_1 和 v_2 分别是两飞机节点的飞行速度大小, 由邻居表中的 Neigh_V 获知; (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) 分别是两飞机节点位置坐标, 由邻居表中的 Neigh_Pos 获知。

求解式 (3) 得:

$$t = (\sqrt{\Delta} - b) / 2 \times a \quad (4)$$

其中:

$$a = (a_1v_1 - a_2v_2)^2 + (b_1v_1 - b_2v_2)^2 + (c_1v_1 - c_2v_2)^2$$

$$b = 2 \times (x_1 - x_2)(a_1v_1 - a_2v_2) + 2 \times (y_1 - y_2)(b_1v_1 - b_2v_2) + 2 \times (z_1 - z_2)(c_1v_1 - c_2v_2)$$

$$c = [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2] - R^2$$

$$\Delta = b^2 - 4ac$$

其链路生存时间就是求解所得的 t 。

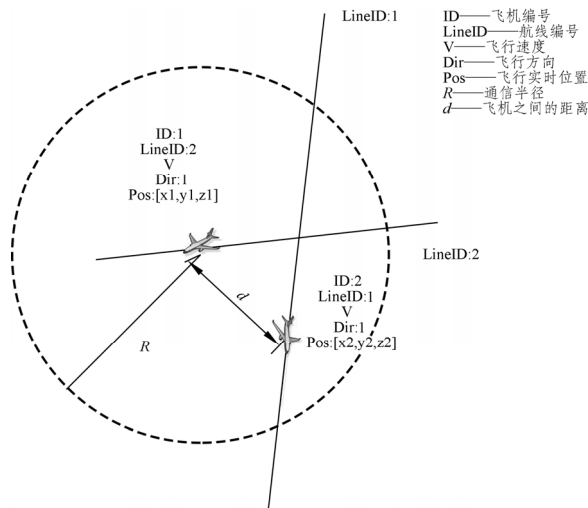


图 4 交叉航线
Fig.4 Cross route

根据本地邻居表记录的邻居节点信息, 小飞机节点建立能够到达周围大飞机节点的路径, 即前向路由。具体流程如图 5 所示。首先, 根据上节的链路生存时间计算方法, 计算源节点 S 与邻居节点 N1 之间链路生存时间 LT1, 如果 LT1 大于设定的阈值, 则表明该链路相对稳定。然后, 判断该邻居节点 N1 是否具有卫星通信功能, 如果 N1 具有卫星通信功能, 则 N1 可以作为中继节点帮助源节点 S 转发实现卫星通信, 所以把该路径添加到路由表, 路由表格式如表 3 所示。如果 N1 不具有卫星通信功能, 接下来, 计算 N1 与其相对应的两跳节点 N2 之间的链路生存时间 LT2。同样, 如果 LT2 大于阈值, 则表明该链路相对稳定。然后, 判断该两跳邻居节点 N2 是否具有卫星通信功能, 如果 N2 具有卫星通信功能, 则 N2 可以作为中继节点为源节点转发实现卫星通信, 从而将该路径添加到路由表中。与建立前向路由相同, 大飞机节点建立到达周围小飞机节点的路径, 即反向路由 (用来回发确认分组 ACK)。

表 3 路由表格式

Table 3 Routing table format

| destAddr | destPort | nextAddr | lifetime | timestamp | val |
|----------|----------|----------|----------|-----------|-----|
|----------|----------|----------|----------|-----------|-----|

destAddr: 目的节点地址, 指飞机节点 ID 编号;

destPort: 目的端口, 包括发送端口 CBRClient 和接收端口 CBRServe 两种;

nextAddr: 下一跳地址;

lifetime: 路径生存时间, 整条路径生存时间由路径中链路生存时间最短的那条链路决定;

timestamp: 时间戳, 记录该路由建立的时间, 用于更新维护路由;

val: 权值, 综合考虑了路径生存时间和路径跳数来评估路径质量, 其表达式是: $val = lifetime/hops$, 其中 hops 表示路径跳数。

3.2 路由发现

3.3 路由维护