

文章编号: 1001 - 893X (2007) 01 - 0082 - 04

空基与星基组合监视系统中的 ADS - B 分群算法^{*}

袁晓晶, 张 军, 黄智刚

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 广播式自动相关监视 (ADS - B) 技术是未来航空监视技术的发展方向之一。为了满足未来空域中移动节点快速多变以及覆盖范围不断扩大等的监视需求, 需要将甚高频自组织数据链和卫星数据链综合实现空基与星基组合监视系统, 而分群是实现该系统的一种有效手段。为此, 文中提出了一种新型的 ADS - B 分群算法, 通过结合最大连通度准则和非确定性算法, 改进了分群组网结构, 提高了组网的初始收敛速度、网络整体结构的稳定性以及通信效率。

关键词: 空基与星基组合监视系统; 广播式自动相关监视; 数据链; 无线自组织网; 分群算法
中图分类号: TN96 V355.1 **文献标识码:** A

ADS - B Clustering Algorithm for Air - Based and Satellite - Based Combined Surveillance System

YUAN Xiao - jing, ZHANG Jun, HUANG Zhi - gang

(School of Electronic Information Engineering Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract The broadcast automatic dependent surveillance (ADS - B) technology is one of the developing directions of air - based surveillance technology. A schema of combining VHF and satellite data - link to realize air - based and satellite - based surveillance system is proposed. Clustering network is introduced into the system, and a new cluster algorithm is proposed with advantage of Highest - Connectivity (H - C) Cluster Algorithm, in order to improve the initial convergence rate, stability and communication efficiency of the network.

Key words air - based and satellite - based surveillance system; broadcast automatic dependent surveillance; data - link; wireless Ad Hoc network; clustering algorithm

1 概 述

航空监视技术作为新航行系统 (CNS ATM) 的核心技术, 一直是军民航空领域关注的热点。随着飞机性能的不断提高, 未来的军民航空域出现了以下的新特点: ①飞行单元数量大、密度高、种类多、速度快、随机性强; ②监视要求范围广、精度高、稳定性好。这些特点对航空监视提出了更高的要求。雷达系统是过去最普遍使用的航空监视手段, 但它有先天的局限性: ①雷达的空域覆盖范围不足, 且雷达波束的直线传播形成了大量盲区; ②飞机的计划航线、速度等态势数据难以通过雷达直接获得。因此, 地

面雷达已经远远不能满足航空监视的要求。

为了有效解决以上问题, 国际民航组织正大力发展未来的航空监视技术——自动相关监视 (Automatic Dependent Surveillance ADS)。广播式自动相关监视 (ADS - B) 作为提高监视性能的一种有效手段, 由于其主动、灵活的监视方式及依赖性低等优点, 成为航空领域的研究热点。它以导航系统提供的数据为信息源, 由具有 ADS - B 功能的飞机将自身的位置、速度及状态等信息周期对外广播, 地面站和其他飞机接收这些广播报文, 飞机就可以互相“看得见”对方位置, 从而实现飞机之间、飞机和地面站之间的空空、空地一体化航空监视。

^{*} 收稿日期: 2006 - 02 - 14 修回日期: 2006 - 08 - 06

ADS-B 可以利用甚高频 (VHF) 自组织数据链实现, 但是其监视范围局限在视距以内, 因此需要引入卫星数据链以实现超视距监视, 从而形成综合这两种数据链的组合监视系统。同时, 为了适应网络拓扑的快速变化, 并高效利用网络资源传输信息, 必须引入分群技术。

本文研究了空基与星基组合监视系统的实现问题, 并研究了系统中的 ADS-B 分群算法。第二节介绍了综合甚高频数据链和卫星数据链实现组合监视系统方案的方案; 第三节分析了此系统环境下分群技术的需求; 第四节提出一种综合最大连通度和非确定性准则的分群算法, 用以解决分群技术组网收敛速度和网络稳定性之间的矛盾。

2 综合甚高频和卫星数据链实现的空基与星基组合监视系统

视距范围内的 ADS-B 可以由飞机间通过 VHF 数据链相互发送位置报告实现, 但是由于 VHF 数据链是视距传输的, 因此无法实现超视距监视。而基于卫星的 ADS-B 虽然可以有效地提高监视范围, 但是卫星自身的一些缺点也限制了该项技术的广泛应用。如果把两者结合起来, 充分发挥各自的优点, 是一种很好的选择, 即: 在视距通信范围内, 卫星系统提供了 ADS-B 而在视距通信范围外, VHF 网络组成区域性 ADS-B 这样就构成了空基与星基组合监视系统。

图 1 是空基与星基组合监视系统的原理图。从图中可见, 空基与星基组合监视系统中, 有的飞行节点处于同一视距范围内, 即任一飞行节点可以通过一跳或几跳的视距通信链路到达另任一节点, 例如图中的区域 A 和 B 内各自的所有节点。对这些节点, 可以对区域内的节点进行分群, 并完全通过 VHF 数据链进行群内节点之间、群与群之间的连接, 由普通节点将自己的位置信息广播给群首, 群首通过网关与别的群通信。这样所有群的节点都可以获得任一其他节点的位置, 从而实现监视。有的节点相互在视距范围之外, 即节点之间不可能通过任何跳数的视距通信链路进行连接, 例如图中区域 A 的某一节点和区域 B 的某一节点。对于这些节点, 可以将节点的位置信息广播给节点所在群的群首, 由群首通过卫星数据链进行通信, 这样区域 A 的任一飞机就可以得到区域 B 任一飞机的位置信息, 从而实现节点之间位置信息的交互, 并实现相互监视。

由以上说明可知, 空基与星基组合监视系统中应用了分群技术, 对不同区域内的节点进行了划分。这是由于系统中的卫星、飞机、地面站等构成了一个

无线自组织网络。由于网络中节点数量多、节点移动性强, 造成网络拓扑动态变化频繁, 因此利用分群技术可以减少网络负载, 提高网络稳定性, 有效实现航空监视。

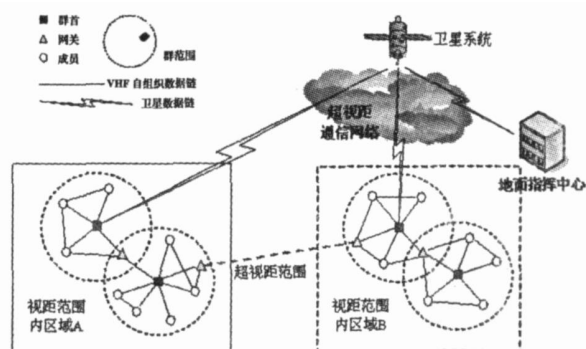


图 1 甚高频和卫星数据链结合实现
空基与星基组合监视系统

3 空基与星基组合监视系统的分群算法

分群是将特定范围内的无线节点, 通过共享相同的无线信道组成子网的过程。每个子网称为一个群, 每个群确定一个群首、一个或多个网关。分群的优点是: ①扩大监视范围; ②提高信道的利用率; ③降低碰撞的概率; ④提高网络稳定性、吞吐率和通信效率。

群的动态拓扑结构网络有 4 种类型: 集中式、分层集中式、完全分布式和分层分布式^[1]。在空基与星基组合监视系统中, 它们各有优劣, 而分层分布式网络拓扑最适合空基与星基组合监视系统。

在分层分布式网络拓扑的分群算法中, 目前选择群首的重要依据是最小 D^[2] 和最大连通度^[3], 它们分别代表了“快”和“稳”的极端思路。现今的分群算法如 LCC 算法^[4] 等, 一般都遵循这两种思路。

空基与星基组合监视系统的空域特点为: 处于复杂移动通信环境中的用户终端具有很大的随机移动性, 其无线通信的地理覆盖范围处于变化之中, 网络的拓扑结构可能会随时发生变化。因此, 分群算法必须符合以下特点: ①符合大范围、无遗漏的基本原则; ②组网快速收敛, 在飞行节点能够迅速入网, 看到其他飞机的位置并将自己的位置广播出去; ③能够对网络拓扑的复杂变化迅速作出反应, 并保持组网稳定性; ④能够尽可能地增大通信效率, 最大限度的利用信道。由于最大连通度法能够提高网络稳定性和通信效率。因此, 我们以最大连通度思想为基础设计分群算法。同时, 在初始化分群时, 采用一种非确定性分群方法来提高网络初始收敛速度。以

最大连通度原则在处理网络变化时的群首变更,能够保持组网稳定性和通信效率,从而解决了“快”和“稳”之间的矛盾。

4 基于最大连通度非确定性分群算法及分析

4.1 基于最大连通度的非确定性分群算法

分群算法包括 3 个方面:拓扑探测、分群过程和维护原则。

4.1.1 拓扑探测

当每个节点开机工作时,它可以广播发送数据报表明它自身的存在,同时将自身的位置信息告知其他节点。与此同时,节点通过监听信道,接收相邻节点发送的数据报,以更新它维护的相邻节点的数据表。如果某个节点收到相邻节点发来的数据报中含有本节点的位置信息时,就说明这个节点与它是双向联通的,也即互相实现了位置监视。在这种情况下,当网络中所有节点发送了一轮自身位置信息之后,所有节点都可以知道自己的相邻节点是哪些。再次发送一轮自身位置信息之后,由于每个节点会把自己维护的相邻节点信息也向其他节点广播,因此每个节点都能知道距它两跳的节点的位置。依此类推。

4.1.2 分群过程

(1) 各节点从“初始”状态开始,周期发送信息包,同时启动一个随机初始计时器。随机初始计时器规定计时器在一个固定的最长时间内随机取值,目的是为了在初始分群时减少各节点在发包和处理上的冲突。节点根据各自收到的信息包得到相邻节点的信息,并且记录自己的连通度(相邻节点的数量)。

(2) 如果节点在随机初始计时器超时之前收到其他节点信息包,且收到的节点信息中无群首信息,则超时后自己转变为群首,否则重新启动随机初始计时器。

(3) 节点如果能够同时接收到多个群首的信息包,则节点状态变为网关。

4.1.3 维护原则

(1) 当一个非群首节点从群 α 进入群 β 范围内时,对群 β 的结构没有影响,只是该节点变为群 β 的一个普通成员节点。

(2) 当两个群的群首处在彼此通信范围内时,则连通度较小的一方启动一个群首相遇计时器(如果连通度相同则在 ID 较大的一方启动)。计时器超时后,如果连通度较小的群首仍在连通度较大群

首的通信范围内,则连通度较小的群首成为普通成员,连通度较大的群首仍为群首。

(3) 脱离所有群的节点,状态变为“初始”状态。

4.2 算法在空基与星基组合监视系统中的性能分析

我们从 3 个主要方面来分析空基与星基组合监视系统中该算法的优越性。

(1) 组网收敛性:主要体现在网络收敛时间上,它可视为从开始执行分群算法到形成一个暂态的稳定所需要的时间。文献[5]提出了一种确定-非确定混合(UC-CM)分群算法,而本文的基于最大连通度的非确定性分群算法与其在初始组网阶段的处理方式相同,因此在 ADS-B 环境下,两种算法的网络收敛时间是相等的,并且当网络规模较大,移动节点(飞机)数较多时,两种算法的收敛时间小于 LCC 算法。

(2) 网络稳定性:其主要标准是当网络拓扑变化时,原群构造改变的程度,以及分群算法面临变化考验下的稳定度。节点的稳定度越大,就越有可能被选为群首。分群稳定度的计算考虑两方面因素:速度稳定因子和稳定邻节点因子。

定义 1: 节点 i 的速度稳定因子 Ψ_i 定义为

$$\Psi_i = \frac{1}{\Delta\varphi_{ji} + 1} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{ji} &= \frac{\Delta v_j}{d_i} \\ &= \frac{\sqrt{(v'_{jx} - v_{jx})^2 + (v'_{jy} - v_{jy})^2 + (v'_{je} - v_{je})^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N [(v_{kx} - v_{ix})^2 + (v_{ky} - v_{iy})^2 + (v_{ke} - v_{ie})^2]}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\Delta v_j = \sqrt{(v'_{jx} - v_{jx})^2 + (v'_{jy} - v_{jy})^2 + (v'_{je} - v_{je})^2} \quad (3)$$

$$d_i = \sqrt{\sum_{k=1}^N [(v_{kx} - v_{ix})^2 + (v_{ky} - v_{iy})^2 + (v_{ke} - v_{ie})^2]} \quad (4)$$

速度稳定因子 Ψ_i 表征了当节点 i 周围一跳节点中的节点 j 的速度变化对分群稳定度的影响程度。节点 i 与其周围一跳邻节点组成一个集合,该集合的所有节点与节点 i 的速度的方差为式(4)中的 d_i ,而当群中某节点的速度 v_j 变化为 v'_j 时,式(3)给出了速度变化 Δv_j 其与方差 d_i 的比值 $\Delta\varphi_{ji}$ 在式

(2) 中给出,而速度稳定因子 Ψ_i 定义为 $\frac{1}{\Delta\varphi_{ji} + 1}$

由式(3)可见,当 N 值增大时, $\Delta\varphi_{ji}$ 减小, Ψ_{ji} 增大。即节点 i 周围的节点越多,某个相邻节点的速度变化对群速度稳定性的冲击就越小。最大连通度法保证了相邻节点最多的节点被选为群首,故 N 值最大,群的速度稳定度也最大。这也是该算法优于文献[5]中的算法的主要原因之一。

定义 2 节点 i 的稳定邻节点因子 Π 的定义为

$$\Pi = \frac{M_i - 1}{M_i} \quad (5)$$

其中:

$$M_i = \sum_{k=1}^{N_i} d_k \quad (6)$$

式中 N_i 为节点 i 的一跳邻节点数目, d_k 如式(7):

$$d_k = \begin{cases} 1 & \sqrt{(v_{kx} - v_{ix})^2 + (v_{ky} - v_{iy})^2 + (v_{kz} - v_{iz})^2} \leq \Delta\bar{V}_s \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

稳定邻节点因子 Π 是为了保证选出的群首有尽可能多速度相近的邻节点而引入的概念,它的计算考虑了邻节点速度变化时对稳定邻节点数的冲击。相对稳定邻节点数 M_i 如式(6),该因子表征了在节点 i 的一跳邻节点中与节点 i 的速度相接近的节点数目。速度接近的节点的选择是依据一个平均速度的偏差,或称为相对稳定阈值 $\Delta\bar{V}_s$,可以定义 $\Delta\bar{V}_s = \frac{1}{2}\Delta v_i$,节点与平均速度的偏差小于该值,则认为速度接近的节点。当有一个邻节点速度增大,并从稳定邻节点变为不稳定邻节点(即从 $d_k=1$ 变为 $d_k=0$)时,定义邻节点稳定因子为现有稳定邻节点与原有稳定邻节点之比,即式(5)。

很明显,最大连通度算法保证了邻节点数量最多,因而式(6)中的 N_i 最大, M_i 也比其他算法尽可能地大,从而令式(5)中的 Π 也尽可能地大。

通过速度稳定因子和稳定邻节点因子的联合,可以计算出节点被选为群首的分群稳定度。对于高动态移动网络,应突出速度稳定因子的影响(通过指数方式变化),同时考虑稳定邻节点因子的影响(通过线性变化)。

定义 3 群首是节点 i 时的分群稳定度定义为

$$S_{ji} = 2^{\Psi_{ji} \log_2(\Pi_i + 1)} - 1 \quad (8)$$

分群稳定度 S_{ji} 表示某一个节点 j 速度变化对分群稳定性的影响。在网络的拓扑结构快速变化的情况下,经过一段时间的结构重组,网络的控制权由拥有最多邻节点数的群首掌握,最终的分群结构将和最大连

通度达到的效果趋于一致,从而增大分群稳定度。

(3)通信效率:算法采用最大连通度的思想,尽可能将相邻节点最多的节点放在核心位置,从而便于业务调配,增大通信容量,优化拓扑结构,进而提高通信效率,并且时间越久,优势节点的地位就越突出。该算法减少了各节点通过群首、网关的中转的次数,以及到达目的节点的平均跳数,因此信道的利用率、网络的吞吐率都得到了显著提高。

参考文献:

- [1] Baker D J, Ephremids A, Flynn J A. The design and simulation of a mobile radio network with distributed control[J]. IEEE Journal on SAC, 1984, SAC22(1): 226-237.
- [2] Baker D J, Ephremids A. A distributed algorithm for organizing mobile radio telecommunication networks[C]//. Proceedings of the 2nd International Conference on Distributed Computer Systems. 1981: 476-483.
- [3] Gerla M, Tsai T J C. Multicaster mobile multimedia radio network[J]. ACM/Baltzer Journal of Wireless Networks, 1995, 1(3): 255-265.
- [4] Chiang C G, Wu H K, Liu W, et al. Routing in clustered multihop mobile wireless networks with fading channels[C]//. The IEEE SICON. 1997: 197-211.
- [5] 张军, 聂妹慧, 刘锋. 非确定-确定混和分群算法及其实现[J]. 航空学报, 2004, 25(3): 279-283.
- [6] 刘凯, 李建东. 多跳结构分组无线网络的性能分析[J]. 电子学报, 1999, 27(11): 81-85.
- [7] 赵春晓, 王光兴. 无线网络中基于最高向量权独立集的分群算法[J]. 兵工学报, 2004, 25(5): 591-593.
- [8] 刘凯, 李建东, 李维英. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2001, 28(3): 311-314.
- [9] 王景, 刘明, 曹剑. 战术分组无线网分群与群管理[J]. 空军工程大学学报, 2001, 2(6): 70-73.

作者简介:



袁晓晶(1981-),男,广东茂名人,北京航空航天大学电子信息工程学院通信与信息系统专业硕士研究生,(电子信箱)chrisxj@163.com



张军(1965-),男,博士,教授、博导,主要研究方向为交通信息工程及控制、航空运输、通信电子技术;

黄智刚(1962-),男,博士,教授,主要研究方向为无线电导航技术、卫星导航、自动测试与控制。