

态势信息感知下的航空网络动态中继协议

陈柯帆¹, 王锦江², 吕娜¹, 贾航川³

(1.空军工程大学信息与导航学院,西安,710077;2.空军工程大学综合电子信息系统与电子对抗技术研究中心,西安,710051;3.94162部队,西安,710600)

摘要 复杂的作战环境造成航空网络的网络拓扑和信道环境复杂多变,给网络连通性的维持带来了挑战。为满足航空网络对网络连通性的需求,提出了一种基于态势信息感知的动态中继协议,并利用 Exata 网络仿真软件对所提协议性能进行了仿真分析。通过对无中继、固定中继以及采用所提中继协议的3种航空网络远距离航空平台间吞吐量性能进行分析对比,所提协议较好地提升了平台间吞吐量,表明协议能很好地维持航空网络的网络连通性。

关键词 中继协议;航空网络;态势信息;吞吐量;Exata

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.03.014

中图分类号 TP393 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)03-0066-05

A Dynamic Relaying Protocol Based on Status Information for Aeronautical Network

CHEN Kefan¹, WANG Jinjiang², LÜ Na¹, JIA Hangchuan³

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Research Center for Integrated Electronic & Information System and Electronic Countermeasure Technology, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 3. Unit 94162, Xi'an 710600, China)

Abstract: The complex operational environment makes the network topology and channel environment complex and volatile, which brings challenges to the maintenance of aeronautical network connectivity. In order to satisfy the demand for network connectivity of aeronautical network, a dynamic relaying protocol based on status information for aeronautical network is proposed, and Exata network emulator is used to analyze the performance of the proposed protocol. By comparing the throughput performance between two aeronautical platform away from each other in three kinds of the aeronautical network without relaying, with fixed relaying, and with the proposed relaying protocol, the use of the proposed protocol can achieve better performance of the network throughput, which means that the proposed protocol is good in maintaining the aeronautical network connectivity.

Key words: relaying protocol; aeronautical network; status information; throughput; Exata

航空网络中节点的发射功率较大,大都工作在 VHF 频段,且几乎没有遮挡,信号衰落程度较地面 更小^[1],一般具有较远的传输距离,在一定传输距离内通常设定航空平台之间组成一个全连通的网

收稿日期:2015-01-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61472443)

作者简介:陈柯帆(1990-),男,四川南充人,硕士生,主要从事航空数据链研究.E-mail:1148180199@qq.com

引用格式:陈柯帆,王锦江,吕娜,等. 态势信息感知下的航空网络动态中继协议[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(3):66-70.
CHEN Kefan, WANG Jinjiang, LV Na, et al. A Dynamic Relaying Protocol Based on Status Information for Aeronautical Network[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(3): 66-70.

络^[2]。但由于作战任务或外部环境的变化,全连通的网络存在临时扩展为非全连通网络的可能,为维持网络的连通性,需采用中继技术迅速有效地进行通信距离的扩展。

由于中继传输将增大通信时延,因此较佳的方法是动态选择、按需中继,以尽可能减少通信距离增加对通信时延带来的影响。在地面传感器网络中,节点一般使用 ACK 确认报文来确定是否需要中继以及进行中继节点的选择^[3-4]。但在航空网络中,传输 ACK 确认报文对网络的时延有较大影响^[5]。为确保信息传输的实时性,需要节点通过已获取信息对是否需要中继独立进行确定。另一方面,文献^[6]认为航空网络中选用航空平台作为中继节点较卫星中继具有更低的时延,但由于航空网络拓扑的变化具有高动态性、突发性和临时性,并且航空网络信道环境复杂多变,需要节点根据实时情况动态进行中继节点的选择。针对以上需求和问题,本文提出了一种基于态势信息感知的动态中继协议,并采用 Exata 网络仿真软件对协议的有效性进行了验证。

1 协议描述

采用 TDMA 组网的数据链在航空通信领域有广泛应用^[7],本文也基于 TDMA 的组网方式对所提协议进行描述。由于本文主要考虑网络拓扑由全连通临时扩展为非全连通的情况,故将中继跳数限制为 1 跳。

1.1 网络传输信息分类

本文将航空网络所传输信息类型分为 2 类,分别为态势信息与非态势数据信息。态势信息是指描述敌我双方状态的信息,包括位置、运动速度、运动方向、平台类型等信息,与作战任务的执行属于间接相关的关系。非态势数据信息是指航空平台之间交互的语言、视频、指令等与作战任务执行直接相关的信息。

1.2 态势信息感知流程

态势信息共享是网络中心战的重要特征。网络中心条件下的联合作战对态势信息具有高度的依赖性^[8]。态势信息分发的周期性以及其对航空平台状态的描述,可以为通过中继实现通信距离的快速扩展提供必要的辅助信息。

本文定义的态势信息分发中心为具有较强信息感知与信息处理能力的地面或航空平台。航空平台周期性的向信息分发中心发送自身态势信息,由于任意航空平台在 1 个时帧内皆分配有发送时隙,故本文将 1 个时帧定义为 1 个态势信息分发周期。态

势信息分发中心将各个航空平台的态势信息以及自身感知到的信息进行信息融合,在自身发送时隙通过广播的方式分发到各航空平台。

本文主要利用态势信息中节点的位置、运动速度、运动方向以及接收信号的信噪比这 4 类信息作为中继判决与中继选择的辅助信息。网络中每个节点维护一张运动状态表用于存储网络中自身及其他节点的位置信息、运动速度信息、运动方向信息,同时维护一张信道状态表用于存储网络中某 2 个节点相互交互信息时,接收方接收到发送方所发送信号时的信噪比信息,信噪比信息主要通过接收节点对所接收到信号进行信噪比估计得到^[9],并作为自身态势信息的一部分发送给态势信息分发中心。当节点收到态势信息分发中心发送的态势信息后,根据最新获取的态势信息更新相关状态表。

1.3 数据帧结构

图 1 中,发送的数据帧由帧头和数据部分组成。帧头中源节点标识用于区分数据帧的发送源节点;目的节点标识用于区分数据帧发往的目的节点;中继节点标识用于区分所选择的中继节点。这 3 类标识可以为节点 ID 号或是节点 MAC 地址,本文不做特别规定。中继位用于确定该数据帧是否需要被中继,1 表示需要中继,0 表示不需要中继,在考虑多跳情况时可用于约束中继数据的中继次数;其他信息主要指其他网络相关控制信息,如数据帧长度、优先级等,本文不做特别说明。数据部分主要用于承载信息分发中心与航空平台之间交互的态势信息或是航空平台之间交互的非态势数据信息。

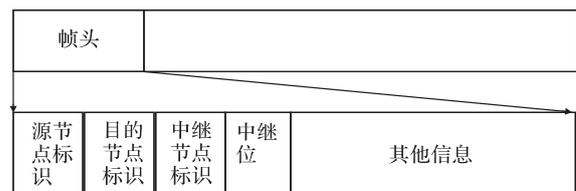


图 1 数据帧结构

Fig.1 Frame structure

1.4 中继判决机制

采用中继传输方式比直接传输的时延更大,且会对中继节点造成过多的业务负担,只有当可以直接进行信息交互的节点由于网络环境变化或任务需求造成节点之间无法直接进行信息交互时,才采用中继方式进行数据传输,需要网络中节点动态确定何时需要进行中继。

网络中每个节点维护 1 张邻居节点信息表。所有节点周期性的向态势信息分发中心通过广播方式发送态势信息时,其发送的数据帧能被邻居节点接收到;若能接收到,邻居节点通过判断中继节点标识

是否为空便可知道该源节点是否为自身邻居节点,读取数据帧帧头的源节点标识并将此源节点添加到邻居节点信息表中;若在一个态势分发周期内未接收到邻居节点信息表中相应节点发送的数据帧帧头中继节点标识为空的数据帧,则将该节点从邻居节点信息表中删除。

当源节点需向目的节点传输数据帧时,源节点首先通过查找邻居节点信息表确定该目的节点是否为自身邻居节点。若在邻居节点信息表中查到该目的节点标识,则不进行中继;若不能在邻居节点信息表中查到该目的节点标识,则通过中继节点选择算法选择相应中继节点,进行中继传输。

图2中实线表示态势信息流,虚线表示航空平台之间交互的非态势信息流。若节点C需向节点A传输数据帧,当节点A与节点C在相互传输距离之内时,节点A周期传输的态势信息能被节点C收到,节点C将节点A添加到邻居节点信息表中。当节点C与节点A不在相互传输距离内时,节点A传输的态势信息不能被节点C收到,节点C将节点A从自身邻居节点信息表中删除,可选择中继节点B将数据帧传给节点A。

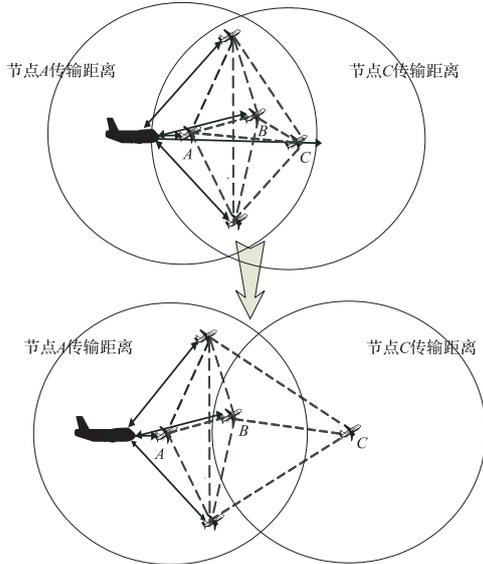


图2 网络场景示意图

Fig.2 Network scenario

1.5 协议流程

源节点在发送数据帧之前首先读取自身邻居节点信息表。若目的节点标识在邻居节点信息表中,则源节点将数据帧帧头中的中继位置0,中继节点标识置为空,将数据帧通过广播方式发送至目的节点;若目的节点标识不在邻居节点信息表中,则源节点将数据帧帧头中的中继位置1,并通过中继选择算法选出最佳中继节点,数据帧帧头中的中继节点标识置为所选中继节点的标识,将数据帧通过广播

的方式发送至目的节点。

当节点接收到数据帧后,首先查看该数据帧帧头中的源节点标识是否为自身,是则将该数据帧直接丢弃;否则继续查看帧头的目的节点标识是否为自身,是则将该数据帧提交上层处理,否则查看中继位是否为1并且中继节点标识是否为自身,是则将该数据帧存入数据发送缓存区,在自身数据发送间隙将该数据帧通过广播的方式发送出去,否则丢弃该数据帧。

2 中继节点选择算法

2.1 相关假设及说明

考虑到中继数据帧需进行存储转发,故中继采用解码转发(DF)方式。由于态势信息分发中心时隙数量有限且业务量较大,不将态势信息分发中心作为中继候选节点。

航空网络中节点的高机动性使得航空网络拓扑具有高动态性、突发性和临时性。同时,节点之间相对距离大且运动速度较快,造成路径损耗与多普勒频移,影响着传输信号的准确接收。由于航空网络存在上述特征,因此给中继链路的维持带来了挑战。为满足航空网络动态中继需求,确保中继链路的有效维持,本文提出了一种基于链路质量的动态中继节点选择算法。链路质量由2个方面决定:①中继最长链路维持时间。中继最长链路维持时间定义为中继链路在节点传输范围有限的情况下考虑节点运动时链路能维持的最长时间;②接收节点接收信号信噪比是否大于信号正确接收门限值。接收节点接收发送节点信号的信噪比可以通过查找信道状态表得到。

态势信息分发的周期性,使得网络中源节点在与目的节点的直接通信链路失效时,都已在相关状态表中记录直接通信链路失效前包括目的节点在内的其他节点的位置信息,运动速度信息,运动方向信息,接收信号的信噪比信息。设源节点的当前位置为 (x_s, y_s, z_s) ,运动速度信息为 v_s ,运动方向信息为 θ_s ;状态表中目的节点位置为 (x_d, y_d, z_d) ,运动速度信息为 v_d ,运动方向信息为 θ_d ;设源节点邻居节点信息表中一共有 N 个节点,任意邻居节点 i 的位置信息为 (x_r^i, y_r^i, z_r^i) ,运动速度信息为 v_r^i ,运动方向信息为 θ_r^i ;目的节点接收邻居节点信号信噪比为 SNR_d^i , $t(A, B)$ 表示节点A与节点B之间的链路维持时间, $t(A, B, C)$ 表示源节点A经过中继节点B到目的节点C的中继链路的链路维持时间, t_{\max} 表示中继链路的最长维持时间,同时假设网络

中所有节点能正确接收数据帧的信噪比门限为 T , 节点的最大传输距离都为 R 。

2.2 算法伪代码

初始化 $r = 1$; /* 中继候选节点从邻居节点信息表中第 1 个节点开始遍历, r 表示节点 ID 号 */
for ($i = 1; i \leq N; i++$) {

if ($\text{SNR}_d^i > T$) { /* 由于采用 DF 解码转发方式进行中继, 当中继节点能正确接收源节点数据帧, 中继节点到目的节点传输链路不受源节点与中继节点间链路质量影响 */

$$t(s, i) = \frac{-(a_1 b_1 + c_1 d_1) + \sqrt{(a_1^2 + c_1^2) r_1^2 - (a_1 d_1 - b_1 c_1)^2}}{a_1^2 + c_1^2};$$

/* 其中 $a_1 = v_r^i \cos \theta_r^i - v_s \cos \theta_s$; $b_1 = x_r^i - x_s$;
 $c_1 = v_r^i \sin \theta_r^i - v_s \sin \theta_s$; $d_1 = y_r^i - y_s$; $r_1 = \sqrt{R^2 - (z_r - z_s)^2}$ */

if ($t(s, i)$ 为复数或小于 0) { /* 源节点与该邻居节点的链路不稳定 */

if ($i = N$) {

找不到符合条件的中继节点, return NULL; }

else continue;

}

$t(d, i) =$

$$\frac{-(a_2 b_2 + c_2 d_2) + \sqrt{(a_2^2 + c_2^2) r_2^2 - (a_2 d_2 - b_2 c_2)^2}}{a_2^2 + c_2^2};$$

/* 其中 $a_2 = v_r^i \cos \theta_r^i - v_d \cos \theta_d$; $b_2 = x_r^i - x_d$;
 $c_2 = v_r^i \sin \theta_r^i - v_d \sin \theta_d$; $d_2 = y_r^i - y_d$; $r_2 = \sqrt{R^2 - (z_r - z_d)^2}$ */

if ($t(d, i)$ 为复数或小于 0) {

if ($i = N$) {

找不到符合条件的中继节点, return NULL; }

else continue;

}

$t(s, i, d) = \min(t(s, i), t(d, i));$

if ($t(s, i, d) > t(s, r, d)$) {

$r = i$;

}

}

else {

if ($i = N$) {

找不到符合条件的中继节点, return NULL; }

}

}

$t_{\max} = t(s, r, d);$

return r ; /* 返回所选中继节点 r */

3 仿真与分析

本文采用美国 Scalable Networks Technologies 公司开发的 Exata 网络仿真系统对所提协议进行仿真分析。网络仿真场景见图 3。

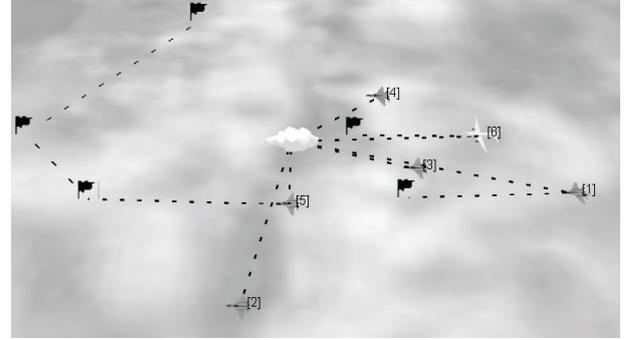


图3 仿真场景

Fig.3 Simulation scenario

场景大小设置为 $500 \text{ km} \times 500 \text{ km}$; 1~5 号节点为航空平台, 6 号节点为态势信息分发中心, 其中 1, 6 号节点运动速度设为 300 m/s , 5 号节点运动速度设为 600 m/s , 3 个节点均按场景中设置轨迹运动; 2, 3, 4 节点运动速度为 450 m/s , 运动方式为 random waypoint; 节点传输距离不大于 200 km , 态势信息分发中心传输距离为 500 km ; 全网采用 TD-MA 组网方式, 一个时帧由 12 个时隙组成, 时隙长度为 5 ms , 态势信息每 60 ms 发布一次; 采用程序模拟的方法模拟信噪比对需中继数据帧的影响。节点接收信噪比门限设为 -10 dB , 1, 5 号节点接收 2, 3, 4 信号信噪比都分别在 $[-12 \text{ dB}, -8 \text{ dB}]$ 范围内随机波动, 感知到接收信噪比低于门限则中继节点不对需中继的数据帧进行中继; 1, 2, 3, 4, 5 号节点产生非态势信息数据帧服从泊松分布, 目的节点从 1, 2, 3, 4, 5 号节点中随机选取。对 1, 5 号节点交互的总的非态势信息数据吞吐量进行统计, 仿真时间 300 s 。

首先分析采用固定中继方式和无中继时节点间的吞吐量性能, 见图 4。固定中继时选取 2 号节点作为中继节点, 随着仿真进行, 1 号节点与 5 号节点交互的非态势信息总的吞吐量逐渐增加。在 120 s 之前吞吐量曲线几乎重合, 采用中继与不采用中继性能相同。120 s 以后, 固定中继的吞吐量大于无中继情况, 主要原因是 1 号节点与 5 号节点的传输范围有限, 不采用中继时 1, 5 号节点无法建立通信连接, 固定中继方式使 1, 5 号节点利用 2 号节点建立起中继链路, 一定程度上维持了 1, 5 号节点的信息交互。但随着仿真时间的进一步增加, 固定中继吞

吐量曲线的增长趋势与无中继时基本保持一致,主要原因是受链路质量的影响,包括链路维持时间的限制导致中继链路不再连通,同时信噪比的波动也在一定程度上限制了吞吐量的增加。

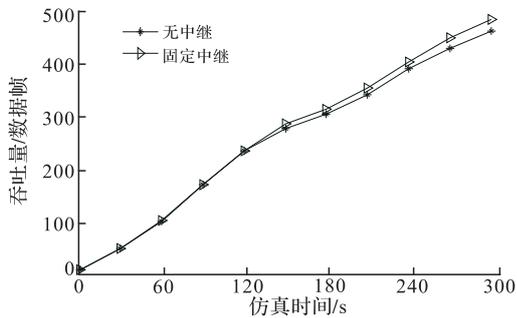


图4 固定中继与无中继吞吐量性能比较

Fig.4 Throughput performance comparison of fixed relaying and none relaying

图5中,固定中继时依然选取2号节点作为中继节点。由于1、5号节点可以直接通信,在120s以前吞吐量曲线几乎重合。同样,在120s以后,由于传输范围有限,1、5号节点通过中继链路进行信息交互,表明基于态势信息感知的动态中继协议能根据态势信息较快的建立中继链路。同时,基于态势信息感知的动态中继协议使得1、5号节点的信息交互较固定中继具有更大的吞吐量,并且吞吐量的增长速度较固定中继方式更快,主要原因协议采用了基于链路质量的中继节点选择算法,算法根据链路质量对中继节点进行动态选择,使得中继链路受链路维持时间以及信噪比波动的影响更小,能更有效地维持1、5号节点间的中继通信。

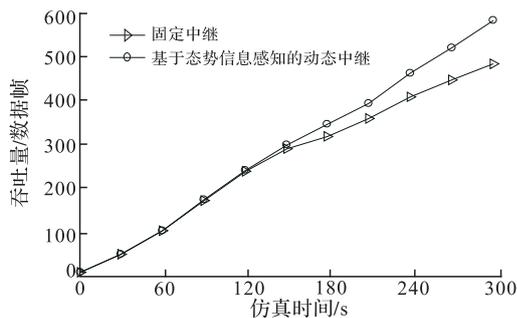


图5 基于链路质量的动态中继吞吐量性能

Fig.5 Throughput performance of dynamic relaying based on link quality

4 结语

为满足航空网络在复杂战场环境下的网络连通性需求,提出了一种基于态势信息感知的动态中继协议。仿真结果表明协议能实时的根据网络连通情况选择是否进行中继,使得航空网络较无中继时具

有更好的网络连通性;同时能根据链路质量情况进行中继节点的动态选择,较固定中继方式进一步提高了源节点与目的节点之间的网络吞吐量。

参考文献(References):

- [1] Najett Neji, Raul de Lacerda, Alaub Azoulay. Survey on the Future Aeronautical Communication System and Its Development for Continental Communications[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2013, 62(1): 182-191.
- [2] 颜骥, 李相民, 刘立佳. 机群多编队作战网络自同步[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(8): 1566-1572.
YAN Ji, LI Xiangmin, LIU Lijia. Combat Network Synchronization of Air Fleet Formation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(8): 1566-1572. (in Chinese)
- [3] JongKwan Lee, HongJun Noh, Jaesung Lim. TDMA-Based Cooperative MAC Protocol for Multi-hop Relaying Networks[J]. IEEE Communication Letters, 2014, 18(3): 435-438.
- [4] 郑国强, 李建东, 李红艳, 等. 多跳无线传感器网络的高效中继节点快速选择算法[J]. 通信学报, 2010, 31(11): 158-170.
ZHENG Guoqiang, LI Jiandong, LI Hongyan, et al. Energy Efficient Relay Node Fast Selection Algorithm for Multi-hop Wireless Sensor Networks[J]. Journal on Communications, 2010, 31(11): 158-170. (in Chinese)
- [5] Hyung Jun Jang, Eunkyung Kim, Jae Joon Lee. Location-Based TDMA MAC for Reliable Aeronautical Communications[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(2): 1848-1854.
- [6] Yufeng Wang, M Cenk Erturk, Huseyin Arslan. Throughput and Delay Analysis in Aeronautical Data Networks[C]// IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications, Mobile Computing and Vehicle Communications Symposium, IEEE press, 2012: 771-775.
- [7] 吕娜. 数据链理论与系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
LÜ Na. Theory and System of Data Link[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese)
- [8] 陈洪辉, 宛海宁, 陈涛. 一种基于服务的态势信息定制分发方法[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(4): 1428-1431.
CHEN Honghui, WAN Haining, CHEN Tao. Service-Based Method to Subscribe and Disseminate Situation Information[J]. Application Research of Computers, 2009, 26(4): 1428-1431. (in Chinese)
- [9] 许华, 王爱粉, 杨晓宇. 常规数字通信信号信噪比估计综述[J]. 信号处理, 2013, 29(6): 723-733.
XU Hua, WANG Aifen, YANG Xiaoyu. Survey of the SNR Estimation of Conventional Digital Communication Signal[J]. Journal of Signal Processing, 2013, 29(6): 723-733. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)