

基于 TTNT 数据链多址接入协议的 多机协同任务调度方法

王瑞琳, 何 锋*, 胡安敏

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要: 为提高无人机蜂群作战中无人机信息交互、资源共享和任务协同的能力, 文章基于 TTNT 数据链 SPMA 协议, 设计高动态变化拓扑下的分层分簇无人机蜂群模型和与之匹配的层次资源与任务调度模型, 并对其消息传输进行优化。通过 OMNeT++ 仿真平台, 以 TTNT 数据链中的数据传输标准对信息端到端时延和网络吞吐量进行不同机间传输距离下的对比仿真实验。其结果表明, 该方法满足 SPMA 协议对于消息传输时延的要求, 并且引入 SPMA 协议后可以有效减少网络数据传输冲突, 提高了系统约 18% 的网络吞吐量, 提升了无人机信息交互、资源共享和协同作战的能力, 对实际无人机蜂群协同任务调度研究具有可参考性。

关键词: TTNT 数据链; SPMA 协议; 无人机蜂群; 分层分簇; 任务调度

中图分类号: TP393.09; V355 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2024)01-0001-07

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.5182

The Multi-machine Collaborative Task Scheduling Method Based on TTNT Data Link Multiple Access Protocol

WANG Ruilin, HE Feng*, HU Anmin

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191 China)

Abstract: In order to improve the ability of drone information exchange, resource sharing, and task collaboration in drone swarm operations, this paper designs a hierarchical and clustered drone swarm model under high dynamic topology based on the TTNT data link SPMA protocol, as well as a matching hierarchical resource and task scheduling model, and optimizes its message transmission. Through the OMNeT++ simulation platform, the data transmission standard in TTNT data link is used to compare the end-to-end information latency and network throughput of information under different inter machine transmission distances. The experimental results show that this method meets the requirements of SPMA protocol for message transmission delay, and can effectively reduce network data transmission conflicts after introdu-

收稿日期: 2023-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(62071023)。

第一作者: 王瑞琳(1999—), 女, 博士, 主要研究方向为机载无线通信、数据链等。

ORCID: 0009-0004-1417-7971 E-mail: w17396370867@buaa.edu.cn

* 通信作者: 何锋(1980—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为机载通信、航空电子综合等。

ORCID: 0000-0001-5128-3061 E-mail: FengHe@buaa.edu.cn

引用格式: 王瑞琳, 何锋, 胡安敏. 基于 TTNT 数据链多址接入协议的多机协同任务调度方法[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2024, 43(1): 1-7.

WANG Ruilin, HE Feng, HU Anmin. The Multi-machine Collaborative Task Scheduling Method Based on TTNT Data Link Multiple Access Protocol[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2024, 43(1): 1-7.

cing SPMA protocol, and improve the system's network throughput and data transmission efficiency by approximately 18%, enhancing the capabilities of unmanned aerial vehicle information exchange, resource sharing, and collaborative operations. It has reference value for practical research on drone swarm collaborative task scheduling.

Keywords: TTNT data link; SPMA protocol; drone swarms; hierarchical clustering; task scheduling

随着作战理念和科学技术的不断发展,战争形态将演变为多机密切协同,陆、海、空、天四位一体,通信、控制、指挥相互融合渗透的立体化战争。无人机蜂群作战作为体系化全域战场的重要组成部分,其网络具有自组织、动态拓扑等特点。但无人机自组网高度的移动性和动态性^[1],使得无人机之间的连接拓扑多变,对于协同任务的变化适应能力差,资源等信息共享能力有限,不符合多机协同通信的网络要求。媒体接入控制(media access control, MAC)协议作为数据链技术的关键部分,决定资源分配和信道接入方式,对移动自组网整体性能起到至关重要的作用^[2]。因此,如何基于数据链 MAC 协议,设计一种实现资源融合、跨平台数据共享的无人机蜂群协同任务调度方法具有重要意义。

目前有关移动自组网 MAC 协议技术的研究主要有 TDMA^[3,4]、动态 TDMA^[5]、轮询^[6]、SPMA 等。TDMA 协议采用固定分配时隙的方式,在节点入网、退网时,极易造成资源浪费。为此, Park 等^[5]提出了一种基于时隙镜像的动态 TDMA 方案,允许节点随机访问空闲的镜像时隙,但需中心节点对时隙资源进行控制,且时隙分配算法较为复杂。关于轮询协议, Ding 等^[6]为克服传统轮询协议无法优先传输紧急业务的问题,提出了一种多优先级轮询 MAC 协议,实现了系统中用户对不同等级业务的传输需求,但也需提前规划好时隙和中心节点,无法较好地适应拓扑高速变化、任务传输时延要求高的无人机蜂群组网。

武协类数据链的战术瞄准网络技术(tactical targeting network technology, TTNT)代表着未来数据链发展方向,具有高速、低时延以及自动组网等特点,主要负责复合跟踪和协同作战等任务^[7]。其 MAC 层采用统计优先级多址接入(statistical priority-based multiple access, SPMA)协议,是一种无中心节点控制的随机接入协议,不需要提前划分

时隙,有着更好的吞吐量和时延性能,适合在节点移动性强、拓扑快速变化的无人蜂群组网环境中使用。目前国内关于 TTNT 的研究大多还停留在概念和理论研究阶段,少有实质性的验证试验。

因此,面向无人机蜂群组网协同环境,本文通过跨平台体系建模,构造分层分簇无人机蜂群模型和与之匹配的层次资源与任务调度模型,基于 TTNT 数据链 SPMA 协议,对模型的消息传输进行优化,以解决无人机蜂群中任务协同、信息交互和互连组网等关键性问题,提高无人机资源共享、协同作战的能力。

1 基于 SPMA 协议的多机协同任务调度

1.1 无人机蜂群分层分簇自组织网络架构

结合未来航空电子领域通信环境,从保证任务系统实时性的角度出发,根据跨平台航电系统中节点分布广、密度不均、数量众多的特点^[8],按照任务协同的需求,本文的无人机蜂群自组织网络架构主要按照分层分簇的思想进行设计,主要包括以中心控制器、簇首、普通无人机组成的 3 层机外结构和以网络控制器为中心的机内架构。在 3 层机外架构中:第 1 层是内部服务器、存储器等资源间的通信网络——云端数据中心网络,负责初始使命的接收和下发;第 2 层是一定区域内的无人簇群的簇首之间通过数据链通信并接入云端数据中心的网络——跨系统平台网络,负责将从云端接收到的使命拆分成单个任务并继续下发;第 3 层是无人机内部以交换式组网为代表的有线通信网络——单系统平台网络,负责将簇首传输来的任务执行完成,如图 1 所示。

由于软件定义网络(software defined network, SDN)技术的主要思想是将网络中底层设备的控制功能集中化,数据控制与转发平面相分离,以实现底层设备对上层应用的透明化^[9],所以,在机内架构中,借鉴 SDN 的控制与转发分离机制,对机内交换机

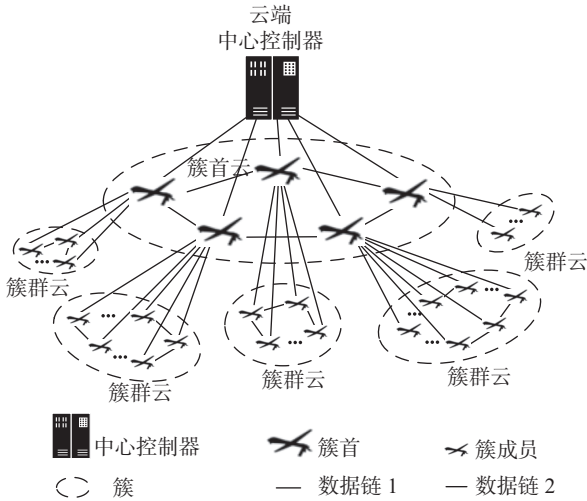


图 1 无人机蜂群分层分簇机间网络架构

Fig. 1 Layered clustering of UAV bee swarms inter-machine network architecture

和网络控制器进行功能划分,控制层主要由网络控制器组成,数据层则由交换机与端系统对应的交互信息组成。控制层控制无人机蜂群网络架构下资源的统一调度和任务分配,将数据承载层资源统一化,从全局上检测网络的资源容量、网络配置等信息,以集中化方式对全网进行动态控制,如图 2 所示。

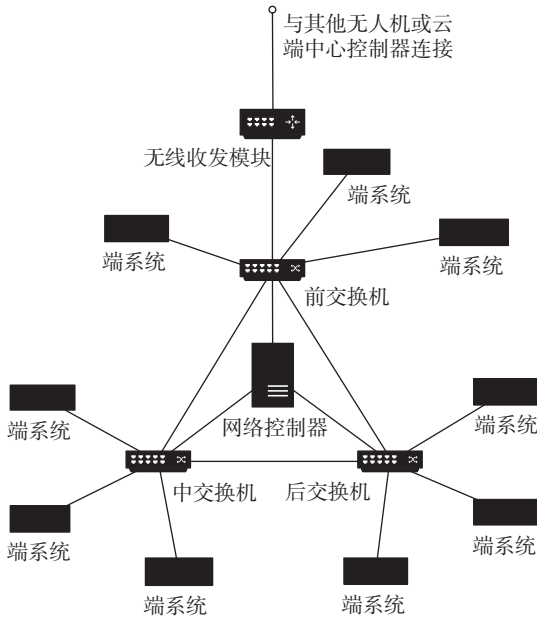


图 2 无人机内部网络架构

Fig. 2 UAV internal network architecture

1.2 基于 SPMA 协议的多层资源与任务调度模型

1.2.1 SPMA 模块与算法设计

由于每架无人机内的交换机连接了机内各节点,负责机内信息交互,并且前交换机与无线收发模块直接相连,负责本无人机与其他无人机或云端

中心控制器进行信息交互,所以,本文设计的 SPMA 模块位于无人机内的各交换机结构中,以调控机内外各类消息的传输。SPMA 协议控制模块的示意图如图 3 所示。

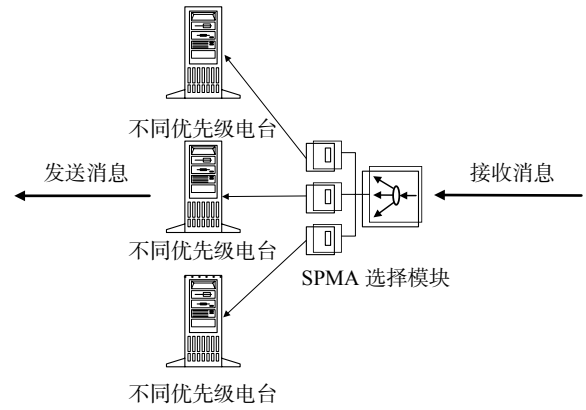


图 3 SPMA 协议控制模块设计

Fig. 3 SPMA protocol control module design

在 SPMA 协议控制模块的结构中,各子模块的功能如下。

1)消息接收端。向 SPMA 模块中发送不同种类的消息,包括资源类消息、路由类消息和 3 种功能不同的任务类消息。

2)SPMA 主体部分。将传输进来的消息按照消息类型和功能分成不同优先级,具体的优先级顺序从高到低分别为路由类消息、任务类消息、资源类消息,并将它们划分为不同优先级队列,结合当前信道占用情况,设定不同优先级的门限阈值,并且每到达一个数据包进行一次发送判定,比较当前信道占用统计值和优先级门限阈值大小,判定数据是否能够发送。

3)不同优先级电台。到达的数据包根据划分的不同优先级传输进入相应电台,当发送判定通过后将数据包直接发送,反之将数据包回退等待,直到下次发送判定通过。

根据 SPMA 协议实现流程^[10],模型中 SPMA 消息调度算法流程如图 4 所示。按照优先级高的消息优先传输的原则,将传输到 SPMA 协议控制模块的路由类消息、3 种任务类消息以及资源类消息划分为 5 个消息优先级,并设定不同优先级消息的门限阈值,高优先级消息对应的门限阈值也高。消息到达时,根据其对应优先级进入相应电台,通过比较当前信道占用统计值和优先级门限阈值大小进行发送判定。如果阈值大于信道占用,则发送

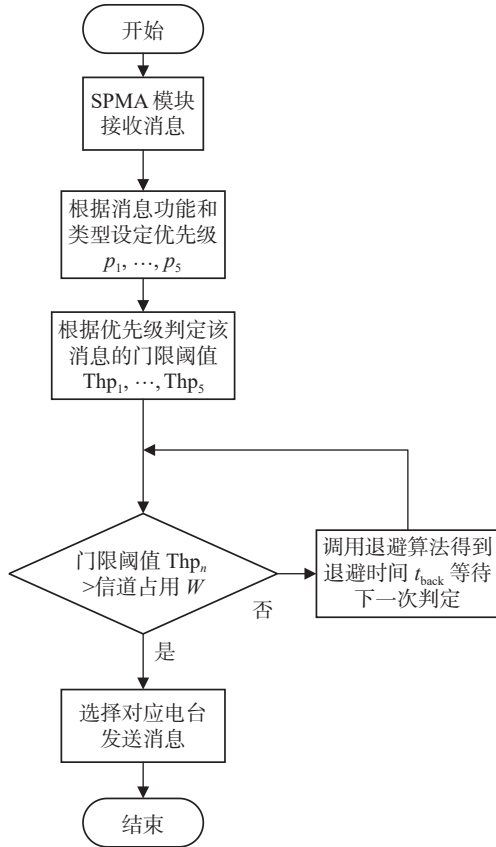


图 4 SPMA 消息调度算法流程图

Fig. 4 SPMA message scheduling algorithm flowchart

数据包, 否则调用退避算法进行退避等待, 直至更高优先级队列的消息全部发送完毕后退避结束, 再次进行该消息的发送判定。

1.2.2 多层资源与任务调度模型

多层资源与任务调度模型的工作流程主要分为 2 部分: 资源上报和任务分配。无人机蜂群资源上报与任务分配示意图如图 5 所示。

网络拓扑变化包含节点入网、退网。当节点入网时, 为满足原任务的实时性, 若任务所对应节点网络性能较差即资源不足, 将原节点资源迁移到新的节点, 若资源充足, 则为新增节点分配新任务。当网络节点偏离系统平台, 对应节点退网, 并重新进行任务资源计算与原节点资源迁移。

1) 资源上报。在每一次任务分配开始前, 需要从底层对无人机蜂群分层分簇自组织网络架构中每层可用的任务资源进行统计, 并将资源信息上报给上一层, 层次关系结构如图 6 所示。无人机内的不同端系统对应执行 CPU(数据处理能力)、GPU(图形处理能力)、MEM(存储能力)、RAD(雷达探测能力)、ATT(攻击功能)、DIS(防御能力)等不同功

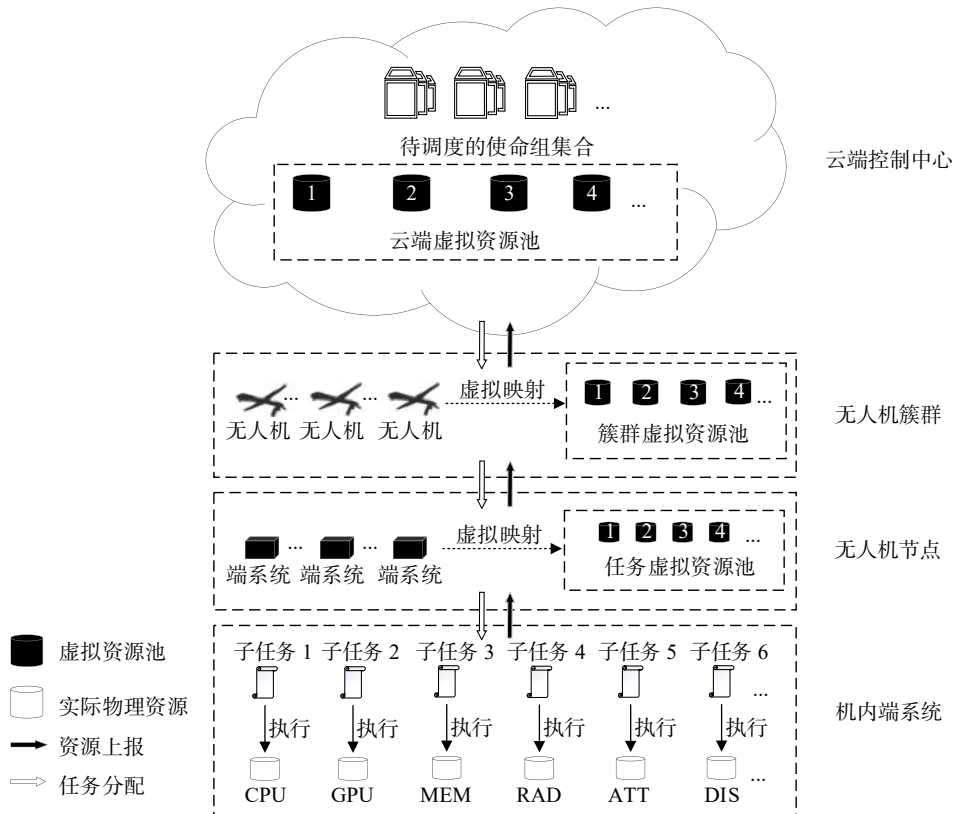


图 5 多层资源与任务调度示意图

Fig. 5 Multi-layer resource and task scheduling diagram

能任务。普通无人机统计各端系统空闲任务资源,对应 6 类任务虚拟资源池,并将每种资源池大小上报给所在簇群的簇首。簇首整合簇内所有无人机

相同资源类型的空闲任务资源,建立无人机簇群虚拟资源池,并将每种资源池大小上报给云端对应类型的虚拟资源池,形成整个模型的任务资源排布。

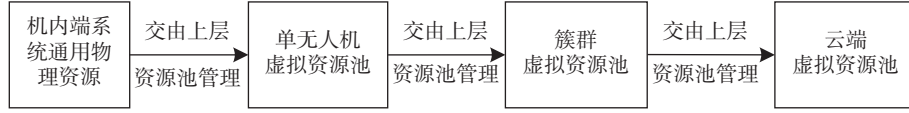


图 6 资源上报层次关系结构图

Fig. 6 Resource reporting hierarchical relationship structure diagram

其中,只有端系统的任务资源是实际的物理资源,最终的任务执行也落实在端系统上。在无人机、簇首和云端形成的资源池都是虚拟资源池。在构建虚拟模块资源到物理单位资源的虚拟化映射时,将虚拟网络映射过程抽象成一个 M , 分成节点映射和链路映射 2 部分,按式(1)进行计算,为

$$M: G^v \rightarrow G^s(N^s, P^s, R_N, R_L) \quad (1)$$

式中: G^v 为带有资源约束的虚拟网络请求; G^s 为底层物理网络; P^s 为网络中的一条无环路径; R_N 为分配给网络节点的资源; R_L 为分配给网络链路的资源。

2) 任务分配。对应各层任务资源排布,建立从高到低分别为使命组、使命、任务和子任务的分层式任务调度模型。根据任务资源需求,在资源上报结束后依据遗传算法和贪心算法进行任务分配。任务分配包含机间任务分配与机内任务分配 2 部分,流程图如图 7 所示。

机间任务分配包括云端使命组分配和簇群内任务分配 2 部分。采用原则是当一个节点足够执行任务时,优先将一个任务分配到一个节点完成,而当单节点无法满足任务的资源需求时,再考虑将任务拆分成多份交给多个节点完成。在使命组下发后,为防止无人机任务执行的实时性过差,当使命组下发时刻小于最低容忍时间开销时,表明无人机蜂群负载过大,资源不足,此时待分配的使命组需等待下次分配,直至使命组下发时刻大于最低容忍时间开销执行任务分配算法。首先,云端根据任务分配算法将接收到的使命下发给一个或多个无人机簇群的簇首,然后,簇首将下发的使命划分成不同任务,再根据任务分配算法下发给簇群内相应的无人机,最后,接收到任务的无人机会将任务细分为子任务,根据机内的任务分配算法下发给不同端系统执行。

在机内任务分配过程中,为使时间开销最少,进行子任务的均为资源数量最充足的端系统。即分配机内任务时,按照此时机内不同端系统对应的 6 类任务虚拟资源池数量进行 6 次排序,每次分配子任务时选择该子任务所需资源剩余量最大的端系统,直至该机内任务的资源需求被全部满足。

2 结果与分析

2.1 仿真实验设置

多机协同任务调度仿真实验是在 OMNeT++ 仿真平台上实现的,通过 NED 语言构建网络拓扑,进行节点连接关系与参数的默认设置,并通过 omnetpp.ini 文件对节点数量、交换机数量、网络带宽等进行配置,对网络拓扑做进一步补充。

在仿真中,节点随机分布在 1 000 km×1 000 km 的空域场景内,采用参考点群体移动模型进行移动,并且为体现节点速度的差异性,速度从 60~100

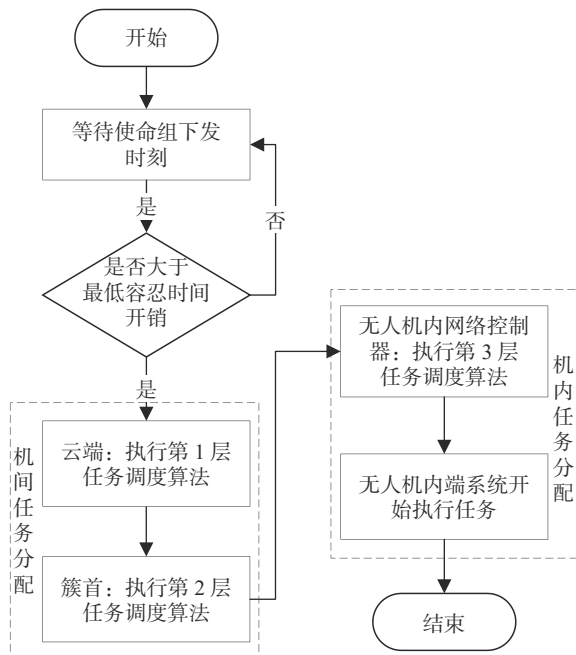


图 7 任务分配流程图

Fig. 7 Task assignment flowchart

m/s 中随机选取。每一个无人机节点的仿真模型结构都相同,协议采用 SPMA 协议与 AODV 自组织路由协议,其余参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置
Tab. 1 Simulation parameter settings

参数类型	数值	备注
族群	5	无
簇内无人机	20	跟随节点入网退网变化
无人机交换机	3	无
无人机端系统	9	1个交换机连接3个端系统
无人机电平均距离/km	180	360时对应数据链速率为500 kb/s
数据链速率/(b/s)	2 M	500 k时对应无人机电平均距离360 km
资源种类	6	无

为增强实验结果可信度并对实际无人机蜂群协同任务调度研究具有可参考性,本文以 TTNT 数据链中无人机电平均距离在 180 km(100 海里)与 360 km(200 海里)时最大数据速率分别可达 2 Mb/s 与 500 kb/s 作为技术指标,时延最高不超过 2 ms 与 6 ms 作为验证指标,进行模型性能测试和评估。

2.2 仿真结果分析

图 8 示出在机间距离为 180 km 时,引入 SPMA 协议前后动态拓扑下的节点端系统的网络吞吐量对比情况。通过模型端系统在一定时间内接收的数据包数量可知,引入 SPMA 协议可以减少网络中的数据冲突,提高系统约 18% 的网络吞吐量。图 9 示出不同传输距离模型端系统的网络吞吐量对比情况。可知,在 SPMA 协议中,平均传输距离远的系统网络吞吐量低。

在 10 s 仿真时间共计 15 000 个调度事件下,重复进行 3 次仿真实验,100 架无人机在不同传输距离时每个端系统的信息端到端平均传输时延的分布图(3 次仿真结果平均值)如图 10 所示。可以看出:动态拓扑下的节点在机间平均距离为 180 km 时,84% 的端系统消息端到端时延可以保持在 2 ms 以内;在距离为 360 km 时,82% 的端系统消息端到端时延可以保持在 6 ms 以内。整网端系统平均时延如表 2 中所示。可以看出:在机间平均距离为 180 km 时平均时延能够维持在 2 ms 左右;在距离为 360 km 时能够维持在 6 ms,满足 SPMA 协议对于消息传输时延的要求。

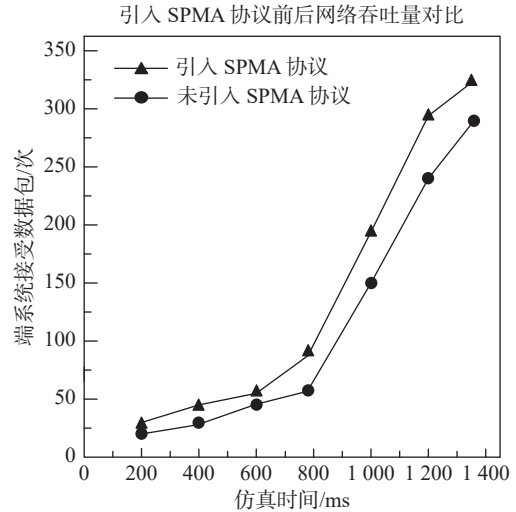


图 8 引入 SPMA 协议前后网络吞吐量对比

Fig. 8 Comparison of network throughput before and after the introduction of SPMA protocol

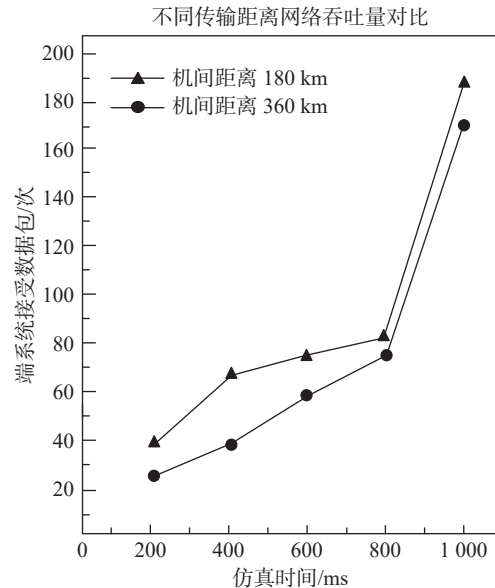


图 9 不同传输距离网络吞吐量对比

Fig. 9 Comparison of network throughput at different transmission distances

3 结束语

面向无人机蜂群组网协同环境,本文基于 TTNT 数据链 SPMA 协议,设计了高动态变化拓扑下的无人机蜂群分层分簇自组织网络架构以及与之匹配的层次资源与任务调度模型,并以 TTNT 数据链中的数据链标准对信息端到端时延和网络吞吐量进行仿真验证。结果表明,该方法满足 SPMA 协议对于消息传输时延的要求并且有效提高了无人机信息交互、资源共享和协同作战的能力。该方法具有算法部署简单、通用性强的优点,

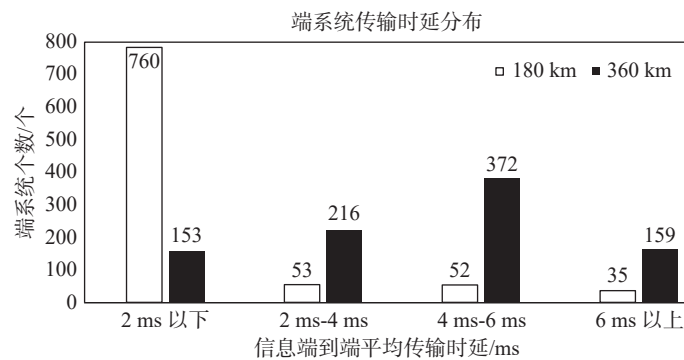


图 10 端系统传输时延分布图

Fig. 10 Fig.10ransmission delay distribution diagram of the end system

表 2 整网端系统平均时延仿真结果

Tab. 2 Simulation results of the average latency of the entire network system

仿真次数	无人机间平均距离/km	是否引入SPMA协议	整网端系统平均时延/ms
1	180	是	2.01
2	180	是	2.92
3	180	是	2.24
4	360	是	5.95
5	360	是	5.86
6	360	是	6.05

对实际无人机蜂群协同任务调度研究具有可参考性。

参 考 文 献

[1] 张珉, 董超, 杨朋, 等. 无人机自组网路由协议研究综述[J]. 数据采集与处理, 2022, 37(5): 952 – 970.

ZHANG M, DONG C, YANG P, et al. Overview on routing protocols for flying Ad-Hoc networks[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2022, 37(5): 952 – 970.

[2] 马生博. 基于优先级的定向天线自组网 MAC 协议研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

MA S B. Research on MAC protocol of directional antenna ad hoc network based on priority[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

[3] HUANG Y X, HU S, WU G. A TDMA approach for OFDM-based multiuser RadCom systems[J]. China Communications, 2023, 20(5): 93 – 103.

[4] 傅妍芳, 张楠, 魏佳宁, 等. 基于 OPNET 的机群数据链混合 TDMA 协议仿真 [J]. 系统仿真学报, 2022, 34(9): 1933 – 1940.

FU Y F, ZHANG N, WEI J N, et al. OPNET based simulation of hybrid TDMA protocol for helicopters datalink[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(9): 1933 – 1940.

[5] PARK J, BAEK H, LIM J. A dynamic TDMA scheme for UAV based relay in combat net radio networks[C]//2019 International Conference on Information Networking (ICOIN). Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2019: 290 – 295.

[6] DING H W, LI C, BAO L Y, et al. Research on multi-level priority polling MAC protocol in FPGA tactical data chain[J]. IEEE Access, 2019, 7: 33506 – 33516.

[7] 周虎. 数据链集成设计与应用研究 [J]. 现代导航, 2020, 11(1): 36 – 40.

ZHOU H. Research on design and application of data link integration[J]. Modern Navigation, 2020, 11(1): 36 – 40.

[8] 邹岩, 陶秋子, 张少卿, 等. 多平台航电系统综合可信度量方案研究 [J/OL]. 小型微型计算机系统: 1–7[2023-07-21]. <https://doi.org/10.20009/j.cnki.21-1106/TP.2022-0364>.

ZOU Y, TAO Q Z, ZHANG S Q, et al. Research on comprehensive credibility measurement scheme towards multi-platform avionics system [J/OL]. Journal of Chinese Computer Systems, 1–7[2023-07-21]. <https://doi.org/10.20009/j.cnki.21-1106/TP.2022-0364>.

(下转第 15 页)

[7] WU Y, ZHANG K, ZHANG Y. Digital twin networks: A survey[J]. *IEEE Internet Things*, 2021, 8(18): 13789 – 13804.

[8] SHEN X, GAO J, WU W, et al. Holistic network virtualization and pervasive network intelligence for 6G[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2021, 24(1): 1 – 30.

[9] 王红微, 杨鹏, 靳慧斌, 等. 基于数字孪生的航班保障预警系统[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(24): 9954 – 9962.

WANG H W, YANG P, JIN H B, et al. Flight guarantee early warning system based on digital twin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(24): 9954 – 9962.

[10] WANG G Q, TAN T. Airport taxiway conflict detection method based on network topology[C]//2020 IEEE

2nd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT). Weihai: IEEE, 2020: 176–181.

[11] GROSHEV M, GUIMARAES C, DE LA OLIVA A, et al. Dissecting the impact of information and communication technologies on digital twins as a service[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 102862–102876.

[12] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(1): 1 – 18.

TAO F, LIU W R, ZHANG M, et al. Digital twin five-dimensional model and application in ten fields[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 1 – 18.

(编校: 叶超)

(上接第 7 页)

[9] YU T, WANG T, CHEN H, et al. An integrated load balancing scheme based on SDN ASR algorithm[J]. *China Communications*, 2023, 20(3): 119 – 127.

[10] 赵志勇, 张洋, 刘锡国. 基于 SPMA 协议的数据

链信道负载统计算法[J]. *指挥与控制学报*, 2022, 8(2): 230 – 234.

ZHAO Z Y, ZHANG Y, LIU X G. Channel load statistic algorithm for data link based on SPMA protocol[J]. *Journal of Command and Control*, 2022, 8(2): 230 – 234.

(编校: 饶莉)