

空海自组网随机接入仿真研究

刘倬腾^{1,2}, 闫朝星², 付林罡², 李世宝¹

(1 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院 青岛 266580;

2 北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 针对无人机在远海远域协同任务过程中的空海信息协同共享需求, 提出了一种基于优先级传输的动态随机接入协议。首先, 通过设计高效集群组网信令保证集群测控通信自组网的遥测、遥控信息的稳定传输; 然后, 结合改进的 TDMA (时分多址) 组网时隙结构实现节点快速入网与动态时隙分配协议; 最后, 通过 OPNET (网络仿真技术软件包) 分析所设计的集群空海自组网系统的随机接入低时延、业务传输高吞吐量和端到端传输低时延性能。结果表明: 该组网信令下建网时间只需要 2~3 个飞控周期, 在 32 节点场景下节点完成随机 Aloha 入网时延平均不到 0.6 s, 改进的 TDMA 协议在端到端时延比传统 TDMA 协议降低 1/3。

关键词: 集群自组网; 随机接入; 动态 TDMA; 低时延

中图分类号: TN924.2 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2024)01-0047-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230911001

引用格式: 刘倬腾, 闫朝星, 付林罡, 等. 空海自组网随机接入仿真研究[J]. 遥测遥控, 2024, 45(1): 47-53.

Research on Random Access of Air-sea Ad-hoc Network

LIU Zhuoteng^{1,2}, YAN Chaoxing², FU Lingang², LI Shibao¹

(1. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Addressing the air-sea information collaboration and sharing requirements for UAVs in distant maritime operations, a dynamic priority-based transmission protocol is proposed for random access. Firstly, this protocol is designed to ensure stable telemetry and remote control information transmission within the cluster measurement and control communication ad-hoc network through efficient cluster networking signaling. Secondly, combines an improved TDMA network time-slot structure for fast node enrollment and dynamic time slot allocation. Finally, an OPNET network simulation is used to analyze the random access, low latency, high throughput, and low end-to-end latency performance of the designed cluster air-sea self-organizing network system. The results indicate that the network establishment time under this signaling scheme requires only 2-3 flight control cycles. In a scenario with 32 nodes, the average delay for nodes to complete random Aloha network access is less than 0.6 seconds. Additionally, the improved TDMA protocol reduces end-to-end latency by 1/3 compared to traditional TDMA protocols.

Keywords: Cluster Ad-hoc Network; Random access; Dynamic TDMA; Low latency

Citation: LIU Zhuoteng, YAN Chaoxing, FU Lingang, et al. Research on Random Access of Air-sea Ad-hoc Network[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(1): 47-53.

0 引言

随着国家远洋战略的开展, 海上活动日益频繁, 在远海远域一体化联合任务中, 空海自组网作为一种跨域协同技术, 将有效提高协同任务适应能力^[1]。伴随着信息技术的发展, 自组网的数据

传输速率和节点数量呈指数型增长, 传统的 MAC 层协议缺乏足够的灵活性, 难以满足实时的通信需求。MAC 协议决定网络中各个节点如何共享信道资源, 对自组网的性能有着不可忽视的影响, 因此如何设计高效的 MAC 协议已成为自组网技术的研究热点。

MAC 层所面临的问题包括突发业务高速率和低时延传输、多优先级支持等^[2]。此外, 在设计 MAC 协议时, 还需考虑节点的速度和动态分布等特性, MAC 协议直接影响到节点建网能力和时隙分配能力, 因此需要设计低开销的 MAC 协议以协调各节点的业务传输、网络资源接入、分配和调度^[3]。MAC 协议分为三类: 竞争类、分配类和混合类^[4], 竞争类协议的典型代表为 IEEE802.11 分布式协调功能 (DCF) 及其改进协议^[5,6], 这类协议通过载波侦听、控制帧和退避策略来避免数据包冲突并解决隐藏终端和暴露终端问题。但是在节点数目众多的情况下, 控制帧的多次握手会导致较长的端到端时延。CSMA/CD 作为另一种竞争协议, 其节点通过竞争获取信道访问权^[7], 如果发生冲突, 数据包会在随机退避时间后再次传输。因此这类协议在轻负载时时延较低, 但随着负载增加其性能会大幅下降。分配类的典型代表是时分多址 (TDMA) 协议^[8,9], 它将时间分为多个时隙结构, 而时隙结构又分为多个时隙。由于节点只能在被分配的时隙中传输数据, 因此 TDMA 协议能够有效降低数据包在通道的碰撞、提高系统的负载能力。但是固定 TDMA 协议的不足之处在于节点没有数据需要传输时仍会占用时隙资源, 当存在需要发送大量数据的节点, 该节点必须等待前面所有数据包传输后才能获取它的时隙。文献 [10] 在固定时隙分配的基础上提出了增加中断时隙来减少通信时延, 提高了数据传输速率。但是 TDMA 协议需要根据任务需求和节点预先分配时隙, 很难快速工作。对此, 本文提出一种基于优先级传输的动态 TDMA 协议, 该协议通过设计低开销组网信令与组网时隙结构, 利用时隙 Aloha 使节点快速入网, 能有效提高节点预分配时隙效率; 针对具有高优先级的数据包, 能够为其自适应分配时隙以此提高信道的利用率。最后通过 OPNET 仿真验证所设计的动态 TDMA 协议在时延、吞吐量等方面性能的优越。

1 空海通信链路与集群自组网

在无人机测控链路设计中, 为实现作用距离、传输速率等指标要求, 需要对空间传播损耗设计适当的发射功率和天线增益^[11]。此外, 无人集群组网的空海通信链路质量易受海况影响, 海况特征可通过风速、浪高、平均浪涌长度和平均浪涌时

间等参数来表示^[12]。此外还受天线高度和指向、天线增益和接收信号功率以及海面移动等因素影响。文献 [13] 研究的广义海上路径损耗指数模型, 考虑海洋干扰因素对传输损耗的影响其传输损耗公式为:

$$L(h, d, f) = L(d_0) + 10\alpha \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_f \quad (1)$$

式中, $L(h, d, f)$ 表示海浪高度为 h 、距离发射频率为 f 的发射机 d 处的信号路径损耗; $L(d_0)$ 为距离发射机 d_0 处的路径损耗。式中, α 定义为 $\alpha = (0.498 \log_{10}(f) + 0.793)h + 2$, X_f 表示均值为 0、标准差为 σ 的高斯随机变量, 其中 σ 表示为: $\sigma = (0.157f + 0.405)h$ 。由上式可见海上通信信道损耗受信号频率、海浪高度和传输距离的影响。在海况等级确定的情况下, 海浪最高高度处于正态分布, 因此当海浪的最高高度服从正态分布时, 海上信道传输损耗为随海浪高度变化的随机值^[14]。

本文研究的空海自组网系统其拓扑结构如图 1 所示, 包含有无人机节点、无人艇节点和地面站节点。地面站节点除了监控组网状态外, 同时也作为一个普通节点参与全对等无中心组网通信, 组网过程包括系统建网、节点入网、时隙请求分配、动态路由与网络重构等, 采用簇首机制维护全网链路状态。

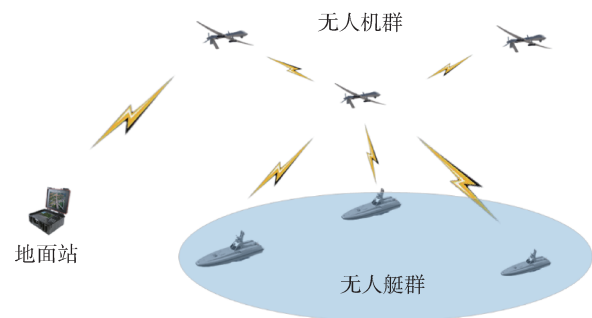


图 1 无人集群的空海自组网场景图

Fig. 1 Scene of unmanned cluster in the maritime self-organizing network

2 基于时隙 ALOHA 的动态 TDMA 自组网协议

2.1 一种集群网络高效组网信令

在空海组网系统中, 数据的高效可靠传输对于保证节点之间的通信起着至关重要的作用^[15]。综合考虑空海协同任务的具体通信需求, 本文提出

一种基于链路与时隙状态的高效组网信令，具体结构如图2所示。该组网信令区别于传统的TDMA时隙结构，将载荷与控制信令相结合，其中控制信令一般占用户时隙长度的2%~20%，“帧类型”依据节点处于不同组网阶段，分为入网请求帧、入网应答帧、时隙申请帧、时隙分配帧和中继请求帧等。在该网络信令及其组网协议下，每个时隙都可以在传输载荷数据的同时，通过“帧类型”与其他信令组合起来进行协议握手，而无须占用多个时隙传输控制信令。该机制减少了控制信令开销，保证了集群测控通信自组网的遥测、遥控信息在典型飞控周期 T 内稳定传输。



图2 无人集群自组网时隙内信令结构图

Fig. 2 Structure diagram of in-slot signaling in unmanned cluster self-organizing networks

2.2 时帧结构及协议流程

本文提出的动态TDMA协议时帧结构如图3所示，时帧 F_t 划分为四个子帧：簇首时隙、节点时隙子帧 F_n 、动态分配时隙子帧 F_r 和随机接入(RA)时隙子帧 F_a 。不同于传统的TDMA，为了充分利用信道资源，簇首节点会根据在网节点数动态调整子帧的时隙数，假设飞控周期为 T ，在网节点个数为 m 个，单个时隙长度为 t ，则一个飞控周期内含有的时隙数量 N_s 可表示为：

$$N_s = T/t \quad (2)$$

设RA时隙个数为 N_a ，则动态分配时隙子帧的时隙数 N_r 可表示为：

$$N_r = N_s - N_a - m \quad (3)$$

在无人集群自组网这类受到飞控周期严格约束，并进行遥测遥控信息传输与机间信息协同共享的应用中，一般设计节点时隙子帧 F_n 包含的时隙数与当前在网节点数一致，即所有节点入网后将保证至少有1个时隙可用。

在集群建网阶段，无人机节点组网设备开机后接收默认频点信号。若超过监听时间 T_l 未收到其他节点信息，判定不存在集群网络，则当前节点的节点类型设为簇首节点，同时以飞控周期 T 广播簇首信息；若在监听时间 T_l 内收到簇首节点信息，则在随机接入时隙子帧中 N_a 个RA时隙之一向簇首发送入网申请。

无人集群自组网主要的信令有：“节点类型”用于区分普通节点和簇首节点；“ID号”用于目的节点辨认消息来源；“目的地址”分为广播地址和单播地址；簇首节点通过“连接状态”和“时隙状态”维护全网链路。簇首节点的“连接状态”信令段将全网 M 个节点用 M 个比特表示，根据其在网内编号通过0/1标识指示是否在网。如此，其他节点可实时从簇首信令中获知本簇内组网节点数量。而普通节点通过时隙状态标识本节点向簇首节点申请的时隙，簇首节点将在下一个TDMA组网周期通过设置“帧类型”与“目的地址”对该节点进行时隙分配应答。

在节点入网阶段，为了网络可靠性需要约束入网节点通过向簇首节点申请才能入网、不可通过中继路由节点转发申请入网信息。因此，在收到簇首节点信息后，入网节点通过时隙ALOHA的方式在随机接入时隙子帧 F_a 向簇首发送入网请求帧、同时发送入网认证序列。簇首节点收到入网请求帧后，在“帧类型”标识为入网应答并回复入网应答帧，同时将节点时隙子帧 F_n 第一个可用时隙分配给入网节点，最后更新全网“连接状态”信令里的在网节点状态。

在数据传输阶段，节点在自己的时隙到来时从网络层缓存队列取出数据包发送。若缓存队列过于拥堵，节点向簇首发送时隙申请帧，如前所述信令设计中簇首将结合“时隙状态”与“帧类型”的时隙分配帧，动态地分配时隙子帧中第一个空闲时隙分配给该节点。此类时隙分配策略将尽可能把网络时隙顺序占用分配，从而减少了网络时隙碎片化分配现象。

2.3 动态时隙分配流程

动态时隙分配流程分为时隙申请、簇首分配、时隙释放。如图4所示，该方案不采用RTS/CTS等双向握手协议，而是引入了额外的控制帧，称为“聚合请求帧”。该控制帧包含 N_r 个缓冲区由簇首节点维护，用于临时存储在网节点发送的时隙申请帧。即图中所示的缓冲区用于为每个节点的时

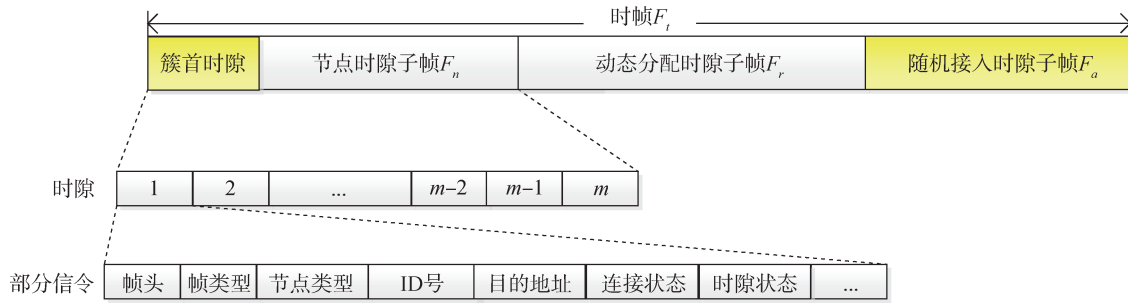


图3 集群组网动态TDMA时帧结构

Fig. 3 Dynamic TDMA frame structure for cluster networking

隙申请消息分配空间, 以防多个节点发送申请时隙消息时发送冲突或者延迟。因此, 我们将节点U1、U2和U3发送的时隙申请消息存储在聚合请求发送帧中, 当缓冲区已满或者在一定的等待时间后不再接收时隙申请消息。

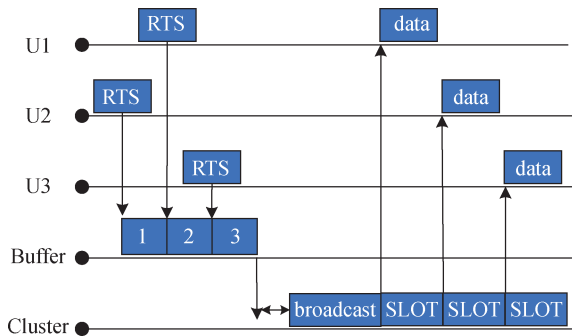


图4 动态时隙分配时序图

Fig. 4 Timing diagram of dynamic slot allocation

从图4还能看出, 簇首无人机在接收到聚合请求帧后, 会检查缓冲区中每个消息的优先级以及顺序, 然后通过广播的方式通知每个在网节点更新本地的时隙状态。场景中数据传输的顺序为U2、U1和U3, 但由于U1数据包的优先级高于U2的优先级, 所以到了下一个飞控周期, 节点U1先发送数据, 其次是U2。等待传输完成后, 簇首节点会在它的时隙中将动态时隙子帧清零, 所有节点可再次竞争缓冲区中的时隙。

3 空海集群自组网系统仿真分析

3.1 网络仿真模型与参数

空海集群自组网是由无人机移动终端自组形成的一个临时性自治系统, 其主要特点包括无中心性、多跳性和自组织性^[16]。通过OPNET网络仿真软件搭建所设计的空海组网系统, 如图5所示, OPNET Modeler提供三层建模机制: 网络模型构

建空海网络拓扑结构、节点模型搭建协议栈模型、进程模型实现协议算法。自组网仿真系统协议栈由应用层、网络层、MAC层、链路层与物理层构成。应用层负责收发业务数据; 网络层主要为路由重构等协议设计; MAC层实现簇首选择、节点入网退网、时隙分配、通信链路维护等功能; 物理层主要为信号调制和解调, 确保数据在节点之间的可靠传输和交换。

节点域参考协议栈, 由5个模块构成, gen模块产生ON/OFF过程的通信业务数据, 封装成数据包, 将数据包发送到动态TDMA模块, 其中ON状态的通信业务产生过程服从指数分布; 动态TDMA模块实现MAC层的功能; 无线发信机模块和无线收信机模块实现物理层无线链路的数据收发功能。进程域共有6个状态, idle状态、register状态和process状态完成节点的初始化工作; cluster状态负责应答监听节点入网申请以及动态分配空闲时隙; application状态完成普通节点发送入网申请; normal节点状态完成节点之间的应用层业务传输。

网络模型仿真场景为40 km×40 km的区域, 其中海上部署15艘无人艇, 空中部署17架无人机, 构成32节点的空海自组网。空海与空空组网节点之间最大通信距离为40 km, 飞行器高度设为600 m, 而海面节点之间不要求必须互联, 任务过程中主要通过无人机实现中继连接, 系统优先设定机载节点为簇首节点。系统设定信道带宽为1 MHz, 数据包大小为1 024 bit, 载荷数据链长度为832 bit, 控制信令192 bit占用18.75%开销。集群组网时隙长度为1.2 ms, 飞行器飞控周期为50 ms, 故动态TDMA时隙周期为50 ms。网络仿真时间为300 s, 具体设置见表1。首先对组网性能进行分析, 然后再对比动态TDMA协议和固定

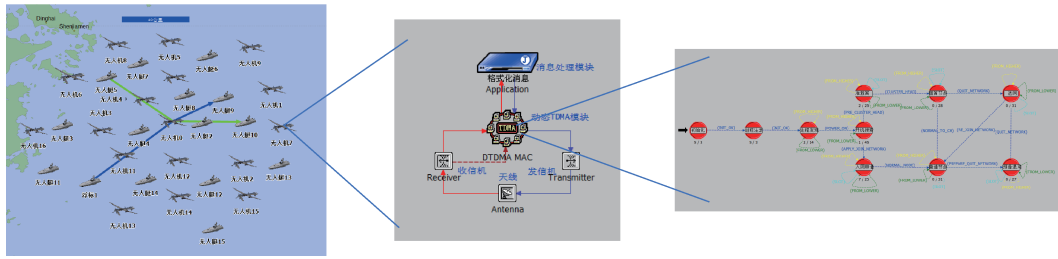


图5 无人集群空海自组网系统三层建模图

Fig. 5 Three-layers modeling diagram of unmanned swarm air-sea ad-hoc network system

TDMA协议的端到端时延和吞吐量性能。

表1 空海自组网基本仿真参数
Table 1 Basic simulation parameters of air-sea ad-hoc network

网络参数	参数值
仿真范围	40 km×40 km
无人艇节点数	15个
无人机节点数	17个
信道带宽	1 MHz
飞控周期 T	50 ms
时隙时长 t	1.2 ms
时隙数量 N_s	41
节点监听时间 T_r	0.4 s
控制信令长度	192 bits(18.75%)
包长	1 024 bits

3.2 组网接入时延性能分析

在无人集群空海自组网中，节点是否能实现快速组网是衡量自组网中协议性能的一项重要指标。通过OPENT对建网过程进行20次仿真，节点建网形成簇首时间见表2。设定建网阶段的监听时间 $T_r=0.4$ s，仿真表明所提出的组网信令建网协议从节点开机到形成簇首平均需要0.511 s，即节点结束监听时间后能在约2~3个飞控周期内迅速完成建网。

仿真中分别设定4、8、12、16、20、24、28、32个节点的组网场景，节点在0~2 s内随机开机，簇首建网后，待入网节点接收到簇首广播后立即结束监听，并在下一个RA时隙以 $P=0.1$ 的概率随机发起入网申请，入网冲突的节点以及未发起入网申请的节点将在下个飞控周期的RA时隙以概率 $P=0.1$ 再次发起申请，直至节点成功入网。仿真分析所设计的时隙Aloha随机入网机制在不同节点数下的平均入网延迟时间，统计结果如图6所示，从图中可以看出当待入网节点数为4时，平均入网时

延能达到1.6 ms。随着待入网节点数的增长，平均入网时延逐渐增大，当节点数达到32时，平均入网时延还能维持在0.6 s以内，由此可得，时隙Aloha在处理节点入网请求时表现出较好的性能，能实现较低的平均接入时延，有效提高系统组网能力。

表2 空海自组网节点建网时间
Table 2 Network construction time of air-sea ad hoc network nodes

仿真序列	建网时间/s	仿真序列	建网时间/s
1	0.488	11	0.455
2	0.460	12	0.456
3	0.473	13	0.478
4	0.587	14	0.453
5	0.618	15	0.450
6	0.642	16	0.561
7	0.466	17	0.486
8	0.550	18	0.627
9	0.550	19	0.519
10	0.452	20	0.455

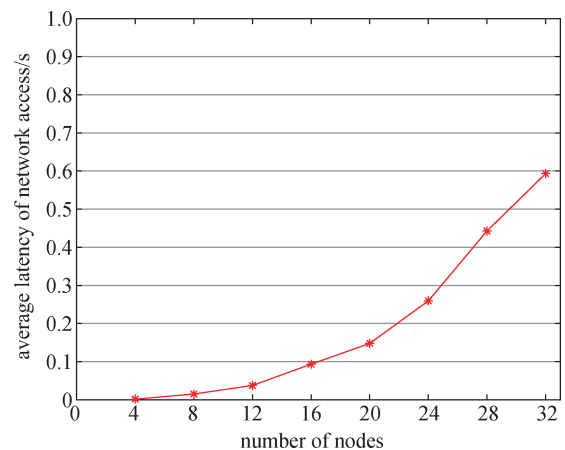


图6 不同节点数的平均入网时延

Fig. 6 Average network access delay for different number of nodes

3.3 集群组网吞吐量性能

仿真比较了无人集群组网动态 TDMA 与传统 TDMA 组网协议的系统吞吐量性能, 如图 7 所示, 在单个节点发包速率较低时, 两种协议的节点均在已分配的时隙传递数据包, 两者的吞吐量随发包速率提高而均匀增加; 当每个节点发包速率超过 840 bit 每 50 ms, 对应约 16.8 kbps 后, 因为动态 TDMA 协议能够动态申请多个动态分配时隙子帧的时隙, 其节点可传输的业务速率将大于 TDMA 协议, 仿真结果中系统吞吐量最大能接近于 680 kbps。因此, 所设计的动态 TDMA 协议相较于固定 TDMA 协议能有效提高系统传输信息的吞吐量。

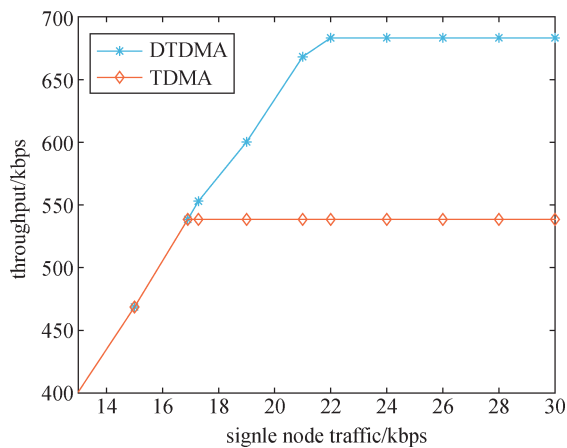


图 7 TDMA 和动态 TDMA 吞吐量对比

Fig. 7 Comparison of TDMA and dynamic TDMA throughput

3.4 端到端传输时延对比

仿真分析无人集群组网动态 TDMA 与传统 TDMA 组网协议的端到端时延性能, 图 8 为发包速率为 17 kbps 时 TDMA 协议与本文动态 TDMA 协议的端到端时延对比, 在节点完成入网后, 本文所设计协议的端到端时延要低于 TDMA 协议的 36 ms, 基本保持在 23 ms 以内, 能够维持通信传输稳定性和高效性。这是因为在设定业务量下, 动态 TDMA 协议的在网节点会在发送业务前向簇首节点申请动态分配时隙, 保障业务的正常传输, 降低排队时延, 进而降低数据的端到端时延。

4 结束语

针对无人集群在空海自组网系统中快速重构网络的需求, 本文提出一种基于优先级传输的低开销 TDMA 协议, 结合所设计的组网信令, 搭建

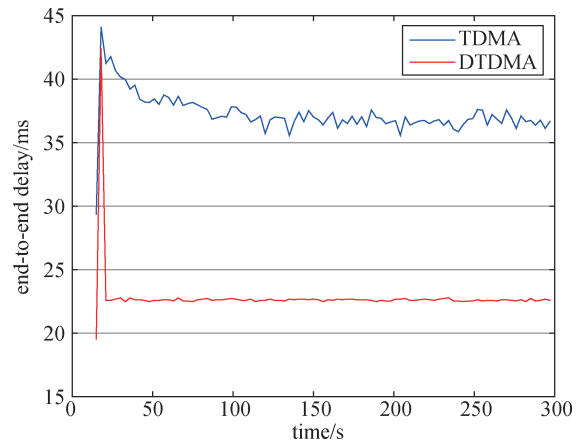


图 8 TDMA 和动态 TDMA 端到端时延对比

Fig. 8 Comparison of TDMA and dynamic TDMA end to end delay

OPNET 系统验证所提出协议的性能。结果表明: 相比于传统 TDMA 协议, 改进的 TDMA 协议在网络流量负载较大的情况下, 端到端时延和吞吐量上都有着较为显著的优势。

参考文献

- [1] 郑宏喆. 海上搜救仿真系统研究与实现[D]. 北京: 中国科学院大学.
- [2] 闫朝星, 付林罡, 郑雪峰, 等. 基于无人机自组网的空海一体化组网观测技术[J]. 海洋科学, 2018, 42(1): 21-27. YAN Chaoxing, FU Lingang, ZHENG Xuefeng, et al. Air sea integrated network observation technology based on UAV ad hoc network[J]. Marine Sciences, 2018, 42(1): 21-27.
- [3] 张卫东, 刘笑成, 韩鹏. 水上无人系统研究进展及其面临的挑战[J]. 自动化学报, 2020, 46(5): 847-857. ZHANG Weidong, LIU Xiaocheng, HAN Peng, et al. Progress and challenges of overwater unmanned systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(5): 847-857.
- [4] 赵佳明, 杨健, 郭肃丽. 一种基于公平接入的按需动态 TDMA 协议[J]. 信息技术, 2022(1): 90-95, 101. ZHAO Jiaming, YANG Jian, GUO Suli, et al. An on-demand dynamic TDMA protocol based on fair access[J]. Information Technology, 2022(1): 90-95, 101.
- [5] CHUA M Y K, YU F R, LI J, et al. Medium access control for unmanned aerial vehicle (UAV) ad-hoc networks with full-duplex radios and multipacket reception capability[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 62(1): 390-394.
- [6] VAN DEN BERGH B, VERMEULEN T, POLLIN S. Analysis of harmful interference to and from aerial IEEE

- 802.11 systems[C]//Proceedings of the First Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications for Civilian Use. 2015: 15-19.
- [7] JINHUI T, YEQUAN W, SHUFU D, et al. A feedback-retransmission based asynchronous frequency hopping MAC protocol for military aeronautical ad hoc networks[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(5): 1130-1140.
- [8] LI X, HU F, QI J, et al. Systematic medium access control in hierarchical airborne networks with multibeam and single-beam antennas[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 55(2): 706-717.
- [9] JANG H, KIM E, LEE J J, et al. Location-based TDMA MAC for reliable aeronautical communications[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(2): 1848-1854.
- [10] M LIU T, LU X, DOU Z. An optimal design of time division multiple access protocol for data link network[C]//2016 IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT). 2016: 158-161.
- [11] 彭继强, 梁少然. 无人机测控链路信道传播损耗模型研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(3): 47-52.
- PENG Jiqiang, LIANG Shaoran. The research on propagation loss model in the design of UAV data link[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(3): 47-52.
- [12] 任祥维, 魏兴云, 杨伟, 等. 深海水面通信信道传播特性分析[J]. 通信技术, 2021, 54(6): 1314-1319.
- REN Xiangwei, WEI Xingyun, YANG Wei, et al. Analysis of propagation characteristics of deep sea surface communication channel[J]. Communications Technology, 2021, 54(6): 1314-1319.
- [13] 朱佳. 基于WiMAX网状网络的海上通信系统构建与应用[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(12): 161-165.
- ZHU Jia. Implementation and practice of the communication system based on WiMAX mesh network on maritime[J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(12): 161-165.
- [14] TIMMINS I J, O'YOUNG S. Marine communications channel modeling using the finite-difference time domain method[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(6): 2626-2637.
- [15] 赵志峰, 郑少仁. Ad hoc网络体系结构研究[J]. 电信科学, 2001(1): 14-17.
- ZHAO Zhifeng, ZHENG Shaoren. Research on ad hoc network architecture[J]. Telecommunication Science, 2001(1): 14-17.
- [16] 张瑞杰, 彭琳琳, 付林罡, 等. 海上无人船自组网随机接入仿真研究[J]. 遥测遥控, 2020, 41(5): 29-35.
- ZHANG Ruijie, PENG Linlin, FU Lingang, et al. Random access technique for unmanned surface vehicle ad-hoc network[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41(5): 29-35.

[作者简介]

- 刘倬腾 1997年生, 硕士。
闫朝星 1985年生, 博士, 研究员。
付林罡 1982年生, 硕士, 研究员。
李世宝 1978年生, 硕士, 教授。

(本文编辑: 潘三英)