

海上无人船自组网随机接入仿真研究*

张瑞杰¹, 彭琳琳², 付林罡², 崔学荣³, 闫朝星²

(1 中国石油大学(华东)计算机科学与技术学院 青岛 266580

2 北京遥测技术研究所 北京 100076

3 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院 青岛 266580)

摘要: 海上无线通信具有传播环境复杂、多径干扰、信号衰减和时延较大等特点,传统的通信传输系统无法满足无人船之间、岸船之间稳定可靠的通信业务需求。针对海气界面组网观测中以无人船为核心的快速机动组网协同观测任务,研究基于信道感知的无人船自组网随机接入协议,采用优先级机制满足海上环境下网络负载较大时敏业务的低延迟传输需求,为无人船组网观测信息传递提供可靠性和实时性保证。终端采用一发多收机制提高数据传输成功率和网络系统吞吐量。最后,基于 OPNET 搭建仿真网络模型,从接入成功率、平均端到端时延、系统吞吐量等方面仿真分析所设计的随机接入协议性能。

关键词: 海上无线通信; 无线自组网; 随机接入协议; OPNET

中图分类号: TN924.2 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2020)05-0029-07

Random access technique for unmanned surface vehicle ad-hoc network

ZHANG Ruijie¹, PENG Linlin², FU Lingang², CUI Xuerong³, YAN Chaoxing²

(1. College of Computer Science and Technology, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

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

3. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Maritime wireless communication has the characteristics of complex propagation environment, multi-path interference, signal attenuation and time delay. The traditional communication transmission system can not meet the requirements of stable and reliable communication between unmanned surface vehicles and shore. Aiming at the cooperative observation task of fast maneuvering network with unmanned surface vehicles as the core in air sea interface network observation, a channel aware random access protocol for unmanned surface vehicles Ad-hoc network is studied. The priority mechanism is adopted to meet the low delay transmission requirements of time sensitive services with large network load in the marine environment, and provide reliable and real-time guarantee for the transmission of observation information of unmanned surface vehicles Ad-hoc network. At the same time, the network communication terminal adopts the mechanism of "one send and multiple receive" to improve the success rate of data transmission and the throughput of network system. Finally, the network model is built based on OPNET simulation tool, and the performance of the designed random access protocol is simulated and analyzed from the aspects of access success rate, average end-to-end delay and system throughput.

Key words: Maritime wireless communication; Wireless ad-hoc network; Random access protocol; OPNET

引 言

随着国家一带一路战略的开展,海上军事经济活动也越来越频繁,对信息保障提出了越来越高的要求。国内外发展了各类用于海气界面协同观测的通信系统,但是由于海洋环境复杂多变,通信链路不稳定,海上通信网络发展相对滞后。根据国际海事组织(IMO)要求,我国交通运输部建设了各海岸电台的通信设施,以满足“全球海上遇险与安全系统(GMDSS)”对通信业务的需要。为了保证航行安全,IMO 增补船载自动识别系统(AIS)采用速率受限的窄带通信系统通信^[1]。海洋卫星通信系

*基金项目: 航天科技集团青年拔尖人才计划(2018YFC1407200); 国家重点研发计划(2019YFC1510904)

收稿日期: 2020-07-05 收修稿日期: 2020-09-18

统, 如海事卫星系统 (INMARSAT)、铱星系统 (Iridium) 和北斗卫星导航系统 (BDS) 的通信设备昂贵且流量费用较高。挪威通信服务商 Tampnet 和华为技术有限公司联合开发的挪威 LTE 离岸海洋油井通信服务是全球首个将长期演进 (LTE) 技术与离岸通信结合的网络应用^[2]。大唐移动通信设备有限公司推出 TD-LTE 海上专网无线通信项目, 用来解决海上采油平台间的通信问题。5G 技术应用于海洋通信也逐渐得到关注。海上无线通信网络由无人船、无人机等移动节点构成多跳通信网络, 除了具有无线自组织网络 (Ad-hoc) 无中心化、动态拓扑、灵活稳定的特点, 其还具有节点移动性更强、网络拓扑动态变化的特征。无线自组网以分布式组网、灵活部署、自愈能力强等优势在军民各领域有了强烈的需求^[3]。

针对海上通信环境复杂多变、通信链路不稳定的特点, 本文研究基于信道感知的随机接入技术, 同时考虑了信道感知统计、优先级阈值设置以及退避时间设置的影响, 并通过 OPNET 软件搭建仿真环境, 比较信道感知随机接入协议和传统的载波监听多路访问 (CSMA) 协议。仿真结果表明, 所设计的随机接入协议可在海上通信环境下获得更优的性能。

1 海上通信网络分析

海气界面组网观测系统的网络拓扑一般由海基 (无人船、浮标、波浪滑翔器)、空基 (无人机、浮空器)、岸基 (基站、海上平台)、潜基 (水下潜航器) 等节点组成, 如图 1 所示。海基节点常通过无人船和部署在海面上的浮标搭载通信模块, 利用无人船的机动性、长时间驻留的能力实现组网; 空基节点利用长航时无人机的机动快速灵活响应, 与其他海上节点进行中继通信; 岸基节点利用海上搭建的油井等设施, 在既有的固定站点配置响应通信模块, 与海上各类节点进行通信。潜基节点主要是由水下潜航器搭载通信模块, 可以通过水声或激光等手段与海面浮标进行通信, 实现空海跨域通信。本文研究的海上自组网网络模型主要考虑海面部分, 网络节点之间可以通过无线电选择多跳链路进行通信, 还可以选择无人船、浮标、无人机、各类海上平台、空中指挥中心作为中继节点, 当有新节点加入或者有节点退出时, 网络自动进行配置。无人船自组网通信研究可支持海气界面机动平台快速组网观测应用。

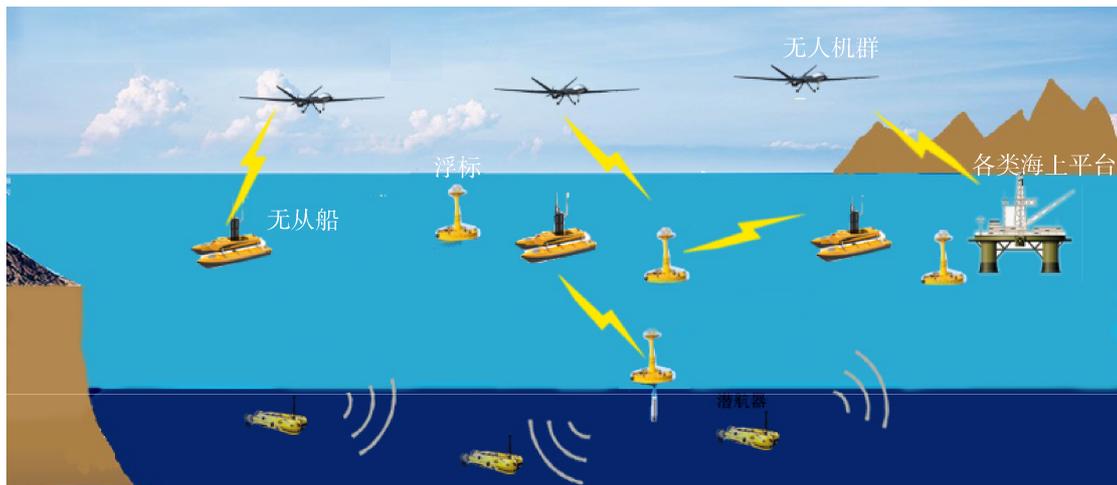


图 1 海上组网通信的空海岸潜网络模型

Fig. 1 Air-sea-coast-submarine network model for maritime network communication

海上自组网通信系统链路质量受不同海况下海浪运动影响, 不断改变天线高度、波束指向、天线增益和接收信号功率。海况特征可用风速、浪高、平均浪涌长度和平均浪涌时间表示^[4]。海上通信链路质量可能会由于海面移动而经历周期性恶化, 网络数据包的重传也可能失败。在发射器和接收器之间的直视路径上, 为避免处于第一菲涅耳区域内障碍物带来进一步衰减, 还需要架设适当高度的天线、

设定通信频率。例如,频率为 1000MHz、通信距离为 10km 时,平均天线高度超过 21m 才可等效自由空间传播损耗;当工作频率提高到 3GHz 时,所需平均天线高度可降低到 12m。在海上移动通信中,由于海况的变化,信道环境更为复杂。海上无线信道传播损耗模型常采用 Longley-Rice 模型^[5],对传播空间中由于地形的不规则性造成的中值传输损耗进行预测。Longley-Rice 模型中引入了介电常数和导电率特性,其适用范围为:频率范围 0.02GHz~40GHz、收发信机天线高度 0.5m~3000m、覆盖半径 1km~2000km、空气折射率 250Ns~400Ns。通过介电常数和导电率可以反映海水的介质特性,不规则地形参数可以反映海面的波浪起伏。所以,Longley-Rice 模型更适合海上环境移动通信信道预测,一般分为三种情况:视距传播损耗、绕射传播损耗和散射传播损耗。Longley-Rice 模型的传输损耗 L_b 为

$$L_b = 32.45 + 20 \lg d + 20 \lg f + L_{\text{ref}} \quad (1)$$

$$L_{\text{ref}}(d) = \begin{cases} \max(0, L_{\text{be}} + k_1 d + k_2 \lg d), & d_{\text{min}} \leq d < d_{\text{LS}} \\ L_{\text{bed}} + m_d d, & d_{\text{LS}} \leq d < d_x \\ L_{\text{bes}} + m_s d, & d \geq d_x \end{cases} \quad (2)$$

其中,传播距离 d 的单位为 km,无线电频率 f 的单位为 MHz, $d_{\text{min}} \leq d < d_{\text{LS}}$ 表示视距通信距离, $d_{\text{LS}} \leq d < d_x$ 表示绕射传播距离, $d_x \leq d$ 表示散射传播距离, L_{be} 、 L_{bed} 、 L_{bes} 分别表示自由空间下视距、绕射和散射的传播损耗值, k_1 和 k_2 为传播损耗系数, m_d 和 m_s 分别为绕射和散射损耗系数。

2 海上组网接入协议设计

2.1 海上自组网特点分析

典型的海上无线通信系统 AIS 车载自动识别系统由陆基岸台和车载电台构成,在船舶-船舶、船舶-海岸之间采集和交换船舶航行静/动态信息以及相关的安全信息,使船舶能够有效掌握周围船舶情况,有效地避免碰撞,提高交通效率和保障航行安全。AIS 系统工作于 156.025MHz~162.025MHz,信道带宽为 12.5kHz 或 25kHz,实时数据传输速率为 9.6kbps,传输距离约 20 海里。该系统采用自组织时分多址接入(SOTDMA)协议广播船舶信息给邻近船舶,采用了基于时隙的自组织预约方式,无需控制台干预,所有用户均通过 SOTDMA 协议自主选择所使用的时隙,实现对信道资源的分配和管理。在每一次发送报文中都预留下次发射的时隙信息,以便通知其它船舶不要占用这个时隙。船舶在 3 到 8 分钟之内会重新选择一次时隙,以此来避免可能产生的碰撞。海上无人船自组网是由车载移动终端自组织形成的一个无中心、多跳的临时性自治系统^[6],网络各节点通过自组织的方式完成信息的交互和接入。它的主要特点如下:

- ① 无中心:网络中没有中心节点,所有节点都是平等的,每个节点都可以随时加入或离开网络,不影响整个网络的运行,具有抗毁性。
- ② 多跳路由:每个节点由于发射功率的限制,覆盖范围有限,当要与覆盖范围之外的节点通信时,需要中间节点转发。
- ③ 自组织性:所有节点通过分层的网络协议和分布式算法协调自己的行为,网络的建立无需控制中心,不依赖于任何预先建设的网络设施,能够快速地、灵活地进行组网。

2.2 基于信道感知的随机接入

无线自组网媒体接入控制(MAC)协议可以分为基于竞争的接入协议和基于调度的接入协议。其中,基于调度的协议通常采用 TDMA、FDMA、CDMA 等信道访问方式,采用特定的调度算法将时间、频率、正交码映射为节点,网络节点只能使用其特定节点资源无冲突地访问信道。而基于竞争的接入协议在充分考虑竞争公平性和合理分配信道资源的情况下具有较低的算法复杂度,不需要提高硬件成本,在无线宽带网中具有广泛的应用。表 1 为经典的竞争类接入协议性能比较,传统接入协议应用到海上无人船组网通信时,需要研究速率、可靠性、吞吐量和时延等通信指标。

本文针对海上无人船自组网设计一种提供 QoS 保障以及高速低时延传输服务的随机接入协议。该

协议采用优先级机制保证海上环境下通信业务繁重时敏业务的低时延传输需求。同时, 通信终端采用一发多收机制提高数据成功率和网络系统吞吐量。如图 2 所示为基于信道感知的随机接入协议的协议流程图。

表 1 竞争类接入协议性能比较
Table 1 Performance comparison of random access protocol

协议名称	协议描述	特点
ALOHA ^[7]	用户一旦产生数据, 立即发送, 不进行其他多余策略。	轻负载时, 时延低, 负载高时成功率低, 吞吐量低, 时延高
CSMA ^[8]	每个节点在发送帧之前进行载波监听, 当信道没有被占用时, 才能发送帧。	冲突有所减少, 成功率增加, 竞争加剧时, 平均时延增加。
MACA ^[9]	采用 RTS-CTS-DATA 的帧交换方式完成帧的发送	发生冲突需要超时重发, 吞吐量低, 成功率高, 时延较高
MACAW ^[10]	采用 RTS-CTS-DS-DATA-ACK 的帧交换方式完成帧发送	传输成功率高, 吞吐量有所增加, 负载高时, 平均时延较高
FAMA ^[11]	允许一次 RTS-CTS 成功握手连续发送多个数据报文	传输成功率较高, 吞吐量较高, 负载高时, 平均时延较高

流程具体描述如下:

① 初始化或者空闲状态, 若有数据包从上层到达 MAC 层, 将该数据包插入对应优先级队列, 然后执行步骤②;

② 检查优先级队列 $Q_0 \sim Q_7$ 是否为空, 若均为空, 则执行步骤①, 否则, 选取最高优先级的数据包, 将其在队列中的等待时间 T_{wait} 与最大等待时间 T_{max} 比较, 若 $T_{wait} \leq T_{max}$, 则执行步骤③; 若 $T_{wait} > T_{max}$, 则数据包超时, 移除队列, 重新执行步骤②;

③ 将此时的信道占用统计值 X 与该数据包队列的阈值 T_{thd} 进行比较, 若 $X \leq T_{thd}$, 则从相应队列中删除该数据包并允许发送, 然后执行步骤②; 若 $X > T_{thd}$, 则根据业务优先级进行不同时间的退避, 退避结束后执行步骤②, 若在退避过程中, 有更高优先级的数据包到达, 则退避过程立即结束, 执行步骤②。

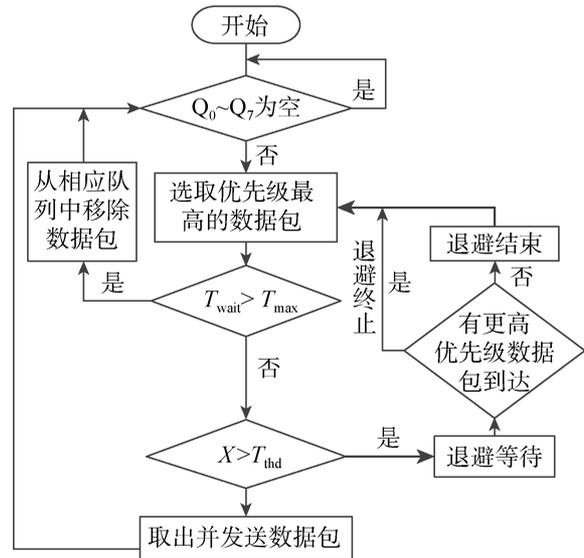


图 2 基于信道感知的随机接入协议流程
Fig. 2 Flow chart of random access protocol based on channel awareness

3 接入协议仿真与分析

3.1 网络仿真模型与场景

下面通过 OPNET 网络仿真工具考察所设计无人船组网接入协议。OPNET Modeler 提供三层建模机制: 进程模型实现协议算法、节点模型实现相应设备功能、网络模型构建网络拓扑。本文采用三层建模机制构建信道感知随机接入协议网络模型, 如图 3 所示。网络域仿真场景为在 $20\text{km} \times 20\text{km}$ 的海面上部署 20 艘无人船, 每艘无人船节点设置多组收发机, 实现协议中的一发多收功能。

节点域共分为 5 个模块: src 模块产生各种优先级的业务, 业务到达过程服从泊松分布; mac 模块根据信道感知随机接入协议接收其他节点的数据, 并将上层数据业务成功发送; dest 模块对时延、传输成功率和系统吞吐量等性能指标进行统计分析; tx 模块和 rx 模块对应 OPNET 的 14 个管道阶段, 实现物理层的发送和接收功能。仿真中无线信道参考式 (1) 所述海上移动通信信道损耗模型。

进程域共有 7 个状态, 实现信道感知随机接入协议: init 初始状态完成无人船的初始化工作; idle

空闲状态等待上层/下层产生的流中断或者统计负载时产生的自中断,当下层有数据包到达时,进入 low 状态处理数据包,将数据包传递到 dest 模块,当上层有业务流到达时,进入 high 状态,按照数据包优先级插入到队列中。同时,该状态周期性地产生自中断以便统计信道负载; aware_process 状态按照图 2 流程处理数据包,当允许发送时进入 send 状态成功发送,否则进入 backoff 状态退避。

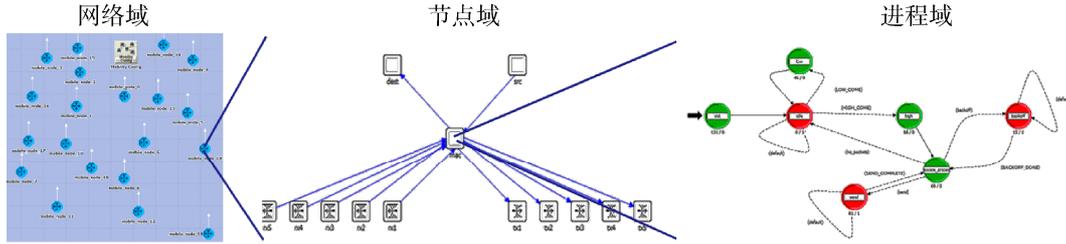


图 3 无人船自组网仿真的三层建模模型

Fig. 3 Three layer modeling model for unmanned surface vehicles Ad-hoc network

上述网络仿真采用网络吞吐量、平均端对端时延、分组接入成功率、服务质量等性能指标评估信道感知随机接入协议的性能。服务质量体现在不同优先级数据的性能。平均端对端时延 T_d 为平均每个分组从产生到成功被接收端接收所需要的时间:

$$T_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{recv_i} - T_{gen_i}) \quad (3)$$

其中, n 为成功接收的包数, T_{recv_i} 为第 i 个包的接收时间, T_{gen_i} 为第 i 个包的产生时间。

网络吞吐量 S 为单位时间内在接收端成功接收的比特数:

$$S = N_{bit} / T_{total} \quad (4)$$

其中, N_{bit} 为成功接收的比特数, T_{total} 为成功接收 N_{bit} 比特所需要的时间。

分组接入成功率 P_p 是指网络中成功传输的数据包量与网络中产生的数据包总量的比值:

$$P_p = N_{pkt} / N_{total} \quad (5)$$

其中, N_{pkt} 为成功接收的数据包数量, N_{total} 为产生的总数据包数量。

设置的仿真参数如表 2 所示,共 8 种优先级的业务 0 号~7 号。其中,0 号业务优先级最高,7 号业务优先级最低。全网所有节点业务源数据包到达服从泊松分布。使用 Random Waypoint (RWP) 移动模型配置无人船的移动状态,运动速度 0~20m/s。仿真中,每节点的发包速度分别为 100pkts/s、200pkts/s、300pkts/s、400pkts/s、500pkts/s,对应网络负载分别为 2Mbps、4Mbps、6Mbps、8Mbps、10Mbps,CSMA 协议占用信道带宽为 2MHz,而基于信道感知随机接入协议采用一发多收机制,共占用 5 个 2MHz 信道,随机选择 1 个信道发送数据。

3.2 网络仿真结果分析

下面对基于信道感知随机接入协议和 CSMA 协议的吞吐量 S 、分组接入成功率 P_p 、平均端对端时延 T_d 以及服务质量进行仿真比较。两种协议的吞吐量如图 4 所示,基于信道感知的新算法协议采用了信道感知统计控制以及优先级控制策略,其网络吞吐量随着发包速率的加快而逐渐增加并稳定在 2.1Mbps,而 CSMA 协议网络吞吐量随着系统发包速率的逐渐加快而增加,从网络负载的峰值吞吐量 1Mbps 后逐渐降低。图 5 给出了基于信道感知的随机接入协议分别在优先级 0、2、4、6 的吞吐量。由于基于信道感知的随机接入协议采用优先级控制策略,优

表 2 无人船自组网仿真参数

Table 2 USV Ad-hoc network simulation parameters

网络参数	数值
场景	20km×20km
节点数	20
信道速率	2Mbps
包长	1024bit
信道统计窗口大小	2ms
最大等待时间	20ms
发包速度	0~500pkts/node/s
优先级业务占比	各占 1/8

先发送高优先级数据包, 使得高优先级业务 0 和 2 的吞吐量随着网络负载的增加而逐渐增大, 而低优先级业务 4 和 6 的数据包为了保障高优先级数据包的发送被阻塞在低优先级队列中, 充分体现了服务质量上的差异。

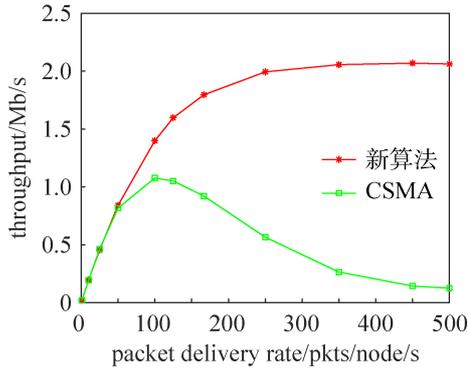


图 4 随机接入协议总吞吐量

Fig. 4 Total throughput of RA protocols

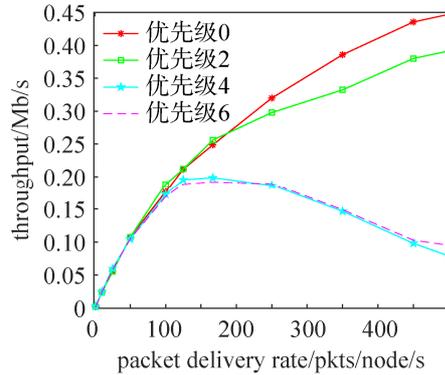


图 5 不同优先级的吞吐量

Fig. 5 Throughput of different priorities

分组接入成功率与负载关系如图 6 所示, 新算法基于信道感知随机接入协议采用优先级控制策略, 随着系统发包速率的加快, 不同优先级分组之间的接入成功率差距逐渐拉大。CSMA 协议由于只判断信道状态决定是否接入信道, 随着系统发包速率的加快, 分组接入成功率持续下降, 且低于基于信道感知随机接入协议的成功率。

图 7 比较了两种协议的平均端到端时延。新算法基于信道感知随机接入协议采用优先级控制策略, 优先发送高优先级数据包, 当发包速率逐渐加快时, 为了保障高优先级数据包的发送, 低优先级数据包会被阻塞在低优先级队列中, 导致低优先级平均端到端时延随着发包速率加快迅速增大。其中, 最高优先级分组平均端到端时延始终小于 1ms, 而 CSMA 协议的分组平均端到端时延随着发包速率的加快而逐渐增加接近 2ms。

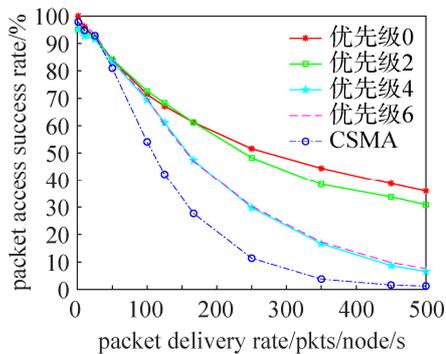


图 6 随机接入协议的分组接入成功率

Fig. 6 Packet access success rate of RA protocols

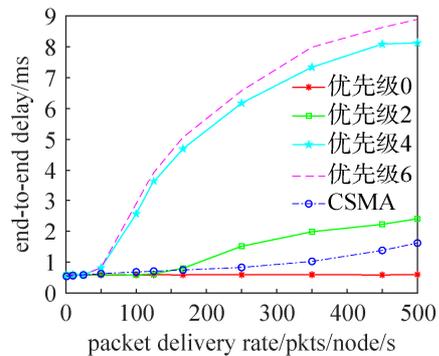


图 7 随机接入协议的平均端到端时延

Fig. 7 Average end-to-end delay of RA protocols

4 结束语

海上无线通信环境复杂, 传统的通信系统传输速率较低、通信质量较差, 无法满足无人船之间、岸船之间稳定可靠的通信业务需求。针对以无人船为核心的组网协同观测任务, 研究一种基于信道感知的无人船自组网随机接入协议, 采用优先级机制确保遇险报警信息等紧急信息可靠传输。同时, 一发多收机制提高了传输成功率和网络吞吐量, 缓解了海上通信信道拥挤的问题。通过 OPNET 仿真对比, 所设计接入协议的性能明显优于传统的 CSMA 协议, 更适用于海上环境。

参考文献

- [1] 夏明华, 朱又敏, 陈二虎, 等. 海洋通信的发展现状与时代挑战[J]. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(6): 677–695.
XIA Minghua, ZHU Youmin, CHEN Erhu, et al. Development status and challenges of marine communication[J]. Scientia Sinica Informationis, 2017, 47(6): 677–695.
- [2] 蒋冰, 郑艺, 华彦宁等. 海上应急通信技术研究进展[J]. 科技导报, 2018, 36(6): 28–39.
JIANG Bing, ZHENG Yi, HUA Yanning, et al. Research progress of maritime emergency communication technology[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(6): 28–39.
- [3] 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, FUN 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.
- [4] 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.
- [5] 仪青帝. 海域电磁波传播模型研究[D]. 海口: 海南大学, 2015.
YI Qingdi. Research on electromagnetic wave propagation model of sea area[D]. Haikou: Hainan University, 2015.
- [6] 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.
- [7] 李志慧, 刘中常, 郭戈. 时隙 ALOHA 协议下的网络化控制系统协同设计[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(7): 1122–1129.
LI Zhihui, LIU Zhongchang, GUO Ge. Control communication co-design for networked control systems with slotted ALOHA protocol[J]. Control Theory and Applications, 2019, 36(7): 1122–1129.
- [8] WANG X, CHONG P H J, LEONG W Y. Performance comparison of CSMA/CD, CSMA/CA, CSMA/RI, CSMA/PRI and CSMA/PR with BEB[C]//5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2010: 15–17.
- [9] LIU J, WANG J. A MACA-based collision avoidance MAC protocol for underwater acoustic sensor networks[C]// IEEE/OES China Ocean Acoustics, 2016: 1–4.
- [10] YUAN F, WANG S, LIN B, et al. Research of the multiple access protocol for underwater acoustic networks based on OPNET[C]//Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, 2010: 29–31.
- [11] CASARI P, TOMASI B, ZORZI M. A comparison between the Tone-Lohi and Slotted FAMA MAC protocols for underwater networks[C]//Proceedings of the Oceans, 2008: 1–8.

[作者简介]

张瑞杰 1994年生, 硕士在读, 主要研究方向为计算机网络应用。

彭琳琳 1994年生, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为自组网软件设计仿真。

付林罡 1982年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为航天测控通信系统。

崔学荣 1979年生, 博士, 教授, 主要研究方向为水面/水下跨域通信及组网。

闫朝星 1985年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为航天信息网络。