

# 控制与决策

Control and Decision

## 速率自适应的海面物联网跨层机会传输协议

赵瑞琴, 张东健, 全豪, 刘创源, 王海燕

引用本文:

赵瑞琴, 张东健, 全豪, 等. 速率自适应的海面物联网跨层机会传输协议[J]. *控制与决策*, 2025, 40(1): 180–186.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0528>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于聚类簇结构特性的自适应综合采样法在入侵检测中的应用

Toward intrusion detection via cluster structure-based adaptive synthetic sampling approach

*控制与决策*. 2021, 36(8): 1920–1928 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1672>

#### 基于改进GNG算法的燃煤锅炉数据动态特征分析与控制

Dynamic characteristics analysis and control of coal-fired boiler based on improved GNG algorithm

*控制与决策*. 2021, 36(8): 1855–1861 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1343>

#### 区分交通流模式的混合服务路口信号控制策略

Signal control strategies of mixed service intersections to discriminate traffic flow patterns

*控制与决策*. 2021, 36(6): 1509–1515 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1520>

#### 基于自适应混合核典型变量分析的工业过程质量相关故障检测

Quality-related fault detection for industrial processes based on adaptive mixed kernel canonical variable analysis

*控制与决策*. 2021, 36(4): 801–807 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0690>

#### 基于云模型的煤矿安全大数据多粒度表示方法及应用

Multi-granularity representation method of big data in coal mine safety based on cloud model and its application

*控制与决策*. 2021, 36(10): 2359–2368 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0325>

# 速率自适应的海面物联网跨层机会传输协议

赵瑞琴<sup>1,2†</sup>, 张东健<sup>1,3</sup>, 全豪<sup>1</sup>, 刘创源<sup>1</sup>, 王海燕<sup>1,4</sup>

(1. 西北工业大学 航海学院, 西安 710072; 2. 海洋声学信息感知工业和信息化部重点实验室(西北工业大学), 西安 710072; 3. 西北工业大学 国家卓越工程师学院, 西安 710072; 4. 陕西科技大学 电子信息与人工智能学院, 西安 710071)

**摘要:** 海面物联网在海洋观测、海域监测等应用中发挥着重要作用. 复杂动态海洋环境造成海洋网络链路状态、链路质量的时变特征, 且其给海面物联网带来了严峻挑战, 为此, 将物理层自适应数据速率、媒体访问控制(MAC)层载波侦听多址接入与网络层机会路由联合进行跨层设计, 提出速率自适应海面物联网跨层传输协议, 通过3次握手机制机会性选择最佳转发结点并基于动态信噪比实现传输速率实时自适应调整, 旨在提高动态复杂海洋环境下海面物联网的稳健性. 陆地和湖上试验结果表明, 所提协议在数据包交付率、能耗与时延方面性能优异, 可为复杂动态海洋环境中海面物联网数据的高效传输提供重要的技术途径.

**关键词:** 海洋; 物联网; 机会路由; 网络; 速率自适应; LoRa; 海洋链路

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0528

引用格式: 赵瑞琴, 张东健, 全豪, 等. 速率自适应的海面物联网跨层机会传输协议[J]. 控制与决策, 2025, 40(1): 180-186.

## Rate-adaptive cross-layer opportunistic transmission for ocean IoT

ZHAO Rui-qin<sup>1,2†</sup>, ZHANG Dong-jian<sup>1,3</sup>, QUAN Hao<sup>1</sup>, LIU Chuang-yuan<sup>1</sup>, WANG Hai-yan<sup>1,4</sup>

(1. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Key Laboratory of Ocean Acoustics and Sensing (Northwestern Polytechnical University), Ministry of Industry and Information Technology, Xi'an 710072, China; 3. National College of Elite Engineer, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 4. School of Electronic Information and Artificial Intelligence, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** The ocean Internet of Things (IoT) has played a crucial role in ocean observation and sea area monitoring applications. The complex and dynamic marine environment leads to time-varying characteristics of ocean network links, posing significant challenges to the ocean IoT. Therefore, a rate-adaptive cross-layer opportunistic transmission (RA-CLOT) protocol is proposed, which integrates physical layer adaptive data rate, MAC layer carrier sense multiple access, and network layer opportunistic routing together. This protocol opportunistically selects the best forwarders through a three-way handshake mechanism, and adjusts the transmission rate based on the link dynamic signal-to-noise ratio, aiming to enhance the robustness of the ocean IoT in the complex and dynamic marine environment. Experimental results from land and lake trials demonstrate that the proposed protocol achieves a high packet delivery ratio with reduced energy consumption and latency under a complex and dynamic network environment.

**Keywords:** ocean; Internet of Things; opportunistic routing; network; rate adaptation; LoRa; ocean link

## 0 引言

海洋物联网因具备获取多元、综合、实时的海洋信息的强大能力, 成为备受瞩目的研究领域. 作为海洋物联网的水面部分, 由海面浮标、无人船/艇、水面舰船等组成的海面物联网, 为海洋观测、海域监测等典型应用提供了重要的技术手段<sup>[1]</sup>. 海洋无线自组网采用完全自治的分布式组网策略, 相比5G/6G网

络具有更好的自治性和灵活性, 适用于远离陆地的海域, 被视为未来海面物联网中的关键技术<sup>[2]</sup>. 复杂恶劣的海洋环境对海面物联网提出了诸多挑战: 海面环境和波浪起伏引起严重多径效应量, 波浪和潮汐等引起链路质量的时变性与动态网络拓扑<sup>[3-5]</sup>, 使已有指定路径的传输策略难以应对<sup>[6-11]</sup>. 因此, 需要针对动态复杂海洋环境下的海面物联网设计高效稳健的

收稿日期: 2024-05-01; 录用日期: 2024-08-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62071385, 62031021).

责任编委: 闫敬.

†通讯作者. E-mail: rqzhao@nwpu.edu.cn.

自组网协议。

路由协议是实现无线自组网数据的稳健传输的关键,如动态源路由协议(DSR)<sup>[12-13]</sup>已被广泛应用于无线自组网,同时低能耗路由协议<sup>[14-15]</sup>也得到了广泛关注。相较传统的路由协议,机会路由及其跨层设计机制在无线自组网的动态环境中通常能够获得更高的数据交付率<sup>[16]</sup>。跨层机会传输协议OppCast因在动态车联网中对数据包的稳健投递能力而获得广泛关注<sup>[17-18]</sup>。文献[18]提出了一种基于延迟重传与预期冗余概率的机制以抑制冗余转发;文献[19]提出了冲突和中断双容忍的水声网络MAC与机会路由跨层传输协议,通过机会路由策略解决信道时变空变导致的随机路由中断、路由空洞以及传输碰撞;文献[20]给出了基于软件定义网络和软件定义无线电的海面物联网跨层组网框架,以提升组网效率。

复杂动态海洋环境造成海洋网络链路状态和质量的时变特征,以及其形成的时变动态网络拓扑,给海面物联网高效稳健自组网带来了严峻的挑战。为此,本文提出速率自适应的海面物联网跨层机会传输协议,旨在提升复杂海洋环境下海面物联网的稳健组网能力,并通过陆地和湖上试验验证所提协议在动态

时变信道环境下的组网性能。

## 1 速率自适应的海面物联网跨层机会传输协议

针对复杂动态的海洋环境造成海洋网络链路状态、链路质量的时变特征及其给海面物联网高效组网带来的严峻挑战,本文将速率自适应数据传输、载波侦听多址接入与机会路由联合进行跨层设计,提出速率自适应海面物联网跨层传输(RA-CLOT)协议。RA-CLOT协议利用机会路由机制,绕过链路质量不佳的路径,自适应选择具有鲁棒链路的最佳转发结点;在此基础上,转发结点依据接收到的MAC层控制包的信噪比自适应选择最佳传输速率。所提出的速率自适应跨层机会传输机制可在海洋链路随机中断的网络下,实现时变海洋信道下海面物联网中数据包的低能耗、高可靠的端到端投递,旨在为复杂动态海洋环境中海面物联网数据的高效稳健传输提供重要的技术途径。

### 1.1 RA-CLOT协议包格式设计

RA-CLOT协议中定义了4种包:邻居发现(HELLO)包、通信机会广播(COB)包、信道确认响应(CAR)包和数据(DATA)包,如图1所示。

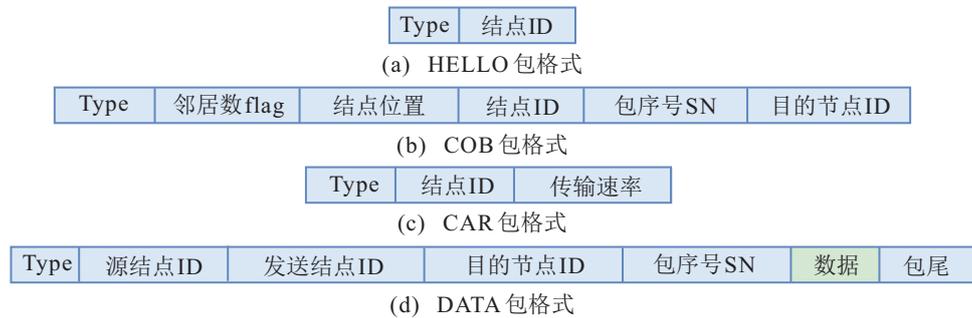


图1 RA-CLOT协议的包格式

在图1中:HELLO包、COB包和CAR包等控制包因其长度较短以最低速率发送;考虑到确定通信硬件配置下,链路速率与传输可靠性是一对矛盾,为了实现海面链路时变动态环境下的稳健传输,DATA包基于链路实时信噪比采用不同链路速率发送,即基于速率自适应机制完成DATA包的传输。下面分别对4种包进行介绍。

**HELLO包:**HELLO包用于结点广播自身的存在信息。若一定时间内未收到某邻结点的HELLO包,则将该结点从本地邻居结点集中删除。

**COB包:**需要发送数据的结点会通过COB包向周围结点广播其数据发送需求。COB包中包含邻居数flag、发送结点位置、本结点ID与目的结点ID。收到COB包的结点依据接收信噪比与COB包内的信

息来判断自身转发条件的优劣。

**CAR包:**收到COB包的结点基于接收信噪比,可通过CAR包告知发送结点合适的DATA传输速率。RA-CLOT协议基于COB包与CAR包的两次握手,不仅完成了机会路由转发结点的转发声明,而且实现了DATA包传输速率的自适应选择。

**DATA包:**携带需要传输的数据载荷的数据包。

### 1.2 RA-CLOT协议描述

RA-CLOT协议采用基于接收端的速率自适应机制,基于3次握手机制(COB-CAR-DATA)完成海洋物联网跨层机会传输协议设计,通过长度较短的COB包和CAR包交互,结合速率自适应机制根据实时的信噪比动态调整传输速率,保证在良好链路状况下尽可能提高DATA传输速率,从而降低能耗和端到

端时延,在信道质量较差时,降低DATA传输速率以提高传输成功率.

结点有DATA包需要发送时,在信道空闲的条件下通过向邻域内广播COB包来告知自身的发送需求.为了保证DATA包在每跳传输中的稳健性,避免因邻居结点数量少且部分链路中断导致DATA包无法被投递至下一跳,该结点依据其邻居结点数量对其COB包的邻居数flag进行赋值:若邻居结点数量小于阈值 $N_b$ ,则COB包中的邻居数flag置1;否则置0.当邻居数flag置1时,所有收到该COB包的结点均可以参与此次转发;当邻居数flag置0时,仅有比发送结点距离目的结点更近的接收到该COB包的结点具有转发资格.通过对COB包中邻居数flag的设置,可以将候选的转发结点的数量控制在一个合理的范围内,不仅有效抑制因为转发结点过多造成的应答控制包冲突,而且在一定程度上解决了因邻居数量较少造成的低转发成功率的问题.

接收到COB包且具有转发资格的结点,依据接收信噪比、自身位置、剩余电量、信噪比、邻居数信息来计算其转发优先级.这些参数能够有效表达该结点的转发能力,使RA-CLOT协议基于接收方的机会路由机制在多个候选转发结点中选择出最优的转发结点.转发结点依据计算得到的转发优先级进行长度为 $T_{pi}$ 的延时,结点的优先级越高,延时 $T_{pi}$ 越小.若在延时过程中收到其他结点发送的CAR包,则表明优先级更高的转发结点已经获得转发权限,于是本地转发结点放弃对DATA包的转发;否则,在延时结束后向发送结点回复CAR包.

在图2所示的场景中, $F_3$ 结点作为转发结点发送数据, $F_4$ 、 $F_5$ 为 $F_3$ 的邻居结点;由于天气原因, $F_5$ 的结点的信道质量比 $F_4$ 结点差,这导致其转发优先级小于 $F_4$ 结点.

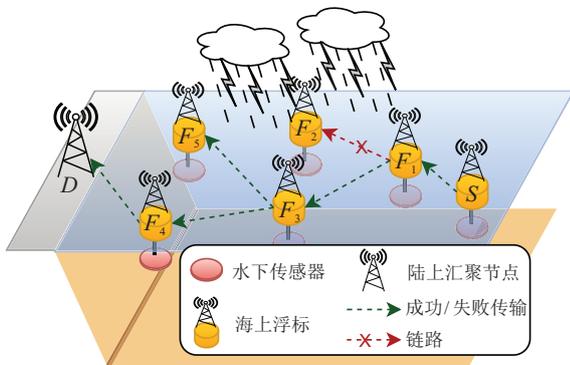


图2 海面物联网

如图3所示, $F_5$ 发送CAR的延时 $T_{p5}$ 大于 $F_4$ 结点的发送CAR延时 $T_{p4}$ , $F_5$ 结点在接收到 $F_4$ 结点先发送的CAR后被抑制转发.如果接收结点就是

DATA包的目的结点,则始终拥有最高的优先级,其将不进行延时( $T_{pi} = 0$ )并直接发送CAR包对发送结点进行应答.

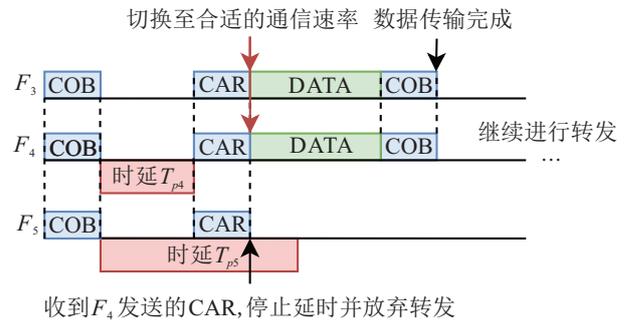


图3 COB-CAR-DATA三次握手机制

转发结点在收到COB包时,依据接收信噪比和物理层所采用的调制方式计算得出该链路的最佳传输速率,并将该信息通过CAR包告知发送结点.发送结点收到CAR包后自适应调整传输速率进行DATA包的发送.转发结点在收到DATA包后,无需向发送结点发送ACK包.因转发结点会继续对DATA包进行下一跳转发,其发送COB包便作为原发送结点对DATA包成功传输的确认.这里的COB包不仅是转发结点继续启动下一跳的转发,还构成了对上一跳传输的隐式确认声明,显著减小时延并提升信道利用率.RA-CLOT协议通过COB-CAR-DATA三次握手机制,以低开销、低时延的方式建立了稳健机会路由、随机接入信道预约和物理层速率自适应调整的跨层传输机制,为复杂动态的海洋环境造成海洋网络链路状态、链路质量的时变下海面物联网DATA低能耗、高可靠的端到端投递提供了重要的技术途径.

RA-CLOT协议中结点发送和接收DATA包的流程如算法1、算法2所示.

算法1 RA-CLOT协议—发送DATA包

- 1) 结点*i*需要发送DATA包
- 2) if  $n < N_b$ , 邻居数flag = 1
- 3) else 邻居数flag = 0
- 4) 将邻居数flag、本结点位置、本结点ID、DATA包序号SN、目的结点ID分别写入COB包对应的域
- 5) 信道空闲时发送COB包
- 6) if在 $T_{CAR}$ 内接收到CAR包,跳至8)
- 7) else跳至10)
- 8) 取CAR包中的最优传输速率信息
- 9) 基于最优传输速率发送DATA包
- 10) end

在算法1和算法2中: $n$ 为结点自身的邻居结点数量; $T_{CAR}$ 、 $T_{COB}$ 分别为等待CAR、COB应答的最大时间; $d_{id}$ 、 $d_{jd}$ 分别为结点*i*、*j*到目的结点*d*的距离; $T_D$ 为接收DATA的最大等待时间,若超过这个时间

**算法2** RA-CLOT协议——接收DATA包

- 1) 结点  $j$  接收到来自结点  $i$  的 COB 包
- 2) if  $D_{SN} = 1$ , 跳至 18)
- 3) if 结点  $j$  为目的结点, 跳至 12)
- 4) if 邻居结点数量  $n \leq 1$ , 跳至 18)
- 5) else if 邻居数 flag = 0, 结点  $j$  进入转发候选集
- 6) else if  $d_{i,d} \geq d_{j,d}$ , 结点  $j$  进入转发候选集
- 7) else 跳至 18)
- 8) if 结点  $j$  是转发候选集的一员, 计算延时  $T_{pi}$
- 9) while 在延时  $T_{pi}$  中 do
- 10) if 收到其他 CAR 包, 放弃转发并跳至 18)
- 11) end while
- 12) 基于接收 COB 包信噪比得出最优传输速率
- 13) 将最优传输速率写入 CAR 包的传输速率域
- 14) 发送 CAR 包, 令  $D_{SN} = 1$
- 15) if 在  $T_D$  内接收到对应的 DATA 包, 跳至 16)
- 16) if 结点  $j$  为目的结点, 向发送结点回复 COB 包
- 17) else 执行算法 1
- 18) end

未收到 DATA, 则认为发生丢包;  $D_{SN}$  用于避免同一个结点对 DATA 包的重复处理, 当对 DATA 包处理一次后, 结点本地将  $D_{SN}$  置 1.

**1.3 基于转发优先级等待时间  $T_{pi}$  的计算**

设变量  $O_{pi}$  为结点的转发优先级,  $O_{pi}$  的计算为

$$O_{pi} = \frac{Q_{SNR}}{2} \left( E_i + \frac{n_i}{n_{max}} \right), \quad (1)$$

其中  $Q_{SNR}$  为归一化 SNR. 基于结点接收到 COB 包的接收信噪比 SNR 取值区间为 (0, 1], 采用下式计算:

$$Q_{SNR} = 10^{\left( \frac{SNR - SNR_{max}}{10} \right)}. \quad (2)$$

其中:  $Q_{SNR}$  反映链路传输的信道质量优劣,  $SNR_{max}$  为理想信道条件下结点的最大接收信噪比.

考虑到海洋链路的动态时变特性, 接收信噪比是重要因素. 为此, 在选择转发结点时将  $Q_{SNR}$  设置为式 (1) 所示的转发优先级中的乘性因子. 同时参加  $O_{pi}$  计算的参数还有: 结点电池剩余电量百分比  $E_i$ 、结点拥有的邻居数量  $n_i$ 、结点所能拥有的最大邻居数量  $n_{max}$ . 结点电池剩余电量百分比  $E_i$  越低, 其转发优先级越低, 这样可以保证各结点能量均匀消耗, 防止某个结点因为传输次数过多而过早耗尽电量. 结点拥有的邻居数量  $n_i$  越大, 代表其下一跳能够成功转发 DATA 包的概率越高, 因此其转发优先级也越高.

转发优先级  $O_{pi}$  与延时  $T_{pi}$  呈反比关系, 结点的  $O_{pi}$  越高, 其发送 CAR 的延时  $T_{pi}$  越小. 一般而言, 低优先级的转发会被高优先级的转发结点抑制. 然而, 若两个转发结点的优先级相近, 则有可能导致 CAR 包碰撞. 为此 RA-CLOT 协议采用下式计算延时:

$$T_{pi} = T_C [n(1 - O_{pi})]. \quad (3)$$

式 (3) 将接收结点等待 CAR 应答的最大时间  $T_{CAR}$  分为  $n$  个时隙, 每个时隙长度为  $T_C$ . 以时隙为单位的  $T_{pi}$  使 CAR 包仅在时隙开始时发送, 旨在降低碰撞概率.

**2 协议性能试验验证**

因 LoRa 扩频通信技术<sup>[21]</sup>能够在复杂多径信道下具有稳健的通信能力和较长的单跳传输距离, 本文构建基于 STM32 系统板 + LoRa 扩频模块的海面物联网结点系统. 在此基础上, 构建多结点海面物联网试验系统, 并在西北工业大学长安校区开展了陆地和湖上的试验研究. 将所提出的 RA-CLOT 协议与无速率自适应机制的跨层机会传输 (CLOT) 协议、DSR<sup>[12]</sup> + CSMA/CA 协议、DSR + ALOHA 协议以及基于结点位置的机会传输协议 OppCast<sup>[17]</sup> 进行对比, 对所提协议在复杂动态时变信道与实际网络环境下进行进一步的研究与性能验证.

**2.1 试验设置与评价指标**

试验中网络结点系统与 RA-CLOT 协议的参数分别如表 1 和表 2 所示.

**表 1** 网络结点系统参数

配置	参数
开发板主控	STM32F103ZET6
射频模块	正点原子 ATK LoRa-01
射频调制方式	LoRa
射频模块发射功率 / dBm	20
发射载波频率 / MHz	433
发包数量	100
DATA 包载荷长度 / 字节	64
可选择的 $R_b$ / Kbps	4.8、9.6、19.2

**表 2** RA-CLOT 协议的试验参数

配置	参数
$n_{max}$	5
$N_b$	3
$T_{CAR}$ / ms	1500
$T_{COB}$ / ms	200
$T_D$ / ms	500
$T_C$ / ms	150
$n$	10
SNR < -5 时选取的 $R_b$ / Kbps	4.8
-5 ≤ SNR ≤ 0 时选取的 $R_b$ / Kbps	9.6
SNR > 0 时选取的 $R_b$ / Kbps	19.2
$SNR_{max}$	10

在表 2 中:  $SNR_{max}$  为发射结点与接收结点距离 1 m 时实际测量得到的接收信噪比,  $R_b$  为 LoRa 模块的通信传输速率. 试验中依据不同信噪比条件下 DATA 包传输成功率不低于 95% 时的最高传输速率, 确定 RA-CLOT 协议的传输速率. 不同的信噪比条件下对应的 3 种不同的传输速率取值如表 2 所示.

试验对比各协议的性能优劣所采用的性能指标如下: 1) 包交付率: 目的结点正确接收到的 DATA 包数量和源结点发送的 DATA 包数量之比; 2) 端到端时

延:从源结点到目的结点成功传输一个DATA包的平均时延; 3) 网络能耗:网络完成单个数据包端到端投递的平均能耗; 4) 网络归一化能耗:确定协议下的网络能耗与相同条件下RA-CLOT协议网络能耗的比值.

### 2.2 两跳路由试验

试验在室外平坦空地进行,网络拓扑如图4所示,源结点与目的结点之间布置多个中继结点形成两跳端到端路由.在结点之间放置障碍物阻挡信号传输,并通过程序设置使网络链路产生随机中断,以模拟海面链路状态、质量的动态变化.试验测试了RA-CLOT、DSR+CSMA/CA、DSR+ALOHA 三种协议,其中后两种协议以最低速率4.8 Kbps发送数据,以保证网络在恶劣信道条件下的传输性能.试验过程中依次增加中继结点数量并观察其对协议性能的影响,验证RA-CLOT协议在复杂恶劣动态信道环境下的端到端投递能力.

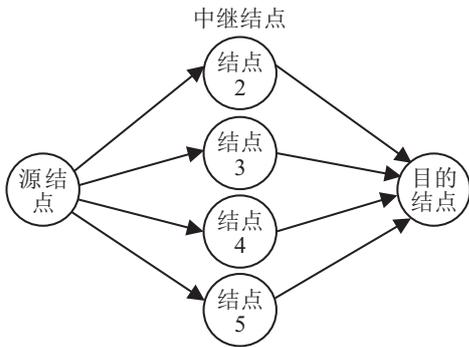


图4 两跳路由试验的网络拓扑

根据图5的数据包交付率信息,DSR源路由协议的包交付率无法通过增加中继结点数量而改善,因为中断后的链路重建依赖于源结点重新发起路由请求.相比之下,RA-CLOT协议能够动态选择正常通信的结点,从而提升包交付率,展现出其在恶劣信道条件下的灵活性.

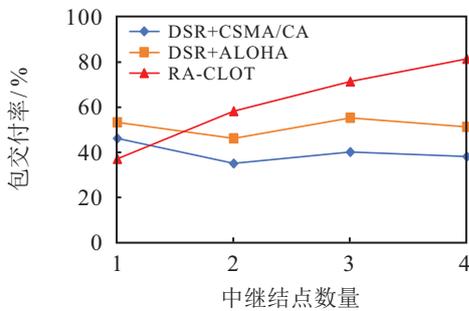


图5 两跳路由试验包交付率

根据图6和图7的统计结果,DSR源路由协议的时延和能耗虽然随中继结点数量增加而下降,但因其频繁发起路由请求及可能导致的路由广播风暴,下降幅度有限且始终保持在较高水平.相比之下,RA-

CLOT协议通过机会路由机制能够直接寻找合适的中继结点,利用速率自适应机制优化时延,从而实现更快的时延下降.同时,RA-CLOT协议无需发起路由请求,且能通过速率自适应减少射频运作时间,因此网络能耗始终最低.

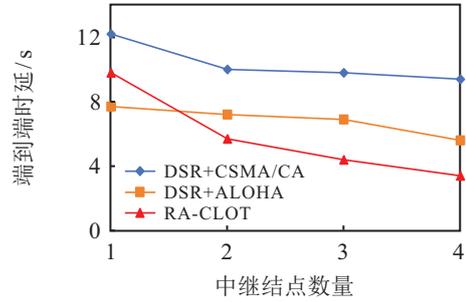


图6 两跳路由试验端到端时延

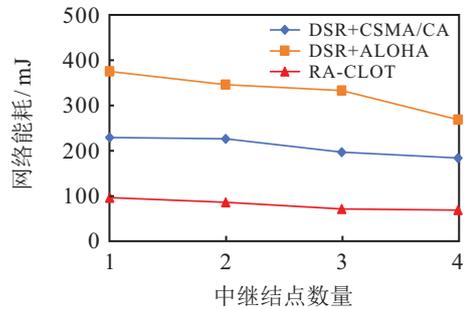
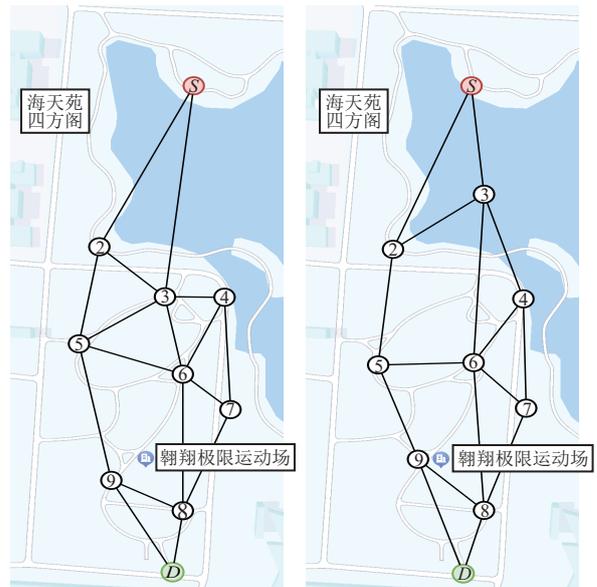


图7 两跳路由试验网络能耗

### 2.3 多跳自组网试验

为了进一步验证协议在接近实际海面物联网应用场景下的工作能力,进行多跳自组网试验.试验由10个通信结点组成,结点均按照图8(a)的拓扑布放以进行多跳自组网试验.



(a) 全陆地结点试验 (b) 湖上无人船结点试验

图8 多跳自组网试验的网络拓扑

网络结点布放时使其与一跳邻居结点的距离设

置为可以最高速率通信的临界距离. 试验中网络布放在林木遮挡的区域, 信道状况复杂且具有较高的时变性. 同时, 试验过程中通过带着结点在一定区域内随机移动、随机摆动天线等人为操作, 模拟结点在高

海况下的升沉、横摇等随机运动. 试验中实测到结点  $D$  的接收信噪比在  $-3\text{ dB} \sim 6\text{ dB}$  之间随机波动, 也印证了试验所构建链路的时变性. 多跳自组网络试验结果(陆地)如表3所示.

表3 多跳自组网试验结果(陆地)

协议类型	包交付率/%	网络归一化能耗	端到端时延/s
RA-CLOT	99	1	5.18
RA-CLOT ( $N_b = 5$ )	83	1.26	5.56
CLOT ( $R_b = 19.2\text{ Kbps}$ )	35	0.65	9.20
CLOT ( $R_b = 4.8\text{ Kbps}$ )	95	1.61	6.54
DSR+CSMA/CA ( $R_b = 19.2\text{ Kbps}$ )	21	1.74	12.28
DSR+CSMA/CA ( $R_b = 4.8\text{ Kbps}$ )	71	1.94	9.76
DSR+ALOHA ( $R_b = 19.2\text{ Kbps}$ )	32	1.18	10.85
DSR+ALOHA ( $R_b = 4.8\text{ Kbps}$ )	66	2.01	7.18
OppCast ( $R_b = 19.2\text{ Kbps}$ )	37	0.79	11.73
OppCast ( $R_b = 4.8\text{ Kbps}$ )	95	1.56	6.57

表3所示的试验结果表明, RA-CLOT协议、恒定速率4.8 Kbps的Oppcast、CLOT协议能够在信道质量差时通过灵活选择转发结点和低速率传输数据, 从而实现高包交付率. 在这3者中, RA-CLOT协议通过动态调整传输速率, 进一步节约传输时间和能耗, 在确保高包交付率的同时实现最低的网络能耗和端到端时延. 此外当邻居数阈值由默认值3增加为5后, 拥有更多邻居的中继结点, 在发送COB包后会收到更多CAR回复, 导致握手过程中的碰撞概率上升, 从而降低包交付率并增加网络能耗.

尽管通过降低LoRa模块的传输速率可改善链路的抗噪声性能, 但因在信道时变的环境中无法及时更新链路信息, 导致链路中断时转发失败, DSR+CSMA/ALOHA协议的数据包交付率始终低于RA-CLOT协议. 此外, 频繁的链路中断增加了路由发现操作的频率, 造成更高的能耗和时延. OppCast、CLOT能通过机会路由机制避开中断链路, 但其无法根据实时信噪比信息得知在当前信道质量下的最佳转发结点, 使得其在高传输速率下的传输成功率低, 且端到端时延也要高于RA-CLOT协议.

为了更好地模拟海面物联网的工作环境, 如图8(b)、图9所示, 将3号结点放置于无人船上, 并将其置于湖面上, 该结点会随风浪在湖上漂移, 同时操作无人船使其以不高于1 m/s的速度进行随机移动.



图9 无人船结点

表4给出了有湖上结点的试验结果, 移动的湖上结点使网络拓扑发生变化, 且因该结点处于地势较低的动态湖上, 对应的链路质量更差, 因此各协议的性能均有所下降. 尽管如此, 该湖上试验中RA-CLOT协议相对于其他协议仍然有着显著的优势, 在保证最高包交付率的同时能够拥有最低的网络能耗以及端到端时延, 这进一步验证了所提协议在海面物联网组网环境下的良好性能.

表4 多跳自组网试验结果(含湖上结点)

协议类型	包交付率/%	网络归一化能耗	端到端时延/s
RA-CLOT	97	1	5.87
RA-CLOT ( $N_b = 5$ )	87	1.27	6.52
CLOT ( $R_b = 19.2\text{ Kbps}$ )	32	0.71	8.78
CLOT ( $R_b = 4.8\text{ Kbps}$ )	93	1.81	7.81
DSR+CSMA/CA ( $R_b = 19.2\text{ Kbps}$ )	22	1.40	13.19
DSR+CSMA/CA ( $R_b = 4.8\text{ Kbps}$ )	67	1.45	8.10
DSR+ALOHA ( $R_b = 19.2\text{ Kbps}$ )	21	1.61	9.31
DSR+ALOHA ( $R_b = 4.8\text{ Kbps}$ )	70	2.22	8.00
OppCast ( $R_b = 19.2\text{ Kbps}$ )	25	1.02	10.97
OppCast ( $R_b = 4.8\text{ Kbps}$ )	92	1.51	7.61

### 3 结论

针对复杂动态海洋环境及其造成的时变链路状态与动态网络拓扑,给海面物联网高效稳健自组网带来了严峻的挑战,本文将物理层自适应数据速率、载波侦听多址接入与机会路由联合进行跨层设计,提出速率自适应海面物联网跨层传输协议,旨在增强海面物联网数据传输的可靠性、灵活性与传输效率.构建了海面物联网组网试验系统,基于该系统通过陆地和湖上试验验证了所提出的速率自适应的海面物联网跨层机会传输协议在复杂时变信道下对数据包低能耗、高可靠与低时延的端到端投递能力,也为复杂动态海洋环境中海面物联网数据的高效稳健传输提供了重要的技术途径.未来,将进一步开展相关湖海试验,验证所提方法在实际海洋环境中的性能.

#### 参考文献(References)

- [1] Qu F Z, Fu Y B, Yang S J, et al. An overview of the development status of underwater acoustic communication technology applied to Ocean Internet-of-Things[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2023, 44(11): 1937-1949.
- [2] Akyildiz I F, Wang X. A survey on wireless mesh networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(9): S23-S30.
- [3] Yang T T, Shen X. Maritime wideband communication networks: Video transmission scheduling[M]. Cham: Springer, 2014: 15-31.
- [4] Zolich A, Palma D, Kansanen K, et al. Survey on communication and networks for autonomous marine systems[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2019, 95(3): 789-813.
- [5] Wei T, Feng W, Chen Y F, et al. Hybrid satellite-terrestrial communication networks for the maritime Internet of Things: Key technologies, opportunities, and challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(11): 8910-8934.
- [6] Zhang X W, Liu T M, Zhou B C, et al. Design of a buoy data collection and control system based on the Internet of Things [J]. *Advances in Marine Science*, 2024, 42(1): 196-206.
- [7] Dinis H, Rocha J, Matos T, et al. The challenge of long-distance over-the-air wireless links in the ocean: A survey on water-to-water and water-to-land miot communication[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(13): 6439.
- [8] Aslam S, Michaelides M P, Herodotou H. Internet of ships: A survey on architectures, emerging applications, and challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 9714-9727.
- [9] Guan S, Wang J, Jiang C, et al. MagicNet: The maritime giant cellular network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(3): 117-123.
- [10] Zhang S W, Yang W C, Xin Y Z, et al. Research progress of a mooring buoy system for sea surface and seafloor observation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(28): 2963-2973.
- [11] 葛建新, 陈柄才, 王骥. 基于LoRa WSN的远程水产养殖监测系统[J]. *电子器件*, 2022, 45(6): 1503-1509. (Ge J X, Chen B C, Wang J. Remote aquaculture monitoring system based on LoRa WSN[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2022, 45(6): 1503-1509.)
- [12] Johnson D B, Maltz D A, Broch J. DSR: The dynamic source routing protocol for multi-hop wireless ad hoc networks[J]. *Ad Hoc Networking*, 2001, 5(1): 139-172.
- [13] Almazok S A, Bilgehan B. A novel dynamic source routing (DSR) protocol based on minimum execution time scheduling and moth flame optimization (MET-MFO)[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020, 2020(1): 1-26.
- [14] Liang Z, Dai Y, Lyu L, et al. Adaptive data collection and offloading in multi-UAV-assisted maritime IoT systems: A deep reinforcement learning approach[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(2): 292.
- [15] Wei Z, He R, Li Y, et al. DRL-based computation offloading and resource allocation in green MEC-enabled maritime-IoT networks[J]. *Electronics*, 2023, 12(24): 4967.
- [16] Xian J, Wu H, Mei X, et al. Low-delay and energy-efficient opportunistic routing for maritime search and rescue wireless sensor networks[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(20): 5178.
- [17] Li M, Zeng K, Lou W. Opportunistic broadcast of event-driven warning messages in vehicular ad hoc networks with lossy links[J]. *Computer Networks*, 2011, 55(10): 2443-2464.
- [18] Zhang H, Zhang X, Sung D K. A fast, reliable, opportunistic broadcast scheme with mitigation of internal interference in VANETs[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2021, 22(4): 1880-1893.
- [19] Zhao R, Li N, Dobre O A, et al. CITP: Collision and interruption tolerant protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(6): 1328-1332.
- [20] Niknami N, Srinivasan A, St. Germain K, et al. Maritime communications—Current state and the future potential with SDN and SDR[J]. *Network*, 2023, 3(4): 563-584.
- [21] Sundaram J P S, Du W, Zhao Z W. A survey on LoRa networking: Research problems, current solutions and open issues[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 22(1): 371-388.

#### 作者简介

赵瑞琴(1981—),女,副教授,博士生导师,主要研究方向为海洋信息网络、水声通信组网技术, E-mail: rqqzhao@nwpu.edu.cn;

张东健(2001—),男,硕士生,主要研究方向为海洋通信组网技术, E-mail: 2904372161@qq.com;

全豪(2000—),男,硕士生,主要研究方向为海洋通信网络分簇, E-mail: 2810172039@qq.com;

刘创源(1998—),男,硕士生,主要研究方向为水下通信组网, E-mail: shendu0317@foxmail.com;

王海燕(1965—),男,教授,博士,主要研究方向为水下目标感知、水声监测网络, E-mail: hywang@nwpu.edu.cn.