



# 计算机科学

COMPUTER SCIENCE

## 基于跨层链路质量状态感知的无人机地理位置路由协议

周雁翎, 米志超, 路颜霞, 王海

引用本文

周雁翎, 米志超, 路颜霞, 王海. [基于跨层链路质量状态感知的无人机地理位置路由协议](#)[J]. 计算机科学, 2023, 50(10): 258-265.

ZHOU Yanling, MI Zhichao, LU Yanxia, WANG Hai. [UAV Geographic Location Routing Protocol Based on Cross Layer Link Quality State Awareness](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(10): 258-265.

---

## 相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

### [基于特征权重感知的VNF资源需求预测方法](#)

Feature Weight Perception-based Prediction of Virtual Network Function Resource Demands

计算机科学, 2023, 50(9): 331-336. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.221000012>

### [基于FlexUDA模型的SQL注入检测研究](#)

Study on SQL Injection Detection Based on FlexUDA Model

计算机科学, 2023, 50(6A): 220600172-6. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220600172>

### [面向交通流量预测的时空Graph-CoordAttention网络](#)

Spatial-Temporal Graph-CoordAttention Network for Traffic Forecasting

计算机科学, 2023, 50(6A): 220200042-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220200042>

### [基于改进PL-VIO算法的机器人视觉惯性光学测量法](#)

Robot Visual Inertial Optical Measurement Method Based on Improved PL-VIO

计算机科学, 2023, 50(6A): 220400171-5. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220400171>

### [基于孪生注意力网络的建设用地遥感影像变化检测](#)

Remote Sensing Image Change Detection of Construction Land Based on Siamese AttentionNetwork

计算机科学, 2023, 50(6A): 220500040-5. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220500040>

# 基于跨层链路质量状态感知的无人机地理位置路由协议

周雁翎 米志超 路颜霞 王海

陆军工程大学通信工程学院 南京 210007

(zyl202101002@126.com)

**摘要** 地理位置路由协议由于开销较低和可扩展性较好而在 FANET 网络中得到了广泛应用,但其贪婪转发过程中依据最靠近目的地的邻居节点作为中继的策略还存在一定的局限性。文中通过感知链路质量,提出了一种适用于拓扑变化频繁、网络环境拥挤的跨层链路质量状态感知的无人机地理位置路由协议(CLAQ-GPSR)。通过设立通信安全区,建立链路负载和流间干扰度量模型,采用交付比 ETX 衡量链路质量,结合物理层、MAC 层、网络层数据综合衡量最可靠的中继节点,以提升通信质量。同时采用左右手组合转发规则,加快路径恢复中的转发速度,避免传统周边转发出现的路由循环等问题。通过网络仿真平台对比分析可知,相比传统的 GPSR, W-GeoR 和 DGF-ETX 协议,所提协议在数据包分组投递成功率、端到端时延和跳数等指标上更具优势。

**关键词**: GPSR; FANET; 链路质量; 流间干扰; 信道空闲率; 左右手组合转发

**中图分类号** TN929

## UAV Geographic Location Routing Protocol Based on Cross Layer Link Quality State Awareness

ZHOU Yanling, MI Zhichao, LU Yanxia and WANG Hai

College of Communications Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China

**Abstract** The geographical location routing protocol has been widely used in FANET networks due to its low overhead and good scalability. However, its strategy of relying on the nearest neighbor node as the relay in greedy forwarding process still has certain limitations. This paper proposes a cross layer link quality state aware unmanned aerial vehicle geographic location routing protocol (CLAQ-GPSR) suitable for frequently changing topology and congested network environments by sensing channel link quality. By establishing a communication security zone, establishing a measurement model for link load and inter flow interference, using delivery ratio ETX to measure link quality, and combining data from the physical layer, MAC layer, and network layer to comprehensively measure the most reliable relay nodes, communication quality can be improved. At the same time, the combination of left and right hand forwarding rules is used to accelerate the forwarding speed in path recovery and avoid routing loops and other issues that occur in traditional peripheral forwarding. Through comparative analysis on network simulation platforms, it is found that, compared with the traditional GPSR, W-GeoR, and DGF-ETX protocols, the proposed protocol has advantages in terms of packet delivery success rate, end-to-end latency, and average hop count.

**Keywords** GPSR, FANET, Link quality, Interflow interference, Channel idle rate, Left and right hand combination forwarding

## 1 引言

目前,随着无线通信技术和嵌入式系统的进步,无人机在通信中继、战场侦察、跟踪巡逻、精确打击等多种特种军事行动中发挥了重要作用,成为未来“网络中心战”的重要依靠<sup>[1]</sup>。通过多机间传输数据信息并且不依赖于通信基础设施的飞行自组网(FANET)成为无人机通信组网的重要核心<sup>[2]</sup>,使得战场态势感知、指控信令和情报得以及时传送<sup>[3]</sup>。但高动态移动性、资源受限性、链路间断性以及拓扑变化频繁等因素,

使得 FANET 的通信更为复杂。

相较于基于拓扑的路由协议在建立和维护路由表时会消耗大量带宽资源,基于地理位置的路由协议仅需通过地理位置信息进行中继节点筛选,在文献[4-6]中已被验证更适用于 FANET。GPSR 协议作为地理位置路由协议的典型代表,其贪婪算法的原理为选择距离目的节点最近的邻居节点进行数据转发,依照此法传输直至将数据传输至目的地,该算法使得链路易陷入断连风险<sup>[7]</sup>。特别是在战场环境中,当无人机之间需要进行大量的信息交互时,

到稿日期:2023-05-30 返修日期:2023-09-19

基金项目:国家自然科学基金(62171465)

This work was supported by the National Natural Science foundation of China(62171465).

通信作者:米志超(icemizc@126.com)

FANET 无法满足协议的 QoS 需求,导致整个无人机集群通信质量下降,因此,设计一个满足 QoS 需求的 GPSR 路由协议非常重要。

当前,针对提升 GPSR 协议链路质量的研究较多。文献[8]通过推导节点连通概率,结合 BADF 技术,综合无人机连通性、路由寿命和路由延迟来度量链路质量。文献[9]利用节点的位置、移动方向、运动速度和链路过期时间来权衡移动因子,以包丢失率、延迟和抖动作为 QoS 指标,通过移动因子和 QoS 指标综合衡量接收经验质量(QoE),以提升在高度动态拓扑链路上的整体质量。文献[10]设定中间转发区域,根据转发区域中邻节点的移动方向、距离目的节点的距离和链路质量因素,通过优先级转发策略筛选最佳中继节点。文献[11]提出了一种增强的定向贪婪转发(DGF-ETX)协议,该协议将 ETX 合并到候选转发节点的距离和方向的多度量路由函数中,选择具有低损失比的链路来提升路由可靠性,但是 ETX 没有考虑负载平衡。文献[12]提出了一种新的加权地理路由协议(W-GeoR),通过评估源车辆和目的地车辆之间的距离因子、车辆速度差、移动角度、链路到期时间、信道 SNR 值和目的地接近因子等因素,利用多个度量来提升网络整体性能。但是该协议仅使用信噪比来衡量链路质量,缺乏对节点负载和干扰量的考虑。

以上针对 GPSR 路由协议的改进大多聚焦在物理层的数据信息<sup>[13]</sup>,缺乏对 MAC 层和网络层数据的综合考量,没有考虑流间干扰和节点负载状况对 QoS 的影响。本文针对上述问题,提出了基于跨层链路质量状态感知的无人机地理位置路由协议 CLAQ-GPSR。通过仿真系统对 GPSR, DGF-ETX 和 W-GeoR 协议性能进行对比分析,结果表明 CLAQ-GPSR 在数据分组交付率、端到端时延和跳数等方面性能较好,能够很好地应用于大数据流的组网环境中。

## 2 问题描述

无线电波传输介质的特殊性,决定了 FANET 在数据传输过程中将面临各种干扰源。虽然 IEEE 802.11 协议可以利用 RTS/CTS 请求来避免信道碰撞和干扰,保证源节点在其通信范围内只有一条可使用的活跃链路,但源节点的干扰范围通常要大于其通信范围,因此在通信范围以外、干扰范围以内的节点易受到源节点的干扰,无法正确解码源节点的 RTS/CTS 请求,该区域的节点可以与其他节点进行通信<sup>[14]</sup>。但由于节点共享无线介质且不具有专用带宽,因此一些同时同频传输的数据流会产生干扰,即流间干扰<sup>[15]</sup>。流间干扰的产生会使链路相互争夺带宽资源,从而影响链路的通信质量,只有当接收数据的信噪比高于某一阈值时,分组才能被正确解码接收。如图 1 所示,由于节点 C 和 D 在节点 A 的通信范围之外,节点 C 和 D 均无法正确解码节点 A 发送的 RTS/CTS 请求,因此链路 A→B 和 C→D 可以同时传输数据。但由于节点 C 和 D 又同时处于节点 A 的干扰范围内,因此当 C 正在向 D 发送数据流时,若 A 也同时向 B 发送数据,则链路 C→D 将受到干扰节点 A 的影响,其链路的可用带宽会降低。

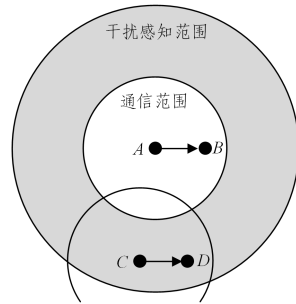


图 1 流间干扰示意图

Fig. 1 Schematic diagram of interflow interference

## 3 CLAQ-GPSR 协议设计思路

为了提升大数据流环境下数据传输的可靠性,CLAQ-GPSR 在选择下一跳节点时,需要尽量避免选择通信边缘不稳定的节点,同时要考虑流间干扰和节点负载状况对链路传输的影响,通过计算通信安全区域内的投影长度、交付比 ETX、链路负载及流间干扰感知度量等性能指标,来完成最优转发节点的选择。

### 3.1 安全区投影长度

为了减少通信边缘节点对通信传输的影响,本文利用文献[16]提出的计算通信安全区投影长度,在保持协议贪婪属性的同时,增强链路稳定性,如图 2 所示。

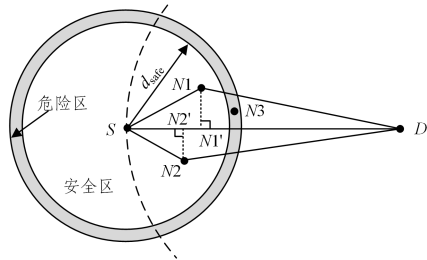


图 2 CLAQ-GPSR 贪婪转发示意图

Fig. 2 Diagram of CLAQ-GPSR greedy forwarding

通信安全区投影长度为:

$$d_{SN_i'} = d_{SN_i} \times \cos \angle NiSD = \frac{d_{SN_i}^2 + d_{SD}^2 - d_{NiD}^2}{2 \times d_{SD}} \quad (1)$$

其中,  $d_{SN_i'}$  为节点  $N_i$  在 SD 连线上的投影长度,  $d_{SN_i}$ ,  $d_{SD}$ ,  $d_{NiD}$  分别为  $SN_i$ ,  $SD$ ,  $NiD$  的距离。

### 3.2 交付比 ETX 度量

FANET 中链路质量和节点负载状况是影响数据包的丢失率和传输延迟的主要因素,特别是在高度动态的组网环境中,节点运动可能会导致所选中继节点位于通信安全区边缘,信道误码导致数据传输失败。ETX 作为度量链路质量的常用标准之一,通过对比发送方和接收方的链路损失比来衡量,可以用于路由协议筛选合适的链路以提高网络的整体性能。ETX 是成功通过该链路发送数据包所需的传输和重传预测数,通过专用的短探针包计算包的传输比来估计链路上的损失率<sup>[17]</sup>。地理位置路由协议主要通过 HELLO 数据包发现周边邻居的地理位置和其他参数信息,但受到无线信道冲突和信道误码的影响,HELLO 数据包的传递比率会相应地受到影响,因此可用 HELLO 数据包的传递比率测算 ETX,且

不会引入额外开销。本文采用该策略计算节点  $S$  和邻居节点  $N_i$  间的 ETX, 其公式如下:

$$ETX(S, N_i) = \frac{1}{df \times dr} \quad (2)$$

其中,  $df$  代表节点  $S$  发送到其邻居节点  $N_i$  的 HELLO 包的前向成功率,  $dr$  代表邻居节点  $N_i$  发送到节点  $S$  的 HELLO 包的后向成功率。

### 3.3 链路负载和流间干扰感知度量

在实际的链路中, 流间干扰可能会降低信道可用带宽, 增加数据包丢失和碰撞的概率, 影响网络整体通信效果。而使用 HELLO 数据包传递比度量的 ETX 没有考虑节点干扰和链路负载状况, 因此 ETX 只能作为度量链路质量的一个参数指标。

为了提升 FANET 在大数据流环境中的链路可靠性, 本文提出了一个组合链路负载和流间干扰度量 TLI (Traffic Load-Interference)。TLI 使用干扰度量模型加权信道空闲率, 有助于感知网络流量的负载情况, 同时能够避免该信息的测量和分布带来过多开销。节点  $S$  和邻居节点  $N_i$  间的 TLI 定义为:

$$TLI(S, N_i) = CIR_{N_i} \times IR_{N_i} \quad (3)$$

其中,  $CIR_{N_i}$  (Channel Idle-Ratio) 为  $N_i$  节点的信道空闲率,  $IR_{N_i}$  (Interference-Ratio) 为  $N_i$  节点的干扰度量的物理模型。使用  $CIR_{N_i}$  表征节点的流量负载状况, 将有助于挑选负载较低的链路。当接收节点处没有受到流间干扰时,  $TLI(S, N_i)$  值仅受  $CIR_{N_i}$  的影响, 它代表着下一跳节点的信道接入难易程度, 有利于减少信道拥塞造成的包丢失。

#### 3.3.1 空闲率

采用 RTS/CTS 机制可以预测未来数据分组占用信道的持续时间, 每当节点收到 RTS/CTS 分组时, 虚拟载波侦听通过设置网络分配向量 (NAV) 来确定介质状态, 并根据 RTS/CTS 中的预期传输延迟, 延迟其信道访问。因此, NAV 用来描述媒介的空闲/繁忙程度。通过计算节点信道访问的空闲和忙碌比例, 可估算节点周边的负载情况和信道接入的难易程度<sup>[18]</sup>。由于节点的忙闲状态是一个动态变量, 在动态的网络环境中使用离散数值测量可能会影响估算精度, 因此本文对测量的历史忙闲状态和最近一次探测的信道状况进行加权均衡量, 节点  $N_i$  的信道空闲率 CIR 的计算式为:

$$CIR_{N_i} = 1 + \left[ \partial \times \frac{C_{\text{busy}}}{C_{\text{all}}} + (1 - \partial) \times C_{\text{NAV}} \right] \quad (4)$$

其中,  $CIR_{N_i}$  为当前邻居节点  $N_i$  的平均空闲率,  $C_{\text{busy}}$  为当前探测滑动窗口内探测信道繁忙的次数,  $C_{\text{all}}$  为滑动探测窗口的大小。  $C_{\text{NAV}}$  表示节点最近一次探测的状态, 当探测到 MAC 层接口为忙时则  $C_{\text{NAV}} = 1$ , 否则为 0。  $\partial$  为调节系数, 本文为了均衡衡量 MAC 层接口的平均空闲率, 取  $\partial = 0.5$ 。无线信道物理层接口通过空闲信道评估 (Clear Channel Assessment, CCA) 功能可判断信道接口是否处于繁忙状态, 因此本文在 MAC 层设置回调函数, 将探测窗口粒度设定为 50, 每隔 20ms 进行一次探测, 当查询的次数达到 50 时, 就将计算的结果回调给网络层并添加到 HELLO 数据包中, 随着周期性的广播, HELLO 数据包被发送给周边邻居。

#### 3.3.2 干扰比

在实际通信中, 每个节点受到邻居节点的干扰程度取决于干扰节点的数量、干扰节点与接收节点之间的距离以及传播空间的路径损耗等因素。此外, 干扰节点传输的时机也会影响干扰程度, 即使干扰节点靠近接收节点, 只要干扰节点不与发送节点同时进行数据传输, 该干扰节点就不会引发任何流间干扰。

本文采用物理干扰模型对链路所受干扰进行捕获计算, 不同于协议干扰模型中使用的传输范围和干扰范围的概念, 该模型使用了在线传输数据流来观测模型参数, 并且干扰强度仅取决于干扰节点发送数据包时的信号强度<sup>[19]</sup>。为了正确解码分组, 邻居节点  $N_i$  必须要满足如下条件, 才能够成功接收到来自转发节点  $S$  的数据。

$$SINR_{N_i} = \frac{P_{N_i}(S)}{BN + \sum_{N_j \in (N' - S)} P_{N_i}(N_j)} \geq \beta \quad (5)$$

其中,  $SINR_{N_i}$  为接收节点  $N_i$  处的信干噪比,  $P_{N_i}(S)$  为节点  $N_i$  接收节点  $S$  发送数据包时的信号强度,  $BN$  为背景环境噪声,  $N'$  为干扰节点  $S$  向节点  $N_i$  传输数据的干扰节点集。因此, 式(5)表示当节点  $N_i$  处的信干噪比高于某一阈值时才能保证节点  $S$  与节点  $N_i$  之间通信成功, 该阈值  $\beta$  的大小取决于信道和数据传输速率。为便于归一化计算, 使用链路  $S$  与  $N_i$  之间的干扰比  $IR$  与负载状况进行加权,  $IR_{N_i}$  的定义如下:

$$IR_{N_i} = \frac{SINR_{N_i}}{SNR_{N_i}} = \frac{BN}{BN + \sum_{N_j \in (N' - S)} P_{N_i}(N_j)} \quad (6)$$

其中, 节点  $N_i$  处的信噪比为:

$$SNR_{N_i} = \frac{P_{N_i}(S)}{BN} \quad (7)$$

从式(6)的推导可以看出,  $IR_{N_i}$  的取值范围为  $0 < IR_{N_i} \leq 1$ , 即当不存在干扰节点或者干扰节点没有与该链路同时进行数据传输时, 信干噪比的值等于信噪比值, 此时  $IR_{N_i}$  取值为 1。为了降低信号动态误差造成的影响, 本文使用指数加权移动平均 (EWMA) 对每次测量的干扰比  $IR_{N_i}$  进行如下计算:

$$IR_{N_i} = (1 - \beta) * IR_{N_i}^{(k-1)} + \beta * IR_{N_i}^k \quad (8)$$

其中,  $IR_{N_i}^{(k-1)}$  和  $IR_{N_i}^k$  分别为节点  $N_i$  在第  $(k-1)$  次和第  $k$  次接收测量到的干扰比, 该测量频次同信道空闲率探测同步。

### 3.4 贪婪转发

为提升在大数据流背景下 CLAQ-GPSR 路由协议的传输效率, 本文通过跨层设计优化选择下一跳中继, 通过综合权衡邻居节点在当前通信安全区的投影长度、交付比 ETX、链路负载和流间干扰等因素, 筛选合适的中继转发节点。贪婪转发的综合度量计算公式为:

$$G_{N_i} = g_1 \times \frac{d_{SN_i}}{R} + g_2 \times \frac{1}{ETX(S, N_i)} + g_3 \times TLI(S, N_i) \quad (9)$$

$$s. t. SINR_{N_i} = \frac{P_{N_i}(S)}{BN + \sum_{N_j \in (N' - S)} P_{N_i}(N_j)} \geq \beta \quad (10)$$

式(9)中,  $g_1$  为安全区投影长度的权重,  $g_2$  为交付比 EYX 的权重,  $g_3$  为流间干扰和负载感知度量的权重, 并满足  $g_1 + g_2 + g_3 = 1$ 。式(10)为确保节点  $S$  与节点  $N_i$  之间通信成功的限定条件。CLAQ-GPSR 综合计算 3 个因素权重, 挑选权重值最大的邻居节点作为中继节点。

### 3.5 周边转发

由通信链路不稳定、干扰或者链路拥塞导致的传输中断,称为路由空洞,需要采用一定的修复策略以绕过路由空洞。传统 GPSR 在贪婪转发数据包失败时,通过构建邻居节点和目的节点的位置二维平面图,采用右(左)手转发准则转发数据包直至目的地或恢复至贪婪转发模式。但传统周边转发策略易出现路径冗余和路由循环的问题<sup>[20]</sup>,导致整体路由跳数和时延增加。同时,由于无人机节点具有随机高速运动、无线网络环境复杂及信道资源有限等特点,在路由恢复中使用单一路径恢复易发生断裂。频繁的断裂和恢复将导致数据包丢失概率增大,数据传播时延增加。为了降低路径冗余和路由循环的影响,减少周边转发过程中的丢包概率和传输时延,本文的路由恢复采用左右手组合转发方法。

左右手组合转发规则是通过“不转发不同于当前设定”的转发模式的数据包来有效解决网络开销<sup>[21]</sup>,即节点采用了左手(右手)转发规则时,将不再转发采用右手(左手)转发规则转入的数据包。如图 3 所示,在同时使用左右手转发规则时,左手转发路径为  $S \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow H \rightarrow D$ ,右手转发路径为  $S \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow H \rightarrow D$ ,此时右手转发会导致路由冗余,采用本路由恢复算法在节点  $E$  处丢弃来自右手转发规则的重复数据包以减小传输开销。

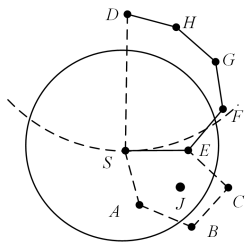


图 3 CLAQ-GPSR 周边转发示意图

Fig. 3 Schematic diagram of CLAQ-GPSR peripheral forwarding

### 3.6 工作流程

步骤 1 判断邻居节点是否为目的节点,若是目的节点则直接转发数据包,若不是则转至步骤 2。

步骤 2 判断邻居列表中是否有比当前转发节点距离目的节点更近的邻居节点,若有则选择贪婪转发模式,根据邻居列表中节点的安全区的投影长度、交付比 ETX、干扰比加权信道空闲率计算各节点贪婪转发权重值,选择最大权重作为中继转发节点;若没有则转至步骤 3,切换到周边转发模式。

步骤 3 记录下贪婪转发失败时节点的地理位置信息。节点复制待转发数据包,使用左手转发准则和右手转发准则同时进行数据转发。节点接收到数据包后,查找数据转发记录表,若是已经接收处理过的数据则丢弃该数据,若没有接收处理过则继续使用默认的转发模式转发数据包,并转至步骤 1。

## 4 仿真性能分析

### 4.1 测试环境和参数设置

本仿真实验使用 NS-3.23 软件在相同条件和场景下对 GPSR, W-GeoR, DGF-ETX 和 CLAQ-GPSR 协议进行性能对比分析。在采用全向天线进行模拟时,理想情况下认为全向

天线为球体状,贪婪转发阶段在二维和三维平面的差别仅在于高度方向的距离计算,周边转发阶段在三维平面可利用映射或投影等修复方法,将三维空间的节点映射至二维平面,同二维平面一样利用左手或右手转发规则进行路由修复。受限 NS-3.23 软件系统运动模型仅提供二维平面,本文将应用场景简化为二维平面,所有无人机随机散布于仿真区域,采取随机运动模型且所有节点可实时获取其地理位置信息,使用 Nakagami 传播衰减模型以捕获不同距离的信号强度和信道衰落特征,其参数设置如表 1 所列。为体现无人机的动态性变化特征对协议性能的影响,本文的仿真实验从 3 个方面来体现,主要通过以下方式实施:

(1) 业务数据的动态性变化:在数据流固定的情况下,通过改变节点发送数据包间隔来增加网络整体负载;在数据包发送间隔固定的情况下,通过改变整体发送数据流数以增加网络负载和干扰。

(2) 运动模型导致网络拓扑的动态性变化:在随机运动模型下,每个节点都是独立的随机移动,网络拓扑也在随机变化,通过调整无人机的运动速度改变网络拓扑变化的程度。

(3) 网络节点密度的动态性变化:通过改变仿真区域无人机数量来增强节点密度的动态性变化。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter configuration

项目类别	取值
仿真软件	NS-3.23
数据包大小/Bytes	512
通信半径/m	250
干扰半径/m	500
数据类型	CBR
Hello 包间隔/s	1
数据包间隔/s	0.2
$\beta$ /dBm	55
信道带宽/Mbps	3
传输协议	UDP
MAC 层类型	IEEE802.11
天线类型	全向天线
信号传播衰减模型	Nakagami
仿真场景范围/km	1 * 1
节点数	80,100,120,140,160,180,200
数据流	5,10,15,20,25,30
速度/(m/s)	10,15,20,25,30,35,40
仿真时间/s	300
权重设置	$g_1=0.7, g_2=0.12, g_3=0.18$
路由协议	GPSR, W-GeoR, DGF-ETX, CLAQ-GPSR

### 4.2 实验数据分析

#### 4.2.1 不同负载下的性能分析

在无人机节点数为 160 个、运动速度为 40 m/s、10 个数据流且每个流发送相同负荷的仿真环境中,无人机节点在不同负载下,分别对 GPSR, W-GeoR, DGF-ETX 和 CLAQ-GPSR 协议进行仿真对比分析。

图 4 给出了不同负载下的分组交付率、端到端时延和跳数的对比结果。随着网络负载的加重,数据冲突风险加剧,所有协议的分组交付率均逐渐减小,端到端时延逐渐增大,除 DGF-ETX 协议跳数保持稳定外,其余协议跳数均逐渐增大。

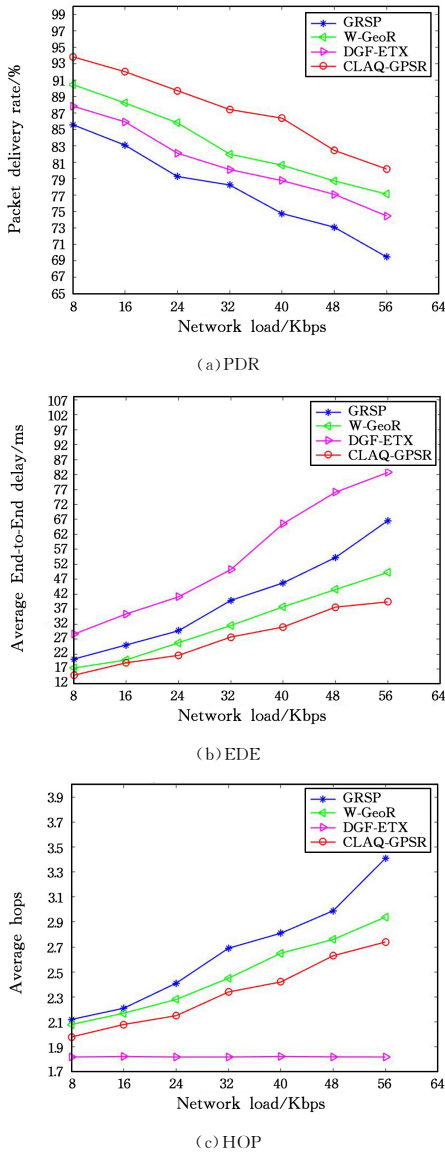


图4 不同负载下性能对比图

Fig. 4 Performance comparison chart with different network loads

图4(a)为分组交付率对比,CLAQ-GPSR协议的分组交付率最高,高出GPSR约8.8%~13.34%,高出W-GeoR约3.6%~3.8%,高出DGF-ETX约6.39%~7.1%。图4(b)为端到端时延对比,CLAQ-GPSR协议的端到端时延最低,低于GPSR约36.31%~68.85%,低于W-GeoR约16.17%~24.96%,低于DGF-ETX约92.15%~109.74%。图4(c)为跳数对比,除DGF-ETX协议跳数保持稳定外,CLAQ-GPSR的跳数低于GPSR约7.07%~24.45%,低于W-GeoR约5.05%~7.29%。GPSR和W-GeoR协议的路由策略没有考虑节点的负载状况,因而可能选择队列中有更多数据包的拥塞中继节点,队列拥塞导致的丢包率将会随着网络负载的加剧而变高,进而导致路由空洞。两协议在路由陷入空洞时使用的是右手转发的传统修复方式。由于节点在仿真区域中随机运动,在节点非稀疏的动态路由环境中易造成路径冗余或循环,从而加大了修复时延和跳数。DGF-ETX虽然使用HELLO数据包的交付率来评估ETX,但是该测量策略可能会受到信道冲突的影响,且对节点的负载情况并不清楚,因而

ETX的测量会低估或者高估链路质量,导致交付失败。在陷入路由空洞时,DGF-ETX利用携带转发策略进行修复,将数据包缓存在本地节点上,并不断检测周边邻居节点的连接状态,当邻节点中存在满足贪婪转发算法的邻居节点时,才选择该邻居节点作为中继节点继续转发数据包,否则继续进行存储,直至遇到合适转发节点或因超过存储时间阈值而丢弃。其携带转发的策略决定了其始终能够保持以贪婪转发的步进方式向目的地转发数据包,且存储携带对时延的影响要远大于数据转发的时间,缓存以牺牲一定的时延来减少转发跳数,因而其跳数始终最小且能保持较为稳定的状态,同时,时延始终最大。而CLAQ-GPSR利用NAV机制能够预判节点的负载状况,根据节点信道空闲比推测信道下一时刻的状态,能够将数据传输给负载较轻的链路,因此中断概率要低于GPSR,DGF-ETX和W-GeoR。并且在路由陷入空洞时,采用左右手组合转发方法进行路由修复,双备份的数据转发能够在复杂的网络环境中避免单路径的恢复转发断裂导致再次陷入路由空洞,因而其整体跳数要少于GPSR和W-GeoR协议。

#### 4.2.2 不同数据流下的性能分析

在无人机节点数为160个、运动速度为40m/s、每个流以0.2s的间隔发送512Bytes数据包的仿真环境中,无人机节点在不同数据流下,分别对GPSR,W-GeoR,DGF-ETX和CLAQ-GPSR协议进行仿真对比分析。

图5给出了不同数据流下GPSR,W-GeoR,DGF-ETX和CLAQ-GPSR的分组交付率、端到端时延和跳数的对比结果。仿真场景设置在节点非稀疏的网络环境中,随着网络数据流的逐渐增大,节点负载和流间干扰也相应增大,因此所有协议的分组交付率均随着数据流的增大而逐渐减小,端到端时延逐渐增大,除DGF-ETX协议跳数保持稳定外,其余协议跳数均逐渐增加。

图5(a)为分组交付率对比,CLAQ-GPSR协议的分组交付率最高,高出GPSR约4.75%~16.51%,高出W-GeoR约1.1%~11.51%,高出DGF-ETX约2.43%~14.3%。图5(b)为端到端时延对比,CLAQ-GPSR协议的端到端时延最低,低于GPSR约23.18%~31.33%,低于W-GeoR约7.28%~21.57%,低于DGF-ETX约29%~45.33%。图5(c)为跳数对比,除DGF-ETX协议跳数保持稳定外,CLAQ-GPSR的跳数低于GPSR约31.28%~45.86%,低于W-GeoR约12.82%~25.48%。主要原因是W-GeoR仅使用信噪比来评估链路质量,没有考虑流间干扰以及节点负载情况,而随着数据流逐渐增大,数据传输更容易出现在MAC层排队溢出的情况,流间干扰逐渐加剧导致数据重传和丢失,进而降低分组交付率,影响链路质量。DGF-ETX考虑的链路质量度量因素单一,缺乏对节点的负载和流间干扰的考虑,在信道竞争激烈的网络环境中易导致数据传输失败。在节点非稀疏的场景中,随着数据流的增大,长时延的存储数据会加重网络拥塞,导致时延逐渐增大。而CLAQ-GPSR考虑了节点可能经历的流间干扰量,避免了MAC重传带来的传输延迟,同时对节点的忙闲状态的考量可以降低网络拥塞和数据冲突,因此通过跨层利用MAC层和物理层数据综合衡量可使链路优先选择负载和干扰状况较轻的节点。

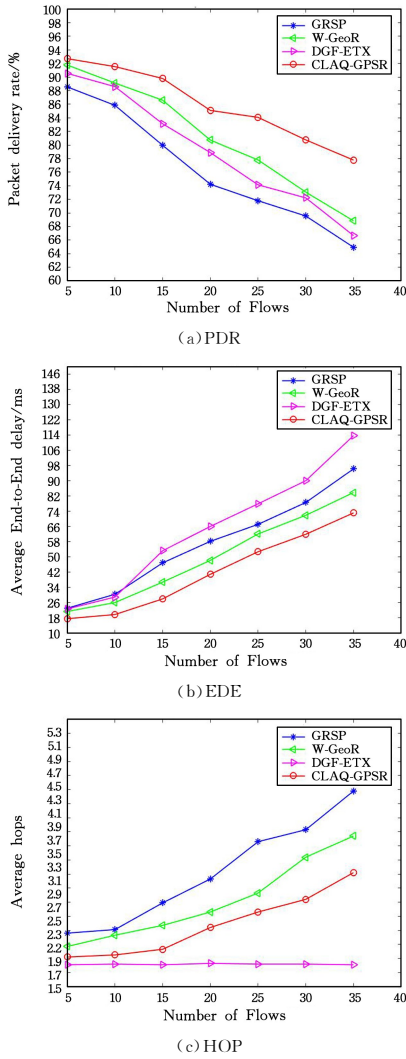


图5 不同数据流下的性能对比图

Fig. 5 Performance comparison chart with different data flows

#### 4.2.3 不同节点数下的性能分析

在无人机运动速度为 40 m/s、10 个数据流且每个流以 0.2s 的间隔发送大小为 512Bytes 数据包的仿真环境中,无人机在不同节点数下,分别对 GPSR, W-GeoR, DGF-ETX 和 CLAQ-GPSR 协议进行仿真对比分析。

图 6 给出了不同节点数下 GPSR, W-GeoR, DGF-ETX 和 CLAQ-GPSR 的分组交付率、端到端时延和跳数的对比结果。仿真场景设置在网络数据流较小的动态拓扑环境中,网络节点密度增大带来了更多可筛选的邻居,同时节点间的竞争和数据冲突也随之加剧。

图 6(a)为分组交付率对比,CLAQ-GPSR 协议的分组交付率最高,高出 GPSR 约 5.38%~6.4%,高出 W-GeoR 约 2.22%~2.46%,高出 DGF-ETX 约 3.07%~3.29%。图 6(b)为端到端时延对比,CLAQ-GPSR 协议的端到端时延最低,低于 GPSR 约 20.11%~54.04%,低于 W-GeoR 约 14.73%~23.1%,低于 DGF-ETX 约 55.8%~62.45%。图 6(c)为跳数对比,CLAQ-GPSR 的跳数少于 GPSR 约 11.6%~14.21%,少于 W-GeoR 约 8.29%~11.58%,DGF-ETX 的跳数随着节点数的增多能够逐渐减少至平稳状态。主要原因是随着网络节点的密度增大,网络通信连接状况得到改善,但增大到一定

程度后,GPSR 和 W-GeoR 协议的转发策略不能很好地应对节点信道竞争和数据冲突的加剧,进而导致路由陷入空洞的概率加大,因此出现 GPSR 和 W-GeoR 协议的分组交付率随着节点密度的增大先逐渐提高后逐渐降低,端到端时延和跳数随着节点密度的增大先逐渐降低后逐渐增大。DGF-ETX 协议的分组交付率随着节点密度的增大而稳步上升,主要原因是网络密度的增大缩短了节点间的距离,通过 ETX 衡量链路之间的质量,降低了链路中断的概率,进而减少了路由由跳数,并伴随着节点密度的增大,进一步减少了数据携带存储的时间。但当数据增大到 120 后,面对节点信道冲突和竞争,DGF-ETX 并不能很好地避开,由于仿真场景是在数据流较小的环境中,带宽资源并不紧张,因而节点增大到一定程度后 DGF-ETX 的携带转发策略使得整体端到端时延和跳数逐渐趋于平稳。CLAQ-GPSR 的通信安全区的设置能够排除通信边缘的节点,且考虑通信安全区的投影长度确保了路由步进长度最大限度地趋近于目的节点,优于 GPSR, W-GeoR 和 DGF-ETX 使用的距离接近度的步进衡量方式。并且,CLAQ-GPSR 能够筛选一条负载较轻、干扰较小的高质量链路,因此 CLAQ-GPSR 相较于 GPSR, W-GeoR, DGF-ETX 能更好地应对冲突逐渐加剧的环境。

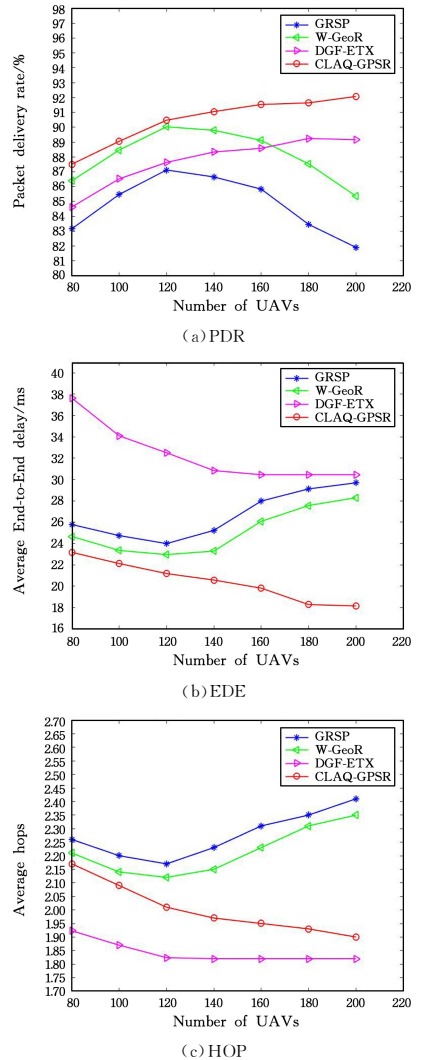


图6 不同节点数下的性能对比图

Fig. 6 Performance comparison chart with different nodes

#### 4.2.4 不同速度下的性能分析

在无人机节点数为 160、10 个数据流且每个流以 0.2 s 的间隔发送大小为 512 Bytes 数据包的仿真环境中,无人机在不同速度下,分别对 GPSR, W-GeoR, DGF-ETX 和 CLAQ-GPSR 协议进行仿真对比分析。

图 7 给出了节点在不同速度下 GPSR, W-GeoR, DGF-ETX 和 CLAQ-GPSR 的分组交付率、端到端时延和跳数的对比结果。仿真场景设置在网络数据流较小的动态拓扑环境中,随着节点移动速度的逐渐加快,网络拓扑的变化将加剧,固定信标导致通信暂盲的现象将随着节点移动速度的逐渐加快而加剧,由此导致的数据重传和丢失的现象将愈发严重,因此所有协议的分组交付率随着节点速度的加快而逐渐降低,端到端时延逐渐增大,除 DGF-ETX 协议跳数保持稳定外,其余协议跳数均逐渐增大。

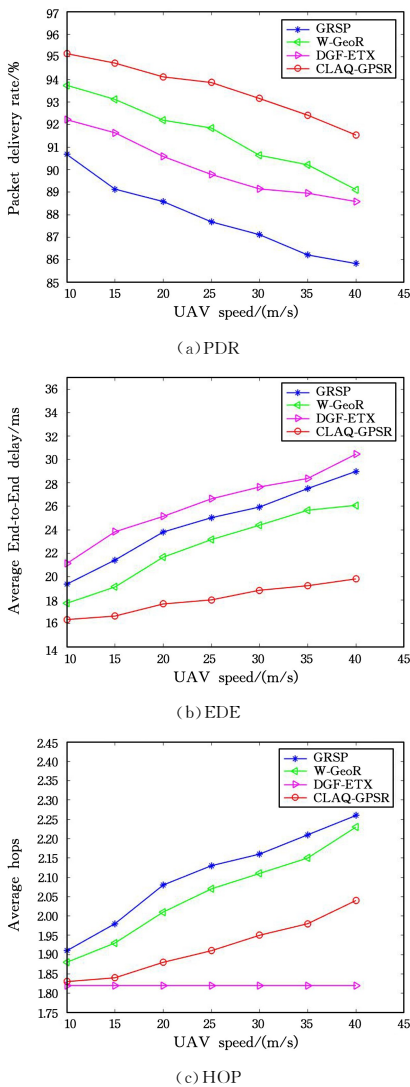


图 7 不同速度下性能对比图

Fig. 7 Performance comparison chart at different speeds

图 7(a)为分组交付率对比,CLAQ-GPSR 协议的分组交付率最高,高出 GPSR 约 4.69%~5.7%,高出 W-GeoR 约 1.47%~2.64%,高出 DGF-ETX 约 3.08%~3.22%。图 7(b)为端到端时延对比,CLAQ-GPSR 协议的端到端时延最低,其端到端时延低于 GPSR 约 18.48%~46.28%,低于

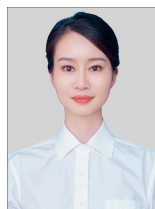
W-GeoR 约 8.51%~31.65%,低于 DGF-ETX 约 29.25%~53.7%。图 7(c)为跳数对比,除 DGF-ETX 协议跳数保持稳定外,CLAQ-GPSR 的跳数少于 GPSR 约 4.37%~10.78%,少于 W-GeoR 约 2.73%~9.31%。虽然 W-GeoR 协议利用移动性因子中的速度差和预估链路到期时间来衡量节点间的链路稳定性,但是该算法并没有考虑通信边缘因素的影响,可能会选择位于通信边缘的节点。速度的加快使得链路断裂的风险加剧,增加了路由修复的次数。DGF-ETX 协议虽然考虑了邻居节点的运动角度、距离和 ETX 因素,但没有考虑通信边缘因素的影响。且路由修复时,在存储等待找到合适的中继节点的过程中,网络拓扑变化速度的加快导致失败重传的次数增多,超过最大重传次数或者数据存储时间超时,导致丢弃数据的风险加剧。而 CLAQ-GPSR 协议设立通信安全区,能够避免选择位于通信边缘的节点在数据传输过程中出现链路中断的情况,利用 ETX 能够在一定程度上筛选出比较稳定的通信节点,通过在通信安全区选择负载和干扰更轻的链路,能够提升链路可靠性,因此其分组交付率和端到端时延性能均为最优。

**结束语** 本文针对网络拥挤的应用环境,为提升在大量实时数据流的场景中 GPSR 协议的链路质量,提出了基于跨层链路质量状态感知的无人机地理位置路由协议 CLAQ-GPSR,利用通信安全区投影长度来解决通信边缘带来的不稳定,并跨层利用物理层和 MAC 层数据设计负载和干扰度量模型,结合 ETX、负载和干扰度量来综合衡量链路质量,提升了传输的可靠性。同时,针对传统路由修复中的右(左)手出现的路由循环和路径冗余现象,本文采用左右手组合转发的方法有效避免了这一问题,同时提升了路由整体的 QoS。仿真结果表明,CLAQ-GPSR 在分组投递成功率、端到端时延、跳数上均表现出了较好的性能。接下来会重点研究信标自适应、位置预测等方面的内容,以提升带宽资源有限的网络环境中 GPSR 协议的性能。

#### 参考文献

- [1] SRIVASTAVA A, PRAKASH J. Future FANET with application and enabling techniques: Anatomization and sustainability issues[J]. Computer Science Review, 2021, 39(1): 1-28.
- [2] NOOR F, KHAN M, ZAHRANI A, et al. A Review on Communications Perspective of Flying Ad-Hoc Networks: Key Enabling Wireless Technologies, Applications, Challenges and Open Research Topics[J]. Drones, 2020, 4(4): 1-14.
- [3] KHAN M, YAU K. Routing Schemes in FANETs: A Survey [J]. Sensors, 2020, 20(1): 1-33.
- [4] HYLAND M, MULLINS B. Simulation-based Performance Evaluation of Mobile Ad Hoc Routing Protocols in a Swarm of Unmanned Aerial Vehicles[C]// 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW'07). IEEE, 2007: 249-256.
- [5] CHEN X, TANG J. Review of Unmanned Aerial Vehicle Swarm Communication Architectures and Routing Protocols[J]. Applied Sciences, 2020, 10(10): 3661-3684.
- [6] MUSTAFA A S, AL-HEETI M M, HAMDI M M, et al. Per-

- formance Analyzing the Effect of Network Size on Routing Protocols in MANETs[C]// 2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications(HORA). 2020;1-5.
- [7] QURESHI K, ABDULLAH A. Localization-based system challenges in vehicular ad hoc networks: survey[J]. Smart Computing Review, 2014, 4(6): 515-528.
- [8] KUMAR K, KUMAR S. Internet of Unmanned Aerial Vehicles: QoS Provisioning in Aerial Ad-Hoc Networks[J]. Sensors, 2020, 20(11): 3160-3182.
- [9] BENMIR A, KORICHI A. GeoQoE-Vanet: QoE-Aware Geographic Routing Protocol for Video Streaming over Vehicular Ad-hoc Networks[J]. Computers, 2020, 9(2): 45-65.
- [10] QURESHI K, BASHIR F. Distance and signal quality aware next hop selection routing protocol for vehicular ad hoc networks[J]. Neural Computing and Applications, 2020, 32(1): 2351-2364.
- [11] ALZAMZAMI O, MAHGOUB I. An enhanced directional greedy forwarding for VANETs using link quality estimation [C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC 2016). IEEE, 2016; 1-7.
- [12] SINGH P, RAW R. W-GeoR: Weighted geographical routing for VANET's health monitoring applications in urban traffic networks[J]. IEEE Access, 2021, 10(6): 38850-38869.
- [13] GAO T, SHI Y. Improved GPSR Protocol Based on Road Network and QoS Model[J]. Chinese Computer Engineering, 2019, 45(2): 7-12.
- [14] AGUAYO D, BICKET J. Link-level measurements from an 802.11 b mesh network[C] // Proceedings of the ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2004; 121-32.
- [15] COELHO A, ALMEIDA E. A Routing Metric for Inter-flow Interference-aware Flying Multi-hop Networks[C]// 2019 IEEE Symposium on Computers and Communications(ISC). IEEE, 2019; 1-6.
- [16] ZHOU Y, MI Z. SZLS-GPSR: UAV Geographic Location Routing Protocol Based on Link Stability of Communication Safe Zone[C]// 2023 15th International Conference on Computer Research and Development(ICCRD). 2023; 258-267.
- [17] COUTO D, AGUAYO D. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing[C]// Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2003; 134-146.
- [18] NARAYAN D, MUDENAGUDI U. A Cross-Layer Framework for Joint Routing and Resource Management in Multi-radio Infrastructure Wireless Mesh Networks[J]. Computers and Electrical Engineering, 2017, 42(8): 651-667.
- [19] BHOJANNAWAR S, MANGALWEDE S. Interference, Traffic Load and Delay Aware Routing Metric for Wireless Mesh Network[J]. Advances in Electrical and Computer Engineering, 2021, 21(1): 57-64.
- [20] KEVIN L, CHENG C. GeoCross: A geographic routing protocol in the presence of loops in urban scenarios[J]. Ad Hoc Networks, 2010, 9(7): 474-488.
- [21] SILVA A, REZA N. Improvement and Performance Evaluation of GPSR-Based Routing Techniques for Vehicular Ad Hoc Networks[J]. IEEE Access, 2019, 7(1): 21722 -21733.



**ZHOU Yanling**, born in 1992, postgraduate. Her main research interests include routing protocol of wireless networks and wireless Ad-Hoc network.



**MI Zhichao**, born in 1974, Ph.D, associate professor. His main research interests include routing protocol of wireless networks and network optimization.

(责任编辑:何杨)