

基于跨层链路质量感知的 OLSR 协议优化研究

李翊嘉, 刘玉涛, 刘倩楠, 刘宪磊, 李佳峰

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081)

摘要: 针对传统 OLSR 协议多点中继选择机制仅依赖拓扑覆盖而忽略链路动态质量的问题, 提出了一种基于跨层设计的 OLSR 改进方案, 对 MPR 选择机制进行优化; 构建跨层综合状态因子, 融合物理层误比特率、MAC 层帧接收成功率、MAC 层队列长度等多维指标, 设计拓展 HELLO 消息格式, 新增 CSE 跨层字段, 实现邻居节点状态的实时交互; 设计新的 MPR 选择机制, 将传统覆盖度优先策略优化为基于 CSE 加权的多目标决策模型, 通过动态评分函数同时优化链路稳定性和负载均衡; 仿真结果表明: CSE-OLSR 在分组投递率、平均端到端时延等方面均优于传统 OLSR, 能够有效提高数据传输的稳定性和可靠性, 适用于高动态、高负载的 MANETs 场景。

关键词: 移动自组网; OLSR 协议; 跨层设计; 链路质量感知; 路由优化

Research on Optimization of OLSR Protocol Based on Cross-Layer Link Quality Awareness

LI Yijia, LIU Yutao, LIU Qiannan, LIU Xianlei, LI Jiafeng

(The 54th Research Institution of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Aiming at the issue that the traditional OLSR protocol's multipoint relay selection mechanism relies solely on topological coverage while ignoring the dynamic quality of links, an improved OLSR scheme based on cross-layer design is proposed to optimize the MPR selection mechanism. A cross-layer comprehensive state factor is constructed, integrating multi-dimensional metrics such as the physical layer's bit error rate, the MAC layer's frame reception success rate, and the MAC layer's queue length. The HELLO message format is extended to include a new CSE cross-layer field, enabling real-time interaction of neighbor node states. A new MPR selection mechanism is designed, optimizing the traditional coverage-first strategy into a multi-objective decision-making model weighted by CSE. This mechanism employs a dynamic scoring function to simultaneously enhance link stability and load balancing. Simulation results demonstrate that CSE-OLSR outperforms the traditional OLSR in terms of packet delivery rate and average end-to-end delay, effectively improving the stability and reliability of data transmission, making it suitable for highly dynamic and high-load MANETs scenarios.

Keywords: mobile ad hoc networks; OLSR protocol; cross-layer design; link quality awareness; routing optimization

0 引言

移动自组织网络 (MANETs, mobile ad hoc networks) 是一种无需固定基础设施、由移动节点通过无线链路动态组成的分布式网络。其核心优势在于高度的自组织性和灵活性, 能够快速适应环境变化, 广泛用于军事通信、应急救灾、智能交通等领域。在 MANETs 中, 节点通过分布式协作实现数据的多跳传输, 摆脱了

对中心节点的依赖, 从而在复杂或不可预测的环境中展现出极强的生存能力和适应性。然而, 这种动态自组织的特性也带来了显著的技术挑战^[1-3]。首先, 网络的拓扑结构因节点的移动性和无线链路的时变性而频繁变化, 导致路由路径的不稳定性^[4-5]。其次, 无线信道的开放性使得链路易受干扰和衰减影响, 尤其在多径传播和节点密度较高的场景下, 链路质量波动剧烈^[6-8]。此外, 节点的资源受限特性 (如有限的电池容量、处理能

收稿日期:2025-06-02; 修回日期:2025-09-01。

基金项目:先进通信网全国重点实验室基金项目(FFX24641X005);国家重点研发计划资助(2022YFC3801100)。

作者简介:李翊嘉(2001-),女,硕士研究生。

通讯作者:刘玉涛(1981-),男,高级工程师。

引用格式:李翊嘉,刘玉涛,刘倩楠,等. 基于跨层链路质量感知的 OLSR 协议优化研究[J]. 计算机测量与控制,2026,34(1):166-172,180.

力与缓存空间)要求路由协议在保障性能的同时, 必须兼顾能耗效率和负载均衡^[2,9-12]。尽管现有的路由协议通过拓扑感知、多路径转发等策略部分缓解了这些问题, 但在高动态、高负载的复杂场景中, 传统的分层路由机制仍难以全面捕捉物理层与 MAC 层的实时状态, 导致链路质量评估失真、拥塞控制滞后等缺陷, 严重影响了数据传输可靠性。

优化链路状态路由协议 (OLSR, optimized link state routing) 作为 MANETs 中经典的链路状态路由协议, 通过引入多点中继 (MPR, multipoint relay) 机制, 显著降低了控制消息的开销并提高了路由稳定性^[13-14]。MPR 机制的核心思想是选择部分关键节点作为中继, 负责转发拓扑控制消息, 从而减少全网广播的冗余。这种机制在静态或低动态网络中表现优异, 能够有效维护全局拓扑信息并快速收敛路由表。然而, 传统 OLSR 协议的 MPR 选择策略主要基于网络层的局部拓扑信息, 缺乏对底层链路状态和节点负载的综合考量^[15-17]。在高动态、高负载的复杂场景中, 物理层信道的时变特性和 MAC 层的队列拥塞可能导致 MPR 节点实际转发能力与理论覆盖范围严重偏离。例如, 一个覆盖度高的节点可能因信道质量差或缓存溢出而频繁丢包, 成为网络瓶颈; 而负载均衡的缺失则可能导致部分节点过早耗尽资源, 加剧网络分裂风险。针对这些不足, 亟需设计一种跨层感知的 MPR 选择机制, 通过整合物理层、MAC 层与网络层的多维信息, 动态评估链路质量与节点状态, 从而在覆盖范围、链路稳定性与负载均衡之间实现最优权衡, 提升高动态 MANETs 的整体性能。

为了解决上述问题, 本文提出了一种基于跨层设计的 OLSR 改进方案 (CSE-OLSR, cross-layer state enhanced OLSR)。该方案结合物理层、MAC 层和网络层信息, 通过跨层感知机制实时获取信道状态、链路质量、节点负载等关键参数, 并引入改进的 MPR 选择策略以提高 OLSR 在高动态 MANET 环境下的适应性和性能。在 CSE-OLSR 方案中, 我们主要进行了以下优化: 首先, 在 OLSR 协议的 Hello 消息中增加额外字段, 使其能够携带跨层信息, 包括信道状态信息、链路误码率、队列长度等。通过这些信息, 节点可以更准确地评估邻居节点的通信质量, 从而优化 MPR 选择过程。其次, 在 MPR 选择过程中, 不仅考虑传统的连通性指标, 还引入跨层质量参数, 使得 MPR 节点的选择更加稳定和可靠。最后, 在 NS-3 平台上对 OLSR 和 CSE-OLSR 进行了对比仿真, 主要分析了两者在数据分组投递率、端到端时延和吞吐量等关键性能指标上的差异。实验结果表明, CSE-OLSR 通过跨层感知和优化的 MPR 选择策略, 能够有效降低端到端时延, 提高数据

投递率和吞吐量, 尤其在高负载和高移动性环境下具有更好的适应性和稳定性。

本文的结构安排如下: 第一章介绍 OLSR 协议的基本原理以及其存在的主要问题; 第二章详细阐述 CSE-OLSR 的设计思想, 包括跨层信息的获取与利用以及 MPR 选择优化; 第三章描述仿真实验的设计, 给出性能评估指标, 并分析实验结果; 第四章总结全文, 并讨论未来的研究方向。

1 传统 OLSR 协议与跨层优化需求

1.1 OLSR 路由协议原理

优化链路状态路由协议是一种先应式路由协议, 它是在传统的链路状态路由协议的基础上改进而成的。OLSR 协议的核心思想是通过定期交换链路状态信息, 使每个节点能够维护一份完整的网络拓扑视图, 从而为数据包的转发选择最优路径。OLSR 协议的一个显著特点是采用了多点中继机制^[18-19]。MPR 机制的主要目的是减少网络中控制信息的洪泛, 通过选择一组最优的中继节点 (MPR 节点) 来转发 TC 消息, 从而优化网络性能。

OLSR 协议由一系列基本操作组成, 主要包括链路侦听、邻居探测、MPR 的选择、TC 分组的广播和路由表的计算, 它的工作流程如图 1 所示, 首先, 每个节点会定期广播 Hello 消息, 通过这种本地通信来发现单跳邻居并检测链路状态, 建立初始的邻居关系表。基于这些邻居信息, 节点会执行关键的 MPR 选择过程。当节点选择完其 MPR 集后, 通过 TC 拓扑控制分组的洪泛将消息传播到整个网络, 其他节点根据收到的 TC 消息得知全网的联通拓扑, 建立自己的拓扑信息表。节点根据自己的一跳邻居表、两跳邻居表、拓扑信息表生成去往全网其他可达节点的路由表。路由表建立完成后, 网络就可根据路由表传递数据业务包, 进行正常的通信工作。当网络中的拓扑信息发生变化时, 定时生成的 HELLO 分组和 TC 分组会重新进行全网拓扑信息的维护过程, 并重新计算路由表。

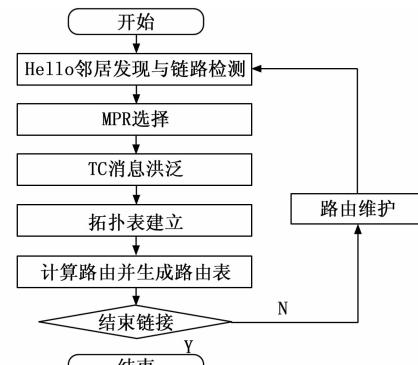


图 1 OLSR 协议流程图

1.2 跨层优化的需求与可行性

移动自组网是一种自组织、动态变化的无线网络，由多个移动设备组成，具有高度的灵活性和自适应性。与传统的有线网络相比，MANET 不依赖固定的基础设施，节点的动态拓扑和网络环境变化较大。传统的分层协议设计方法主要是为固定的网络环境（如 Internet）设计的，这种方法简化了协议的设计和实现，但由于无线信道的时变特性和节点的高动态性，使得网络的链路断裂、路由改变成为常态，严重影响数据稳定传输。尽管 OLSR 协议通过拓扑感知能够适应大规模和动态变化的网络环境，但在拥塞控制方面仍然存在不足。因此，如何优化 OLSR 协议以适应 MANET 的动态特性，成为了当前研究的重要课题。

跨层设计（CLD, cross-layer design）作为一种打破传统分层架构的设计方法，允许不同层次之间直接交互和共享信息，从而优化网络的整体性能。在 MANET 中，跨层设计的核心思想是：不同网络层（如物理层、MAC 层、网络层和传输层）不再独立优化，而是通过协调和信息交换来共同提升网络性能。通过综合分析网络各层的状态信息，跨层设计能够实现更加高效的网络资源管理、路由选择和拥塞控制。

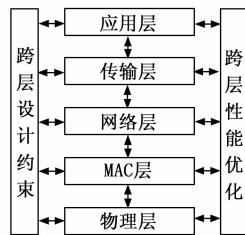


图 2 MANETs 跨层设计及参数传递

近年来，许多学者提出基于跨层设计的路由优化方案，文献 [20] 中提出基于预期传输次数 ETX 的路由选择方案，通过测量前向和反向链路的丢包率，计算数据包成功传输所需的平均传输次数，并以此选择稳定路径。文献 [21] 在 ETX 基础上，进一步引入带宽因素，计算数据包通过链路的预期传输时间 ETT，使得高带宽路径优先被发现。文献 [22] 对物理层进行研究，提出基于 SINR 优化的跨层路由，通过测量信号功率与干扰噪声功率比值判断链路质量。Marina 等人对 MAC 层进行研究，提出一种基于竞争窗口（CW, contention window）的 OLSR 路由改进方案，优先选择节点在发送数据前等待时间较短的路径^[23]。

上述这些跨层设计的优化方法在一定程度上提升了网络的性能，在 MANETs 中得到了广泛的应用，但它们主要基于单一的网络参数进行路径选择，所以也存在一些问题。ETX 和 ETT 两种判决方式仅考虑了链路质量，但未考虑节点的负载状态，当路径上某些节点因队

列过长而发生拥塞时，ETX 和 ETT 仍可能选择这些路径，导致时延增加、丢包率上升。SINR 仅考虑物理层信号质量，未考虑 MAC 层的重传次数、竞争状态、队列长度等因素，容易选择信号强但负载高的路径。并且，由于网络拓扑变化频繁，基于单一参数的度量方式无法灵活适应网络状态变化，导致路径不稳定，影响数据传输的可靠性。

2 基于跨层设计的 OLSR 路由协议

本节详细阐述基于跨层设计的 OLSR 路由协议优化方案。首先，设计跨层综合状态因子（CSE, cross-layer state enhanced），通过融合物理层误码率、MAC 层帧接收成功率及队列负载等多维参数，构建链路质量与节点状态的量化评估模型，为路由决策提供跨层感知依据。其次，对 HELLO 消息格式进行扩展，新增 CSE 字段，将物理层与 MAC 层的关键状态信息实时广播至邻居节点，实现全网链路质量的动态同步。在此基础上，优化 MPR 选择机制，将传统基于拓扑覆盖度的单一选择策略改进为结合 CSE 的动态评分模型，优先选择覆盖范围广、链路质量优、负载均衡的节点作为 MPR，从而降低控制开销并提升路由稳定性。

2.1 跨层状态因子

基于 1.2 节的分析我们发现单一的网络参数不能全面的反应当前的网络状态，其次，跨层设计的核心目标之一是提升网络性能的同时，避免额外的计算和通信开销，为此在选取跨层参数时，应遵循参数易于获取、计算复杂度低等原则。基于以上原则，通过分析 MANETs 网络的关键影响因素，从物理层、MAC 层选取参数，并将其综合计算形成跨层综合状态因子（CSE），作为路由选择的判决标准。

在无线自组网中，由于信道的竞争、信号干扰以及节点移动性等因素，数据的传输成功率会受到影响。帧接收成功率（FRSR, frame reception success rate）是衡量链路质量的重要指标，它表示在一定的时间窗口内，从邻居节点成功接收的数据帧占其接收数据帧总数的比例，其计算公式如下：

$$F_r(i, t) = \frac{\sum_{j=0}^{n-1} F_s(j, t)}{\sum_{j=0}^{n-1} \{F_e(j, t) + F_s(j, t)\}} \quad (1)$$

$$FRSR(i) = E[F_r(i, t)] \quad (2)$$

其中： $F_r(i, t)$ 为节点 i 在时间 t 内，MAC 帧接收成功率， $F_s(j, t)$ 为在时间 t 内，来自节点 j 的成功接收的帧数， $F_e(j, t)$ 为在时间 t 内，来自节点 j 的错误帧数， n 为统计的邻居节点数。为提高计算的稳定性，FRSR 通常采用一段时间内期望值计算。FRSR 直接反映无线链路的可靠性，能够表征数据帧在传输过程中受信道干扰、信号衰减等因素影响的综合结果。相较于传统基于跳数的

链路评估, FRSR 通过统计实际数据帧的传输成功率, 能够更精确地识别拥塞链路或弱信号路径, 为路由选择提供实时质量反馈。低 FRSR 会导致大量的数据重传, 增加端到端时延和网络负载。通过选择 FRSR 较高的路径, 可以减少重传次数, 提高传输效率。

节点的网络负载和信道状况对路由性能有重要影响, 节点状态评估延迟 (NSAD, node status assessment delay) 用于综合衡量节点当前的业务负载情况, 并考虑信道质量对数据传输的影响, 其计算公式为:

$$NSAD = E\left(\frac{Dr(t)}{D_m \cdot \alpha(1 - BER)}\right) \cdot T_b + E\left(\frac{Q_l(t)}{Q_c}\right) \cdot T_c \quad (3)$$

其中: $Dr(t)$ 为节点 t 时刻的业务数据速率, D_m 为节点的最大传输速率, α 为网络效率因子, BER 为物理层误比特率, 表示信道质量, $Q_l(t)$ 为节点 t 时刻 MAC 层队列长度, Q_c 为节点的最大队列容量, T_b , T_c 表示业务速率和 MAC 队列长度对时延的影响因子 ($T_b + T_c = 1$)。节点的业务负载决定了其转发能力, 高负载节点的传输时延较长, 可能成为网络瓶颈, 通过 NSAD 评估节点当前的负载状态, 可能避免选择高负载节点作为 MPR 节点。

CSE 由 FRSR 和 NSAD 计算得到:

$$CSE(i) = \frac{NSAD}{FRSR(i)} \quad (4)$$

FRSR 筛选高可靠性链路, 降低数据重传开销, NSAD 规避高负载节点, 避免局部拥塞扩散, 双参数实时更新, 适应拓扑快速变化与业务波动。CSE 的值越小代表当前路径的综合状态越好。

2.2 OLSR 消息格式扩展

在 OLSR 协议中, HELLO 消息和拓扑控制消息是核心的控制报文, 分别用于邻居发现和全网拓扑信息维护。传统 OLSR 的 HELLO 消息仅包含基本的邻居信息, 并未涉及链路质量、节点负载等关键指标, 而 TC 消息仅传递 MPR 选出的拓扑信息, 未能提供全局范围内的链路质量参数。为支持跨层路由决策, 本方案在 HELLO 消息的基础上进行拓展, 引入跨层综合状态因子及相关链路质量参数, 使得节点在邻居发现和拓扑维护过程中可以共享物理层和 MAC 层的重要信息, 从而优化 MPR 选择。

基于 2.1 节中的分析, 我们在 HELLO 消息中增加了跨层综合状态因子字段, 扩展后的 HELLO 消息格式如图 3 所示。扩展后的 HELLO 消息通过新增字段实现了跨层状态交互。为明确各字段的功能定义与数据格式, 表 1 给出了详细的字段解析, 说明了各字段的存储方式、取值范围及作用。

Byte0 01234567	Byte1 01234567	Byte2 01234567	Byte3 01234567
Reserved		Htime	Willingness
Link Code	Reserved	Link Message Size	
Neighbor interface address			CSE

图 3 HELLO 消息格式

表 1 HELLO 分组字段解析

字段	作用
Reserved	保留字段, 为今后对协议的拓展留出空间。
Htime	发送间隔, 表示 HELLO 消息的发送周期。
Willingness	数据转发意愿, 表示一个节点给邻居节点转发信息的意愿程度, 该字段的值总共 5 种, 从低到高分别为 0、1、3、6、7, 是 MPR 节点的判定准则之一。意愿的值为 0 表示不会成为任何节点的 MPR, 意愿的值为 7 代表总会被选做 MPR, 默认情况下, 该字段为 willing default。
Link Code	链路编码, 该字段包括链路类型 (Link Types) 和相邻节点类型 (Neighbor Types) 两种。
Link Message Size	链路消息大小。该字段表示每类消息的大小, 计算方式是从“Link Code”字段开始到下一个“Link Code”字段结束。
Neighbor Interface Address	邻居节点接口地址, 记录邻居节点的 IP 地址。
CSE	通过 FRR、BER 和 QL 计算得到的链路质量综合评分, 作为后续 MPR 选择和路径选择的依据。

2.3 MPR 选择的优化

MPR 机制作为优化链路状态路由协议的核心创新, 通过精简控制消息的传播路径, 显著提升了 MANETs 的路由效率。MPR 机制通过选择性洪泛大幅降低了控制开销。在传统链路状态协议中, 每个节点都需要向所有邻居广播拓扑信息, 导致网络中出现大量的冗余消息。而 MPR 机制仅由被选中的 MPR 节点负责转发 TC 消息, 而非 MPR 节点不会被用于转发广播信息。通过这种方式, OLSR 协议可以减少网络中链路状态信息的广播次数, 同时确保网络拓扑的最新信息能够迅速传播到整个网络中, 不仅减少了控制信息的数量, 还提高了路由计算的效率。

传统 OLSR 协议采用基于覆盖度的确定性 MPR 选择算法, 具体过程如图 4 所示。第一阶段, 节点 A 周期性广播 HELLO 消息, 消息中包含邻居列表和链路状态信息, 构建两个关键数据结构: 一跳邻居集合 $N_1 = \{n_1, n_2, \dots, n_i\}$ 和二跳邻居集合 $N_2 = \{m_1, m_2, \dots, m_{11}\}$ 。第二阶段, 对于每个一跳邻居 $n_i \in N_1$, 计算其覆盖度 $C(n_i) : C(n_i) = |N_2(n_i) \cap U|$, 其中 $N_2(n_i)$ 表示 n_i 可达的二跳邻居集合, U 为当前未被覆盖的二跳邻居集合。第三阶段, 逐步选择 MPR 节点, 算法具体流程如下:

- 1) 初始化 MPR 集合 $M = \varnothing$, 未覆盖集合 $U = N_2$;
- 2) 更新每个一跳邻居 $n_i \in N_1$ 的覆盖度 $C(n_i)$, 选择覆盖度 $C(n_i)$ 最大的节点加入 M ;
- 3) 从 U 中移除被新 MPR 覆盖的邻居;
- 4) 重复 2) ~ 3) 直至 $U = \varnothing$;

该算法保证了所选 MPR 集合能够覆盖所有二跳邻居, 同时尽可能最小化 MPR 数量。在典型配置中, HELLO 消息间隔为 2 秒, MPR 选择每 10 秒重新计算一次, 以平衡开销与及时性。按照上述流程, 选出一组 MPR 节点 $\{n_1, n_3, n_5\}$ 。

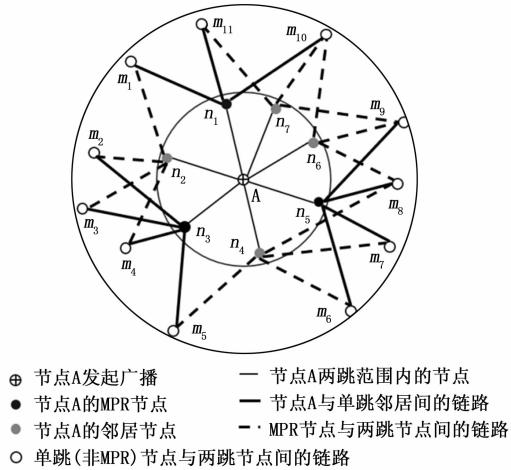


图 4 MPR 机制

尽管 MPR 机制具有显著优势, 但传统选择策略在动态 MANETs 环境中暴露出很多关键缺陷, 首先, 基于拓扑覆盖的单一指标忽视了链路质量差异, 在实际无线环境中, 具有相同覆盖度的两条链路可能存在显著的质量差异; 其次, 静态参数配置难以适应动态网络环境, MPR 选择依赖的 willingness 值通常是预先配置的固定参数, 无法反映节点实时的资源状态; 并且, 缺乏对网络负载的考量, 传统算法选择 MPR 时未考虑节点的当前负载, 可能导致流量集中于少数节点, 当某 MPR 节点的 MAC 层队列持续拥塞时, 不仅影响自身转发性能, 还会造成控制消息丢失, 进而引发路由信息不一致。这些不足严重制约了 OLSR 协议在高动态、高负载场景中的性能表现, 亟需引入跨层优化机制来提升 MPR 选择的智能化水平。

本方案在 MPR 的选择过程中引入跨层综合状态因子, 不仅考虑邻居节点的可达性, 还结合其链路质量和负载情况, 使得选出的 MPR 既能高效传播拓扑信息, 又能确保链路稳定性和负载均衡。在优化方案中, MPR 选择需同时满足以下三个条件: 能覆盖尚未被 MPR 选中的二跳邻居; CSE 值较低, 即链路质量高、负载低, 确保拓扑信息稳定传播; 兼顾 MPR 数量最

少, 减少 OLSR 控制报文的冗余传输, 提高协议效率。为实现上述目标, 定义 MPR 评分用于衡量节点的 MPR 选择优先级, 其计算公式如下:

$$MPR_{Score(n_i)} = \frac{C(n_i)}{CSE(n_i)} \quad (5)$$

其中: $C(n_i)$ 表示节点 n_i 能够覆盖的二跳邻居数量, $CSE(n_i)$ 表示跨层综合状态因子, 由 FRR 和 NSAD 计算得到。 MPR_{Score} 的设计实现了覆盖度与质量的动态权衡, 分子确保拓扑信息传播的完备性, 是 OLSR 协议低开销的基础; 分母通过倒数形式强化链路质量与低负载的优先级, 当 CSE 差异显著时, 分母主导评分, 此时高质量链路优先; 当 CSE 相近时, 覆盖度决定优先级, 符合 MPR 机制的核心目标。 MPR_{Score} 的计算公式确保覆盖更多的二跳邻居且链路质量较优的节点具有更高的 MPR 评分, 从而在 MPR 选择过程中优先选中。

在传统 MPR 选择机制的基础上, 优化后的 MPR 选择过程如图 5 所示。

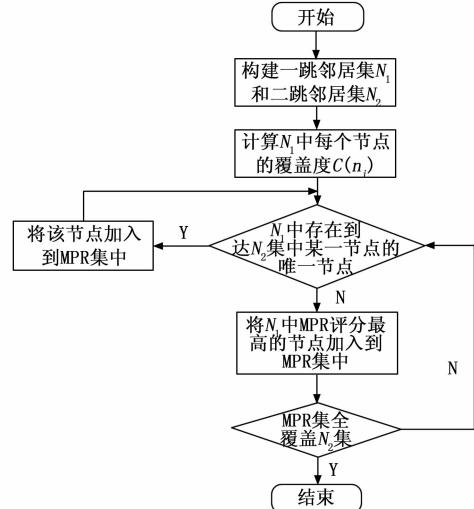


图 5 优化后 MPR 选择过程

每个节点通过周期性 HELLO 消息获取其直接邻居和二跳邻居的信息, 统计所有直接邻居 $N = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_k\}$ 各自覆盖的二跳邻居集合。根据公式 (5) 计算每个邻居的 MPR_{Score} 评估每个候选 MPR 节点的优先级, 按 MPR_{Score} 降序排列, 得到节点优先选择集, MPR 评分越高的节点, 说明其既能覆盖较多的二跳邻居, 又具有较好的链路质量, 因此优先被选做 MPR。依次选取评分最高的一跳邻居作为 MPR, 并更新二跳邻居的覆盖状态; 若某个二跳邻居已经被选中的 MPR 覆盖, 则不再需要额外的 MPR 进行冗余覆盖; 重复该过程, 直到所有的二跳邻居都被至少一个 MPR 节点覆盖。

3 仿真结果与分析

基于 NS-3.37 仿真平台, 在 Ubuntu 24.04 环境下

运行仿真实验, 以模拟 OLSR 以及 CSE-OLSR 优化版本在 MANETs 网络中的性能表现。节点数分别设置为 20/25/30/35/40/45/50/55/60, 仿真区域设置为 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$, 节点的运动速度分别设置为 4/6/8/10/12/14/16 m/s, 节点的运动采用随机航点移动模型 (Random Waypoint Mobility Model), 且不设置暂停时间, 模拟节点持续移动的高动态网络环境, 节点最大通信半径为 200 m, 采用 DSSS 11 Mbps 的物理层模式。为评估协议性能, 仿真中配置了 UDP 数据流, 使用 OnOffApplication 生成流量。数据包大小固定为 64 字节, 传输速率为 2 048 bps, 仿真持续时间为 100 s。使用 FlowMonitor 模块收集每个流的统计数据, 选取的路由协议性能指标包括分组投递率、平均端到端时延, 通过分析变化的趋势来衡量网络性能。

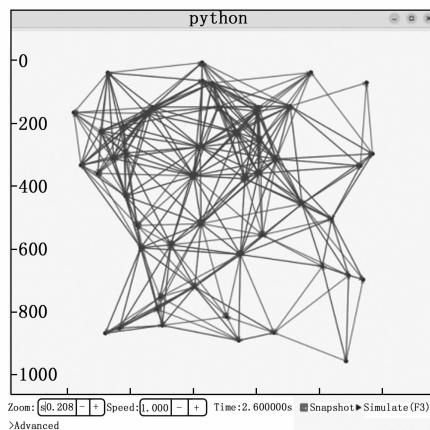


图 6 仿真场景设置

分组投递率 (PDR, packet delivery ratio) 表示目的节点成功接收到来自源节点发送数据包的数量在源节点发送的总数据包数量的比重, 通过衡量网络成功传输包的比例, 评估网络稳定性和可靠性。平均端到端时延 (AD, average delay) 是由路由发现时延、路由中断修复时延和数据分组处理时延等组成, 是数据分组从源节点到达目的节点的时间差值, 主要用来衡量路由效率和网络性能。

3.1 不同的节点移动速度

固定节点数为 30, 节点最大移动速度分别设置为 4/6/8/10/12/14/16 m/s, 仿真数据如图 7~8 所示。通过图 7 可知, 随着节点最大移动速度的增加, 原始 OLSR 协议与 CSE-OLSR 协议的平均端到端时延都呈上升趋势, 这是由于节点移动速度加快, 链路断裂概率增大, 路由协议需要频繁更新拓扑信息, 增加路由发现和维护的开销, 并且, 链路不稳定还会导致数据包丢失, 触发重传机制, 累积时延。但改进后的路由协议的端到端时延性能要比原始协议更加优越, 主要得益于跨层链

路质量评估减少无效重传。

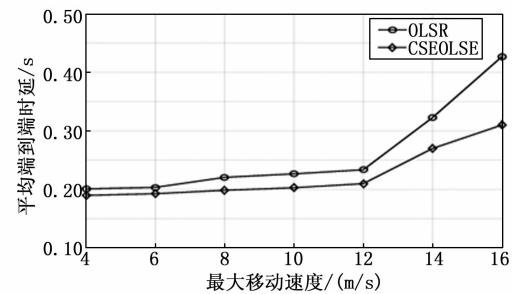


图 7 平均端到端时延随速度变化的性能对比

通过图 8 可知, 随着节点最大移动速度的增加, 原始 OLSR 协议与 CSE-OLSR 协议的分组投递率都持续下降。原因是高速移动导致节点间的物理链路频繁中断, 数据包传输路径失效概率增大, 并且, 链路中断和丢包触发重传机制, 但频繁的重传会加剧网络拥塞, 进一步降低分组投递率。但相较于标准 OLSR 协议, 改进后的 CSE-OLSR 协议的分组投递率性能整体上有所提升。这是因为优化后路由协议的 MPR 选择机制需要综合考虑链路质量和负载, 能够较好的适应由于节点高速移动导致拓扑频繁变化的网络。

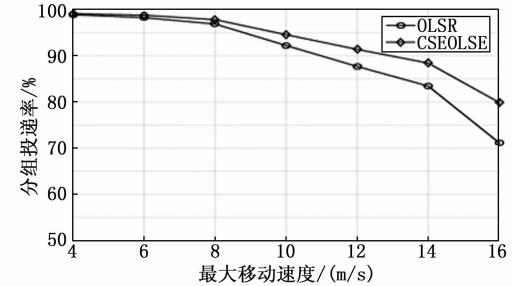


图 8 分组投递率随速度变化的性能对比

3.2 不同的节点数

固定节点最大移动速度为 10 m/s, 节点数分别设置为 20/25/30/35/40/45/50/55/60, 仿真数据如图 9~10 所示。通过图 9 可知, 随着网络中节点数目的增加, 原始 OLSR 协议与 CSE-OLSR 协议的平均端到端时延都呈上升趋势, 主要原因是节点的增加导致信道竞争加剧, MAC 层冲突概率升高, 数据包传输需多次退避, 增加单跳时延, 并且, 更多的节点会导致端到端路径跳数增加, 累积时延随之增加。但优化后的路由协议的端到端时延性能要比原始协议更加优越, 原因是优化后的 MPR 选择机制, 通过整合物理层、MAC 层与网络层的多维信息, 动态评估链路质量与节点状态, 显著提升了网络的传输效率, 更加适应大规模高密度的网络场景。

通过图 10 可知, 随着网络中节点数目的增加, 原

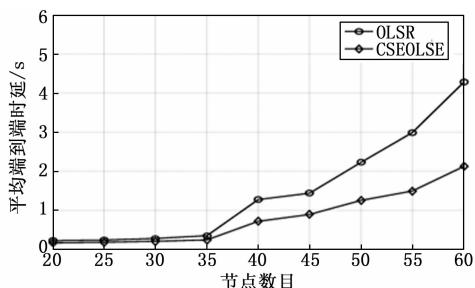


图 9 平均端到端时延随节点数量变化的性能对比

始 OLSR 协议与 CSE-OLSR 协议的分组投递率都持续下降, 主要原因是节点密度增加导致 MAC 层冲突概率上升, 数据包因碰撞而丢失, 并且, 多跳路径的中间节点增多, 链路断裂概率累积, 端到端传输失败风险升高。但改进后的 CSE-OLSR 协议相较于标准 OLSR 协议分组投递率性能整体上有所提升。原因是优化后的 MPR 选择机制, 基于 CSE 评分动态选择多点中继节点, 避免高负载节点成为瓶颈。

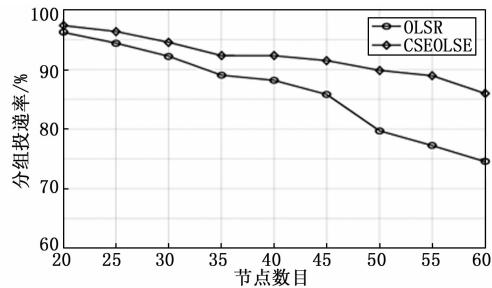


图 10 分组投递率随节点数量变化的性能对比

4 结束语

本文针对 OLSR 的特点, 结合物理层、MAC 层和网络层信息, 通过跨层感知机制实时获取信道状态、链路质量、节点负载等关键参数, 对 MPR 选择算法进行改进, 以提高 OLSR 在高动态 MANET 环境下的适应性和性能。将改进后的协议与原版协议进行对比, 在不同节点数和最大移动速度下分析其性能差别, 分析指标包括平均端到端时延、分组投递率。结果表明, 在高动态、高负载的网络环境下, CSE-OLSR 相较于传统 OLSR 具有更优的网络适应性和稳定性。该研究表明跨层设计能够有效提升 OLSR 协议在 MANETs 中的性能, 然而, 仍有一些问题值得进一步研究, 例如, 针对路由开销问题, 研究基于拓扑变化的控制消息自适应算法, 通过动态调整 HELLO 消息的发送频次, 在保证路由及时性的同时减少冗余控制流量; 如何适配更复杂的移动模型和真实的网络环境, 以验证 CSE-OLSR 的通用性和鲁棒性。未来的研究可结合智能算法、机器学习进一步优化 MPR 选择和路由计算, 以增强网络智能化水平。

参考文献:

- SAFARI F, SAVIC I, KUNZE H, et al. The diverse technology of MANETs: a survey of applications and challenges [J]. Int. J. Future Comput. Commun., 2023, 12 (2): 37–48.
- ALWAN A H, AZIZ A A R, JUBAIR M A, et al. Monitoring the impact of the nodes density on the MANETs' environment [C] //2022 5th International Conference on Engineering Technology and its Applications (IICETA), IEEE, 2022: 546–549.
- 朱天林. 基于蚁群优化的移动自组网路由协议研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2023.
- ELTAHLAWY A M, ASLAN H K, ABDALLAH E G, et al. A survey on parameters affecting MANET performance [J]. Electronics, 2023, 12 (9): 1956.
- RAMPULL D, MUNGUR A, ARMOOGUM S, et al. A review of mobile ad hoc network (MANET) protocols and their applications [C] //2021 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), IEEE, 2021: 204–211.
- 郑泽峰, 潘艺萍, 吴建平. 无线多跳网络中具中继负载平衡预估的路由算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35 (4): 689–693.
- 胡春, 任智, 崔忠林. 无人机自组网按需寻路的可靠 OLSR 协议 [J]. 小型微型计算机系统, 2021, 42 (1): 122–126.
- 陶洋, 董亚雷, 黄宏程. MANETs 基于跨层设计的多路径路由协议研究 [J]. 计算机工程与设计, 2013, 34 (11): 3790–3795.
- KANELLOPOULOS D. Congestion control for MANETs: An overview [J]. ICT Express, 2019, 5 (2): 77–83.
- 张栋, 高龙. 基于跨层协同的 MANET 网络拥塞控制算法仿真研究 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2013, 35 (1): 26–30.
- CALAFATE C T, MALUMBRES M P, OLIVER J, et al. QoS support in MANETs: a modular architecture based on the IEEE 802.11 e technology [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for video technology, 2009, 19 (5): 678–692.
- JAIN R, KASHYAP I. An QoS aware link defined OLSR (LD-OLSR) routing protocol for MANETs [J]. Wireless Personal Communications, 2019, 108 (3): 1745–1758.
- BAI Y, MAI Y, WANG N. Performance comparison and evaluation of the proactive and reactive routing protocols for MANETs [C] //2017 Wireless Telecommunications Symposium (WTS), IEEE, 2017: 1–5.

(下转第 180 页)