

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.08.006

引用格式: 赖俊宇, 朱俊宏, 郑小辉, 等. 基于节点活跃度的命名数据自组网包转发策略[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(8): 67-77.



# 基于节点活跃度的命名数据自组网包转发策略

赖俊宇<sup>1a</sup>, 朱俊宏<sup>1b</sup>, 郑小辉<sup>1a</sup>, 刘哲<sup>1a</sup>, 肖翰<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学 a. 航空航天学院; b. 计算机科学与工程学院, 成都 611731; 2. 中国空气动力研究与发展中心  
计算空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为提升命名数据移动自组织网络服务质量, 针对其拓扑动态时变特性, 提出一种基于节点活跃度的包转发策略。策略周期性地计算网络节点的活跃度, 并利用高活跃度节点进行兴趣包和数据包的转发和存储。使用 NS-3/ndnSIM 开源框架开发了仿真程序, 将这个策略与默认的洪泛和典型的最短路径路由策略进行评估。实验结果显示, 在中等和高动态性的 MANET(mobile ad hoc network)环境中, 基于节点活跃度的数据包传输策略能通过适度增加节点的存储消耗, 保持较低的平均请求延迟, 同时取得更优秀的请求响应率, 消耗更少网络带宽。

**关键词:** 命名数据移动自组织网络; 转发策略; 节点活跃度; 网络仿真; 服务质量

中图分类号: TP393.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)08-067-11

## Node activeness-based packet forwarding strategy for named data mobile ad hoc network

LAI Junyu<sup>1a</sup>, ZHU Junhong<sup>1b</sup>, ZHENG Xiaohui<sup>1a</sup>, LIU Zhe<sup>1a</sup>, XIAO Han<sup>2</sup>

(1a. School of Aeronautics and Astronautics; 1b. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, P. R. China; 2. Institute of Computational Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, P. R. China)

**Abstract:** To enhance the quality of service (QoS) in named data mobile ad hoc network (NDMANET), this paper proposes a novel node activeness-based packet forwarding (NAPF) strategy designed to mitigate performance degradation caused by the network's time-varying topology. The proposed NAPF strategy periodically calculates and updates the activeness levels of all participating nodes, prioritizing nodes with higher activeness for forwarding and caching interest and data packets. A simulation platform is developed using the open-source NS-3/ndnSIM framework to conduct comparative performance evaluations among default flooding, shortest path routing, and the proposed NAPF strategy. Experimental results indicate that in medium-to high-mobility scenarios, the NAPF strategy significantly reduces average request delay, improves response ratios, and decreases bandwidth consumption, with only a modest increase in node storage usage.

收稿日期: 2020-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(61402085, 61872051)。

Supported by National Science Foundation of China (61402085, 61872051).

作者简介: 赖俊宇(1981—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事网络性能建模与优化、云计算及边缘计算技术应用等方向研究, (E-mail)laijy@uestc.edu.cn。

通信作者: 肖翰(1995—), 男, (E-mail)609544839@qq.com。

**Keywords:** named data mobile ad hoc network (NDMANET); forwarding strategy; node activeness; network simulation; quality of service (QoS)

命名数据移动自组织网络 (named data mobile ad hoc network, NDMANET), 它是以信息中心网络 (information centric networking, ICN) 中最具代表性的命名数据网络 (named data networking, NDN) 技术与传统移动自组织网络 (mobile ad hoc network, MANET) 为基础, 融合形成一种全新的自组织网络结构。NDMANET 可有效缓解基于 TCP/IP 协议簇<sup>[1]</sup>的无线移动自组织网络中一系列问题, 主要包括: 高丢包率、高误码率、建立通信路由持续时间短和频繁中断等。原因主要有以下几方面: 1) 传统 IP 网络依靠 IP 地址来标识和定位网络节点 (包括主机和路由器), 构建节点到节点的连接路由, 实现面向连接 (connection-oriented) 和尽力 (best-effort) 交付的数据传输服务。然而, MANET 网络节点具有移动性, 其位置可能持续动态变化, 无法依靠 IP 地址对其准确定位。因而, 在低动态场景应用广泛的 TCP/IP 协议并不适合中高动态 MANET 应用场景; 2) ICN 是未来网络结构的重要组成部分, 作为其典型实现, NDN 技术采用“接收者驱动”模式, 实现异步通信, 无须建立和维护节点之间连接。此外, NDN 引入了网络缓存技术, 显著提高每个网络节点对无线信道的利用效率, 因此, 该方法可有效减少无效请求的数量, 同时缩短接收请求内容的等待时间。低时延、高稳定的通信链路能显著提升系统的任务执行效率, 同时增强系统的整体可靠性和鲁棒性<sup>[2]</sup>。对于中高动态 MANET 场景, 例如应急救灾场景<sup>[3]</sup>与无人机蜂群场景, NDN 协议比 IP 协议更能满足数据传输的应用需求。目前, 许多研究人员正在探索使用 NDN 技术来构建各种移动自组织网络, 例如普通的移动自组织网络、军事领域的 MANET 和汽车自组织网络<sup>[4]</sup> (vehicular ad hoc networks, VANET)。

随着 NDMANET 技术的发展, 该研究方向受到越来越多研究者关注, 有效的路由转发策略能大幅提高网络性能和服务质量。洪泛 (flooding) 策略<sup>[5]</sup>和最短路径路由 (shortest path routing) 策略<sup>[6]</sup>是 NDMANET 使用的信息包转发策略, 其对网络性能和可靠性起着至关重要作用。这些转发策略是基于先前在有线网络中的 ICN/NDN 实践而来, 尚未充分优化以适应高度动态的无线网络链路和拓扑特点, 还有性能改进的潜力。为提高 NDMANET 网络的性能, 参考容断/容延网络 (delay/disruption tolerant network, DTN) 中的“节点活跃度 (node activeness)”<sup>[7]</sup>理念, 将其融入 NDMANET 的路由转发策略, 应对频繁链路中断和网络拓扑变化等挑战。该策略依照定期监测各节点的活跃度, 将其分高低 2 档, 仅使用活跃度高的节点存储、转发信息包, 提高包转发效率, 减少传输无效信息带来的网络带宽浪费。总的来说, 贡献可总结为以下 3 个方面:

- 1) 笔者创造性给出了一种基于网络节点活跃度的信息包转发策略。这一技术具有良好的兼容性, 只需要把节点活跃度信息增添进原生信息包中, 不需要对网络协议架构做出调整;
- 2) 通过开发基于 NS-3/ndnSIM 的转发策略仿真测试程序, 可有效评估 NDMANET 网络中不同类型包转发策略的性能, 更好地实现高效传输;
- 3) 研究对经典的 flooding 策略、shortest path routing 策略及笔者提出的策略进行性能比较, 从实验结果得到, MANET 环境的动态水平偏中上时, 提出的策略通过适度提升节点存储容量, 维持较低的平均请求延迟, 提高请求响应率, 降低网络带宽的消耗。

## 1 背景

概述基于 NDN 协议的 MANET, 另外介绍 NDMANET 的 2 种常用转发策略, 最后探讨信息包传输技术面临的困难和挑战。

### 1.1 基于 NDN 协议的 MANET

MANET 是典型的对等无线通信网络, 很容易遭受无线环境中频道衰减和阴影等环境因素的干扰。目前, “数据链路层 (OSI 模型的 L2 层)” 提供了介质访问控制 (medium access control, MAC) 策略, 可完成 CSMA/CA 和 TDMA 2 种方法的传输, 防止在无线信道上发生冲突, 提高系统的可靠性。MANET 的“网络层 (OSI 模型的 L3 层)”通常使用 IP 协议为主, 尽管它在固定网络中取得巨大成功, 但在适应高动态性 MANET

应用场景时存在局限性。首先,基于 IP 协议的 MANET 是一种主机中心网络(host-centric network, HCN), 其中 IP 地址是节点的身份标识符, 用来定位节点在网络拓扑中的位置。然而, 当 MANET 节点脱离自组织网络时, 其位置无法被定位, 原本建立的通信路径也会随之中断。此外, 为了保持节点间的关联性并实时更新位置, 移动节点需要生成大量的控制信令, 这种机制会大幅消耗网络带宽资源, 增加网络负载, 导致网络性能下降。同时, MANET 基于 IP 协议的“发送方触发”传输方式, 可能无法充分利用发送方及路径中继节点的信道资源, 难以构建反映网络全局状态的最优转发路径, 限制了 IP 协议在 MANET 中的高效应用。

## 1.2 NDMANET 常用转发策略介绍

当前 NDMANET 中广泛采用的包转发策略主要包括洪泛策略和最短路径路由策略。

### 1.2.1 洪泛策略

洪泛策略是一种在 NDMANET 中常见的数据传输方法, 核心是通过广播方式实现数据在网络中的传播。当某个节点需要特定数据时, 它会生成一个兴趣包(interest packet), 在兴趣包中包含所需要数据的名称, 通过无线网络广播给邻近节点。收到兴趣包的邻居节点会解析包中的信息, 判断是否需要转发该数据。若需要, 则继续广播兴趣包; 若不需要, 则直接丢弃。这一过程会在网络中不断重复, 直到兴趣包到达包含目标数据的节点。目标节点在接收到兴趣包后, 会生成相应的数据包, 将其返回给最初发出兴趣包的节点。在网络拓扑较为稳定的情况下, 洪泛策略能够快速、高效定位所需要数据。然而, 当网络具有较高动态性时, 为适应拓扑变化, 兴趣包的传播次数可能显著增加, 导致网络拥塞和带宽资源浪费。

### 1.2.2 最短路径路由策略

在 NDMANET 中, 最短路径路由策略类似于洪泛策略, 但引入了距离值的考量。当一个用户节点需要发送数据包到目标节点时, 它首先广播一个兴趣包, 包含了额外信息用于计算与中继节点的距离值(consumer distance, cd)。生产者节点接收兴趣包后, 在生成的数据包中插入距离值, 而中继节点在接收数据包后, 提取出自身到生产者节点的距离值(producer distance, pd)和生产者到用户节点的最短距离(minimum distance, md)。然后, 中继节点根据不等式  $cd+pd \leq md$  判断是否继续传输数据包, 以选择最佳路径。这种策略有助于提高网络效率, 减少冗余传输, 有效管理数据在无线自组织网络中的传输。在大多数 NDMANET 网络中, 包转发策略通常未充分考虑到 MANET 网络的性质, 为提高网络性能, 引入一种创新性概念, 即“节点活跃度”。

## 2 研究现状

对于 MANET 网络中具有移动特点的节点, 其网络拓扑会实时变化, 网络链路会频繁中断, 导致网络出现高丢包率、高误码率和高延迟, 严重影响网络性能。近年来, 也有学者提出了分簇式协议<sup>[8]</sup>, 但是分簇式协议对簇首节点的依赖大、耗能高, 无法完全解决基于 IP 协议的 MANET 网络问题。NDMANET 是一种将 NDN 技术与 MANET 网络融合的新型网络架构<sup>[9]</sup>, 继承了基于 NDN 固网场景的包转发策略。目前, 主要的兴趣包和数据包转发策略可以分为 2 类: 一种是盲目转发策略, 它们不考虑网络拓扑状态; 另一种是感知转发策略, 它们依赖于采集相邻节点信息或通信路径信息, 下面对其进行详细介绍。

盲目转发策略是一种与网络拓扑无关、无须维护路由信息的策略。当前主要的盲目转发策略包括: 默认洪泛、智能洪泛<sup>[10]</sup>和定时器等待<sup>[11]</sup>等。默认的洪泛策略采用了多跳中继和广播方法, 把原始数据包传递给所有能到达的网络节点, 以达到最高限度的数据传送。尽管这种方法具备更多信息传输路径, 但同时也容易引发整个网络的广播风暴, 占用和浪费大量的网络带宽资源。智能洪泛策略通过设置网络节点转发接口状态以改进包转发策略性能, 但这种策略依然会带来较重网络带宽消耗。定时器等待策略在网络节点内为各发送端口设置随机等待时延, 降低其产生广播风暴的几率, 但依然无法解决冗余信息的传输问题。Wang 等<sup>[11]</sup>直接使用基本洪泛转发策略实现 MANET 中兴趣包的转发, 用户节点可以在无线开放信道中直接以广播方式, 洪泛兴趣包直至在生产者节点或中继节点上发现所请求的数据包, 而生产者节点或中继节点则可以依据其 PIT 表所记录的兴趣包接收端口信息, 将此数据包反馈给用户节点。此策略复杂度低、实现简单, 但由于兴趣包和数据包传输冗余路径多, 易造成相邻节点间的信道冲突和竞争, 降低带宽的有效利用率。因此, 盲目转发策略需要进一步改进, 提高其在 MANET 网络中的兴趣包转发效率。

感知转发策略是以内容源和邻居等信息为基础实现包转发的一种策略。先侦听后广播(listen first broadcast later, LFBL)策略<sup>[12-13]</sup>引入了距离表,用于记录当前节点与其他节点之间的距离信息,做出相应的转发决策。在 LFBL 策略框架下,用户节点通过广播兴趣包与中继节点交互。中继节点接收到兴趣包后,会解析其内容,计算用户节点与自身之间的跳数,并对距离表进行更新,针对由生产者发出的数据包,以及由中继节点传递的信息包,LFBL 策略均采用一种基于距离感知的方法,选定最佳的转发节点,执行兴趣包的转发任务。LFBL 转发策略是一种与网络拓扑完全无关的转发协议,性能完全依赖于所选择的距离尺度。文献[14]所提策略通过采集地理位置信息选择合适的转发节点进行数据传输。Kuai 及其团队<sup>[15]</sup>通过统计车联网整体节点密度选择最佳的转发路径。Anastasiades 等<sup>[16-17]</sup>提出一种代理辅助内容获取方法,通过选择可能与发送节点相遇的节点作为代理,优先进行数据转发和存储,利用节点移动特性实现高效传输。Al-Omaisi 等<sup>[18]</sup>引入了一个多层次框架,设计高效的 VANET-NDN 数据传输解决方案。Li 等<sup>[19]</sup>开发了一种基于 SDN 命名的数据网络路由机制,通过分布式控制器优化全局路由选择。董谦等<sup>[20]</sup>创新性地构建了一种集中控制的流量调度策略,通过选择资源充足的节点作为控制节点,负责收集全局路由信息以支持更精确的决策。总体而言,感知转发策略依赖网络信息的收集辅助决策,然而,感知信息具有时效性,该策略更适合节点移动速度较慢或拓扑相对稳定的网络环境,在中高度动态的 NDMANET 网络场景中不太适用,因此,其应用范围存在一定限制。

近年来,已经开始在 DTN 网络传输策略中采用基于节点活跃度的转发决策方法。崔波<sup>[7]</sup>黄宏程等<sup>[21]</sup>提出一种适用于高动态命名数据容迟网络的方法,该方法通过维护邻居表来评估节点的活跃度,并通过定期广播 hello 包获取邻居节点的数量。基于所获得的数据,中继节点被细化成了 2 类:一类是临时节点(仅进行转发而不存储);另一类是永久转发节点(多次转发)。尽管该协议能够稳定确保信息在节点机会性通信环境下实现高效的数据传输,但在某些情况下可能会引发网络拥塞问题。李建铎等<sup>[22]</sup>提出一种 DTN 路由算法,通过分析节点的关键特性来选择最优的消息中继节点,并结合节点的剩余能量、活跃度和缓存空闲率等因素进行综合决策。潘冬等<sup>[23]</sup>对复杂的 DTN 网络进行区域划分,针对中继节点、摆渡节点和普通节点等不同类型的中间传输节点,分别设计相应的活跃度统计算法。经过试验测试,尽管该算法在一定程度上改善网络传播的性能,减少传播时间,但同时显著增加了网络流量开销。NDMANET 与 DTN 非常相似,都具有链路频繁中断和网络拓扑时变的特点。因此,为了提高 NDMANET 的包转发性能并解决这些负面影响,在 NDMANET 的包转发策略中引入“节点活跃度”概念,提高网络服务质量。

### 3 基于节点活跃度的包转发策略

在中高动态的 NDMANET 中,为应对其拓扑的动态变化特性,基于“节点活跃度”理念,笔者提出一种新的 NDMANET 包转发策略。研究内容将分为以下几个部分:首先,阐述节点活跃度相关概念及其在 DTN 网络包转发策略中的应用;随后,提出一种面向 NDMANET 网络的基于节点活跃度的包转发策略,深入解析其设计原理及具体实现流程;最后,对该转发策略的优劣势进行定性分析。

#### 3.1 节点活跃度定义

节点活跃度指的是无线网络中的可移动节点在单位时间内遇到邻居节点的平均数量。节点的活跃度越高,与其他节点相遇、建立连接进行通信的可能性越大;反之,节点活跃度越低,与其他节点相遇及建立连接的可能性也越低,通信的机会相应减少。DTN 网络的特点是拓扑分割、节点机会性相遇、内容提供者未知,为减少冗余数据包传输和网络带宽的浪费,之前的研究是通过节点活跃度决定 DTN 网络中的包路由转发。DTN 网络所采用的是以节点活跃度为基础,选择活跃度较高的节点来保存及转发包的路由转发策略,降低因传输额外包所造成的网络带宽资源浪费,也能提高成功传输数据的概率。为了准确计算节点的活跃度,节点需要统计它在某一时间段内遇到过的邻居节点数目,基于此信息推算出节点的活跃度水平。此外,网络节点间需要通过消息传递机制来共享它们的活跃度信息。

#### 3.2 策略设计原理

在中高动态 MANET 应用场景中,节点位置的移动会导致网络拓扑发生变化,引起节点周围邻居节点的

动态变化,导致节点活跃度发生改变。为减轻传输节点间大量交互信息带来的网络拥堵,确保节点活跃度的计算准确性,网络节点需要根据网络拓扑动态变化的剧烈程度,定期刷新活跃度,提供更可靠准确的包转发决策支持。对于NDMANET网络场景,提出依赖网络节点活跃度的包路由转发策略,主要的路由转发过程为:首先,修改(更新)兴趣包和数据包内发送者信息,再向本节点通信范围内所有邻居节点进行广播;其次,对发送者信息读取以及节点活跃度进行比较,判定该节点是否能存储及转发该兴趣包或数据包。

原生NDN网络架构定义的兴趣包格式包括4个字段:名字、选择器、一次性随机数以及指示器。用户生成兴趣包并将其发送至网络,中继节点接收到兴趣包后,根据其名称继续向数据生产者转发,若兴趣包到达的某个节点(这个节点可以是中继节点或者生产者节点)含有它所请求的数据,那么这个节点将会返回一个包含4个字段的数据包,这4个字段分别是:名字、元数据、内容和签名。如图1(a)展示了上面描述的兴趣包和数据包的格式。因为在NDMANET网络中实现以节点活跃程度为基础的包转发策略,每一个网络节点的活跃程度值都需要被精确统计,因此,需要对NDN网络的原生兴趣包和数据包进行字段扩展,以便接收节点能依据新增信息做出转发权限的判断,兴趣包和数据包在扩展后分别新增3个字段,如图1(b)所示。

1)节点标号(NODE\_ID)。该字段用于记录发送信息包节点的网络接口MAC地址(作为节点标识符),为接收节点计算自身活跃度提供支持;

2)节点活跃度(NODE\_ACT)。该字段记录发送信息包节点的无线通信范围内邻居节点的数量,为发送节点与接收节点间的活跃度比较提供依据。通过比较,接收节点可以判定自身是否具备信息包转发的必要条件;

3)特殊节点标记(SPE\_ID)。此字段用于标识兴趣包和数据包的发送者是用户、生产者还是其邻居节点。若是用户或是生产者,则把该特殊节点标记设置为2;若是用户的邻居节点或是生产者的邻居节点,则把该特殊节点标记设置为1;否则把该特殊节点标记设置为0。在某些特定场景中,尽管接收节点的活跃度较低,但若直接能与特殊节点建立通信连接,该特殊节点标记仍可用于判定其转发权限,以便兴趣包和数据包及时到达消费者或生产者节点。

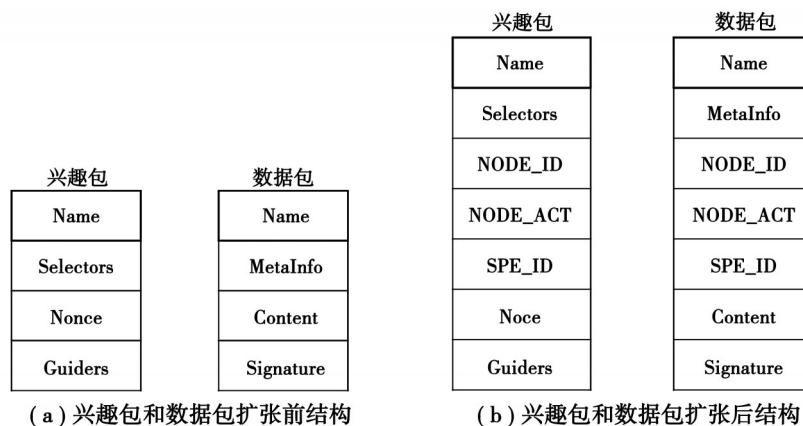


图1 兴趣包和数据包扩展前后结构示意图

Fig. 1 Diagram of interest packet and data packet structures before and after extension

### 3.3 转发策略实现流程

基于原生命名数据网络(NDN)系统中兴趣包和数据包的类型差异,笔者设计了2种不同的处理实现流程。具体如下:

NDMANET节点接收到兴趣包时,会根据名称字段判断是否因广播导致环路重复,若重复则丢弃,否则检索PIT表。若PIT表中不存在与该兴趣包名称相同的条目,则将其作为新条目添加到PIT表中。同时,节点会在其“内容存储”中查找该兴趣包请求的内容。若在内容存储中找到匹配信息,则通过接收该兴趣包的接口将对应数据包转发回去;若找不到匹配信息,则继续通过网络广播将该兴趣包向外路由转发。

对于数据包,当网络节点接收到一个数据包时,会首先查询其PIT表。若发现表中存在与数据包名称匹

配的兴趣包记录,则将数据包储存到“内容存储”中,并依据 PIT 表中指定的接口进行转发;若未找到匹配的兴趣包记录,则丢弃该数据包。图 2 展示了转发兴趣包及数据包策略的实现流程。

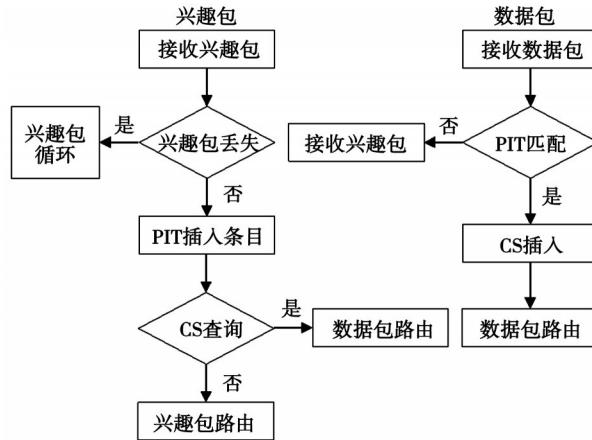


图 2 原生兴趣包和数据包实现流程图

Fig. 2 Flowchart of the implementation process for native interest packages and data packages

在NDMANET网络中,笔者提出基于节点活跃度的包转发策略。网络节点会在接收到包之后检查和分析所有的新增字段,确保在发出兴趣包或数据包之前,确定存储或转发的权限。图3的伪代码详细展示了处理过程。

算法:基于节点活跃度的包转发策略	
1.	if NODE_ID!<=NODE_NEIGHBOR[] then
2.	node.act++
3.	if Interest packet then
4.	insert into PIT and lookup CS
5.	else insert into CS
6.	if SPE_ID==2&1 then
7.	NODE_ID=NODE_ID-1
8.	forward Interest (Data) packet
9.	else if node.act>=NODE_ACT then
10.	forward Interest (Data) packet
11.	else drop Interest (Data) packet

图 3 基于节点活跃度的包转发策略伪代码

Fig. 3 The pseudo code of node activeness-based packet forwarding strategy

### 1) 信息包(包括兴趣包和数据包)接收阶段

当节点收到一个信息包后,提取其节点标号(NODE\_ID)并检查邻居标号数组(NODE\_NEIGHBOR[])中是否存在该标号。若不包含,则将其按顺序插入到邻居标号数组,将节点活跃度值(node.act)加1;若包含,就会忽略这个处理步骤。接下来,节点按照原生NDN网络的相关处理流程对接收的信息包进行处理。需要特别注意的是,当节点接收到数据包且PIT表中无对应兴趣包条目时,仍需要将其存入“内容存储”,以利用节点移动性提高数据包成功传递的概率。

### 2) 信息包转发阶段

首先读取接收信息包的特殊节点标记(SPE\_ID),若该标记的值为1或者2,节点会将该标记的值减1后,进入原生NDN网络的转发流程;若该标记的值为0,节点会比较信息包的节点活跃度值(NODE\_ACT)与自

身的活跃度值(node.act)大小,当node.act值大于或等于NODE\_ACT值时,节点会对该信息包进行转发,反之则会停止对该信息包进行转发。在这种情况下,活跃度较低的节点虽然接收到数据包,并将其缓存到“内容存储”(content storage, CS)中,但不会向邻居节点广播。随着节点移动、网络拓扑不断变化,节点活跃度可能会提高,在接收到所对应的兴趣包后参与数据包路由,提升数据请求成功概率。

## 4 性能测试与分析

研究采用计算机仿真(simulation)的方式,对提出的基于节点活跃度的包转发策略、NDMANET网络的默认洪泛转发策略和先侦听后广播的包转发策略进行性能对比评估。评估中选取了4个主要对比指标,包括:请求响应率(response rate, RR)、平均请求时延(average delay, AD)、网络带宽使用量(bandwidth usage, BU)以及节点存储消耗(node storage consumption, NSC)。以下将对这些指标的具体定义进行详细说明:

1)请求响应率。请求响应率是指在特定仿真时间内,用户节点在目标NDMANET网络中成功接收与其发送的兴趣包数量的比值,其中,发送的兴趣包数量不包含重传兴趣包,即

$$RR = \frac{NUM_{received-Data}}{NUM_{sent-Int}}, \quad (1)$$

式中:NUM<sub>received-Data</sub>表示接收到数据包的数量;NUM<sub>sent-Int</sub>表示发送兴趣包的数量。

2)平均请求时延。平均请求时延指在特定仿真时间内,目标NDMANET网络中从用户节点发送一个兴趣包开始到该节点接收到请求数据包的时间间隔均值,即

$$AD = \frac{\sum_{i=0}^{NUM_{received-Data}} (T_{i,received-Data} - T_{i,sent-Int})}{NUM_{received-Data}}, \quad (2)$$

式中:T<sub>i,received-Data</sub>表示第i个数据包到达时间;T<sub>i,sent-Int</sub>表示第i个兴趣包发送时间;NUM<sub>received-Data</sub>表示接该时段内收到数据包的数量。

3)网络带宽使用量。网络带宽使用量指在特定仿真时间内,目标NDMANET网络中所有节点发送的信息包总量。

4)节点存储消耗量。节点存储消耗量指在特定仿真时间内,目标NDMANET网络中所有节点缓存的数据包总量。

### 4.1 仿真程序研发

基于学术界广泛使用的开源仿真软件NS-3及NDN网络扩展工具ndnSIM,开发了一套专门针对NDMANET网络设计的仿真测试程序。表1中详细列出了仿真环境的硬件与软件配置。

表1 仿真平台硬软件配置

Table 1 Simulation platform configuration

参数	平台参数值
内存	64 GB DDR4
CPU	i7-4790K
操作系统	ubuntu 16.04
NS-3	version 3.25
ndnSIM	version 2.6

### 4.2 仿真场景设定

表2列出了作为仿真目标命名数据移动自组织网络的相关参数。仿真实验通过随机设置节点的不同移动速率,比较2种经典包转发策略与研究策略在多项性能指标上的表现。这些指标包括:请求响应率、平均请求延迟、网络带宽利用率和节点存储消耗量。在仿真场景中,由于不同节点以不同速率随机移动,其活跃度会随之动态变化。具体来说,节点移动速率较高时,网络拓扑变化更剧烈,邻居数量在节点通信范围内频繁波动;而在移动速率较低情况下,拓扑变化趋于缓慢且稳定。为此,仿真实验参照节点移动速率设置了不

同的活跃度更新周期,更新后所有节点的活跃度统一置零,并按照规则每个节点发送一次兴趣包,重新统计活跃度数据。

表 2 仿真场景参数设置  
Table 2 Parameter setting of simulation platform

参数	仿真参数值
无线协议	802.11 a
传输速率/Mbps	24
通信范围/m	120
场景大小/m×m	600×600
节点数量	60
请求频率/interest/s	10
仿真时间/s	200
节点运动速度/(m·s <sup>-1</sup> )	5~30(间隔 5)
consumer 数量	5
producer 数量	1
仿真时间/s	200

### 4.3 结果分析讨论

图 4~7 分别展示了请求响应率、平均请求时延、网络带宽使用量和节点存储消耗量 4 个性能指标的测试结果。Default 指代默认洪泛转发策略,LFBL 指代先侦听后广播包转发策略,NAPF 指代所提出的基于节点活跃度的包转发策略。

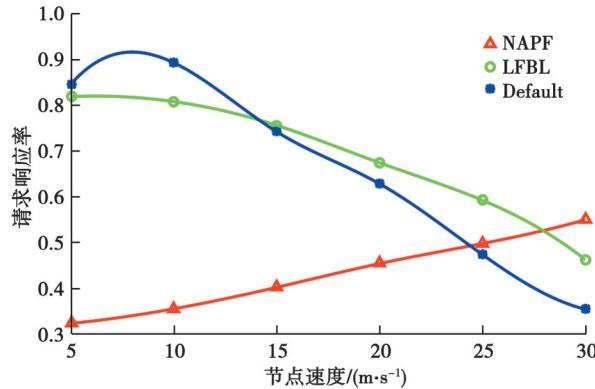


图 4 请求响应率实验结果  
Fig. 4 Experimental results of response rate

对于请求响应率指标,针对低动态拓扑场景,由于 Default 策略和 LFBL 策略能够在拓扑变化较缓慢时维持相对稳定的通信连接,其请求响应率较高。然而,NAPF 策略倾向于限制低活跃度节点的转发权限,从而在此类场景中导致请求响应率相对较低。随着目标网络动态性的增加,一方面,Default 转发策略由于转发路径的链路频繁通断和信道间冲突加重,请求响应率逐渐降低;另一方面,LFBL 虽然会由于链路频繁通断造成请求响应率降低,但该策略仅在选定路由路径上进行信息包转发,相对默认洪泛策略不易引起广播信道争用冲突,有效降低了网络拓扑动态变化对请求响应率造成的不利影响。对于 NAPF 包转发策略,由于节点位置快速变化,生产者和用户节点具有更大的和活跃度较高节点进行通信的概率,使请求响应率逐渐增高。图 4 显示,在节点速率为 30 m/s 时,NAPF 策略比 LFBL 策略高 9%、比 Default 策略高 20%。

对于平均请求时延指标,随着节点运动速率的提高,网络拓扑动态性逐渐提升,网络中节点之间连接的

稳定性逐渐降低, 同时信道冲突问题逐步加剧, 导致 Default、LFBL 和 NAPF 策略的平均请求时延提高。其中, Default 策略平均请求时延最高, 可能会引发最严重的信道冲突问题; 相比之下, NAPF 策略保持了数据转发节点的多样性, 但也导致高动态网络拓扑场景下的请求时延比 LFBL 策略的请求时延更长, 实验结果见图 5 所示。

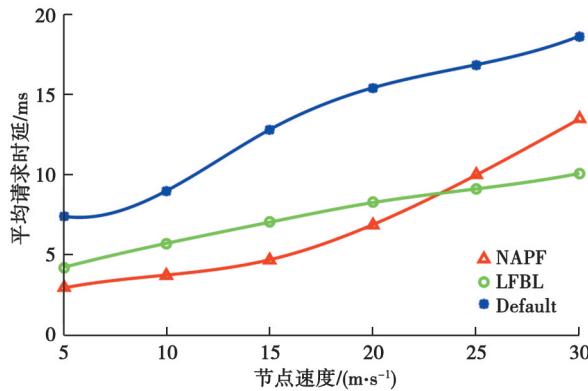


图 5 平均请求时延实验结果

Fig. 5 Experimental results of average delay

对于网络带宽使用量指标, Default 策略在所有情况(节点速率不同的场景)下允许所有网络节点接收、存储和转发其收到的信息包, 所以网络带宽使用量指标明显高于 NAPF 和 LFBL 转发策略。LFBL 策略因限定了转发路径, 在所有的测试参数下, 其网络带宽使用量显著低于 Default 策略。NAPF 策略则与这 2 种策略有所不同, 低活跃度节点被限制转发后, 随着网络节点随机运动速率的增加, 特殊节点在距离高活跃度节点跳数更近的位置进行兴趣包和数据包接发的概率提高。同时, 相较于低动态网络拓扑场景而言, 其请求重传次数降低, 使网络带宽消耗逐渐减少。实验结果如图 6 所示, 当网络节点以 30 m/s 的速率随机移动时, NAPF 策略比 LFBL 策略和 Default 策略分别减少了 40% 和 60% 左右的网络带宽使用量。

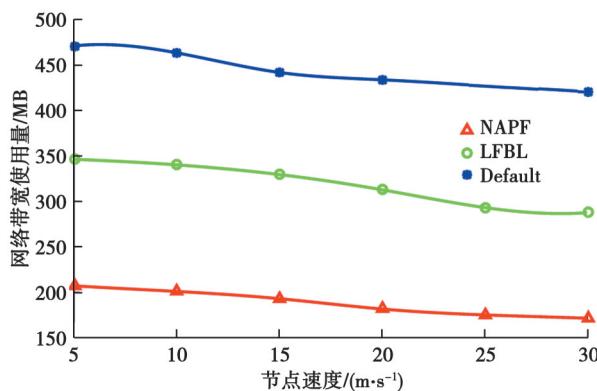


图 6 网络带宽使用量实验结果

Fig. 6 Experimental results of bandwidth usage

对于节点存储消耗量指标, 在动态性较低的网络拓扑场景下, Default 包转发策略具有多路径传输的特性, 网络节点因而会消耗较多的存储空间。笔者所提的 NAPF 包转发策略为较好应对中高动态网络拓扑所带来的链路中断挑战, 网络节点需要缓存所接收的数据包在未来实现随遇回传, 故其网络节点需要消耗一定的存储空间。特别是当目标网络拓扑的动态性增大时, NAPF 包转发策略使网络中大量未接收兴趣包的节点存储兴趣包所对应的数据包, 导致节点存储消耗量较 Default 和 LFBL 策略会随节点速率的提升而线性增加, 实验结果见图 7 所示。

通过分析这 4 个性能指标, 提出的基于节点活跃度的包转发策略在中高动态的 NDMANET 网络场景中主要有 2 方面优势: 1) 与默认的洪泛转发策略相比, 所提出的策略明显减少网络带宽资源的消耗; 2) 与最短

路径路由转发策略(如LFBL策略)相比,所提的策略进一步提高数据转发的成功率。

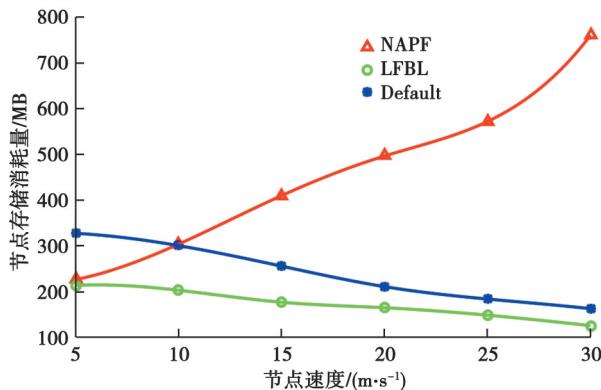


图7 节点存储消耗量实验结果

Fig. 7 Experimental results of node storage consumption

研究提出的NAPF策略利用活跃度较高的节点和特殊节点进行信息包转发,同时调用活跃度较低的节点存储数据,作为未来用户请求的新数据源。但若特殊节点所在区域的节点密度较低,可能导致特殊节点处于“被屏蔽”状态,无法有效执行正常的路由流程。再者,若活跃度较高的节点相距较远,且没有位于节点较密集的区域,有可能无法建立转发路径。除此之外,若NDMANET网络场景中节点以较低速度运动,节点移动性会限制额外数据源机制,导致该机制难以有效实施。总的来说,在大规模、高动态NDMANET场景下,提出的基于节点活跃度的NDMANET网络包路由策略的性能优异,如果NDMANET网络场景的规模和动态性较低,所提策略有不足之处。但节点是否转发兴趣包/数据包主要由基于节点活跃度的转发机制决定,若能将节点移动性与转发机制有机结合,通过监测节点的实时运动速度自动改变转发判定条件,如当前节点移动性较低时,只要节点活跃度不低于上一中继节点活跃度值减2,则可继续转发兴趣/数据包。通过设计并实现类似可以自适应的转发机制,能有效提升本策略在低动态、小规模NDMANET场景下的运行性能。

## 5 结 论

研究关注NDMANET网络中的信息包转发策略,针对MANET网络链路通断频繁和拓扑动态随时间变化等固有特征,把节点活跃度概念引入NDMANET网络的包转发策略,创新性提出一种基于节点活跃度的NDMANET网络包路由转发策略。利用在NS-3/ndnSIM开源框架上开发的仿真程序,对提出的NAPF策略进行性能评估,实验结果显示,在具有中高动态的MANET网络中,研究所提策略能维持较低的平均请求时延,相比洪泛策略和最短路径路由策略,实现更高的请求响应率,降低网络带宽的消耗,其代价是合理增加节点的存储消耗。

## 参考文献

- [1] Irfan T, Ariefianto W T, Rachmana S N. Experiment OLSR routing in named data network for MANET[EB/OL]. (2020-02-03) [2020-05-12]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8978256>.
- [2] 李刚,周尚波,郭尚志,等.通信延迟下自适应容错控制及其在航天器编队中的应用[J].重庆大学学报,2024,47(4):104-113.
- Li G, Zhou S B, Guo S Z, et al. Adaptive fault-tolerant control with communication delays and its application in spacecraft formation[J]. Journal of Chongqing University, 2024, 47(4): 104-113. (in Chinese)
- [3] Jin Y, Tan X B, Feng W W, et al. MANET for disaster relief based on NDN[C]//2018 1st IEEE International Conference on Hot Information-Centric Networking(HotICN). Shenzhen, China: IEEE, 2018: 147-153.
- [4] 李源,刘玮.车联网产业进展及关键技术分析[J].中兴通讯技术,2020,26(1): 5-11.
- Li Y, Liu W. Industrial progress and key technologies of Internet of vehicles[J]. ZTE Technology Journal, 2020, 26(1): 5-11. (in Chinese)

- [5] 雷凯.信息中心网络与命名数据网络[M].北京:北京大学出版社,2015: 49-60.
- Lei K. Information-centric network(ICN)and named-data networking(NDN)[M]. Beijing: Peking University Press, 2015: 49-60. (in Chinese)
- [6] Zhang L, Estrin D, Burke J, et al. Named data networking(NDN)project[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2010, (1): 227-234.
- [7] 崔波.命名数据无线移动自组织网络中数据转发与存储机制的研究[D].呼和浩特:内蒙古大学, 2017.
- Cui B. Research on data forwarding and storage mechanism in named data wireless mobile ad hoc network[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2017. (in Chinese)
- [8] 苏晓,于洪.移动自组织网中一种平均节点度分簇算法[J].重庆邮电大学学报(自然科学版), 2010, 22(2): 237-241.
- Su X, Yu H. An average degree clustering algorithm in mobile ad hoc network[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2010, 22(2): 237-241. (in Chinese)
- [9] Oh S Y, Lau D, Gerla M. Content centric networking in tactical and emergency MANETs[EB/OL]. (2010-12-03)[2020-05-12]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5657708>.
- [10] Afanasyev A. NS-3 based named data networking(NDN)simulator[EB/OL]. (2015-01-20)[2020-05-12]. <http://ndnsim.net/1.0/fw.html#smartflooding>.
- [11] Wang L, Afanasyev A, Kuntz R, et al. Rapid traffic information dissemination using named data[C]//1st ACM Workshop on Emerging Name-Oriented Mobile Networking Design-Architecture, Algorithms, and Applications. Hilton Head South Carolina USA: ACM, 2012: 7-12.
- [12] Meisel M, Pappas V, Zhang L X. Ad hoc networking via named data[C]//5th ACM International Workshop on Mobility in the Evolving Internet Architecture. Chicago, USA: ACM, 2010: 3-8.
- [13] Meisel M, Pappas V, Zhang L X. Listen first, broadcast later: topology-agnostic forwarding under high dynamics[EB/OL]. (2010-08-13)[2020-05-12]. [https://www.academia.edu/2790668/Listen\\_first\\_broadcast\\_later\\_Topology\\_agnostic\\_forwarding\\_under\\_high\\_dynamics](https://www.academia.edu/2790668/Listen_first_broadcast_later_Topology_agnostic_forwarding_under_high_dynamics).
- [14] Russell K, Simon R. Evaluation of a geo-region based architecture for information centric disruption tolerant networks[C]// 2019 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC).Honolulu, USA: IEEE,2019: 911-917.
- [15] Kuai M, Hong X Y, Yu Q Y. Density-aware delay-tolerant interest forwarding in vehicular named data networking[EB/OL]. (2017-03-20)[2020-05-12]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7880953>.
- [16] Anastasiades C, El Alami W E M, Braun T. Agent-based content retrieval for opportunistic content-centric networks[C]//Wired/Wireless Internet Communications. Cham: Springer International Publishing, 2014: 175-188.
- [17] Anastasiades C, Schmid T, Weber J, et al. Information-centric content retrieval for delay-tolerant networks[J]. Computer Networks, 2016, 107: 194-207.
- [18] Al-Omairi H, Sundararajan E A, Abdullah N F. Towards VANET-NDN: a framework for an efficient data dissemination design scheme[C]//2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI). Bandung, Indonesia: IEEE, 2019: 412-417.
- [19] Li J, Xie R C, Huang T, et al. A novel forwarding and routing mechanism design in SDN-based NDN architecture[J]. Frontiers of Information Technology&Electronic Engineering, 2018, 19(9): 1135-1150.
- [20] 董谦,李俊,马宇翔.基于集中控制的命名数据网络流量调度方法[J].通信学报, 2018, 39(7): 68-80.
- Dong Q, Li J, Ma Y X. Traffic scheduling method based on centralized control in named data networking[J]. Journal on Communications, 2018, 39(7): 68-80.(in Chinese)
- [21] 黄宏程,王定国,寇兰,等.基于节点分簇的延迟容忍网络路由策略[J].重庆邮电大学学报(自然科学版), 2015, 27(2): 260-265.
- Huang H C, Wang D G, Kou L, et al. Routing strategy based on nodes clustering for delay tolerant network[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2015, 27(2): 260-265. (in Chinese)
- [22] 李建铎,刘建明,李龙,等.基于节点关键度的DTN路由算法[J].计算机仿真, 2018, 35(4): 126-130.
- Li J D, Liu J M, Li L, et al. DTN routing algorithm based on key nodes[J]. Computer Simulation, 2018, 35(4): 126-130. (in Chinese)
- [23] 潘冬.DTN中基于区域划分和节点活跃度的路由研究[D].合肥:安徽大学, 2017.
- Pan D. Routing research based on region division and node activity in DTN[D]. Hefei: Anhui University, 2017. (in Chinese)