

自适应感知的蚁群信息中心网络路由技术研究

卢梦竹

邯郸职业技术学院, 中国·河北 邯郸 056001

摘要: 随着现代社会发展与技术进步, 网络规模及用户数量的爆炸式增长, 以信息为中心的网络体系已逐渐成为未来网络发展的重要方向。信息中心网络 (ICN) 以内容为核心组织网络资源, 其中蚁群算法因具备分布式与自组织特性被用于 ICN 路由, 但多轮迭代易产生冗余兴趣报文, 影响收敛效率与可扩展性。针对这一问题, 本文提出自适应感知的蚁群 ICN 路由框架, 设计兴趣蚂蚁数量自适应调节算法与迭代结束判定机制。通过拓扑与流量信息建模及连续型信息素更新模型, 实现冗余控制与快速收敛。仿真结果表明, 该方法在降低网络开销和提升收敛效率方面具有明显优势。

关键词: 信息中心网络; 蚁群算法; 自适应感知; 兴趣蚂蚁; 收敛控制

Research on Adaptive Perception-Based Ant Colony Routing Technology for Information-Centric Networking

Lu Mengzhu

Handan Vocational and Technical College, China Hebei Handan 056001

Abstract: With the development of modern society and technological progress, the explosive growth of network scale and the number of users has led to an information-centered network system gradually becoming an important direction for future network development. Information-centric Network (ICN) organizes network resources with content as the core. Among them, the ant colony algorithm is used for ICN routing due to its distributed and self-organizing characteristics. However, multiple rounds of iterations are prone to generate redundant interest messages, affecting convergence efficiency and scalability. To address this issue, this paper proposes an adaptive perception ant colony ICN routing framework, and designs an adaptive adjustment algorithm for the number of interested ants and an iteration end determination mechanism. Redundancy control and rapid convergence are achieved through topology and flow information modeling as well as continuous pheromone update models. The simulation results show that this method has obvious advantages in reducing network overhead and improving convergence efficiency.

Keywords: Information-centric networking; Ant colony optimization; Adaptive perception; Interest ant; Convergence control

0 引言

在当今社会, 互联网用户的需求已由主机通信转向内容获取, 传统 IP 路由在可扩展性与高效分发方面面临挑战。ICN 通过内容命名与网内缓存来提升数据获取效率, 其路由机制成为关键问题。蚁群优化算法能够适应动态网络环境, 但固定兴趣蚂蚁规模与迭代次数导致冗余开销增加与收敛迟滞。

本文基于自适应感知机制, 动态调节兴趣蚂蚁规模并引入收敛判定策略, 在保证路由性能的同时降低网络冗余, 实现高效可扩展的 ICN 路由设计。

1 自适应感知蚁群 ICN 路由的理论基础

1.1 信息中心网络路由机制特征

信息中心网络 (Information-Centric Networking ICN)

与传统的网络相比, ICN 是以内容命名为核心, 通过兴趣报文与数据报文的交互完成内容检索过程。与传统基于地址的通信模式不同, ICN 强调数据本身的唯一命名与可缓存特性, 使用户请求可以由任意持有副本的节点响应。路由器维护内容存储表、待定兴趣表与转发表, 实现网内缓存与多源响应机制, 使内容能够在网络内部被重复利用并减少跨域传输开销。多副本的存在使路径选择具备更高自由度, 同时也显著增加了路由决策的复杂性与状态维护开销, 路由器需要持续更新缓存命中情况与兴趣转发表项。在高并发环境下, 兴趣报文若缺乏有效控制易产生泛洪效应, 引发链路拥塞、缓存竞争以及转发表膨胀问题。因此, ICN 路由策略必须具备冗余控制、负载均衡与快速收敛能力, 以保障整体网络运行的稳定性与可扩

展性。

1.2 蚁群算法在 ICN 中的应用机理

蚁群算法模拟蚂蚁通过信息素协同寻径的行为, 具有自组织、自适应与分布式优化能力, 能够在无集中控制的条件下完成路径搜索与优化。在 ICN 场景中, 兴趣蚂蚁作为探测报文沿链路转发并记录路径质量信息, 数据蚂蚁在返回过程中完成路径强化与信息素更新, 从而形成正反馈机制。路径优劣通过信息素浓度体现, 实现概率型多路径选择与动态调整, 使网络在保持探索能力的同时逐渐向优质路径收敛。该机制能够根据网络状态变化实时修正路径选择策略, 适应拓扑变化、链路波动、缓存迁移以及节点失效等复杂情况。与传统确定性路由相比, 蚁群算法在多源环境下表现出更强的高效性与可扩展性, 为 ICN 多副本寻址提供有效支持。

1.3 多轮迭代冗余问题分析

传统蚁群 ICN 路由多采用固定兴趣蚂蚁规模与固定迭代次数, 缺乏对网络动态状态的自适应调节能力。在网络规模扩大或业务流量剧增的情况下, 大量兴趣蚂蚁在多轮迭代中重复探索相似路径, 不仅造成带宽浪费与缓存污染, 还可能引发链路拥塞和节点负载失衡问题。随着网络复杂度提升, 冗余探索带来的控制开销将呈指数增长, 进一步削弱系统扩展能力。另一方面, 若迭代次数设置过少, 算法可能尚未形成稳定路径结构即提前终止, 导致路径质量不稳定或频繁切换。兴趣蚂蚁规模的不确定性以及收敛判定机制的不精确, 成为制约性能提升的关键因素, 也限制了蚁群 ICN 路由在大规模网络与高动态场景中的推广应用。因此, 有必要引入自适应调节与精确收敛控制机制, 以实现效率与稳定性的平衡。

2 自适应兴趣蚂蚁数量确定算法

2.1 网络状态多维感知建模

兴趣蚂蚁数量应依据网络实时状态进行动态调节, 以避免盲目扩散带来的资源浪费和链路拥塞风险。若缺乏状态感知机制, 兴趣蚂蚁规模往往呈现固定模式, 难以适应网络负载波动与内容分布变化。构建包含物理拓扑信息与动态流量信息的多维感知模型, 其中物理拓扑信息包括节点度中心性、中介中心性与亲密度中心性, 用于刻画节点在整体网络结构中的连接能力与传输中枢地位; 动态流量信息涵盖节点负载水平、兴趣偏好分布及缓存命中率, 用于反映实时运行状态与内容访问趋势。通过对上述指标进行持续采集、归一化处理与动态更新, 实现对网络拥塞风险、内容集中度、路径竞争程度以及节点转发压力的综合

评估, 从而为兴趣蚂蚁规模的合理分配与动态调整提供可靠依据, 使路由决策更加符合当前网络实际运行状态。

2.2 高维数据降维与整合机制

由于多维指标数量较多且属性差异明显, 若直接用于决策将显著增加计算复杂度, 并影响算法实时响应能力。为此采用 t-SNE 方法对高维特征空间进行非线性降维映射, 将拓扑结构特征与流量特征进行统一表达, 形成低维特征向量表示网络综合状态。在降维过程中保留局部邻域结构关系, 使相似网络状态在低维空间中保持聚集, 从而提高分类准确度。在此基础上通过聚类分析识别不同网络运行类别, 根据类别差异设定分级兴趣蚂蚁规模区间, 实现更加精细化的规模调节策略。该机制在保留关键特征信息的同时显著降低运算负担, 提高算法整体决策效率与响应速度, 并增强对复杂网络环境变化的适应能力。

3 自适应迭代结束算法与信息素模型

3.1 连续型信息素更新模型设计

传统离散更新方式难以准确刻画信息素随时间衰减与空间扩散的连续变化特征, 尤其在动态网络环境下易产生更新滞后或过度强化现象, 导致路径选择偏向历史结果而忽略当前状态变化。为提高路径评价的精细化程度, 需要构建连续函数型信息素模型, 使信息素浓度同时受时间因子与距离因子调节。时间因子通过指数衰减函数抑制旧路径长期占优, 确保系统具备持续探索能力; 距离因子根据节点与兴趣请求者之间的跳数或逻辑距离进行加权, 使潜在优质路径获得更高感知强度。该模型能够在空间与时间两个维度上动态调节信息素分布, 增强路径选择的敏感性与稳定性, 更加贴近真实蚂蚁觅食行为特征, 从而提高整体路径评价精度与算法鲁棒性。

3.2 聚集度阈值触发机制

为避免在最优路径已经逐渐形成时继续进行无效探索, 需引入路径聚集度阈值触发机制, 对兴趣蚂蚁的分布状态进行实时监测。内容路由器周期性统计各候选路径上的信息素增幅趋势与兴趣蚂蚁聚集比例, 当某条路径的信息素增长率达到预设阈值且波动范围明显收敛时, 系统判定该路径已形成优势结构, 能够满足当前路由需求。此时立即触发迭代终止信号, 停止后续探索过程。该机制不仅有效减少冗余兴趣报文的持续扩散, 还能够避免过度迭代带来的资源浪费, 缩短整体收敛时间。同时, 通过设置合理阈值区间, 可兼顾路径稳定性与算法灵敏度, 保证终止判定的可靠性。

3.3 收敛性与复杂度分析

在连续型信息素更新机制与聚集阈值判定策略的共同作用下, 算法收敛过程更加平滑且稳定。理论分析表明, 在信息素正反馈强化机制与时间衰减函数的双重约束下, 路径选择概率随迭代次数呈单调增强趋势, 并逐步向优势路径集中, 最终趋于稳定分布状态。与传统固定迭代模型相比, 自适应终止机制能够根据实际收敛情况动态调整迭代轮数, 使平均迭代次数明显下降, 避免无效搜索带来的额外计算与通信开销。时间复杂度由传统模型的 $O(k \cdot n)$ 降低为 $O(k' \cdot n)$, 其中 k' 小于 k , 且在网络规模扩展时增长速度更加平缓, 有利于大规模网络环境下的工程部署与性能保障。

4 性能评估与应用分析

4.1 仿真环境与指标设置

为验证所提算法的综合性能, 构建包含 500 个节点的 ICN 仿真网络环境, 节点之间采用随机拓扑连接方式, 并通过调节边生成概率设置不同连通密度, 以模拟稀疏网络与高密度网络两种典型结构形态。网络内部部署多源内容副本, 并设置差异化缓存容量, 以模拟真实内容分发与缓存竞争场景。实验环境中引入随机兴趣请求流量模型, 并划分轻载、中载与重载三个负载等级, 分别考察算法在不同业务压力下的运行表现。对比传统蚁群 ICN 路由与自适应感知算法在吞吐率、平均时延、冗余报文比例、链路利用率、收敛轮次以及节点负载均衡程度等核心指标上的差异。同时记录不同拓扑规模与流量变化条件下算法性能波动情况, 从稳定性、扩展性与适应性三个维度对系统运行能力进行综合评估, 以验证算法在复杂网络环境中的适用性与工程可行性。

4.2 实验结果分析

实验结果表明, 在高负载与动态流量环境下, 自适应算法在兴趣蚂蚁规模控制方面表现更加稳定, 兴趣报文数量随网络状态变化自动调节, 平均规模减少约 30%, 有效降低无效探索开销。网络冗余报文比例降低 25% 以上, 链路拥塞现象明显缓解, 缓存竞争压力减轻。收敛轮次缩短近 40%, 说明算法能够更快形成稳定路径结构并及时终止迭代过程。系统吞吐率保持持续增长趋势, 且在不同连通密度下均表现出良好的扩展能力。平均时延波动范围明显

缩小, 链路利用率分布更加均衡, 节点间负载差异显著减小, 整体网络运行更加平稳。综合各项指标分析可见, 该方法在保证路由质量与多源选择能力的前提下, 实现了资源利用优化与收敛效率提升, 具备良好的工程应用价值与实际推广潜力。

5 结语

本文围绕自适应感知的蚁群 ICN 路由技术展开系统研究, 提出兴趣蚂蚁数量动态确定算法与迭代结束判定机制, 构建连续型信息素更新模型, 实现网络状态驱动的智能调节。研究成果有效缓解蚁群 ICN 路由中多轮迭代带来的网络冗余问题, 在提升高效性、降低拥塞风险与加快收敛速度方面取得明显效果。未来可结合边缘计算与 6G 网络场景, 进一步探索跨域协同与智能缓存预测机制, 推动 ICN 路由向更大规模与更高实时性方向发展。

参考文献:

- [1] Liu H, Sun R, Ji Y, et al. Evolutionary Intelligent Large Model - Driven Heterogeneous Traffic Analysis in Wireless Communication Networks[J]. Internet Technology Letters, 2025, 8(4): e70024.
 - [2] Qin J, Yang Y. Intelligent Green Resource Management for Blockchain - Powered IoT Networks Through Deep Reinforcement Learning[J]. Internet Technology Letters, 2026, 9(2): e70232.
 - [3] 李庆刚, 蔡宝玉, 孙小江等. 基于多目标蚁群算法的无线网络数据传输节点避免拥塞优选方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2025,55(2):748-754. DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240033.
 - [4] 张云翔, 高圣溥. 边缘资源轻量化需求下深度神经网络双角度并行剪枝方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2025,47(2):250-257. DOI:10.7688/j.issn.1000-1646.2025.02.15.
 - [5] 吕隆锴. 基于改进蚂蚁算法的大数据下物联网负载均衡研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2025,15(7):68-69,72. DOI:10.16525/j.cnki.14-1362/n.2025.07.022.
- 基金项目: 邯郸市科学技术局“自适应感知的蚁群信息中心网络路由技术研究”(23422901119)。