

融合拥塞控制的NDN路由策略

刘立, 桂易琪

扬州大学信息工程学院, 江苏 扬州

收稿日期: 2022年6月20日; 录用日期: 2022年7月19日; 发布日期: 2022年7月26日

摘要

命名数据网络采用由内容请求者驱动的通信机制, 针对转发过程中路由准确性问题现有研究并没有给出具体解决方案。本文提出了一种多因素综合考虑的蚁群路由优化算法。借鉴传统蚁群生态行为和遗传算法中的精英策略, 综合考虑了各节点之间路径上的信息素浓度、邻居节点间路径长度以及请求节点与转发节点间的内容相似度等因素, 采用可选下一跳方法将兴趣蚂蚁往高概率节点进行转发方式来确定最佳的兴趣蚂蚁路由路径; 利用内容聚合和节点转换控制的方法进行拥塞控制保证网络传输的稳定性。仿真实验结果表明, 在有限网络空间资源条件下, 兴趣蚂蚁请求数量增加到一定阈值时, 本算法对比蚁群算法平均路由命中率提高了14%, 平均路由时延降低了25%, 可以更有效避免网络拥塞。

关键词

命名数据网络, 路由算法, 精英策略, 蚁群算法, 拥塞控制

NDN Routing Policy Converged Congestion Control

Li Liu, Yiqi Gui

College of Information Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

Received: Jun. 20th, 2022; accepted: Jul. 19th, 2022; published: Jul. 26th, 2022

Abstract

Named data network adopts communication mechanism driven by content requester. Existing research does not provide a specific solution for the problem of routing accuracy in the forwarding process. In this paper, an ant colony algorithm for routing optimization is proposed. Referring to the traditional ant colony ecological behavior and the elite strategy in genetic algorithm, taking into account the pheromone concentration on the path between nodes, the path length between neighbor nodes and the content similarity between requesting nodes and forwarding nodes, the

optional next hop method is used to forward the interest ants to high probability nodes to determine the best interest ant routing path; Content aggregation and node switching control are used to control congestion and ensure the stability of network transmission. The simulation results show that when the number of interested ant requests increases to a certain threshold under the condition of limited cyberspace resources, the average routing hit rate of this algorithm is increased by 14% and the average routing delay is reduced by 25% compared with ant colony algorithm, which can more effectively avoid network congestion.

Keywords

Named Data Network, Routing Algorithm, Elite Strategy, Ant Colony Algorithm, Congestion Control

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着数据及用户的不断增长, 现有的 TCP/IP 网络架构存在的缺陷愈发明显, 其网络安全性问题和较差的扩展性成为限制互联网继续发展的因素。为了打破当前“主机到主机”的通信模式, 实现互联网数据处理的强大功能, 信息中心网络(Information-Centric Network, ICN) [1]作为一种革命式的新型网络体系结构应运而生。其中命名数据网络(Named Data Network, NDN) [2]是一类 ICN 网络架构。NDN 旨在构建基于内容寻址的网络服务, 网络虚拟化和 SDN 技术使得现有网络进行 NDN 服务构建成为可能。

基于内容寻址的网络架构有两大核心机制, 分别为内容路由[3]和网内缓存[4]。本文主要研究命名数据网络路由的策略, NDN 路由转发可以视为在缓存普遍存在的前提下, 面向内容的寻址方式。Cheng 等人[5]研究了 NDN 中自适应转发的问题, 利用数据包自带寻址的操作控制网络的路由规模, 缺点是存在技术可行性和环境适应性的问题。一种同时考虑缓存与路由的策略[6]提出一种新的路由协议方式以改善缓存同时提高路由效率, 不足之处在于对于多路径路由转发缺乏实用性。全转发策略[7]是 NDN 网络中比较原始的路由方式, 对于单个内容请求的兴趣包, 节点向转发信息表(Forwarding Information Base, FIB)中所有对应的接口转发该兴趣包, 缺点是路由过程中会造成大量的数据冗余。随机转发策略[8]针对单个兴趣包, 路由节点选择转发信息表中随机接口请求数据转发, 降低了时延, 但无法保证用户获得稳定的网络性能。一种基于优先级计算的兴趣转发策略[9]选择最佳的兴趣转发传出接口以便转发兴趣数据包, 然而该策略在高带宽要求下未能表现出良好的性能。

NDN 的路由优化问题[9]引申出不同种类的仿生解决方案。相较于其它仿生策略, 蚁群中蚂蚁的觅食行为类似于 NDN 的路由过程。将蚁群算法应用于命名数据网络的研究中, Zhang 等人[10]提出改善下一跳选择的代价, 一定程度上缩短了请求的时延, 然而没有考虑不在传输路径上的节点缓存; 将信息素分为不同等级的理念, 使用多级别信息素替代传统单一信息素, 在较低复杂网络的前提下性能得到提升, 作为一种非混合式蚁群路由优化策略[11]并不适用于大型复杂网络; 一种以内容为中心, 面向服务的路由策略[12]可以在 NDN 上添加一个控制层来操作底层 FIB, 采用基于蚁群算法的机制收集服务信息。A. Z. Khan 等人[13]提出了一种基于 ACO 的服务质量(QoS)感知路径选择方案, 使用具有较高信息素的传出接口进行转发具有较高概率的兴趣包; Huang 等人[14]基于概率提出了一种使用蚁群算法的自适应转发策略以减少传输延迟和网络开销。

上述这些路由方式存在一些缺点, 比如无法利用临近缓存、收敛速度过慢等。本文借鉴遗传算法中的精英选择策略, 即把适应度最好的个体保留到下一代种群中的方法, 加快蚁群收敛速度。另一方面, 在使用精英策略转发兴趣蚂蚁时进行适当聚合保持下一跳节点可选, 设置节点拥塞度[15]来控制拥塞, 提升网络稳定性。采用熵权法对上述两方面结合优化, 最终得到整体最优的性能。

2. 携带精英策略的蚁群路由算法

算法策略的思路源自蚁群算法, 将不同节点内容的差异性作为转发概率的衡量标准之一, 引入精英策略思想将成功进行最优路径选择的蚂蚁命名为精英蚂蚁并且精英蚂蚁走过的路径进行额外的信息素更新, 为了减少路由表规模膨胀的影响进行适当的内容聚合且做出精准的拥塞控制, 最后使用熵权法对实验指标建模得出综合最优。

2.1. 改进蚁群路由算法

通过模拟自然界蚁群合作觅食的行为, 仿生出一种人工蚁群算法。基本原理是通过多次迭代计算出从当前节点 i 到它的邻居节点 j 的状态转移概率以做出选择进行下一跳, 综合考虑各节点之间路径上的信息素浓度、邻居节点间路径长度以及请求节点与转发节点间的内容相似度, 其转移概率公式为:

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\varepsilon [\eta_{ij}(t)]^\beta [\cos_{ij}(\theta)]^\gamma}{\sum_{s \in a_k} [\tau_{is}(t)]^\varepsilon [\eta_{is}(t)]^\beta [\cos_{is}(\theta)]^\gamma}, & j \in a_k \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

其中, a_k 为当前节点 i 非禁忌可选下一跳节点的集合; $\tau_{ij}(t)$ 是路径 (i, j) 上的信息素强度, 在迭代开始前默认每条路径的初始信息素强度相同; $\eta_{ij}(t)$ 为启发式因子, 与路径长度有关; $\cos(\theta)$ 为代表内容差异性的余弦相似度。参数 ε 、参数 β 和参数 γ 分别代表信息素因子、启发式因子和内容相似度因子对于转移概率的权重影响。

2.2. 精英选择策略

为提高寻找最优解的速度, 本文引用精英蚂蚁, 即为带精英策略的蚁群算法。为精英蚂蚁走过的路径进行额外的信息素更新, 带精英策略的蚂蚁系统信息素更新方式如下:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}^* \quad (2)$$

$$\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (3)$$

上式中 ρ 代表信息素衰退程度, $1-\rho$ 则表示信息素残留系数。 $\Delta\tau_{ij}^*$ 表示精英蚂蚁在节点 i 和 j 路径上的信息素增量。 $\Delta\tau_{ij}^k$ 则表示第 k 只兴趣蚂蚁在本次迭代中为路径 (i, j) 带来的信息素增量。当精英蚂蚁数量过多, 局部最优路径上的信息素浓度增长速度过快, 从而出现搜索早熟收敛的情况, 需要对精英蚂蚁的数量进行合适的取值, 同时考虑到节点负载问题, 对蚁群进行分批次迭代实验, 迭代次数为 N_C 。

$$\Delta\tau_{ij} = \begin{cases} E/R_k & \text{第 } k \text{ 只蚂蚁从节点 } i \text{ 到节点 } j \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta\tau_{ij}^* = \begin{cases} M \cdot E/R^* & \text{节点 } i \text{ 和 } j \text{ 之间为最优路径} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

式(4)中 E 表示信息素强度; 式(5)中 M 表示精英蚂蚁的个数, R^* 是本次迭代最优解的路径长度。考虑到信息素随着时间流逝不停挥发, 构建相邻节点间的内容浓度更新模型。节点的信息不但根据自身请求获得的数据蚂蚁进行更新, 还要叠加其它节点经过的蚂蚁(具体算法见算法 1)。内容的差异性使得数据规模庞大间接导致时延的增加, 因此在路由时需考虑避免网络拥塞, 为降低网络负载本文选择在路由时对数据内容进行聚合, 同时使用控制节点转换的方法进一步降低拥塞。

算法 1 精英策略路由算法

输入: 起始节点 a_1 , 目的节点 a_j 和实验参数

输出: 接收到目的节点的数据包

- 1) put Ant on start point a_1 , $N_C = 1$
- 2) for Ant k in M Do
- 3) Use formula 2 calculate the probability and transition
- 4) if Ant i reach to a_j
- 5) $k = k + 1$
- 6) Update pheromone
- 7) else continue routing
- 8) Record optimal path and Update Elite pheromone
- 9) if $N_C < N_{CMAX}$
- 10) $N_C = N_C + 1$
- 11) end if

3. 基于熵权法的拥塞控制

节点的拥塞会给路由的稳定性带来较大的隐患。针对 NDN 节点的拥塞控制本文分为两个部分, 分别是内容聚合和节点转换。考虑到不同的节点拥塞阈值会对实验整体性能产生影响, 本文使用熵权法对实验指标进行建模并得出综合评价最优的取值。

3.1. 内容聚合

内容节点的多样性和差异性使得路由表规模易急剧膨胀, 不能及时处理数量巨大的条目使得网络延迟逐步增加。本文采用可选下一跳 FIB 聚合来解决数据膨胀的问题, 对命名内容进行相应规则的聚合用以提高路由表项的利用率。聚合需要满足的规则首先是内容命名具有相同的前缀, 其次是二者路由时具有相同的下一跳。

3.2. 节点转换控制

为进一步实现拥塞控制, 节点在转发的过程中, 设定判定节点是否拥塞的两个阈值(C_{max} , C_{min}), 通过屏蔽拥塞度达到 C_{max} 的节点的方式, 将数据回转到次最优节点, 而屏蔽节点拥塞度降到 C_{min} 后重新启用(算法 2)。本文使用拥塞度 C 代表节点在一个周期 t 内处理兴趣包的能力, 其变化过程可用下式表示:

$$C = C_{min} + (C_{max} - C_{min}) \frac{D_t}{D_s} \quad (6)$$

其中, D_t 表示当前周期内节点累积需要转发的兴趣包总数, 而 D_s 则表示节点历史最大累积转发总数。节点状态转换如图 1 所示。

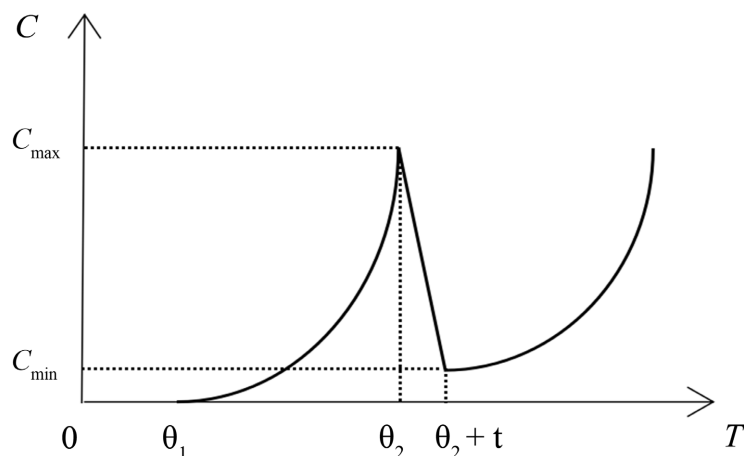


Figure 1. Node state transition
图 1. 节点状态转换图

算法 2 拥塞控制算法

输入: C_{\min} , 兴趣蚂蚁 Ant_i , 周期 t , 最优次优节点 a_c, a_v

输出: 实时最优 C_{\max} 的值,

- 1) $D_i = 0$, $D_s = 300$
- 2) For $i = 1$
- 3) IF Ant_i aggregate with Ant_{i+1} , Ant_i reach a_c
- 4) $D_i = D_i + 1$
- 5) $i = i + 2$
- 6) Calculate C by using formula 8
- 7) if $C < C_{MAX}$
- 8) continue
- 9) else find and select a_v as the suboptimal node by using formula 2
- 10) if $C \leq C_{MIN}$
- 11) reuse a_c instead of a_v
- 12) end

3.3. 熵权法建模

本文使用熵权法对实验四个评价指标进行建模, 通过实验得出最优的阈值取值。使用熵权法的步骤如下: 首先是构建初始矩阵, 实验中原始矩阵的构建信息可以通过实验中阈值数和评价指标数得出:

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & z_{14} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & z_{24} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} & z_{34} \\ z_{41} & z_{42} & z_{43} & z_{44} \end{bmatrix} \quad (7)$$

矩阵 Z 表示实验时阈值的取值有 4 个, 其范围为 $\{0.7, 0.8, 0.9, 1\}$, 而评价指标有 4 个, 分别为命中率、路由跳数、路由时延和通信开销。由于命中率是正向指标, 而路由时延、路由跳数和通信开销是负向指标, 所以需要进行标准化处理。

$$Q_{ij} = \begin{cases} \frac{z_{ij} - \min(z_i)}{\max(z_i) - \min(z_i)} (\text{正向}) \\ \frac{\min(z_i) - z_{ij}}{\max(z_i) - \min(z_i)} (\text{负向}) \end{cases} \quad (8)$$

其中, Q_{ij} 为归一化处理之后的第 i 个节点的第 j 个指标, $\max(z_i)$ 、 $\min(z_i)$ 表示指标最大最小值。根据信息熵的定义, 一组数据的信息熵 E_j 如式(9)。式(10)中 S_{ij} 表示指标 j 在方案 i 下所占比值。如果 S_{ij} 的值是 0 时, 那么 E_j 也为 0, 代表着此指标的信息熵为 0。

$$E_j = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^n S_{ij} \ln S_{ij} \quad (9)$$

$$S_{ij} = \frac{Q_{ij}}{\sum_i Q_{ij}} \quad (10)$$

得到信息熵 E_j 后可以计算各个指标的权重并得出不同取值对应的综合评价。式(11)、(12)分别是权重公式以及综合评价公式, 式中 w_j 为各指标的权重, T_i 为各阈值取值下的综合评分, 其中 k 为指标个数等于 m 。

$$w_j = \frac{1 - E_j}{k - \sum E_j} \quad (11)$$

$$T_i = \sum_{j=1}^m w_j \cdot Q_{ij} \quad (12)$$

4. 仿真实验

本文提出的 EACO 路由算法在使用 python 语言在 Pycharm 中模拟数据命名网络的环境下进行仿真实验。数据命名网络节点的内容符合 Zipf 分布, 其中 Zipf 参数 α 默认设置值为 1.0, Zipf 分布的特性使得更少的节点被更多的用户访问, 具有无标度特性。本算法使用 networkx [16]生成一个小型无标度网络, 同时刻画出对应拓扑 a (见图 2), 为与其产生对比实验引入复杂网络拓扑 b (见图 3)分别进行了模拟仿真。实验参数如表 1 所示。为了评估算法的性能, 实验中将路由命中率、路由跳数[17]、路由时延和通信开销 [18]作为性能评价指标。实验中引入全转发策略(Full Forwarding strategy, FFS), 随机转发策略(Random forwarding strategy, RFS), 和蚁群路由算法(Ant colony routing algorithm, ACO)并进行了对比。

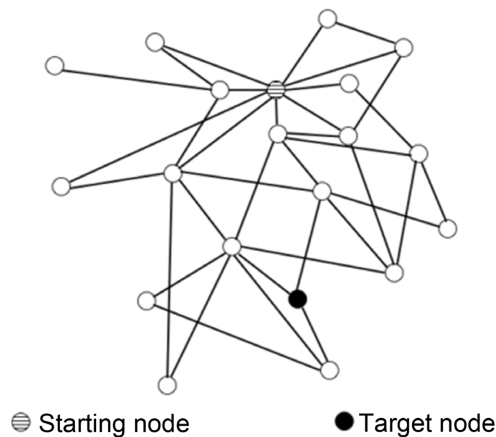


Figure 2. Topology a
图 2. 拓扑 a

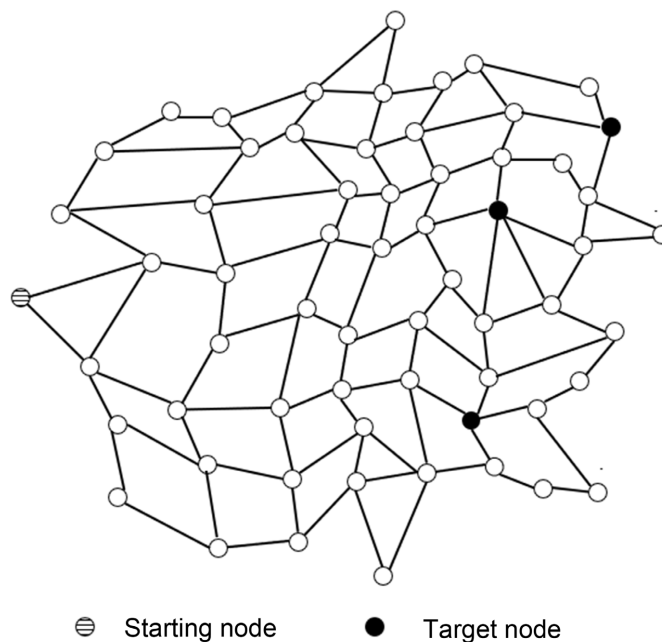


Figure 3. Topology b
图 3. 拓扑 b

Table 1. Parameter
表 1. 参数表

参数	参数值
ε	1.2, 表示信息素的相对重要程度
β	3.0, 表示启发式信息对路由的重要性
γ	1.0, 衡量节点内容的差异性
ρ	0.25, 影响算法的全局搜索能力
N	600, 1000, ..., 3000, 表示兴趣蚂蚁总数
α	1.0, Zipf 参数
k	4, 性能指标个数
C_{\min}	0.1, 节点转换控制的下限

对比实验前通过引入熵权法的实验确定阈值 C_{\max} 的取值。图 4 和图 5 分别代表在拓扑 a 和拓扑 b 中不同迭代次数下, 增大阈值取值得出的综合评分。实验结果表明, 拓扑和迭代次数得变化都不太改变整体效果格局, 随着阈值的增大, T_i 大体也随之增大。拓扑 a 和 b 中 T_i 上升下降趋势相同, 拓扑 b 中 T_i 整体取值大于拓扑 a, 造成这种现象的原因是两种拓扑结构的差异导致四种评价指标的差异较明显。可以观察发现, 在拓扑 a 中, 除了迭代次数为 1 的情况下, C_{\max} 取 0.9 的综合评分是最高的; 而在拓扑 b 中, 除迭代次数为 1 和 2 的情况下, 0.9 作为取值仍是最优。因此实验表明, 阈值 C_{\max} 的取值是和拓扑结构以及实验迭代次数相关的, 在后续实验中本文对照图 5 和图 6 选择合适的取值 C_{\max} 进行实验。

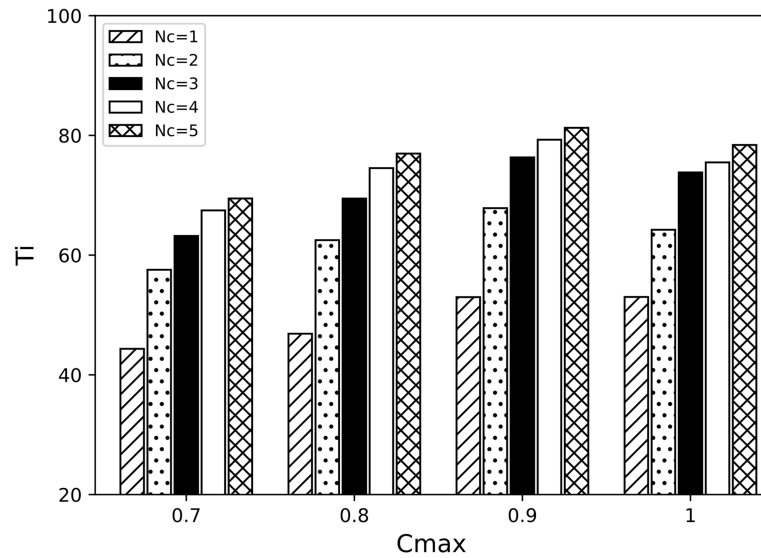


Figure 4. Scoring diagram of topology a
图 4. 拓扑 a 评分图

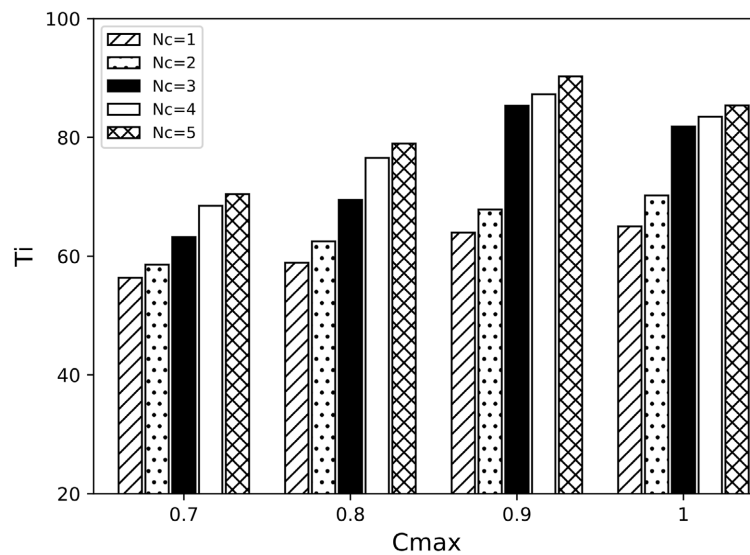


Figure 5. Scoring diagram of topology b
图 5. 拓扑 b 评分图

4.1. 平均路由命中率

平均路由命中率 ARHR (Average route hit rate)定义为成功检索到所需求的内容的兴趣蚂蚁占总迭代的兴趣蚂蚁的比例如下式:

$$ARHR = \frac{N_C \cdot \sum_{i=1}^n r}{N} \quad (13)$$

其中 n 为每次迭代兴趣蚂蚁数, 实验中取 600, N_C 为迭代次数, N 为蚂蚁总数, r 表示兴趣蚂蚁是否成功命中, 其值为 0 或 1, 为 1 时表示命中, 为 0 时表示路由失败。图 6 和图 7 对应拓扑 a 和 b 的路由命中率对比。在两种不同拓扑结构网络下, ACO 和 EACO 的路由命中率都远大于 FFS 和 RFS, 原因在于 FFS

和 RFS 都无法针对所需的内容节点进行最优路由选择。FFS 会造成多余的路由冗余, 略好于 RFS, 但也无法获得较为稳定的网络性能。经过多次迭代实验后, ACO 和 EACO 保持路由命中率持续升高, 且 EACO 的命中率升高速率大于 ACO, 这是由于 EACO 在 ACO 基础上进行改进, 加入了精英蚂蚁, 使得命中率收敛速度大幅度提高。

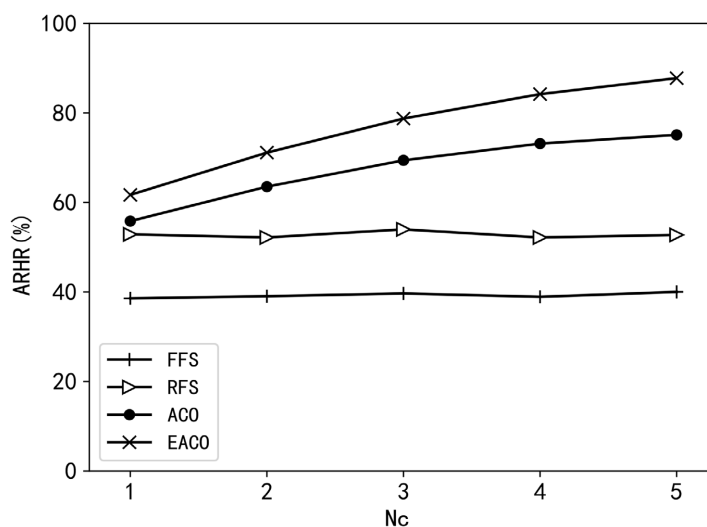


Figure 6. ARHR line graph of topology a

图 6. 拓扑 a ARHR 折线图

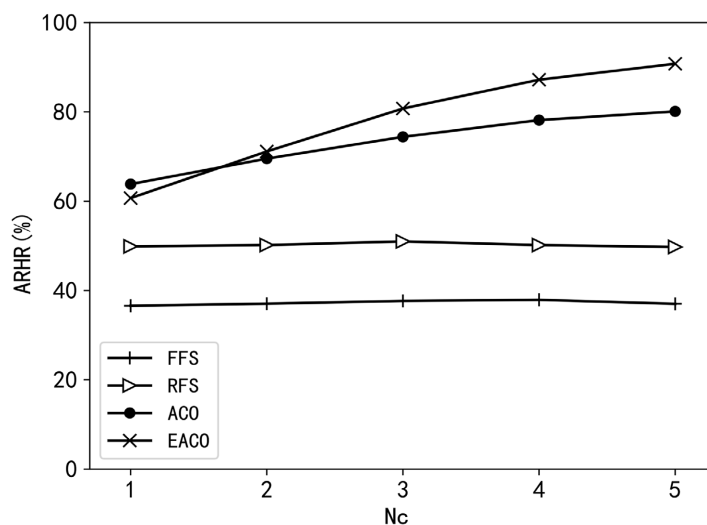


Figure 7. ARHR line graph of topology b

图 7. 拓扑 b ARHR 折线图

4.2. 平均路由跳数

平均路由跳数 ARH (Average routing hops) 定义为路由成功的兴趣蚂蚁平均跳数。可用下式表示:

$$ARH = \frac{\sum_{i=1}^N f(i)}{N_c \cdot \sum_{i=1}^n r} \quad (14)$$

上式中 $f(i)$ 表示成功命中的兴趣蚂蚁转发的跳数, r_s 则表示路由成功的次数。平均路由跳数能够表达路由路径的优劣性。图 8 和图 9 均路由跳数随请求迭代次数变化的情况, 本文所提出的路由机制的平均路由跳数在拓扑 a 中下降了 24.6%, 拓扑 b 中下降了 19.3%。其中 FFS 和 RFS 表现相对较差且不会受到迭代次数增加的影响而降低跳数。EACO 优于 ACO 的关键仍是精英策略对最优路径加速收敛的作用。

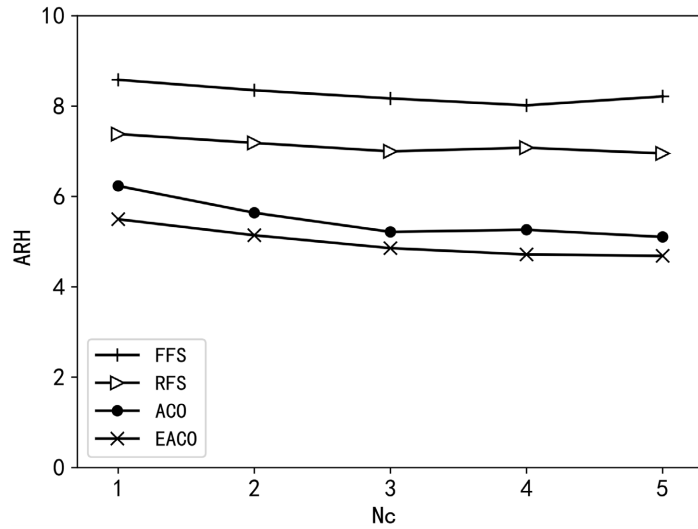


Figure 8. ARH line graph of topology a

图 8. 拓扑 a ARH 折线图

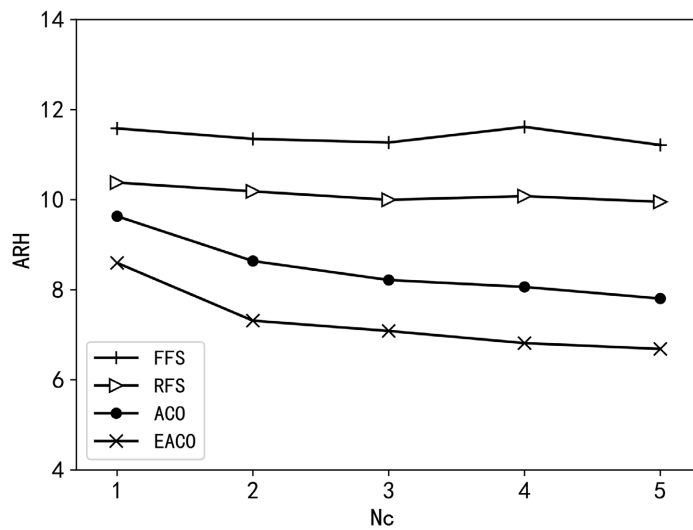


Figure 9. ARH line graph of topology b

图 9. 拓扑 b ARH 折线图

4.3. 平均路由时延

平均路由时延 ARD (Average routing delay), 定义为所有兴趣蚂蚁从出发到停止搜索下一跳所经历的时间的平均值。兴趣蚂蚁停止搜索的情况有两种: 第一种, 携带此兴趣包的兴趣蚂蚁已检索其所需的内容节点; 第二种, 携带此兴趣包的兴趣蚂蚁在未找到其所需内容所在节点前无非禁忌下一跳节点。

$$ARD = \frac{N_c \cdot \sum_{i=1}^n (S_i/v)}{N} \quad (15)$$

其中, S_i 是兴趣蚂蚁路由总路程, v 是路由速率, 时延的单位为毫秒。

EACO 和 ACO 的平均路由时延远低于 FFS 和 RFS 且随着迭代次数增加越来越低。由于 EACO 考虑了路径长度, 综合的信息素浓度以及节点间内容的相似度, 因此能有效避开拥塞程度相对高的节点, 找到最优选择的路径, 在兴趣蚂蚁请求数较多情况下, 大大节约了兴趣包等待时间。图 10、图 11 表明, 在不同拓扑下, 考虑节点的内容相似度和加入精英蚂蚁都会使得 EACO 比 ACO 更早进入收敛。

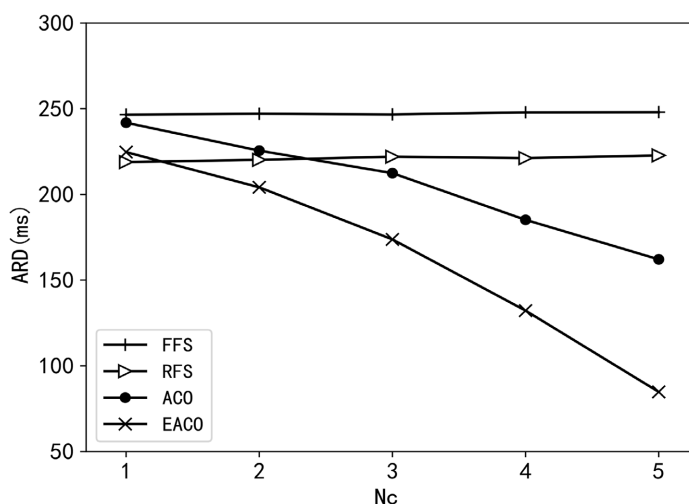


Figure 10. ARD line graph of topology a

图 10. 拓扑 a ARD 折线图

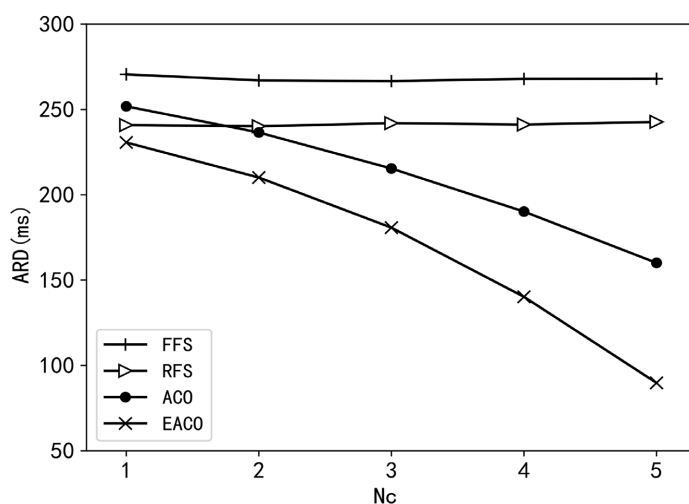


Figure 11. ARD line graph of topology b

图 11. 拓扑 b ARD 折线图

4.4. 通信开销

通信开销 COH (Communication overhead) 定义为网络中所有生成的包被转发的次数与成功命中的包的比值。

$$COH = \frac{\sum_{i=1}^N F(i)}{N_c \cdot \sum_{i=1}^n r} \quad (16)$$

其中, $F(i)$ 表示第 i 个节点路由过程中所转发的次数。FFS、RFS、ACO 和 EACO 在两种拓扑下的通信开销如图 12 和图 13 所示。对比几种策略可以发现 ACO 和 EACO 的通信开销是低于 FFS 和 RFS 的, 这得益于蚁群算法对路由的精准性提升, 而 RFS 相比较于 FFS 减少了部分无效路由, 相比较而言通信开销也有所降低。观察可以发现, 一方面图 12 区别于图 13, EACO 的通信开销随着兴趣蚂蚁数量增加逐渐超过 ACO, 考虑到 EACO 策略中加入了节点控制转换的操作, 导致在路由过程中存在增加网络开销的情况, 另一方面图 13 显示在复杂网络下, EACO 整体通信开销还是低于 ACO 的, 表明在阈值实验中选取不同的拥塞控制阈值也会影响网络的通信开销。EACO 考虑了单个节点负载情况, 避免了局部拥塞节点的出现, 更好地促进了兴趣蚂蚁的转发, 降低了网络的整体负载, 尽管在小型拓扑中相比于 ACO 有着较高通信开销, 但总体性能仍然优于其他策略。

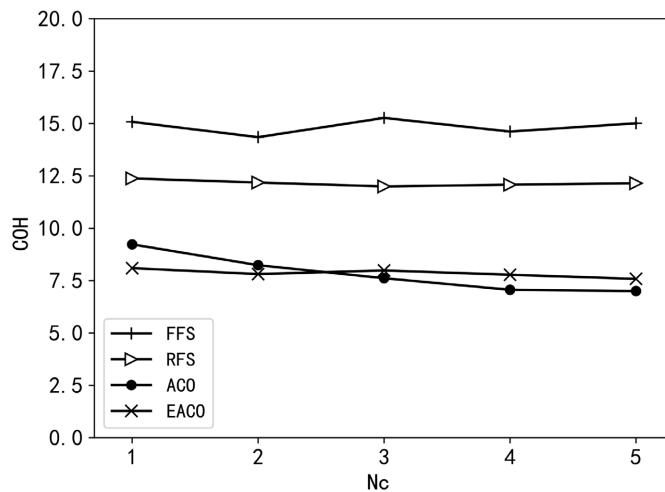


Figure 12. COH line graph of topology a
图 12. 拓扑 a COH 折线图

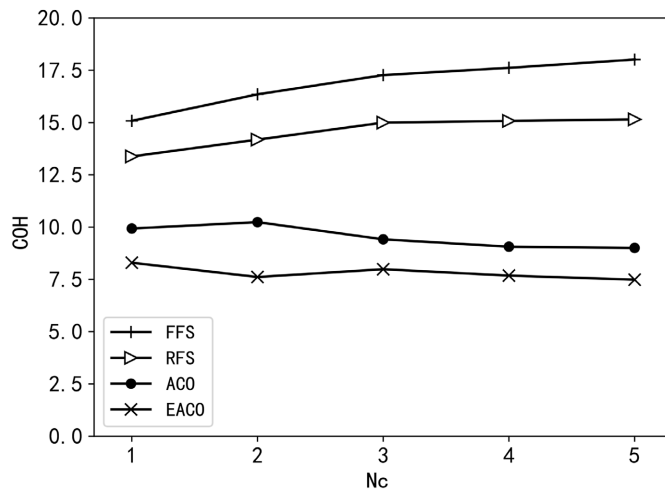


Figure 13. COH line graph of topology b
图 13. 拓扑 b COH 折线图

5. 总结

蚁群算法具有并行性、较强的鲁棒性、良好的全局搜索能力并能应用在众多领域中, 本文提出一种结合精英策略对传统蚁群算法进行改进的 NDN 路由机制, 综合考虑各节点间路径上的信息素浓度、邻居节点间路径长度以及请求节点与转发节点间的内容相似度; 同时, 在路由选择时针对路由的盲目性问题采用可选下一跳节点 FIB 聚合方法, 针对拥塞问题提出节点控制转换的方法。提出使用熵权法综合考虑四个性能指标, 控制两种方法的组合最优的前提下保证路由命中率和路由时延的同时控制了网络的拥塞。仿真实验结果表明, 在网络空间资源有限、网络开销合理的前提下, 不断增加请求数据包的情况下, 本文使用的策略相比另外三种路由策略有着较大的性能提升。在未来工作中, 我们考虑进一步优化算法, 通过引入其它协同策略提高性能。

基金项目

江苏省自然科学基金(BK20150459); 未来网络科研基金项目(FNSRFP-2021-YB-48)。

参考文献

- [1] Din, I.U., Hassan, S., Khan, M.K., Guizani, M., Ghazali, O. and Habbal, A. (2018) Caching in Information-Centric Networking: Strategies, Challenges, and Future Research Directions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **20**, 1443-1474. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2787609>
- [2] Conti, M., Gangwal, A., Hassan, M., Lal, C. and Losiok, E. (2020) The Road Ahead for Networking: A Survey on ICN-IP Coexistence Solutions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **22**, 2104-2129. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2994526>
- [3] Tariq, A., Rehman, R.A. and Kim, B.S. (2020) Forwarding Strategies in NDN-Based Wireless Networks: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **22**, 68-95. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2935795>
- [4] Gui, Y. and Chen, Y. (2021) A Cache Placement Strategy Based on Entropy Weighting Method and TOPSIS in Named Data Networking. *IEEE Access*, **9**, 56240-56252. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3071427>
- [5] Cheng, Y., Alexander, A., Lan, W., Zhang, B. and Zhang, L. (2012) Adaptive Forwarding in Named Data Networking. *ACMSIGCOMM Computer Communication Review*, **42**, 62-67. <https://doi.org/10.1145/2317307.2317319>
- [6] Ghasemi, C., Yousefi, H., Shin, K.G. and Zhang, B. (2018) Routing Meets Caching in Named Data Networks. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Computer Communications Workshops*, Honolulu, 15-19 April 2018, 1-2. <https://doi.org/10.1109/INFCOMW.2018.8406984>
- [7] Fang, C., Yao, H., Wang, Z. and Richard, Yu.F. (2018) A Survey of Mobile Information-Centric Networking: Research Issues and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **20**, 2353-2371. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2809670>
- [8] Gu, D. and Yu, Y. (2011) The Resource Efficient Forwarding in the Content Centric Network. *Proceedings of 10th International IFIP TC 6 Conference on Networking*, Valencia, 9-13 May 2011, 66-77. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20757-0_6
- [9] Gao, Y., Fu, J. and Lu, Y. (2021) Improvement of GPSR Routing Protocol for TDMA-Based UAV Ad-Hoc Networks. 2021 *World Conference on Computing and Communication Technologies (WCCCT)*, Dalian, 23-25 January 2021, 58-63. <https://doi.org/10.1109/WCCCT52091.2021.00018>
- [10] 张国印, 唐滨, 孙建国, 李佳楠. 面向内容中心网络基于分布均匀度的蚁群路由策略[J]. 通信学报, 2015, 36(6): 1-12.
- [11] 刘期烈, 诸葛丽强, 夏远鹏, 秦庆伟, 邢峰英. CCN 中一种非混合式蚁群路由优化策略[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2018, 30(4): 445-452.
- [12] Shanbhag, S., Schwan, N., Rimal, I. and Varvello, M. (2011) SoCCeR: Services over Content-Centric Routing. *Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking*, Toronto, 19 August 2011, 62-67. <https://doi.org/10.1145/2018584.2018600>
- [13] Khan, A.Z., Baqai, S. and Dogar, F.R. (2012) QoS Aware Path Selection in Content Centric Networks. *IEEE International Conference on Communications*, Ottawa, 10-15 June 2012, 2645-2649. <https://doi.org/10.1109/ICC.2012.6363829>

- [14] Huang, Q. and Luo, F. (2016) Ant-Colony Optimization Based QoS Routing in Named Data Networking. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, **16**, 671-682. <https://doi.org/10.3233/ICM-160648>
- [15] 沈越欣, 王兴伟, 李洁, 曾荣飞. 基于多源的NDN端节点拥塞控制算法[J]. *网络空间安全*, 2019, 10(8): 75-83.
- [16] Shi, G., Altafini, C. and John, S. (2019) Dynamic over Signed Networks. *SIAM Review*, **61**, 229-257. <https://doi.org/10.1137/17M1134172>
- [17] Membrey, P., Hps, D. and Plugge, E. (2015) Content Delivery Networks. In: *Practical Load Balancing*, Vol. 37, Apress, New York, 71-92. https://doi.org/10.1007/978-1-4302-3681-8_5
- [18] 石峻岭, 王兴伟, 黄敏. 基于 ICN 网络架构的社区感知型 MSN 路由机制[J]. *软件学报*, 2020, 31(6): 1786-1801.