

引用本文: 邱达, 李建华, 汪井源, 等. 一种用于紫外光通信网络的改进蚁群算法[J]. 光通信技术, 2024, 48(2): 12-17.

一种用于紫外光通信网络的改进蚁群算法

邱达¹, 李建华², 汪井源², 韦玮^{1*}

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 南京 210023;

2. 中国人民解放军陆军工程大学 通信工程学院, 南京 210007)

摘要: 由于紫外光通信网络信道时变性强, 需要对应的自适应路由来解决组网过程中出现的网络传输时延大和节点能量消耗不均衡等问题。基于蚁群优化(ACO)算法, 提出了一种用于紫外光通信网络中的改进 ACO 算法。该算法将网络节点能量引入到 ACO 算法状态转移概率公式中, 并通过 Matlab 软件仿真分析了算法在不同收发角度、发射功率和数据传输速率条件下的时延性能。仿真结果表明: 与 ACO 算法相比, 当收发仰角为 50°时, 所提算法的时延降低了 1 s, 收敛速度提升了 28%, 收敛路径的平均剩余能量也明显提高, 有效地延长了网络的生存周期。

关键词: 紫外光通信; 蚁群算法; 网络传输时延; 平均剩余能量; 自组织网络

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)02-0012-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.02.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Improved ant colony algorithm for ultraviolet communication network

QIU Da¹, LI Jianhua², WANG Jingyuan², WEI Wei^{1*}

(1. College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology),

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. College of communication Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: Due to the strong time-varying nature of the ultraviolet communication network channel, corresponding adaptive routing is needed to solve the problems of high network transmission delay and uneven energy consumption of nodes during the networking process. Based on ant colony optimization(ACO) algorithm, an improved ACO algorithm for ultraviolet communication networks is proposed. The algorithm introduces the network node energy into the state transition probability formula of ACO algorithm, and analyzes the delay performance of the algorithm under different transmitting angles, transmitting power and data transmission rates by Matlab simulation software. The simulation results show that compared with the ACO algorithm, when the transmit-receive elevation is 50°, the delay of the proposed algorithm is reduced by 1 s, the convergence speed is increased by 28%, the average residual energy of the convergence path is also significantly increased, and the life cycle of the network is effectively extended.

Key words: ultraviolet communication, ant colony optimization, network transmission delay, average residual energy, self-organizing network

收稿日期: 2023-04-27。

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.62171463, 62271502)资助。

作者简介: 邱达(1998—), 男, 硕士研究生, 现就读于南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院电子信息专业, 主要从事紫外光通信自组织网络方面的研究, 参与了国家自然科学基金项目与江苏省光通信工程技术研究中心开放基金项目。

*** 通信作者:** 韦玮(1960—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事紫外光通信的发射、接收与调制研究, 以及光电信息功能材料和器件、特种光学材料和光纤的设计制备与性能研究。



0 引言

紫外光通信作为一种新型的无线光通信方式, 具有窃听率低、全天候通信和抗干扰能力强等特点^[1]。与自组织网络相结合, 形成了无线紫外通信网络, 它不仅可扩大传输距离, 还能实现远距离通信, 具有广泛的应用前景^[2]。

在通信过程中, 路由协议是节点经过多跳才能与其它节点进行通信的必要条件, 需要在源节点与目的节点之间建立一条能够转发分组的通信传输路径并

正确传输数据。由于紫外光通信的节点覆盖范围小、信道时变性强, 其节点密度、传输功率和传输速率等参数都将影响紫外光通信的质量^[9]。此外, 传统的无线网状网络中的路由协议无法直接应用于紫外光自组织网络中, 因此紫外光通信需要有对应的自适应路由协议才能进行通信^[2]。

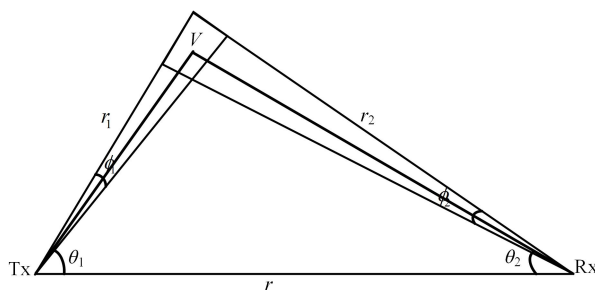
自适应路由是无线自组织网络的一个关键功能, 近几年已经得到了大量的研究。2016年, 华中科技大学的 ABDULWAHID H 等人^[4]针对移动 Ad Hoc 网络中节点变化导致拓扑变化的问题, 提出了一种链路调度组播路由协议, 并分析了不同路由协议的性能。2017年, 西安工程大学宋晓梅等人^[5]提出了一种紫外光空分复用自组网路由协议并进行了仿真分析, 设计了一种可旋转的紫外线(UV)通信收发设备, 将区域划分为多个扇区, 结合节点间的通信距离求得节点间的相对位置。2019年, 西安工程大学陈冲等人^[6]研究分析了紫外光自组网按需多径距离矢量路由算法, 并利用 NS2 软件进行了仿真, 分析了不同移动区域和节点数目条件下算法的性能。2021年, 西安理工大学赵太飞团队^[7]提出了一种无人机蜂群中紫外光隐秘通信能耗均衡路由算法, 通过构建链路权值函数来有效均衡无人机蜂群节点的能量消耗。2022年, 赵太飞团队^[8]又提出了一种无线紫外光协作无人机蜂群能效优化路由算法, 通过引入距离项和能量项对非均匀分簇算法进行了改进。但是, 紫外光自组织网络的拓扑结构不断变化, 节点之间较长的响应时间间隔导致网络拓扑变化的响应变慢, 出现频繁的路由失效, 使网络无法通信^[9]。此外, 在路由发现过程中, 若选用洪泛机制将造成较大的路由开销; 在传输路径上, 多次使用同一个节点进行传输又将导致节点能量提前耗尽。针对这些问题, 西安理工大学柯熙政团队^[2]提出了将蚁群优化(ACO)算法应用到无线网络服务质量(QoS)路由中, 删除了节点路径间的环路, 并在信息素更新部分考虑节点电量并保留信息素给后续节点使用, 但在实际仿真过程中节点数较少, 无法判断当节点数增多的情况下其算法的有效性。

目前, ACO 算法已被广泛应用于资源二次分配问题、旅行商问题、最短路径规划等经典优化问题中, 并取得了较好的效果。虽然 ACO 算法具有良好的拓展性, 且能有效提高动态网络环境中的 QoS^[10], 常被用于自组织网络的路由算法求解, 但是在紫外光通信自组织网络中的应用较少。本文基于 ACO 算法, 提出一种用于紫外光通信网络中的改进蚁群算法(下文简称 UVACO 算法)。

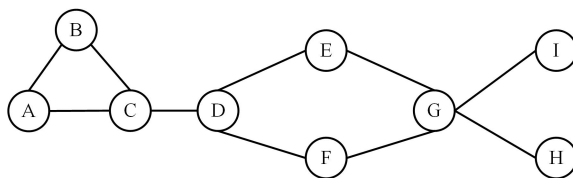
1 基本原理

1.1 紫外光自组织网络传输原理

紫外光通信网络传输模型如图 1 所示。图 1(a)中, T_x 为发射端, R_x 为接收端, r 为通信距离, V 为有效散射体, r_1 为发射端到有效散射体的距离, r_2 为接收端到有效散射体的距离, θ_1 为发射仰角, θ_2 为接收仰角, ϕ_1 为光束发散角, ϕ_2 为接收视场角。紫外光的散射信道在通信时不需要完全对准, 当发射端和接收端的视场角重叠时, 就可以形成非直视传输(NLOS)路径^[11]。图 1(b)中, 各节点功能相同, 相邻多个节点可同时交互信息, 相邻节点通信距离受紫外光散射的最大通信距离约束。源节点与目的节点之间一般存在多条传输路径, 可选择最佳路径, 或者通过多径传输实现负载均衡。



(a) NLOS 链路示意图



(b) 自组织网络结构示意图

图 1 紫外光通信网络传输模型

由于紫外光在大气中受到的散射作用很强, 传播衰减非常快, 随着通信路径增长, 衰减损失呈指数级增加。非视距紫外光传输损耗 L 可以用式(1)^[12]表示

$$L = \xi r^\epsilon e^{-\mu} \quad (1)$$

其中, ξ 为路径损耗系数, ϵ 为路径损耗指数, μ 为衰减因子。在短程通信中, μ 值约为 $1 \sim 10 \text{ km}^{-1}$, 其影响可忽略不计。因此, 对于本文中的短距离情况, 式(1)可简化为

$$L = \xi r^\epsilon \quad (2)$$

在无线紫外通信过程中, 太阳辐射噪声光子的分布更接近泊松噪声分布, 本文采用开关键控(OOK)调制, 其误码率 P 可以表示为

邱达, 李建华, 汪井源, 等: 一种用于紫外光通信网络的改进蚁群算法

$$P = \frac{1}{2} \exp(-\lambda_s) \quad (3)$$

其中, λ_s 为脉冲信号周期内信号光子到达接收机的速率, 可以表示为

$$\lambda_s = \frac{\eta P_t}{LR_b (hc/\lambda)} \quad (4)$$

其中, λ 为波长, 每个光子携带的能量为 hc/λ ; h 是普朗克常数, c 是光速。 η 为滤光片和光电探测器的量子效率, $\eta = \eta_{\text{PMT}} \eta_i$, η_{PMT} 为光电倍增管 (PMT) 的量子效率, η_i 为光学滤光片效率, P_t 为传输功率, R_b 为数据速率。

根据上述公式, 推导出紫外光通信节点的通信半径公式^[13]为

$$R = \sqrt[3]{-\frac{\eta P_t \lambda}{\xi R_b h \ln(2P)}} \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 紫外光通信节点的通信半径受到传输功率、数据速率、误码率等多个参数的影响。在紫外光通信组网过程中, 节点频繁移动、网络参数不断变化以及节点通信半径变化, 都会影响网络的拓扑结构, 节点之间的信息传输需要实时收集紫外光信道参数来确定传输路由。因此, 紫外光通信网络需要对应的自适应路由来提高网络通信效率。

1.2 UVACO 算法

在 ACO 算法中, 蚂蚁根据状态转移概率公式选择下一跳节点, 时刻 t 位于节点 i 的蚂蚁 k 选择节点 j 为下一跳节点的状态转移概率公式^[13]可以表示为

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{u \in A_k} [\tau_{iu}(t)]^\alpha [\eta_{iu}(t)]^\beta}, & j \in A_k \\ 0, & j \notin A_k \end{cases} \quad (6)$$

其中, A_k 为下一跳可以选择的节点集合, $\tau_{ij}(t)$ 为时刻 t 在 (i, j) 路径上的信息素浓度, $\eta_{ij}(t)$ 为启发函数; u 表示当前节点 i 可以选择的下一跳节点; α 为信息启发因子, 反映信息素在蚂蚁搜索过程中的相对重要程度, β 为期望启发式因子, 反映启发信息的相对重要性程度。

在迭代过程中, 每只蚂蚁会根据状态转移概率公式选择下一个节点, 直至到达目标点。每次迭代结束后, 每条路径上的信息素浓度都要更新变化, 不断调整信息素浓度 $\tau_{ij}(t)$ 以加快算法的收敛^[14], 其更新公式为

$$\tau_{ij}(t+\Delta t) = (1-\rho) \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t) \quad (7)$$

$$\Delta \tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t) \quad (8)$$

$$\Delta \tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & i, j \in l_k \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

其中, ρ 为信息素挥发系数, $\Delta \tau_{ij}(t)$ 为本次循环中路径 ij 上的信息素增量, $\Delta \tau_{ij}^k(t)$ 为第 k 个蚂蚁在本次循环中在路径 ij 上释放的信息素, m 为蚂蚁种群的蚂蚁数量, L_k 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中所经过的路径的长度, l_k 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中所经过的点的集合, Q 为常数。

ACO 算法具有分布式计算、正反馈机制和较强的鲁棒性等优点, 算法搜索迭代过程无需人为调整。但是, 在实际应用过程中, ACO 算法容易出现收敛速度慢和陷入局部最优解等问题, 导致无法搜索计算出最佳的结果。由于紫外光通信网络的信道质量和拓扑结构不断变化, 使用 ACO 算法实时收集信道参数, 必须收敛速度快且避免陷入局部最优解, 收敛速度慢会导致路由失效和通信中断, 使用局部最优解进行通信会导致通信资源浪费。另外, 还需要避免因节点被过度使用而导致能量提前耗尽的问题。

基于此, 本文对 ACO 算法进行改进, 提出 UVACO 算法, 具体思路如下:

1) 根据紫外光通信参数确定节点通信半径 R 和节点间路由, 相邻节点间删除不满足紫外光通信要求的路由, 缩小下一跳节点的选择范围, 从而加快算法的收敛。

2) 调整状态转移概率公式, 将节点能量加入到状态转移概率公式中, 优先选择节点能量大的节点作为下一跳节点, 从而延长网络生存周期。节点的状态转移概率公式为

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta [\delta_{ij}(t)]^\gamma}{\sum_{u \in A_k} [\tau_{iu}(t)]^\alpha [\eta_{iu}(t)]^\beta [\delta_{iu}(t)]^\gamma}, & j \in A_k \\ 0, & j \notin A_k \end{cases} \quad (10)$$

$$\delta_{ij}(t) = \frac{e_j(t)}{C} \quad (11)$$

其中, $\delta_{iu}(t)$ 为能量因子, 是与节点能量有关的函数, 能够直接反应邻居节点的剩余能量; C 为节点初始能量, $e_j(t)$ 为节点当前能量。 γ 为能量启发因子, 反映了节点能量在搜索过程中的相对重要程度。节点信息素更新策略不变。

图 2 为本文提出的 UVACO 算法流程图, 算法步骤具体描述如下:

1) 初始化网络参数设置, 确定蚂蚁种群数量和最大迭代次数, 设置源节点和目的节点、信息启发因子、期望启发因子、能量启发因子和信息素挥发系数等参数; 初始化启发函数和信息素, 设置紫外光通信节点收发仰角、透射功率和传输速率等参数; 相邻节点间删除不满足紫外光通信传输要求的链路, 将所有蚂蚁置于源节点。

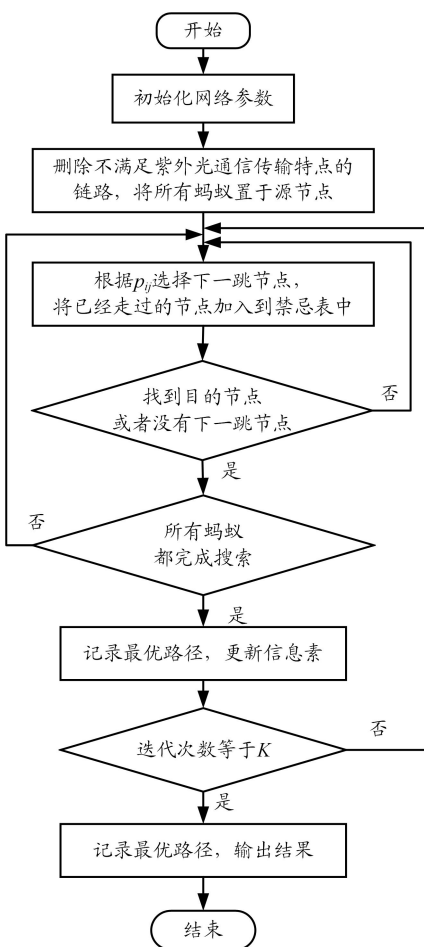


图 2 UVACO 算法流程图

2) 开始迭代计算, 所有蚂蚁进行并行计算, 每只蚂蚁根据状态转移概率公式选择下一跳节点, 同时将已经走过的节点加入禁忌表中, 重复上述过程, 直到 m 只蚂蚁均完成完整的路径搜索, 找到目的节点或没有下一跳可达。

3) 单次迭代完成, 记录每条路径的网络时延和平均剩余能量, 比较得出当前迭代的最优路径。

4) 对蚂蚁走过的路径进行信息素更新, 重复步骤 2) 继续迭代。

5) 完成 K 次迭代, 输出全局最优路径, 记录最优路径结果, 绘制最优路径的网络时延图、收敛路径平均剩余能量图, 输出结果。

2 结果与讨论

为充分验证本文提出的 UVACO 算法在紫外光通信网络中的有效性, 本文利用 Matlab 软件对 UVACO 算法进行了模拟仿真研究, 算法中使用的场景和节点设置参数如表 1 所示。

自组织网络节点间距离坐标图如图 3 所示。网络

表 1 UVACO 算法仿真参数

参数	数值
发射仰角 $\theta_t/^\circ$	50
接收仰角 $\theta_r/^\circ$	50
波长 λ/nm	280
误码率 P	10^{-6}
传输功率 P/W	0.5
数据传输速率 $R_b/\text{kb/s}$	10
光学滤光片效率 η_f	0.15
光电倍增管的量子效率 η_{PMT}	0.3
节点初始能量 C/J	10

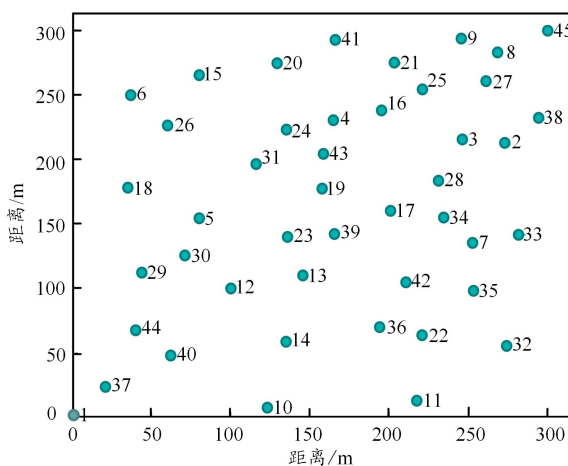


图 3 自组织网络节点间距离坐标图

节点随机分布在一个 $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ 的正方形区域内, 每个节点初始能量设置为 10 J , 选定的节点密度为 $5 \times 10^{-4} \text{ m}^{-2}$, 仿真区域内共 45 个节点, 设置源节点为节点 1, 目的节点为节点 45。

相同源节点和目的节点间, 采用 UVACO 算法和 ACO 算法的网络传输时延随迭代次数的变化图如图 4 所示。可以看出, UVACO 算法在迭代前期呈现振荡趋势, 但是随着迭代次数增加, 振荡幅度逐渐变小, 收敛直至稳定。相较于 ACO 算法, UVACO 算法搜索得到的路径时延更低且收敛速度更快, UVACO 算法迭代 51 次收敛, 而 ACO 算法需要迭代 71 次, 与之相比, UVACO 算法的收敛速度提升了 28%, 网络时延减少了 1 s 。由此可见, UVACO 算法在紫外光通信网络中有效地找到了低时延路径, 降低了网络时延。

UVACO 算法和 ACO 算法在迭代过程中收敛路径上的平均剩余能量变化情况如图 5 所示。可以看出, UVACO 算法收敛路径上的平均剩余能量随着迭代次数增多而逐渐增加并趋于稳定, 收敛路径平均剩余能

邱达, 李建华, 汪井源, 等: 一种用于紫外光通信网络的改进蚁群算法

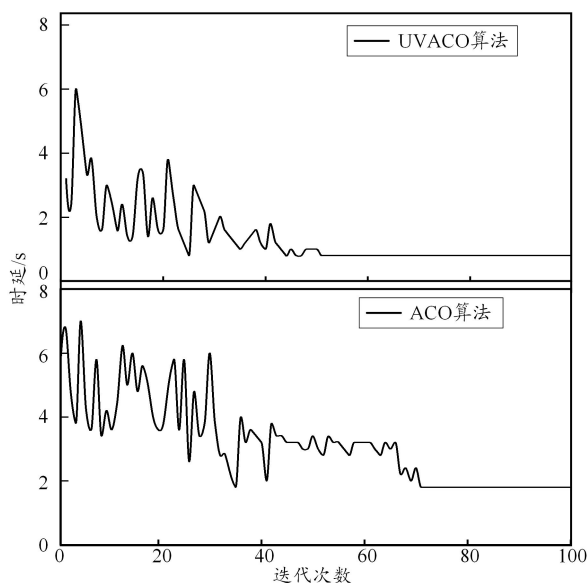


图4 2种算法迭代过程中的网络传输时延变化图

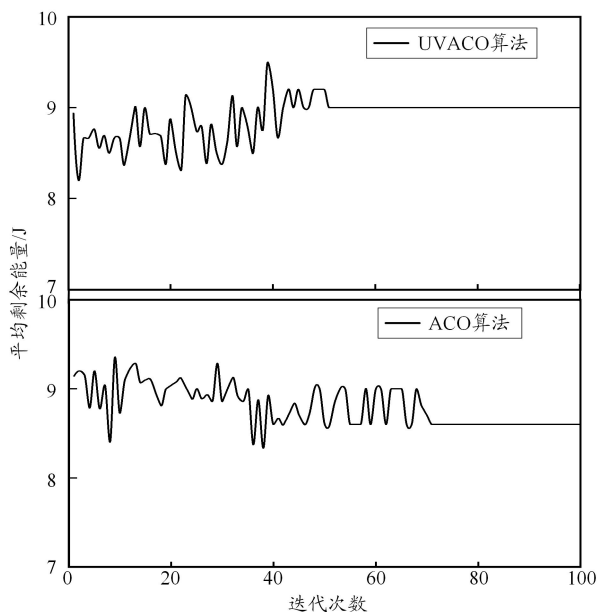
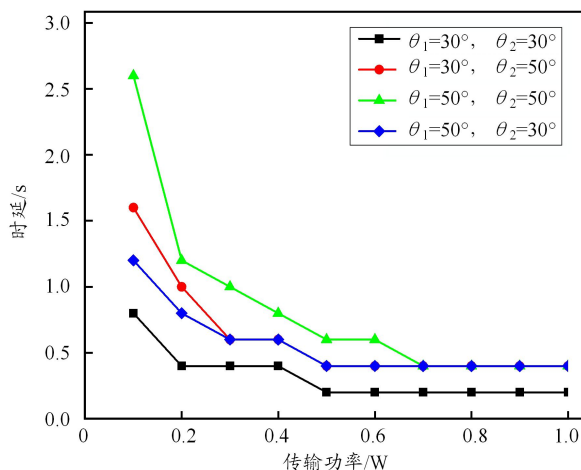


图5 2种算法收敛路径上平均剩余能量变化图

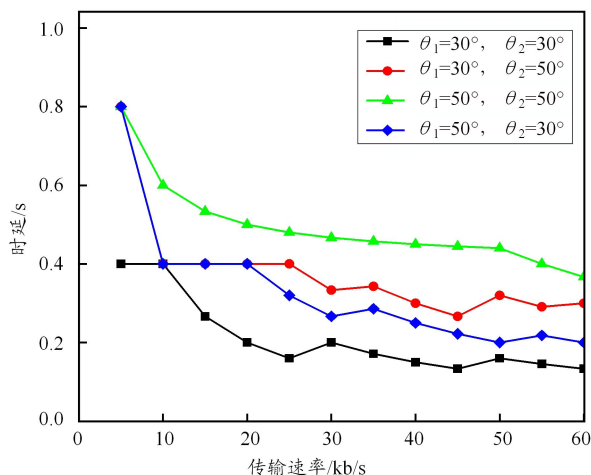
量为9 J。这是因为节点根据状态转移概率公式 $p_{ij}(t)$ 来选择下一跳节点,选择的过程基于轮盘赌法进行选择。在算法迭代前期,节点间各条路径上的信息素差别较小,使用轮盘赌法进行选择时,有可能会选到剩余能量较低的节点,导致在迭代前期路径上的平均剩余能量较小且波动较大。然而,随着迭代次数增多,算法不断地进行信息素的积累和更新,这样的正反馈过程使得算法能够迭代收敛得到最优的路径,从而优先选择剩余能量大的节点作为下一跳节点。因此,UVACO 算法迭代后期路径的平均剩余能量高于迭代前中期,避免了单个节点被多次使用而导致能量消耗过

快,有效地延长了网络生存时间。由于 ACO 算法不考虑节点能量,导致迭代过程中的路径平均剩余能量波动较大且无法在迭代后期提高路径的平均剩余能量,稳定后路径平均剩余能量为 8.6 J,低于 UVACO 算法,故 ACO 算法无法优先选择能量大的节点进行转发。

在节点密度不变的情况下,本文采用 UVACO 算法研究了不同收发角度下时延与传输功率、传输速率之间的变化情况,如图 6 所示。为了充分发挥紫外光非视距通信的特性,发射端和接收端仰角不宜小于 20° ,且接收仰角大于 70° 时,通信半径随角度变化不大。选取的仰角组合为: $\theta_1=30^\circ, \theta_2=30^\circ$; $\theta_1=30^\circ, \theta_2=50^\circ$; $\theta_1=50^\circ, \theta_2=50^\circ$; $\theta_1=50^\circ, \theta_2=30^\circ$ 。设定: $R_b=10$ kb/s,传输功率由 0.1 W 变化至 1 W。从图6(a)可以看出,相同源节点和目的节点之间,随着传输功率增加,时延逐渐减小。这是由于传输功率增大,节点通信范围变大,可



(a) 传输功率与时延



(b) 传输速率与时延

图6 不同收发角度下发射功率、传输速率与时延的变化曲线图

选择的下一跳节点变多,所以节点转发次数逐渐变小,总时延变小。当传输功率小于 0.4 W 时,传输功率变化对网络时延影响较大,当传输功率大于 0.7 W 时,继续增大传输功率对转发次数和时延没有影响。设定:节点传输功率 $P=0.5$ W,传输速率由 5 kb/s 变化至 60 kb/s。从图 6(b)可以看出,随着传输速率增大,网络时延整体呈现下降趋势。这是因为节点间单次传输时延随着传输速率的增大而变小。尽管传输速率增大,会导致节点通信半径变小,从而在相同源节点和目的节点之间需要更多的转发节点,但总体时延还是呈现下降趋势。

由图 6 可知,当发射仰角 $\theta_1=30^\circ$ 时,接收仰角 $\theta_2=30^\circ$ 时的时延小于 $\theta_2=50^\circ$ 时的时延;当接收仰角 $\theta_2=30^\circ$ 时,发射仰角 $\theta_1=30^\circ$ 时的时延小于 $\theta_1=50^\circ$ 时的时延;当发射仰角 $\theta_1=50^\circ$ 时,接收仰角 $\theta_2=30^\circ$ 时的时延小于 $\theta_2=50^\circ$ 时的时延;当接收仰角 $\theta_2=50^\circ$ 时,发射仰角 $\theta_1=30^\circ$ 时的时延小于 $\theta_1=50^\circ$ 时的时延。由此可知,在相同传输功率和数据传输速率条件下,收发仰角角度越小,相同源节点和目的节点之间的时延越小。这是因为当发射仰角或接收仰角增大时,通信半径减小,相同源节点和目的节点之间则需要更多的转发次数。

3 结束语

本文提出了一种 UVACO 算法,该算法将网络节点能量引入到 ACO 算法状态转移概率公式中,通过 Matlab 软件仿真分析了 UVACO 算法在不同收发角度、传输功率和数据传输速率条件下的时延性能。仿真结果表明:与 ACO 算法相比,UVACO 算法能够搜索到的路径更优,时延更低,并且收敛速度提升了 28%。UVACO 算法通过在节点状态转移概率公式中引入节点能量,优化节点转发,有效地提高了收敛路径的平均剩余能量,延长了网络的生存时间。此外,UVACO 算法在收敛路径的平均剩余能量方面具有优势,能够有效地均衡节点能量消耗。在不同的收发仰角、传输功率和数据传输速率的紫外光通信自组织网络中,U-

邱达,李建华,汪井源,等:一种用于紫外光通信网络的改进蚁群算法

VACO 算法能够有效找到低时延路径。该方法为今后紫外光通信自组织网络路由协议的研究提供了新思路。

参考文献:

- [1] 彭木根,袁仁智,王志峰,等. 紫外光通信:原理、技术与展望[J]. 北京邮电大学学报,2022,45(3):13-18.
- [2] 柯熙政. 紫外光自组织网络理论[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [3] VAVOULAS A, SANDALIDIS H G, VAROUTAS D. Node isolation probability for serial ultraviolet UV-C multi-hop networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications And Networking, 2011, 3(9): 750-755.
- [4] ABDULWAHID H, DAI B, HUANG B, et al. Scheduled-links multicast routing protocol in MANETs[J]. Journal of Network & Computer Applications, 2016, 63(3): 56-67.
- [5] 宋晓梅,宋菲,宋鹏,等. 紫外光空分复用自组织网络路由协议[J]. 中国激光,2017,44(10):193-202.
- [6] 陈冲,宋鹏,李云红,等. 紫外光自组网按需多径距离矢量路由算法[J]. 西安工程大学学报,2019,33(1):74-80.
- [7] 赵太飞,程敏花,吕鑫喆,等. 无人机蜂群中紫外光隐秘通信能耗均衡路由算法[J]. 系统工程与电子技术,2021,43(1):251-257.
- [8] 赵太飞,程敏花,张港,等. 无线紫外光协作无人机蜂群能效优化路由算法[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(5):139-146.
- [9] ZHANG X, ZHANG Y, LI Y, et al. Bio-inspired adaptive routing in self-organized networks: a survey[C]//IEEE. Proceedings of 2013 8th International Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM). Guilin: IEEE, 2013: 505-510.
- [10] SUBRAMANIAN D, DRUSCHEL P, CHEN J. Ants and reinforcement learning: a case study in routing in dynamic networks[C]//IJCAI. Proceedings of 1997 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence. Nagoya: IJCAI, 1997: 832-838.
- [11] HAN D, FAN X, ZHANG K, et al. Research on multiple-scattering channel with monte carlo model in UV atmosphere communication[J]. Applied Optics, 2013, 52(22): 5516-5522.
- [12] CHEN G, XU Z, DING H, et al. Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications [J]. Optics Express, 2009, 17(5): 3929-3940.
- [13] HE Q, SADLER B M, XU Z. Modulation and coding tradeoffs for non-line-of-sight ultraviolet communications [C]//SPIE. Proceedings of SPIE Conference on Free-Space Laser Communications. San Diego: SPIE, 2009: 74640H1-74640H12.
- [14] DORIGO M, BIRATTARI M, STUTZLE T. Ant colony optimization-artificial ants as a computational intelligence technique[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2006, 1(4): 28-39.