

一种基于蚁群算法的深空光通信网络链路性能研究

王小瑞,陈冬冬,何红杰

(郑州轻工业大学 计算机与通信工程学院,郑州 450002)

摘要:为尽量减少额外开销和寻找最优传输路径,结合激光通信视距传输和长距离传输的特性,提出了一种基于蚁群算法的深空光通信网络路由算法(RA-ACA)。首先对深空光通信中的单向链路问题、节点能耗问题进行研究,然后在传统路由算法的基础上对RA-ACA进行优化,最后进行了仿真对比实验。仿真结果表明:RA-ACA收敛路径上的剩余总能量高于TACA约5kW·h,RA-ACA保留节点信息素时收敛速度提高了50%。

关键词:深空通信;激光通信;链路性能

中图分类号:TN929.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)04-0022-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.04.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on link performance of deep space optical communication network based on ant colony algorithm

WANG Xiaorui, CHEN Dongdong, HE Hongjie

(School of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to minimize additional overhead and find the optimal transmission path, combined with the characteristics of line of sight transmission and long-distance transmission of laser communication, a deep space optical communication network routing algorithm(RA-ACA) based on ant colony algorithm is proposed. Firstly, the unidirectional link problem and node energy consumption problem in deep space optical communication are studied, and then RA-ACA is optimized based on the traditional routing algorithm. Finally, the simulation and comparison experiments are carried out. The simulation results show that the total remaining energy on the convergence path of RA-ACA is about 5 kW·h higher than that of TACA, and the convergence speed of RA-ACA is increased by 50% when it retains the node pheromone.

Key words: deep space communication, laser communication, link performance

0 引言

深空光通信网是实现深空高速信息通道的一项战略性基础设施,为导航定位、深空探测以及遥感遥测提供强有力的技术支持。然而,深空光通信的时延较长,链路连接具有间断性,分组很容易丢失;且由于

受到障碍物、节点通信能量以及背景噪声的影响,深空光通信网络链路容易出现不对称现象(单向链路),这给路由设计带来极大的挑战^[1-3]。

目前,深空通信网中的主要路由策略是基于射频通信,而射频通信网络路由方法不能直接应用到深空光通信网中。深空光通信网是一种有别于地面固定拓扑网络、无线移动蜂窝网络和无线自组织网络的特殊无线网络,其用户的接入具有动态的特性,且不存在固定的基站。深空光通信网络路由设计面临的挑战^[4-6]包括:①间断连通性。深空光通信网络具有动态拓扑,端到端的链路具有间断链接特性,行星自身的移动、苛刻的空间环境以及碎片的干扰等均会导致链路的中断。②时延长。较长的传输距离是导致传输时延延长的主要原因;另外,由于深空通信节点的移动,也将增加传输时延。③不对称链路带宽和较高的误比特

收稿日期:2021-08-23。

基金项目:河南省自然科学基金项目(批准号 212300410302)资助;博士启动基金项目(0131/13501050033)资助;河南省科技攻关项目(批准号 212102210554)资助;郑州市重大科技创新专项项目(No.2019CXZX0042)资助。

作者简介:王小瑞(1984—),女,博士,现于郑州轻工业大学计算机与通信工程学院任教,主要从事无线紫外光通信、空间光通信关键技术研究工作。2016年,获得河南省教育厅优秀科技成果奖二等奖;2019年,成为郑州泰恩科技有限公司特聘教授;2021年,主持河南省自然基金项目。



率。信号进行传输时上行链路与下行链路的数据传输速率比等级达到 1:1000;另外,苛刻的网络环境和长距离传输导致深空链路具有较高的误比特率。④节点能量有限。由于在极远的传输距离情况下,需要高功率的发射机和高敏感的接收机,因此节点的能量绝大部分用于信号的传输和接收,严重限制了网络的通信时间。

基于以上分析,提出一种基于蚁群算法的深空光通信网络的路由算法(RA-ACA),提高网络性能。

1 问题描述

目前,深空通信的地面通信网的架构和基础设施建设已经逐步完善。但是,随着人类探测的脚步向更遥远的太空迈进,点对点通信具有很大的局限性。激光通信视距传输和长距离传输的特点带来的信号衰减以及深空探测供电有限等问题给深空光通信网的连通性和路由选择提出了更高挑战。本文针对目前深空光通信中存在的单向链路问题和节点能耗问题进行分析。

1.1 单向链路问题

激光通信的视距通信指信源和信宿之间没有障碍物。图 1 为单向链路^[7]示意图。可以看出,节点 A 在节点 B 的传输范围内,节点 B 却不在节点 A 的传输范围内。因此,在通信过程中,节点 A 能够接收到节点 B 发送的数据,而节点 B 则接收不到节点 A 发送的数据,即节点 A 与节点 B 之间存在单向链路。

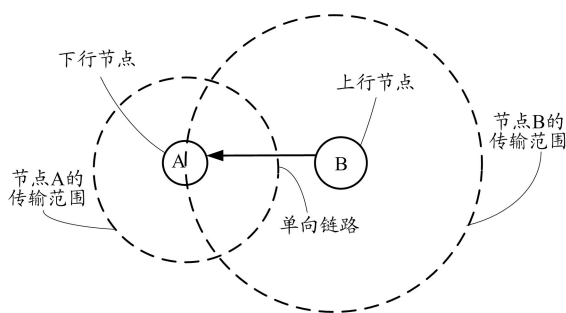


图 1 单向链路示意图

深空光通信网中产生单向链路的原因主要有:
①不同通信节点的通信能力不同。如节点 A 与节点 B 的通信能力不同,导致其节点覆盖范围不一样。②障碍物的存在,导致某时刻通信链路的中断。③背景噪声的影响。例如日凌现象,当卫星在地球与太阳之间,地球在接收卫星信号时,强大的太阳辐射会使通信短暂中断。

目前,无线网络路由算法中解决单向链路的主要方法均是将单向链路屏蔽,只使用链路中存在的双向链路。虽然该方法在一定程度上是有效的,但当网络中某节点只能通过单向链路连接网络时,以上方法将会导致该节点与整个网络失去联系;另外,当网络中存在的单向链路比双向链路的性能参数好时,使用单向链路就可以节约网络资源。

1.2 节点能耗问题

航天器电源的选择是根据航天任务的要求和空间电源的发展水平而确定的,各类航天器可选用不同的电源^[8]。轨道、短寿命卫星一般采用化学原电池或蓄电池组,载人航天器采用氢氧燃料电池组和太阳阵-蓄电池组联合电源,而极大部分长寿命卫星则采用太阳电池阵-蓄电池组联合电源。由于到达航天器的太阳能与航天器离太阳距离的平方成反比,因此光照环境直接影响探测器能源系统的设计。在光照环境较差的情况下,几乎无法使用太阳能。除了距离,深空探测器飞行过程中可能存在长阴影、长光照和辐射变化大的因素。因此,深空探测器受到重量、体积和环境等因素的制约,可采用核电源。相比太阳能,核电源不受太阳光照、外界环境温度和电磁场等条件的限制,且工作寿命长。但是,当有限核能消耗完以后,深空探测器就失去了工作能力,因此低功耗的探测器十分重要。

延长深空探测器使用寿命的传统方法主要是通过合理设计探测器的电源系统,提高有限能量的使用效率和转化效率,同时采用智能管理技术实现电能的合理分配。但这些都是对深空探测器本身的改进,并没有考虑如何在深空探测器信息收发过程中控制节点能量消耗速度。

2 RA-ACA 描述

深空光通信网中,激光通信视距传输的链路受到障碍物或者背景噪声(如日凌现象)的影响从而产生单向链路。传统路由算法一般采用屏蔽掉单向链路的方式,这造成了资源的浪费。本文充分利用单向链路性能,在传统蚁群算法(TACA)的基础上结合深空光通信的特点提出了 RA-ACA。该算法把蚂蚁看作移动代理(控制报文),分为三类:前向蚂蚁(Fants)、后向蚂蚁(Bants)和广播后向蚂蚁(BBants),通过蚂蚁代理间的交互信息来确定路由。与传统路由算法相比,RA-ACA 将在几个方面做出改进:①基于多接口的深空节点模型设计^[9],将充分利用网络中的单向链路资源,提高网络资源利用率;②为解决深空光通信网中的节点

王小瑞,陈冬冬,何红杰:一种基于蚁群算法的深空光通信网络链路性能研究

能耗问题,在路由选路时,把节点能量作为选择下一跳路径的因子,改善网络性能;③为解决传统蚁群算法收敛速度慢的问题,每次寻找完一个目的节点后,保留路径上的信息素给后续节点使用,从而加速收敛速度。

2.1 数学模型

蚂蚁在寻路的初始时刻,假设各条路径上分布的信息素强度相等,即 $\tau_{ij}(0)=C$ (C 为一个常数)。蚂蚁 k ($k=1,2,\dots,m$) 在运动过程中,转移方向是由各条路径上的信息素函数浓度决定的,并且位于某一节点只能选择一个目标节点前行。那么, t 时刻时,位于节点 i 的蚂蚁 k 在选择节点 j 为目标节点的概率^[10]为

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)^\alpha \times \eta_{ij}(t)^\beta]}{\sum_{u \in allowed_k} [\tau_{iu}(t)^\alpha \times \eta_{iu}(t)^\beta]}, & j \in allowed_k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $allowed_k = \{V - tabu_k\}$ 表示蚂蚁 k 下一步允许选择的节点, V 为节点 i 的邻居节点集, $tabu_k$ 为禁忌表,表示蚂蚁 k 走过的节点集; $\tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻在路径 (i,j) 上积累的信息素强度; $\eta_{ij}(t)$ 为启发函数,可以理解为路径 (i,j) 的能见度; α 为信息启发因子,表示轨迹的相对重要性; β 为期望启发因子,表示能见度的相对重要性;另外,各个路径上的信息素将随着时间而逐渐消失。假设蚂蚁完成一个循环的时间为 n 个时刻,那么各路径上的信息素调整如下:

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

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

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在本次循环中经过路径 } (i,j) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$\tau_{ij}^k = \frac{Q \times P(j)}{L_k} \quad (5)$$

其中, ρ 表示信息素挥发系数; $\Delta\tau_{ij}$ 表示在路径 (i,j) 上的信息素的增量,初始时刻时 $\Delta\tau_{ij}=0$; τ_{ij}^k 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中在路径 (i,j) 上释放的信息素强度; L_k 表示蚂蚁经历的所有路径长度; Q 表示信息素增加强度系数。式(4)是 Ant-Cycle 模型中求信息素增量的方法。另外,在寻路过程中,本文添加了节点能量 $P(j)$ 如式(5)所示。当 $P(j)$ 越大,并且路径 (i,j) 上的信息素越多时, $P_{ij}^k(t)$ 也就越大。

2.2 算法流程

深空光通信网中的深空探测器节点靠电量有限的电池供电,如果不考虑节点能量,网络中能量小的节点有可能被过度使用从而使能量消耗殆尽,导致整个网络的生存时间降低。因此,在路由寻路的同时,本文考虑选择能量大的节点作为下一跳。由于蚁群算法是一个反复迭代的过程,计算复杂度比较高,因此在应用该算法对存在的问题进行优化时,大部分的计算时间被用于解的构造,所以搜索最优解的速度较慢。为了提高蚁群算法寻找到每一个目的节点最优路径的平均收敛速度,本文考虑在寻路之前,对不满足深空光通信丢包率、带宽和延时条件的链路进行删除,以减少蚂蚁探索路径数量;在每次寻找完一个目的节点后,保留算法路径上的信息素,从而加快收敛速度。

RA-ACA 步骤描述如下:

步骤 1:网络初始化,即每个节点维护一个信息素表,用来记录到其邻居节点的转移概率,每条路径上的信息素设置为相同常数 C ,信息素增量为 0,设置带宽、丢包率约束条件、迭代次数 K 和源节点集。

步骤 2:根据带宽和丢包率约束条件删除不满足条件的链路和节点。

步骤 3:将源节点置于禁忌表 $tabu_k$ 中,同时源节点发出 m 只 Fants 开始寻路。

步骤 4:根据式(1)计算转移概率 P_{ij} ,每只 Fant 根据转移概率选择下一跳节点,并把该节点置于 $tabu_k$ 中,重复本步骤,直到寻找到目的节点或者没有下一跳为止。

步骤 5:经过 Δt 时刻,所有 Fants 都完成一次循环,判断每只 Fant 是否找到目的节点,找到目的节点的 Fants 产生一个 Bant。

步骤 6:每只 Fant 在信息素表中寻找是否有到达该节点的前一跳路径。若该路径存在,则沿该路径单播 Bants,同时依据式(1)、式(2)、式(3)和式(4)更新转移概率和该路径上的信息素;若该路径不存在,则生产 BBants,并广播 BBants 寻找到达该节点前一跳节点的路径,到达前一跳节点后,依据相应的 Fants 中的信息更新信息素;重复本步骤,直到到达源节点。

步骤 7:清空 $tabu_k$,返回步骤 3,直到完成 K 次迭代。

步骤 8:保存已经找到的到达当前目的节点的路径上的信息素,初始化其它参数。

步骤 9:若仍有目的节点未找到,则更换源节点,返回执行步骤 2,直到寻找完所有目的节点。

步骤 10:输出结果。

3 仿真与性能分析

网络拓扑结构如图 2 所示。该结构共有 8 个节点,其中单向链路 1 条,即节点 1 到节点 3。仿真参数设置如下:带宽 B 为 70 Mb/s,时延 D 为 50 s,时延抖动 d_j 为 12 s,节点丢包率 p 为 0.001,信息启发因子 α 为 1,期望启发因子 β 为 1,信息素蒸发系数 ρ 为 0.5,信息素增加强度系数 Q 为 100,蚂蚁的迭代次数 K 为 20,每次迭代蚂蚁的个数 m 为 10,源节点 s 为 1,目的节点集 $M=\{5,6\}$ 。

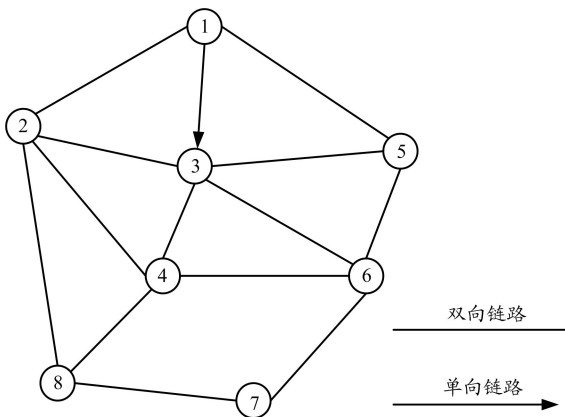


图 2 网拓扑图结构图

以目的节点 M 为 6 时为例,本文首先对 TACA (只支持双向链路)和 RA-ACA(单向链路和双向链路都支持)进行 25 次仿真,仿真结果如表 1 所示。可以看出,RA-ACA 的成功收敛次数明显优于 TACA,当迭代次数 $K \leq 10$ 时,RA-ACA 的收敛次数约为 TACA 的 2 倍。同时,RA-ACA 的成功收敛的迭代次数平均值比 TACA 降低了 4.18 次。因此,RA-ACA 在成功收敛次数和收敛速度方面的性能要优于 TACA。此外,RA-ACA 的最后寻到的路径时延平均值比 TACA 降低了 9.19 s;当收敛时延小于 30 s 时,RA-ACA 的收敛次数是 TACA 的 2 倍。由此可见,由于 RA-ACA 充分利用了网络中的单向链路资源,因此具有更好的网络性能。

然后,本文对 2 种算法传输时延和收敛速度的性能进行仿真,如图 3 所示。可以看出,在不同的迭代次数下,RA-ACA 的时延都要低于 TACA。这是因为 RA-

表 1 25 次算法仿真性能比较

算法	性能指标				时延平均值/s
	成功收敛总数	收敛次数 ($K \leq 10$)	收敛次数 (时延 ≤ 30 s)	成功收敛次数平均值	
TACA	20	11	12	9.85	32.40
RA-ACA	24	22	22	5.67	23.21

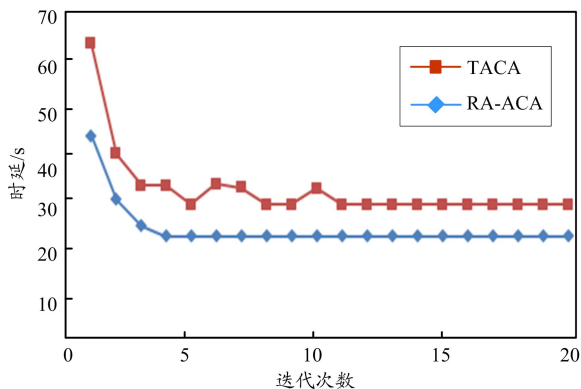


图 3 收敛路径上不同迭代次数下的时延

ACA 能够利用参数性能优良的单向链路传输数据,控制节点能量消耗速度,且能选择节点能量较大的节点作为下一跳,从而选择能量较为充足的传输路径,合理分配传输能耗给网络中各个节点,防止节点过早死亡。

当考虑节点能量时,2 种算法收敛路径上剩余总能量对比情况如图 4 所示。可以看出,RA-ACA 收敛路径上的剩余总能量明显高于 TACA 约 5 kW·h。这说明本文提出的 RA-ACA 选择能量大的节点作为下一跳路径,传输能耗得到合理分摊,从而防止单个节点能量消耗过快,延长了整个网络的生存时间。另外,本文同时考虑单向链路和节点能耗的问题,对其网络的时延性能进行仿真,结果如图 5 所示。可以看出,相比仅考虑单向链路,同时考虑单向链路和节点能量时,虽然收敛路径上的总时延并没有改善,但是可以很快找到最优路径,大大提高整个网络的生存时间。

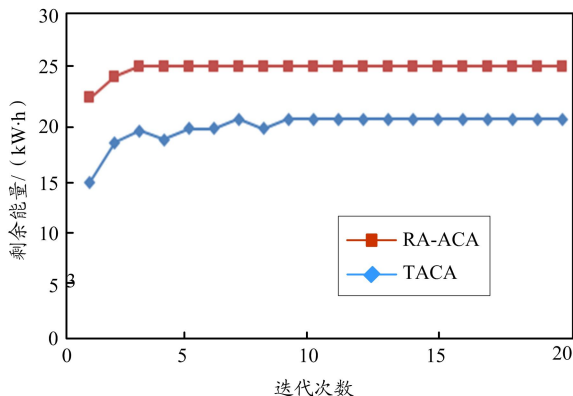


图 4 考虑节点能量时收敛路径上剩余能量

为了加快算法收敛速度,本文在 RA-ACA 中考虑节点保留信息素给后续寻路使用,代价收敛速度示意图如图 6 所示。可以看出,未保留节点信息素时,大概需迭代 4 次才收敛;保留节点信息素时,时延曲线迭代 2 次即可收敛,速度提高了 50%,证明本文所提方

王小瑞,陈冬冬,何红杰:一种基于蚁群算法的深空光通信网络链路性能研究

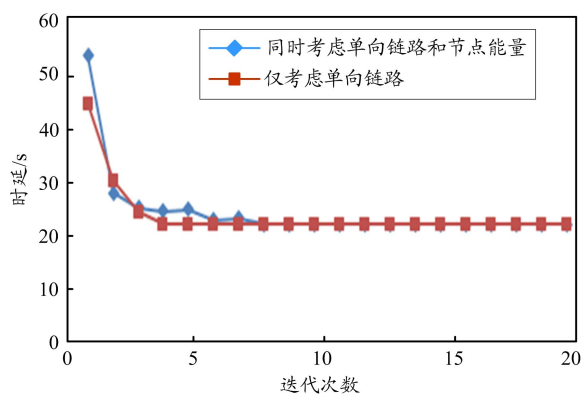


图5 同时考虑节点能量和单向链路时收敛路径上的时延

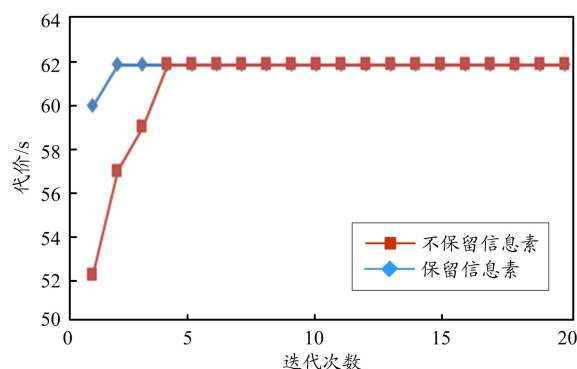


图6 代价收敛速度示意图

法改善了算法收敛速度。因此,RA-ACA 保留节点信息素时,时延和代价都比未保留信息素时收敛速度快。

4 结束语

本文针对深空光通信网中的单向链路问题、节点能耗问题进行了研究,提出了 RA-ACA。以寻找最优路径为目标,当网络中单向链路的性能优于双向链路时,充分利用了单向链路资源,在寻找最优路径的同时,可有效地节约网络资源。仿真结果表明:相比于 TACA,提出的算法有效地减少了传输时延,并且该算法较传统只支持双向链路的路由算法更能提高整个网络的连通性;另外,路由选路时把节点能量作为选

路因子之一,从而可以提高整个网络的生存时间;同时,保留节点信息素为后续寻路使用,使得收敛速度得到显著提高。

参考文献:

- [1] HU J L, WANG R H, SUN X, et al. Memory dynamics for DTN protocol in deep-space communications [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2014, 29(2): 22-30.
- [2] FALL K, FARREL S. DTN: an architectural retrospective [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(5): 828-836.
- [3] TOYOSHIMA M, TAKAYAMA Y, TAKAHASHI T, et al. Ground-to-satellite laser communication experiments[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2008, 23(8): 10-18.
- [4] CHENG Z J, ZHANG X N, SHENS H, et al. T-trail: link failure monitoring in software-defined optical networks [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communication and Networking, 2018, 10(4): 344-352.
- [5] DAVARIAN F, ASMAR S, ANGERTM, et al. Improving small satellite communications and tracking in deep space-a review of the existing systems and technologies with recommendations for improvement. part II: small satellite navigation, proximity links, and communications link science [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2020, 35(7): 26-40.
- [6] GU Z Q, ZHANG J W, SU X, et al. Optimizing networked flying platform deployment and access point association in FSO-based fronthaul networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(8): 1221-1225.
- [7] MAEKAWA T, TADA H, WAKAMIYA N, et al. An ant-based routing protocol using unidirectional links for heterogeneous mobile ad-hoc networks[C]//2006 International Conference on Wireless and Mobile Communications, Jul. 29-31, 2006, Bucharest, Romania. New York: IEEE, 2006: 43-50.
- [8] LOPEZ-LAPENA O, PENELLA M, GASULLA M. A closed-loop maximum power point tracker for subwatt photovoltaic panels [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(3): 1588-1596.
- [9] 王小瑞,李端,陈冬冬. 深空光通信网中定向接入协议研究[J]. 光通信技术, 2021, 45(8): 18-23.
- [10] IACPINO C, PALMER P, BREWER A, et al. EO constellation MPS based on ant colony optimization algorithms [C]//2013 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, Jun.12-14, 2013, Istanbul, Turkey. New York: IEEE, 2013: 159-164.