

文章编号: 1002-1582(2026)02-0173-10

卫星光网络中的路由算法研究进展

梁静远¹, 刘俊豪¹, 柯熙政^{1,2*}

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

(2. 咸阳市智能制造装备技术重点实验室, 陕西 咸阳 712000)

摘 要: 卫星光网络是未来星间与星地通信研究的主流方向, 其中的路由问题亟需解决。开发低延迟、高可靠和高资源利用率的路由算法对推动该网络发展至关重要。文章将路由算法分为传统算法、改进算法和智能算法三类, 并按其算法特点进行分类总结。对传统算法中的经典算法进行论述, 将改进算法按单层路由技术和多层路由技术分类叙述总结, 智能算法依据算法的训练与决策机制分为离线学习型智能路由算法与在线学习型智能路由算法。未来对于卫星光网络的通信要求将越来越高, 路由算法支柱的逐渐变为智能算法, 卫星光网络的进步也不仅仅靠路由算法的发展, 更要有新型的、优秀的路由架构支撑。

关 键 词: 无线光通信; 卫星光网络; 路由算法; 智能算法

中图分类号: TN29; TN24.

文献标识码: A

Research progress on wavelength routing algorithms in satellite optical networks

LIANG Jingyuan¹, LIU Junhao¹, KE Xizheng^{1,2*}

(1. Xi'an University of Technology School of Automation and Information Engineering, Xi'an 710048, China)

(2. Xianyang Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Equipment Technology, Xi'an 712000, China)

Abstract: Satellite optical networks represent a predominant research direction for future inter-satellite and satellite-ground communications, wherein routing issues require urgent resolution. The development of routing algorithms characterized by low latency, high reliability, and optimal resource utilization is critical for advancing such networks. Routing algorithms into three classes is categorized: traditional algorithms, improved algorithms, and intelligent algorithm, with summaries structured according to their algorithmic features. Classical algorithms within the traditional category are examined in detail, while improved algorithms are classified and summarized based on single-layer and multi-layer routing techniques. Intelligent algorithms are classified into offline learning-based intelligent routing algorithms and online learning-based intelligent routing algorithms according to their training and decision-making mechanisms. As communication demands on satellite optical networks continue to escalate in the future, intelligent algorithm will progressively form the backbone of routing solutions. However, the advancement of satellite optical networks relies not only on the evolution of routing algorithms but also on the support of novel and sophisticated routing architectures.

Keywords: optical wireless communication; satellite optical network; routing algorithm; intelligent routing algorithm

0 引 言

无线光通信利用自由空间中的光波作为载体,

突破了传统射频通信频谱资源有限的限制, 展现出高带宽、高速率和低干扰等显著优势。随着空间通信需求的快速增长, 研究者进一步将无线光

收稿日期: 2025-10-17; 收到修改稿日期: 2025-12-31

基金项目: 陕西省重点产业创新项目 (2017ZDCXL-GY-06-01); 国家自然科学基金面上项目 (61377080)

作者简介: 梁静远 (1989—), 女, 助理工程师, 从事无线光通信理论与技术方向研究。

柯熙政 (1962—), 男, 教授, 俄罗斯自然科学院外籍院士, 从事无线光通信理论与技术方向研究。

* 通讯作者: xzke@263.net

通信拓展至星间与星地链路的构建，由此形成了卫星光网络。该网络以卫星为核心节点，通过高速稳定的激光链路实现全球范围内的互联互通，成为未来宽带通信与天地一体化网络的重要发展方向。

本文首先介绍了卫星光网络模型及其特点，随后对路由算法研究进展进行描述，从传统算法、改进算法和智能算法入手，首先对传统算法研究中的算法进行了论述，并指出其在应用中的不足。并分别将改进算法研究进展按单层和多层路由两部分进行了论述，智能算法研究进展按离线学习型智能路由算法与在线学习型智能路由算法两部分进行论述，之后对文中提到的算法技术进行表格总结并进行分析，最后指出未来卫星光网络路由算法的研究方向。

1 卫星光网络

1.1 卫星光网络模型

目前，卫星光网络结构主要分为静止轨道卫星（Geosynchronous Earth Orbit Satellite, GEO: 40000km）、中轨道卫星（Medium Earth Orbiting Satellite, MEO: 5000~15000km）、低轨道卫星（Low Earth Orbit Satellite, LEO: 1000~2000km），还包括在地球上的移动终端等一系列设备。图1为卫星光网络模型。不同颜色的卫星代表了不同轨道高度的卫星，实线代表同轨道间卫星之间的激光链路，虚线代表不同轨道间卫星的激光链路。相较于地球静止轨道卫星，低地球轨道和中地球轨道卫星在传播时延和发射能量消耗方面更具优势，地球静止轨道卫星虽然时延高，但其覆盖面广，因此在路由算法的设计中GEO和MEO更适合完成卫星光网络中数据汇总和对LEO的信息分配。

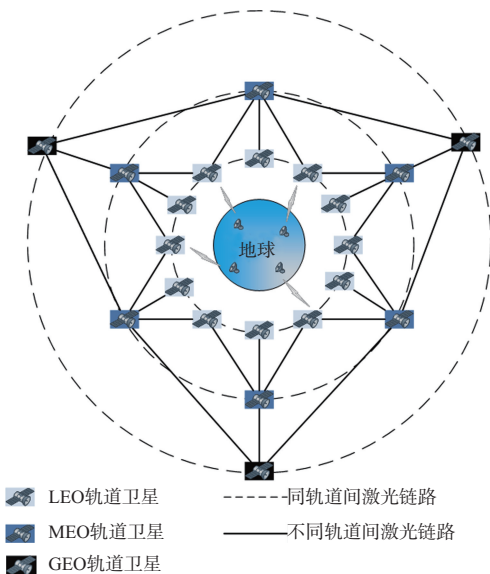


图 1 卫星光网络模型

1.2 卫星光网络特点

卫星光网络的路由机制高度依赖其独特的时空特性。首先，受轨道力学约束的拓扑周期性演化使网络可通过时间切片生成拓扑快照，预计算全周期路由序列并结合波长分配，实现链路切换和光束调整的离线化与时序确定性传输，从而降低信令延迟并均衡负载。其次，节点总量的恒定性支持全局优化架构，通过构建永久性虚拓扑、预定义最优波长路径及固化保护路由，实现资源规划与物理拓扑高度耦合，提高波长利用率并降低星上处理复杂度。最后，剧烈变化的星间距离要求物理层与网络层协同优化，动态融合链路距离、传播时延、损耗及多普勒频移信息，通过发射功率调节、调制格式优化及跨层感知接口，将物理参数转化为路由度量因子，实现低时延、高可靠的传输效能优化。

2 卫星光网络路由算法研究进展

根据卫星光网络中路由算法的发展应用历程，将算法分为传统算法、改进算法和智能算法三类，并根据不同算法应用或技术特点进行细分。具体如图2所示。

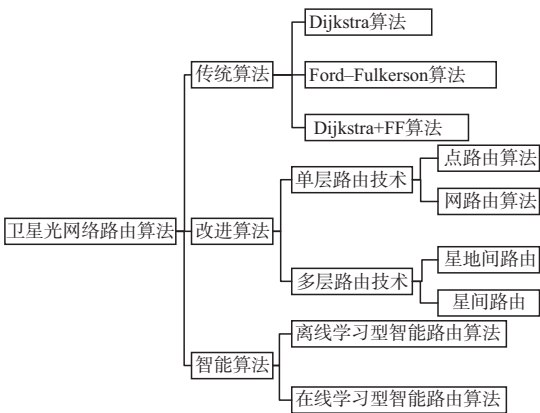


图 2 卫星光网络路由算法分类

2.1 传统算法

2.1.1 Dijkstra算法

Dijkstra算法^[53]是一种基于贪心思想的经典图论算法，其目标是在带非负权值的图中求解单源最短路径。其原理是逐步扩展已知最短路径集合：将源点距离初始化为零，其他顶点设为无穷大；迭代过程中，每次选取当前估计距离最小的未确定顶点并加入集合，同时对其邻接顶点执行松弛更新。由于每一步选择均为局部最优，且满足非负权边约束，算法最终可在有限迭代内收敛至全局最优解。

梁平^[2]等通过优化Dijkstra算法提出了基于邻居节点的最短路径（Neighbor-Node Shortest Path，

NNSP)算法,将NNSP算法整合应用于卫星光网络中副载波与光波的双层路由机制。通过融合波长路由、波分复用(WDM)等关键技术,卫星间的路由过程得以大幅简化与加速。

邹家豪^[31]等提出星上冗余感知负载均衡算法(Redundancy-Aware Load Balancing, RALB),RALB算法在Dijkstra算法基础上进行改进,通过规避高负载链路并优先选择低负载链路,提升网络资源利用率。该算法以实时链路负载为权重,计算源到目的节点的路径,以实现流量均衡,并确保选择负载最小的工作路径。

2.1.2 Ford-Fulkerson(FF)算法

Ford-Fulkerson算法的核心是增广路径思想,即在残量网络中不断寻找源点至汇点的可增广路径。残量网络的边容量表示可增加的流量,反向边允许已分配流量的回退。每次迭代沿增广路径确定瓶颈容量并增广流量,同时更新残量网络,直至不存在可增广路径。该过程保证总流量单调增加并最终收敛于最大流,且残量网络的节点划分自然对应最小割。其复杂度依赖于路径选择策略。该算法不仅首次提供了构造性求解方法,还以增广路径和残量网络的创新思想奠定了现代网络流算法的理论基础。

2.1.3 Dijkstra+FF算法

Dijkstra+FF算法在卫星光网络中结合最短路径搜索与最大流优化,既保证路径选择的最优性,又提升链路带宽利用率,从而增强网络吞吐量与传输效率。Dijkstra算法用于快速确定最短路径以降低时延与损耗,FF算法则通过增广路径迭代优化流量分配,提高容量利用率并缓解拥塞。该组合方法在多波长光网络和动态路由环境中表现出良好的适应性与可扩展性。

该算法也存在一定局限性。Dijkstra算法的贪心特性可能忽视全局负载均衡,而FF算法在大规模网络中的增广路径计算复杂度较高,易导致实时性不足;同时,该方法对拓扑与链路状态高度敏感,卫星光网络中频繁的链路切换会引发路径重计算频繁,增加控制开销。因此,尽管Dijkstra+FF算法在理论上兼具路径最优与流量优化优势,其实际应用仍需结合动态调度、负载预测与并行计算等机制,以缓解计算复杂度和网络波动带来的影响。

2.2 改进算法

2.2.1 单层级路由

在卫星光网络中,单层拓扑可抽象为网结构,卫星对应其中的节点。路由链路的建立需先汇总各节点的路由信息,再确定源节点至目的节点的

最优路径。基于此,优化单一卫星间点对点传输链路的算法可称为点路由算法,而通过整合各节点路由信息实现全局传输链路优化的算法则称为网路由算法。

(a) 点路由算法

信息从源节点发出到目的节点接收的整个路由过程,需要路由中每个节点间的准确寻路,每一个卫星可以独立根据链路信息决定下一个卫星节点,确保整条路由链路高效、可靠。

郑滢雷^[5]等提出了一种基于动态业务模型的分布式蚁群算法以解决路由与波长分配(Routing and Wavelength Assignment, RWA)问题。该方法使每只蚂蚁同时负责路径选择与波长分配:在每个节点上先判断波长可用性,再进行路径选择。董毅^[7]等设计了一种基于小窗口搜索策略的蚁群优化(Small Window Strategy-Ant Colony Optimization, SWS-ACO)算法。该算法将链路可持续时间与波长空闲率纳入启发函数,以优化网络负载并抑制拥塞。通过小窗口策略限制蚂蚁的搜索范围,提高收敛效率;同时利用相邻链路空闲波长交集,使单只蚂蚁在一次迭代中协同完成路由选择与波长分配。Wang^[20]等提出了一种基于蚁群算法的卫星光网络路由算法(the Routing Algorithm based on Ant Colony Algorithm, RA-ACA),该算法重点探讨了动态卫星光网络中资源感知蚁群算法在单向链路利用与节点能耗管理方面的优化。有效管控节点能耗速率并避免节点过早失效,显著延长网络生存时间。通过保留节点信息素用于后续路径发现过程,进一步加快了算法的收敛速度。刘治国^[30]等提出一种改进天牛须群落的卫星光网络路由算法(Wavelength Assignment Algorithm for Routing In Satellite Optical Networks Based on Beetle Swarm and Ant Colony, BS-ACRWA),该方法通过波长矩阵乘法计算相邻节点的波长冲突度与最大公共波长数,结合时延与节点负载建立约束模型减少无效路由;路由阶段改进天牛须算法,引入蚁群信息素机制,使方向更新兼顾卫星链路有限特性,提升搜索效率。Li^[32]等提出一种在跳数松散约束下采用自适应负载平衡小窗口策略的蚁群优化(Ant Colony Optimization with Adaptive Load Balance Small Window Strategy under Hop Number Loose Constraint, ACO-ALB-SWS-HNLC)算法,该算法引入自适应小窗口策略与跳数松散约束机制,依据窗口内负载动态调整收敛范围,以提升收敛速度并降低跳数。信息素蒸发速率根据窗口内链路波长利用率动态调节,从而实现负载均衡。

Liu^[13]等提出一种基于链路成本的蜂群算法优化 (The Bee Colony Algorithm Optimization based on Link Cost for RWA, BCO-LCRWA) 来解决卫星光网络中的 RWA 问题, 该算法以传输时延和波长利用率构建链路成本模型, 作为蜂群初始路径的依据, 并满足拓扑与物理约束。在此基础上, 综合候选路径的波长占用与跳数, 构建适应度函数, 从而筛选出适应性更优的高质量路由。Yang^[25]等提出了一种基于定向制导的蜂群优化算法 (A Bee Colony Optimization Algorithm for Routing and Wavelength Assignment based on Directional Guidance, D-BCO-RWA) 该算法是一种结合节点相对位置与实时链路负载的定向制导策略, 并基于该制导因子构建了用于路径搜索阶段的链路代价评估函

数。曹阳^[27]等提出了方向增强的链路状态 (Direction Enhanced-Link State, DE-LS) 算法, 该算法基于实时链路状态, 引入方向影响因子 (Directional Impact Factor, DIF) 和方向增强指数 (Directionally Enhanced Index, DEI), 综合 DEI、DIF 及卫星系统参数动态计算链路代价值, 以指导每跳的数据包方向选择。该方法有效规避空间碎片遮挡导致的通信中断, 提升星间通信的稳定性与可靠性。

在点路由层面, 多种方法采用分布式计算与仿生优化, 结合动态业务模型、约束搜索范围, 考量链路可持续性、资源状态、时延、波长冲突度及节点负载等进行路径决策, 可降低连接阻塞率, 提升波长与网络资源利用率, 优化算法收敛速度与传输时延。点路由算法技术方面对比如表 1。

表 1 点路由算法技术对比

路由算法	适用或模拟场景	技术方案	准确率	资源利用率	阻塞率	其他优化目标
基于动态业务模型的分布式蚁群算法	16 节点 MESH 网络和 NSFNet 网络	蚂蚁寻路算法		提升	降低	
SWS-ACO	单、双主星的极轨星座	引入小窗口搜索策略、波长空闲率约束		提升	降低	
SCSA	SpacePro 星座	具备计算存储能力的超级卫星节点, 预测拓扑变化		提升		
BCO-LCRWA	铱星星座	基于链路成本的蜂群算法, 考虑时延和波长利用率	提升	提升		
RA-ACA	NSFNet 网络	保留节点信息素, 提高资源感知, 能耗控制		提升		提升收敛速度
DBCO-RWA	铱星星座	优化蜂群链路代价函数	提升	提升	降低	
DE-LS	Walker48 星座	方向影响因子、方向增强指数	提升			提升稳定性
BS-ACRWA	铱星星座系统	天牛须搜索加蚁群机制, 波长矩阵冲突度建模	提升	提升		减少时延
ACO-ALB-SWS-HNLC	类铱星星座和 NeLS 星座	自适应小窗口策略和跳数松散约束, 动态调整收敛范围		提升		提升收敛速度

(b) 网路由算法

单纯的点对点路由易陷入局部最优, 且因全球流量分布不均, 热点地区可能出现严重拥塞, 而非热点地区链路闲置, 从而降低网络整体性能。相比之下, 基于全局路由信息与流量优化的网路由技术有助于缓解该问题。

徐亮^[4]等提出符合 LEO 卫星通信特点的服务质量路由算法 (Supporting QoS Heuristic Routing Algorithm for LEO Satellites, QHRL), 该算法结合空间光链路与 LEO 系统特性, 针对星座时变拓扑的高可预测性, 提出创新的 QoS 保障策略。其核心为基于有限路径的启发式搜索方法, 有效适应低轨卫星通信的动态环境。程希^[6]等提出了基于改进蚁群算法的 (Smart Ant-Dynamic RWA, SADRWA) 算法, 该算法将转移概率加入链路空闲率约束并引入随机扰动防早敛, 优化了阻塞率和资源利用率。Wen^[10]等提出了一种基于蚁群优化 (Ant Colony Optimization, ACO) 的负载均衡 RWA 算法构建了一个以全球通信分布特征为参考的多目标优化模型。该模型创新性地将流量分布

特征作为动态权重, 用于调整光路综合代价, 并实时追踪星间光链路波长利用率。基于此, 采用 ACO 算法高效求解每个连接请求的最优光路, 在遵循波长利用率、传输时延及波长连续性等约束下, 实现建路成本最小化。Liu^[18]等提出一种面向人工蜂群负载均衡算法的链路成本动态修正方法, 以实现流量的前摄性分配。另外, 基于波长利用率构建突发拥塞规避机制, 动态调整路由策略, 从而有效抑制拥塞引起的网络性能下降。王蔚龙^[14]等人提出基于用户业务分布的卫星光网络负载均衡路由与波长分配 (A Load Balancing-routing Wavelength Assignment, LBRWA) 算法, 该方法利用全球用户流量分布模型动态修正统计平均光路径成本, 实现链路状态实时更新, 并通过蚁群优化算法进行光路径全局寻优, 将业务流量引导至负载较轻的非热点卫星节点, 从而为各类用户请求高效分配负载均衡且性能最优的光传输路径。之后王蔚龙^[15]等又提出了一种基于启发式思想的 The Smart Ant Colony Routing and Wavelength Assignment (SAC-RWA) 算法, 算法采用基于 DSC 的双主星节点架构, 以

增强可选路径的多样性。在构建系统模型时，充分考虑了传输时延与波长连续性约束对系统性能的作用，通过将波长空闲率纳入状态转移函数，实现了波长资源在各链路上的均衡分配。Deng^[21]等提出一种基于窗口缩减的蚁群优化路由算法（Ant Colony Optimization Routing Algorithm with Window Reduction for LEO Satellite Networks, ACORA-WR），该算法通过将蚁群的搜索活动约束在局部范围，并综合评估路径距离、传输方向及链路负载等多重因素，以实现低延迟、低成本传输路径的高效寻优，以实现负载均衡。Peng^[23]等提出了一种基于匹配算法（The Two-phase Traf-

fic Grooming based on The Matching Algorithm, TPTG_MA），构建了以能量和波长消耗最小化为目标的优化模型。在此基础上，采用匹配算法对该流量疏导问题进行求解。Ning^[26]等提出了拥塞感知负载均衡（The Congestion-Aware Load Balancing, CALB）算法，该算法针对低地球轨道光卫星网络动态拓扑结构中的星间链路拥塞问题。

在网路由层面，多数研究引入全球流量分布特征作为动态权重，实时修正链路成本，运用智能优化方法寻找建路成本最低路径，能缓解热点区域拥塞，实现全网负载均衡，降低阻塞率和端到端传输时延。网路由算法技术对比表 2。

表 2 网路由算法技术对比

路由算法	适用场景	技术方案	准确率	资源利用率	阻塞率	其他优化目标
QHRL	准铱星星座	Qos路由算法、优化加权评价函数		提升	降低	
SA-DRWA	MESH网络	蚁群算法、优化转移概率		提升	降低	
ACO	铱星星座和 NeLS 星座	蚁群算法、流量分布特征作为动态权重因子		提升		降低时延
LBRWA	极坐标星座	蚁群算法、寻成本最小路径		提升	降低	
SAC-RWA	2 π 星座	蚁群算法、优化状态转移函数		提升	提升	降低时延
ACORA-WR	铱星星座	蚁群算法窗口缩减		提升		降低时延、提高吞吐量
ERA	铱星星座	基于支持波分复用星间链路的集中式软件定义网络架构	提升			提高稳定性
TPTG_MA	模拟不规则网络拓扑	匹配算法		提升	降低	节能
CALB	LEO	优化动态拓扑阻塞			降低	

2.2.2 多层级路由

MEO 卫星通过光链路实现与 LEO 卫星的互联，LEO 卫星之间则通过星间链路形成动态的网格拓扑，并与地面基站、地球站和用户终端进行交互。在路由算法中，这种分层互联结构能够利用 MEO 卫星的覆盖范围与 LEO 卫星的低时延优势，实现跨层次、跨区域的灵活数据传输与路由协同，从而在复杂的卫星光网络中保障全局负载均衡与高效通信性能。其结构如图 3 所示。

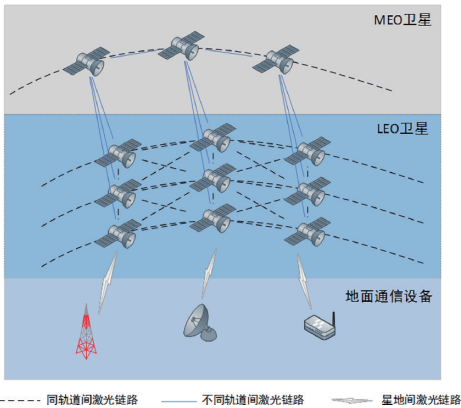


图 3 多层卫星结构图

(a) 星地间路由

为了构建单层卫星光网络路由与地面间链接，即星地间路由。郭圆月^[1]等人基于微波副载波/光波

长的双层光路由方案，提出了启发式星上路由和信道分配 Routing and Channel Assignment（RCA）算法，该算法通过网络控制单元协调动态地按需分配。Wen^[9]等提出了一种基于跨层设计的蚁群路由和波长分配算法（Ant Colony Routing and Wavelength Assignment Algorithm based on Cross-layer Design, CL-ACRWA），该算法能够抑制多普勒波长偏移对卫星光网络传输的影响。其通过构建跨层优化模型，将多普勒偏移、传输时延及波长连续性等约束纳入求解，利用蚁群算法为每个业务连接请求寻找满足约束的最优光传输路径。Ning^[26]等提出一种基于星地协同的负载均衡路由算法（Load-balancing Routing Algorithm based on Satellite-ground Cooperation, SGC-LB），以进一步降低网络瓶颈的影响，减少链路中的堵塞概率，提高了卫星光网络的传输吞吐量。对于星地卫星光网络中负载不均衡问题，

(b) 星间路由

为了克服单层卫星路由性能的限制，和传统多层微波卫星路由高延迟等特点，徐亮^[3]等基于空间光链路传输的双层卫星网络结构及其相应的基于拉格朗日松弛算法的 LDSR（the Lagrange Relaxation Based Double-layered Satellite Routing Algorithm）算法，该算法中由 MEO 层卫星对整个星

座的路由信息进行收集和分发的业务，LEO 卫星则基于拉格朗日松弛算法来确定其选用的路由。刘庆利^[8]等提出基于多业务的卫星光网络 DWRA (Double-layered Satellite Wavelength Reservation Routing Algorithm) 算法。在路径选择过程中，该算法综合评估时延与可用波长数量计算链路权重，并引入波长冲突度评估机制优化卫星节点负载，减轻处理压力。此方法不仅降低全网阻塞概率，还提升波长利用效率，更好地适应多样化业务通信需求。

现有卫星光网络多采用分布式架构，难以实现全局最优路由。引入软件定义网络 (Software-Defined Network, SDN) 理念后，高轨卫星可作为集中控制器管理低轨卫星网络，实时掌握节点状态与负载，而低轨卫星仅按控制器下发流表执行路由转发和硬件配置^[55]。控制平面与应用平面之间由 SDN 北向接口 (Northbound Interface, NBI) 负责通信，NBI 允许用户按实际需求定制开发^[56]。GEO 卫星作为 SDN 控制器，通过南向接口与 LEO 卫星光网络通信，先与各 LEO 节点交互，获取全局拓扑及节点链路信息；再以波长路由算法算出最优传输路径，经南向接口将路径信息分配给各节点。其逻辑框架如图 4 所示。

在软件定义卫星光网络的网络框架思想下，石晓东^[11]等提出了一种基于软件定义网络的蚁群优化波长路由算法，该算法改进蚁群启发函数，将波长空闲率、时延、时延抖动及丢包率作为蚂蚁选路决策依据，从而为业务筛选满足多维服务质量要求的最优传输路径。同时，为不同等级业务配置专属波长集来进行波长分配。李海^[16]等提出一种

基于蚁群算法的软件定义卫星光网络跨层波长路由算法 (A Software-defined Satellite Optical Network Cross-Layer Wavelength Routing Algorithm based on Ant Colony Algorithm, SDNCL-RWA)。该算法将时延和可用波长率作为启发函数，并设计一种两阶段的跨层波长路由机制来减少路由跳数和网络阻塞率，首先在 LEO 卫星单层网络中路由，当路由失败或者路由跳数过高时借助 MEO 卫星网络路由。

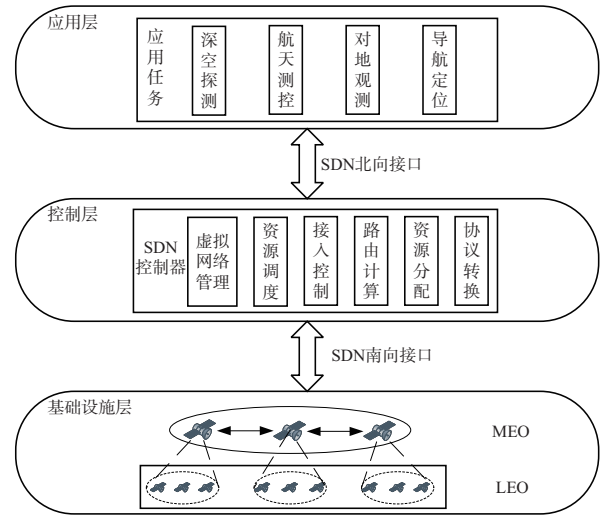


图 4 基于 SDN 的卫星光网络逻辑架构^[11]

在星地与星间协同的多层级路由结构中，研究通常采用跨层设计思想，通过构建融合多普勒偏移、时延、波长连续性等约束的模型，并借助分层路由机制，在保证服务品质的同时简化路由过程。此外，通过冗余感知、动态迂回多径及流量分组传输机制，增强了星地传输的可靠性和链路利用率。多层路由算法技术对比如表 3。

表 3 多层路由算法技术对比

路由算法	适用或模拟场景	技术方案	准确率	资源利用率	阻塞率	其他优化目标
RCA	星地间	通过算法按需分配光波和微波		提高		降低时延
NNSP	星地间	整合副载波与光波的双层路由机制				降低时延
CL-ACRWA	星地间	使用蚁群算法在模拟传输干扰中寻找最优解	提高			降低时延、增强收敛
SGC-LB	星地间	根据负载合理分配路由以实现高吞吐量		提高	降低	提高吞吐量
RALB	星地间	改进 Dijkstra 算法在选择时优先选择空闲链路		提高	降低	
LDSR	星间	MEO 层对路由信息汇总和分发，LEO 层完成具体路由工作	提高	提高		时间复杂度高
DWRA	星间	对不同业务按照权重规则分类，GEO 负责汇总，LEO 层负责接入和发出		提高	降低	
SDN	星间	使用蚁群算法对不同等级业务进行路由和波长分配		提高	降低	
SDNCL-RWA	星间	GEO 为控制层，MEO/LEO 为路由施行层	提高		降低	降低时延

2.3 智能算法

与传统固定规则或启发式路由相比，智能路由算法通过学习与自适应能力应对卫星光网络中拓扑高速动态变化和流量不均衡问题。从本质上看，现有智能路由算法均以数据为基础进行决策

优化，其差异主要体现在学习阶段是否在线进行、策略是否持续更新以及对实时环境变化的适应方式。因此，依据算法的训练与决策机制，可将智能路由算法划分为以下两类：离线学习型智能路由算法与在线学习型智能路由算法。

2.3.1 离线学习型智能路由算法

离线学习型智能路由算法依托历史网络运行数据进行集中训练，在离线阶段构建从业务请求到路由路径的映射模型。其核心思想是：通过学习历史业务特征、网络状态与路径选择之间的对应关系，提取隐含的决策规律，并在在线运行阶段直接调用已训练模型进行路径推断，从而减少实时计算与控制开销。

该类算法通常采用监督学习或深度学习方法，适用于网络拓扑变化相对可预测、业务模式较为稳定的场景，但对先验数据规模和数据质量依赖较强。

Jing^[24]等提出了一种基于深度学习的路径算法。针对网络拓扑频繁变化导致路由表更新开销过大的问题，该方法通过学习历史业务与路由路径的映射关系，在业务到达时直接推断数据转发路径，从而降低路由表更新频率并保持较高的路径计算精度。然而，该方法需要大量历史样本进行训练，当网络运行状态发生显著变化时，模型泛化能力可能受限。Mao^[57]等提出了协同多智能体强化学习（Cooperative Multi-Agent Reinforcement Learning, CoMARL）算法，将路径选择问题建模为分散部分可观察马尔可夫决策过程，通过自定义加权效用函数（融合延迟、丢包率、吞吐量指标）实现多目标优化，采用基于函数单调性的协同机制缓解多智能体决策冲突，借助绝对值激活函数与时序差分误差最小化稳定训练过程，有效解决了传统路由收敛慢、信令开销大、多 QoS 需求适配不足及路径冲突等问题。

2.3.2 在线学习型智能路由算法

在线学习型智能路由算法强调与网络环境的持续交互与实时自适应能力，通常基于强化学习或深度强化学习框架构建。其基本流程为：智能体根据

当前网络状态选择路由动作，并通过奖励函数对路由结果进行评估，在不断的交互反馈中逐步优化决策策略，实现路由策略的动态调整与持续进化。

该类算法不依赖固定的离线映射模型，能够较好地适应拓扑变化频繁、业务负载动态波动的卫星光网络环境，但对在线计算能力和收敛速度提出了更高要求。

周伟^[29]等提出了一种基于卫星间光链路光业务单元的 OISL-DDPG 算法。该算法构建路由策略学习智能体，根据实时网络状态动态调整策略参数，以生成适应当前业务需求的优化路由方案，并通过集中控制器将决策下发至各卫星节点，实现网络资源与流量的集中化、实时调控。李信^[17]等提出了一种基于深度强化学习的卫星光网络波长路由分配方法（Deep Reinforcement Learning Routing and Wavelength Algorithm, DRL-RWA），业务到达 LEO 卫星后，实时业务与链路状态上传至 MEO 层 SDN 控制器，控制器通过强化学习智能体探索最优路由与波长分配策略，并将决策结果下发至源节点执行，同时将实际服务质量反馈用于持续优化策略性能。艾琪洋^[28]等提出的 DQN-MD-RWA 算法通过将拓扑结构、链路状态感知与下一跳波长匹配度融合，引导智能体优先选择匹配度更高的邻节点构建路由，并在在线交互中不断迭代优化策略。

表 4 对文中涉及的典型智能路由算法进行了简要对比。从表中可以看出，现有方法主要分为离线学习型与在线学习型两类。离线学习型算法依赖历史数据进行集中训练，在线阶段通过模型推断完成路由决策，适合对实时性要求较高但网络变化相对可控的场景；在线学习型算法基于强化学习框架，通过与网络环境的持续交互实现策略更新，能够更好地适应卫星光网络中拓扑与业务的动态变化。

表 4 智能路由算法技术对比

路由算法	分类方式	算法架构	状态设计	动作设计	收敛性与稳定性	适用场景
CoMARL	离线学习型	协同多智能体强化学习框架	LEO 卫星缓存状态集合、影响 QoS 的核心因素	计算路径构成智能动作集	算法复杂度低、收敛速度快	超密集自由空间光 LEO 卫星网络
基于深度学习的 路径算法	离线学习型	传统/对照型路由或综述模型	显式网络参数	固定或启发式决策	稳定但性能上限受限	算法对比与基线评估
DRL-RWA	在线学习型	深度强化学习波长路由框架	拓扑状态、链路资源、业务需求	波长或路径选择	自适应性强,初期收敛波动	时变拓扑、大规模星座
OISL-DDPG	在线学习型	OISL-OSU 通算一体优化架构	计算资源与通信资源状态	任务映射与路由调度	稳定性高,可解释性强	通算融合卫星网络
DQN-MD-RWA	在线学习型	DQN 驱动的分布式波长路由	链路匹配度、波长占用、节点负载	下一跳与波长联合选择	收敛较快,稳定性优于传统 DQN	高动态 LEO 卫星光网络

同时，不同在线学习型算法在学习范式、控制方式及决策对象上存在明显差异，体现了在全局优化能力、实时性与系统复杂度之间的不同权衡。这种差异为后续针对特定网络特性设计高效、可扩展的智能路由算法提供了重要参考。

3 结语

3.1 总结

现有研究在不同路由层级上通过引入分布式计算、仿生与智能优化方法以及跨层协同设计,实现了对链路状态、资源约束与业务动态的综合感知与联合决策。点路由侧重于提升局部资源利用效率与连接成功率,网路由通过全局流量感知实现负载均衡与拥塞缓解,而星地-星间多层级路由则借助跨层建模与分层机制,在保障服务质量的同时增强了系统的可靠性与可扩展性。整体而言,这类方法有效降低了阻塞率与传输时延,为复杂空间光网络的高效、稳定运行提供了重要技术支撑。

3.2 展望

基于现有研究成果分析,未来卫星光网络路由算法的发展可从以下几个方面展开,并亟需针对关键瓶颈问题进行深入研究。

面向高动态星座的时变感知与预测型路由机制将成为重要研究方向。低轨大规模星座中拓扑高速演化、链路可持续时间有限,单纯依赖瞬时状态的反应式路由难以兼顾稳定性与效率。未来需要将轨道力学先验、链路可见性预测与业务到达统计特性相结合,构建“预测-决策-校正”一体化路由框架,实现对链路中断与拥塞的前摄性规避。其核心问题在于如何在预测精度、模型复杂度与星上计算资源受限之间取得平衡。

跨层协同与多维约束联合优化路由仍是亟需深化的方向。卫星光网络中路由性能高度依赖物理层特性,如星间距离变化、多普勒频移、功率受限与波长连续性约束等。未来研究应进一步打破层间隔离,将物理层状态、链路层资源与网络层路由决策进行深度融合,形成统一的跨层优化模型。需要重点解决的问题包括:多维约束下路由度量的合理构建、跨层信息交互带来的信令开销控制,以及模型在大规模星座中的可扩展性。

智能路由向“离线学习-在线强化学习”混合范式演进将成为主流趋势。离线学习型方法计算效率高但泛化能力受限,在线强化学习方法自适应性虽强但收敛成本较高。未来有必要构建融合两者优势的混合智能路由架构:在拓扑和业务相对稳定场景下,采用离线学习结果进行快速推理;在突发业务或异常链路条件下,引入在线学习模块进行局部策略修正。该方向面临的关键问题包括在线学习的安全性、收敛稳定性、训练样本获取成本以及智能决策的可解释性。

面向 SDN 与通算融合架构的集中-分布式协

同路由仍具有广阔的研究空间。通过引入高轨卫星或地面控制中心,利用其全局网络视图与较强的计算能力开展宏观层面的统一调度与策略规划;同时由低轨卫星承担轻量化的本地转发与自适应路由决策,可在全局优化能力与实时响应性能之间实现有效权衡。该类架构下亟需重点关注的问题包括:控制平面与转发平面解耦所引入的控制时延对路由性能的影响、集中控制节点在动态星座环境中的失效容错与备份机制设计,以及集中决策模式对系统整体可靠性与稳定性的影响与保障方法。

面向工程应用的鲁棒性与复杂场景适应能力将成为评价路由算法的重要标准。空间碎片遮挡、激光链路失锁、突发大规模业务和节点失效等极端场景,对现有算法提出了更高要求。未来研究需在算法设计阶段显式引入不确定性建模与鲁棒优化思想,通过多路径冗余、风险感知路由与快速重构机制,提高卫星光网络在复杂空间环境下的长期稳定运行能力。

综上所述,未来卫星光网络路由算法的发展将呈现出预测化、跨层化、智能化与体系化并行的趋势,其核心挑战在于如何在复杂动态环境中实现高性能、低开销与高可靠性的统一。这些问题的解决将为下一代卫星互联网和天地一体化信息网络的工程化部署奠定关键技术基础。

参考文献:

- [1] 郭圆月,王东进,刘发林.卫星光网络中微波/光波双层路由技术方案[J].南京大学学报(自然科学版),2004,4(04):497—503.
Guo Yuanyue, Wang Dongjin, Liu Falin. A scheme of two-layered routing technology of subcarrier/light wave in the optical satellite networks[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2004, 4(04): 497—503.
- [2] 梁平,赵尚弘,李勇军,等.基于激光链路的卫星光网络路由算法[J].光通信技术,2007,4(05):54—57.
Liang Ping, Zhao Shanghong, Li Yongjun, et al. The satellite optical network routing algorithm[J]. Optical Communication Technology, 2007, 4(05): 54—57.
- [3] 徐亮,罗风光,曹明翠,等.基于空间光链路的双层卫星网络路由算法研究[J].计算机工程与应用,2007,43(32):1—4.
Xu Liang, Luo Fengguang, Cao Mingcui, et al. Routing algorithm in double layered satellite networks based on optical links[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(32): 1—4.
- [4] 徐亮,罗风光,罗志祥.基于空间光链路的启发式低轨卫星网络路由算法[J].小型微型计算机系统,2008,23(09):1643—1646.
Xu Liang, Luo Fengguang, Luo Zhixiang. Heuristic routing algorithm for LEO satellite network based on optical links[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2008, 23(09): 1643—1646.
- [5] 郑滢雷,顾晓仪,连伟华,等.采用蚁群算法解决光网络中动态及分布式 RWA 问题的方法[J].北京理工大学学报,2009,29(12):1104—1109.
Zheng Yanlei, Gu Wanyi, Lian Weihua, et al. Ant colony al-

- gorithm—distributed strategy for solving RWA problem in optical WDM network[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(12): 1104—1109.
- [6] 程希, 沈建华. 一种基于改进蚁群算法的光网络波长由分配算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(03): 710—715.
Cheng xi, Shen Jianhua. An improved ant colony algorithm for routing and wavelength assignment in optical networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(03): 710—715.
- [7] 董毅, 赵尚弘, 李勇军, 等. 基于蚁群算法的分布式卫星光网络波长路由分配技术研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(11): 2650—2656.
Dong Yi, Zhao Shanghong, Li Yongjun, et al. Research on routing and wavelength assignment based on ant colony optimization in distributed satellite optical network[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(11): 2650—2656.
- [8] 刘庆利, 姚俊飞, 刘治国. 基于多业务的卫星光网络波长路由算法研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(08): 1780—1787+1794.
Liu Qingli, Yao Junfei, Liu Zhiguo. Research on wavelength routing algorithm based on multi-service in satellite optical networks[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(08): 1780—1787+1794.
- [9] Wen G, Zhang Q, Wang H, et al. An ant colony algorithm based on cross-layer design for routing and wavelength assignment in optical satellite networks[J]. China Communications, 2017, 14(08): 63—75.
- [10] Guoli W, Qi Z, Houtian W, et al. Ant colony optimization based load balancing routing and wavelength assignment for optical satellite networks[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2017, 24(05): 77—86.
- [11] 石晓东, 李勇军, 赵尚弘, 等. 软件定义卫星光网络蚁群优化波长路由技术[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): 211—218.
Shi Xiaodong, Li Yongjun, Zhao Shanghong, et al. Ant colony optimization routing and wavelength technology for software-defined satellite optical networks[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(10): 211—218.
- [12] Sun X, Cao S. A routing and wavelength assignment algorithm based on two types of LEO constellations in optical satellite networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(8): 2106—2113.
- [13] Liu Y, Zhang Q, Xin X, et al. Bee colony algorithm optimization based on link cost for routing and wavelength assignment in satellite optical networks[J]. IEICE Transactions on Communications, 2020, 103(6): 690—702.
- [14] 王蔚龙, 李勇军, 赵尚弘, 等. 基于负载均衡的卫星光网络路由与波长分配方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(07): 157—167.
Wang Weilong, Li Yongjun, Zhao Shanghong, et al. Routing and wavelength assignment based on load balance for optical satellite network[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(07): 157—167.
- [15] 王蔚龙, 李勇军, 赵尚弘, 等. 基于改进蚁群算法的卫星光网络波长分配方法[J]. 激光与红外, 2021, 51(07): 909—916.
Wang Weilong, Li Yongjun, Zhao Shanghong, et al. Routing and wavelength assignment for satellite optical network based on improved ant colony algorithm[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(07): 909—916.
- [16] 李海, 赵尚弘, 李勇军, 等. 软件定义卫星光网络跨层路由波长算法研究[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(03): 76—80.
Li Hai, Zhao Shanghong, Li Yongjun, et al. Research on wavelength algorithm for cross-layer routing in software defined satellite optical network[J]. Space-Integrated-Ground In-
- formation Networks, 2021, 2(03): 76—80.
- [17] 李信, 李勇军, 赵尚弘. 基于深度强化学习的卫星光网络波长路由算法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(01): 264—270.
Li Xin, Li Yongjun, Zhao Shanghong, et al. A wavelength routing algorithm for optical satellite network based on deep reinforcement learning[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(01): 264—270.
- [18] Liu Y, Zhang Q, Xin X, et al. Congestion avoidance based on artificial bee colony algorithm for routing and wavelength assignment in optical satellite networks[J]. Optical Engineering, 2021, 60(3): 036109—036109.
- [19] Marbel R, Yozevitch R, Grinshpoun T, et al. Dynamic network formation for fso satellite communication[J]. Applied Sciences, 2022, 12(2): 738.
- [20] Wang X, Chen D. Link design for wireless optical communication network based on ant colony algorithm[J]. Communications and Networks, 2022, 24(2): 8.
- [21] Deng X, Zeng S, Chang L, et al. An ant colony optimization-based routing algorithm for load balancing in LEO satellite networks[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, 2022(1): 3032997.
- [22] Li Y, Zhang Q, Gao R, et al. An elastic resource allocation algorithm based on dispersion degree for hybrid requests in satellite optical networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(9): 6536—6549.
- [23] Peng C, He Y, Yan D, et al. Provision of energy-and wavelength-efficient traffic grooming for sparse WDM-enabled distributed satellite cluster networks[J]. MDPI, 2022, 9(7): 494.
- [24] Jing Y, Yi L, Zhao Y, et al. Deep-learning-based path computation without routing convergence in optical satellite networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2023, 15(5): 294—303.
- [25] Yang M, Zhang Q, Yao H, et al. Bee colony optimization algorithm for routing and wavelength assignment based on directional guidance in satellite optical networks[J]. China Communications, 2023, 20(7): 89—107.
- [26] Ning Y, Yi L, Zhao Y, et al. Load-balancing routing algorithms for service congestion avoidance in LEO optical satellite networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2023, 15(12): 1038—1049.
- [27] 曹阳, 邢雯珺, 彭小峰, 等. 空间碎片干扰下的卫星光网络路由算法研究[J]. 光子学报, 2024, 53(02): 70—80.
Cao Yang, Xing Wenjun, Peng Xiaofeng, et al. Research on routing algorithms for satellite optical networks under space debris interference[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(02): 70—80.
- [28] 艾琪洋, 何荣希, 林润峰. 卫星光网络中基于DQN的匹配度感知波长路由算法[J]. 光通信技术, 2024, 48(03): 30—37.
Ai Qiyang, He Rongxi, Lin Runfeng. Wavelength routing algorithm with matching degree awareness based on DQN in satellite optical networks[J]. Optical Communication Technology, 2024, 48(03): 30—37.
- [29] 周伟, 罗青松, 谢晓兰, 等. 基于OISL-OSU的通算一体卫星路由优化算法[J]. 光通信技术, 2024, 48(05): 51—59.
Zhou Wei, Luo Qingsong, Xie Xiaolan, et al. Communication-computing-integrated satellite routing optimization algorithm based on OISL-OSU[J]. Optical Communication Technology, 2024, 48(05): 51—59.
- [30] 刘治国, 吕文强, 潘成胜. 基于改进天牛须群落的卫星光网络路由算法[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(06): 188—194.
Liu Zhiguo, Lu Wenqiang, Pan Chengsheng. Routing and wavelength assignment algorithm for satellite optical network based on improved beetle colony[J]. Journal of Ordnance Equip-

- ment Engineering, 2024, 45(06): 188—194.
- [31] 邹家豪, 曹阳, 彭小峰, 等. 基于星地混合流量迂回的低地球轨道卫星光网络路由负载均衡[J]. 光学学报, 2025, 45(08): 74—82.
Zhou Jiahao, Cao Yang, Peng Xiaofeng, et al. Routing load balancing based on satellite-ground hybrid traffic detour in low-earth orbit satellite optical networks[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(08): 74—82.
- [32] Li Y, Zhang Q, Yao H, et al. Swarm-intelligence-based routing and wavelength assignment in optical satellite networks[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2023, 11(1): 1303—1319.
- [33] Yi X, Chin K W, Li Z, et al. Free space optical links scheduling and routing in satellite networks: a safe reinforcement learning approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 67(3): 236—374.
- [34] 赵尚弘. 卫星光网络技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 67—89.
Zhao Shanghong. Satellite optical network technology[M]. Beijing: Science Press, 2010: 67—89.
- [35] 赵尚弘, 彭聪, 李勇军, 等. 面向卫星互联网的下一代卫星光网络关键技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(07): 11—21.
Zhao Shanghong, Peng Cong, Li Yongjun, et al. Key technology progress of next-generation satellite optical network for satellite internet[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(07): 11—21.
- [36] 文国莉. 空间光网络路由与资源管理技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
Wen Guoli. Research on routing and resource management technology for space optical network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [37] 崔潇. 卫星光通信关键技术及发展态势分析信息通信技术与政策, 2021, 3(11): 65—72.
Cui Xiao. Analysis of key technologies and development trend of satellite optical communication[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2021, 3(11): 65—72.
- [38] Bhanja U, Mishra D. Quality of service aware fuzzy dynamic routing and wavelength assignment technique in all optical networks[J]. Photonic Network Communications, 2017, 34(2): 1—15.
- [39] Gravett A S, Du Plessis M C, Gibbon T B. A distributed ant-based algorithm for routing and wavelength assignment in an optical burst switching flexible spectrum network with transmission impairments[J]. Photonic Network Communications, 2017, 34(3): 375—395.
- [40] Martin I, Troia S, Hernández J A, et al. Machine learning-based routing and wavelength assignment in software-defined optical networks[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2019, 16(3): 871—883.
- [41] Maurya R K, Thangaraj J, Priye V. Dynamic routing and wavelength assignment using cost based heuristics in WDM optical networks[J]. Wireless Personal Communications, 2020, 115(2): 971—992.
- [42] 李乐民. WDM光传送网的选路和波长分配算法[J]. 中兴通讯技术, 2001, 3(06): 4—7.
Li Lemin. Routing and wavelength assignment algorithms for WDM optical transport networks[J]. ZTE Technology Journal, 2001, 3(06): 4—7.
- [43] 胡剑浩, 李涛, 吴诗其. 具有星际链路的LEO&MEO双层卫星网络路由策略研究[J]. 电子学报, 2000, 2(04): 31—35.
Hu Jiantao, Li Tao, Wu Shiqi. Routing of a LEO&MEO double layer mobile satellite communication system[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 2(04): 31—35.
- [44] 潘登, 齐志刚, 赵继军, 等. 一种实现负载均衡的动态波长分配新算法[J]. 光子学报, 2003, 4(06): 710—713.
Pan Deng, Qi Zhigang, Zhao Jigang, et al. A new dynamic wavelength assignment algorithm: load equalization algorithm[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 4(06): 710—713.
- [45] 郝铮. 基于机器学习的光传送网路由规划技术研究与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
Hao Zheng. Research and implementation of satellite-based machine learning routing planning technology for optical transport networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [46] 卢勇, 赵有健, 孙富春, 等. 卫星网络路由技术[J]. 软件学报, 2014, 000(05): 1085—1100.
Lu Yong, Zhao Youjian, Shun Fuchun, et al. Routing techniques for satellite networks[J]. Journal of Software, 2014, 000(05): 1085—1100.
- [47] 张泰江, 李勇军, 赵尚弘. 基于GEO/LEO双层卫星网络的路由算法优化设计[J]. 计算机工程, 2020, 46(07): 198—205.
Zhang Taijiang, Li Yongjun, Zhao Shanghong. Optimization design of routing algorithm based on geo/leo double-layer satellite network[J]. Computer Engineering, 2020, 46(07): 198—205.
- [48] Zyane A, Pierre S, Guennoun Z. A new approach for routing and wavelength assignment for permanent and reliable wavelength paths in wide all-optical WDM networks[J]. Photonic network communications, 2008, 15(1): 77—82.
- [49] 靳晓晗. 基于深度强化学习的无线多跳网络路由算法研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院大学工程科学学院), 2020.
Jin Xiaohan. Research on deep reinforcement learning based routing algorithm for wireless multihop networks[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [50] 张子涵. 低轨卫星网络路由策略研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2024.
Zhang Zihang. Research on routing strategy of low-earth-orbit satellite network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2024.
- [51] Boyan J, Littman M. Packet routing in dynamically changing networks: A reinforcement learning approach[J]. Advances in neural information processing systems, 1993, 6(46): 128—283.
- [52] Di Cicco N, Mercan E F, Karandin O, et al. On deep reinforcement learning for static routing and wavelength assignment[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2022, 28(4): 1—12.
- [53] Dijkstra E W. A note on two problems in connexion with graphs[M]. Edsger Wybe Dijkstra: his life, work, and legacy. 2022: 287—290.
- [54] Ford L R, Fulkerson D R. Maximal flow through a network[J]. Canadian Journal of Mathematics, 1954, 8(4): 399—404.
- [55] Bertaux L, Medjah S, Berthou P, et al. Software defined networking and virtualization for broadband satellite networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 54—60.
- [56] 张朝昆, 崔勇, 唐嵩嵩, 等. 软件定义网络(SDN)研究进展[J]. 软件学报, 2015, 26(01): 62—81.
Chaokun Zhang, Yong Cui, Hehe Tang, et al. Research progress in Software-defined networking(SDN)[J]. Journal of Software, 2015, 26(01): 62—81.
- [57] B. Mao, X. Zhou, J. Liu and N. Kato. On an Intelligent Hierarchical Routing Strategy for Ultra-Dense Free Space Optical Low Earth Orbit Satellite Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2024, 42(5): 1219—123.