

基于多目标模拟退火算法的导航卫星激光星间链路拓扑动态优化

董明佺^{1,2}, 林宝军^{1,3,4}, 刘迎春³, 周黎莎^{1,2,3}

¹中国科学院光电研究院, 北京 100094;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中国科学院微小卫星创新研究院导航卫星研究所, 上海 201203;

⁴上海科技大学信息科学与技术学院, 上海 201203

摘要 根据激光星间链路的技术特点,并考虑导航卫星星间链路需兼顾通信、高精度测量与自主定轨的多重要求,研究了全球导航卫星系统(GNSS)激光星间链路拓扑的动态优化问题。采用有限状态自动机(FSA)思想建立了一种导航卫星激光星间链路的链路周期表。综合卫星平台、轨道动力学、激光终端捕获跟踪性能等工程约束条件,以网络时延和链路空间位置精度因子(PDOP)作为通信性能和高精度测量的量化指标,建立拓扑的多目标优化模型。提出一种基于多目标模拟退火算法(MOSA)的改进算法,求解全局最优拓扑结构,并在某卫星或某条激光链路不可用时进行动态优化。此外,还设计了一种避免冲突的链路交叉算法,改进了多源最小时延路由算法。仿真结果表明:在包括 24 颗 MEO 和 3 颗 IGSO 卫星的 GNSS 中,经该算法优化的拓扑结构具有良好的通信和测量性能,能够有效改善网络时延、PDOP 值;当个别卫星或个别激光链路不可用时,改进算法计算出的拓扑结构仍能较好地兼顾高速通信与高精度测量性能。

关键词 光通信; 星间链路; 网络拓扑; 多目标优化; 导航卫星; 激光通信

中图分类号 V474.2; TP393

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0706004

Topology Dynamic Optimization for Inter-Satellite Laser Links of Navigation Satellite Based on Multi-Objective Simulated Annealing Method

Dong Mingji^{1,2}, Lin Baojun^{1,3,4}, Liu Yingchun³, Zhou Lisha^{1,2,3}

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Institute for Navigation Satellites, Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China;

⁴School of Information Science and Technology, Shanghai Tech University, Shanghai 201203, China

Abstract The topology dynamic optimization problem for inter-satellite laser links of global navigation satellite system (GNSS) is studied according to the technical characteristics of inter-satellite laser links. The requirements of communication, high-accuracy measurement and autonomous orbit determination for navigation satellite crosslink are also considered. The periodic tables of inter-satellite laser links for navigation satellite are established via the finite state automation (FSA), and a multi-objective optimization model of topology is set up considering the three engineering constraints as follows: satellite platform, orbit dynamics, acquisition and tracking performance of laser terminal. The two quantitative indices of networks delay and position dilution of precision (PDOP) are used to

收稿日期: 2017-11-28; 收到修改稿日期: 2018-02-13

基金项目: 国家重大专项(SYDH04)

作者简介: 董明佺(1985—),男,博士研究生,主要从事航天科学与技术、空间信息网络方面的研究。

E-mail: dongmingji@163.com

导师简介: 林宝军(1963—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事飞行器设计及仿真方面的研究。

E-mail: linbj@nc.poac.ac.cn

evaluate the performance of communication and high-accuracy measurement. An improved algorithm based on multi-objective simulated annealing (MOSA) is proposed and used to solve the global optimization topology structure. Dynamic optimizations can be performed especially when some satellites or inter-satellite laser links are unavailable. Meanwhile, a link exchange method with conflict avoidance is applied, as well as an improved multi-sources minimum delay routing algorithm. Finally, simulation results show that the optimized topology has good communication and measurement performance and effectively improves networks delay and PDOP in GNSS which is comprised of 24 mesospheric earth orbit (MEO) and 3 inclined geo-synchronization orbit satellite (IGSO) satellites, and the requirements of both high-speed data and high-accuracy measurement are achieved even if individual satellites or inter-satellite laser links are unavailable.

Key words optical communications; inter-satellite links; networks topology; multi-objective optimization; navigation satellite; laser communication

OCIS codes 060.2605; 060.3510; 060.4258; 060.4251

1 引 言

空间激光通信与测量技术具有高速率、高容量、小束散角、抗干扰、高测量精度等显著特点,近年来开始应用于星间链路^[1-4]。欧洲航天局(ESA)主导的 Sentinel-1A 环境监测卫星与 Alphasat 通信卫星成功开展了激光星间链路实验^[5]。导航卫星通过搭载激光星间链路,借助激光通信测量一体化技术^[6],在通信能力方面,可实现高速星间组网及大数据量转发与交互,提升系统网络传输与管理能力;在测量能力方面,利用激光链路连续、高精度的测量方式^[7],可获取大量的高精度星间测距数据,从而提高系统自主定轨性能^[8]。利用激光链路高精度时频传递功能,还可提高系统授时性能^[9]。俄罗斯的 GLONASS 系统已搭载星间激光链路开展了星间通信和测量实验,其星间通信能力仅为 50 kbit/s^[10]。

目前,国内外星间链路拓扑的研究工作多以提高链路通信性能为优化目标。Chang 等^[11]利用有限状态自动机(FSA)的思想,将低轨卫星系统周期划分为等长的时间间隔,在每个间隔内星间链路拓扑保持不变,并以降低呼叫阻塞概率为优化目标,利用模拟退火算法(SA)对链路分配问题进行离散化求解。Liu 等^[12]针对激光星间链路的建链规划问题,以最小端到端传输距离和链路利用率为优化目标,利用基于 2 部图的完美匹配算法求解链路分配方案。周泽华^[13]提出了一种基于链路稳定性的综合加权星间链路分配策略,在保证链路稳定性的同时,优化了链路时延和链路切换性能。

学术界针对导航卫星激光星间链路拓扑研究的成果较少,主要集中在微波时分体制星间链路的链路分配研究。针对提高导航卫星自主定轨精度的需求,孙桦等^[14]提出了一种星间链路拓扑变换时间间

隔恒定的方案,以空间位置精度因子(PDOP)最小化为优化目标生成拓扑结构,并统计了该拓扑结构的网络时延和节点数据流量。针对导航卫星兼顾通信与测量的双重需求,王东会^[15]提出了一种基于整网平均观测位置精度因子与整网时延综合加权的链路分配方法,利用基于有向图深度优先遍历方法寻找使链路代价最小化的链路分配方案;石磊玉等^[16]针对导航卫星链路分配问题提出了一种贪婪建链算法,在保证星间观测数量最大化的前提下,以通信代价为优化目标实现链路分配;燕洪成等^[17]分别采用基于首次改善(FI)和模拟退火的算法,以星间通信时延为优化目标,求解链路分配问题。

我国的北斗卫星导航系统(BDS)星座为中圆地球轨道(MEO)、倾斜地球同步轨道(IGSO)和地球同步轨道(GEO)三种不同轨道的多层卫星星座^[18],其激光星间链路需同时满足系统星间高速通信、高精度时间与距离测量的多重需求。与微波星间链路相比,激光星间链路由于指向、捕获、跟踪(PAT)技术复杂导致链路切换代价较大^[19],需尽量减小链路切换对系统性能的影响。在星间通信方面,BDS 不同轨道卫星之间的空间几何关系相对复杂,星间可视性以及端到端传输时延差异较大;在星间测量方面,星间链路的几何构型对自主定轨精度存在一定影响^[20]。提高系统自主导航性能需要激光星间链路具有较小的位置精度因子(PDOP, η)。此外,当卫星或激光星间链路不可用时,拓扑应具备一定的适应性,将中断对系统性能的影响降至最小。因此,BDS 激光星间链路的上述需求使得链路拓扑在优化目标上不仅要考虑链路切换、空间构型,还需考虑传输时延、PDOP 及链路中断的影响,使 BDS 的激光星间链路拓扑设计更具有挑战性。

本文充分考虑激光星间链路的特点,兼顾导航卫星星间链路的高速通信和高精度测量需求,以链

路利用率、端到端传输时延、链路空间几何构型等参数为优化目标,将 BDS 激光星间链路拓扑规划问题建模为多约束条件下的多目标函数优化问题。文中对多目标模拟退火算法(MOSA)加以改进,使算法在某卫星或某激光链路不可用时仍能够进行拓扑动态优化,进而求解全局最优拓扑结构。此外,还设计了一种避免冲突的链路交叉算法,优化了多源最小时延路由算法,以提高算法效率。

2 链路周期表

BDS 卫星主要分布在 MEO、GEO 及 IGSO 轨道层,可分别建立静态或动态激光链路拓扑实现星间通信与测量。静态拓扑构型简单,不需链路切换,但对于空间几何特性连续变化的导航星座,静态拓扑的传输时延和 PDOP 值会周期性降低,并且当卫星因约束条件不可见或因链路中断无法建链时,链

路利用率会下降。因此,可采用动态拓扑结构建链。由于激光星间链路捕获时间较长,链路同时切换会影响链路利用率及网络连通性,因此本文采用链路周期表的方式对星座系统周期进行规划。

由于 BDS 的卫星轨道有拟回归周期,本文借鉴文献[11]中有限状态自动机的思想,将星座系统周期划分为若干持续时间为 t_{FSA} 的 FSA 状态,相邻状态之间具有重叠的链路交换周期 t_{exch} ,如图 1 所示。若两颗卫星在某 FSA 状态内满足持续可见条件,则认为这两颗卫星在该状态内可视。为避免激光链路频繁切换,在每个 $(t_{\text{FSA}} - 2t_{\text{exch}})$ 时段内,激光星间链路拓扑保持不变,且拓扑可使该 FSA 状态内的系统性能达到最优,从而提升激光链路在整个系统周期内的性能。FSA 状态按照系统周期的起始点顺序排列,当下一个状态到来或存在计划性中断时,系统根据下一个状态的约束条件生成最优链路拓扑。

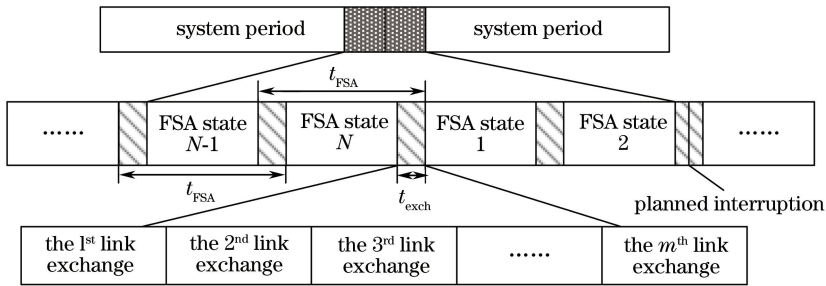


图 1 星座系统周期处理模型

Fig. 1 Constellation system period handling model

在链路交换周期 t_{exch} 内,设相邻两 FSA 状态发生交换的链路数量为 m ,则待交换链路按照一定的次序以捕获时长为时间间隔依次进行交换,即在每个 t_{exch} 内同时只有一对链路断开并进行交换,从而将多条链路的同步切换转化为一种异步切换机制,避免了待交换链路同时进入捕获状态所带来的链路利用率下降。每个 FSA 状态时长 t_{FSA} 既需满足通信效率的要求,又要保证链路交换期 t_{exch} 的时长要求,还应保证星座中任何一颗卫星在该状态内都可达(即网络的全连通性)。

3 激光星间链路拓扑的数学模型

根据导航卫星系统对激光星间链路兼顾高速通信、高精度测量与自主定轨的多重需求,本文所提出的链路拓扑生成算法综合考虑系统约束条件、通信代价以及测量代价,以网络平均时延、最大时延和链路平均 PDOP、最大 PDOP 为优化目标,将拓扑生成问题转化为以数学模型表述的多目标优化问题,

对激光星间链路动态拓扑结构进行求解。多目标优化问题的数学模型可表示为

$$f : \mathbf{L} \rightarrow \begin{cases} \min \tau_A \\ \min \tau_M \\ \min \eta_A \\ \min \eta_M \end{cases}, \quad (1)$$

式中: f 为最优化目标函数,求解 $\mathbf{L} = [l_{ij}]$, $i = 1, 2, 3, \dots, k$, $j = 1, 2, 3, \dots, k$, \mathbf{L} 为链路拓扑矩阵其构成的拓扑结构为无方向图结构, $l_{ij} \in \{0, 1\}$ 表示时段内卫星 i 与卫星 j 是否建立激光星间链路;变量 τ_A 、 τ_M 、 η_A 、 η_M 分别表示平均时延、最大时延、平均 PDOP 值、最大 PDOP 值。

优化目标:

$$\tau_A = \frac{1}{k(k-1)} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1, j \neq i}^k c_{ij}, \quad (2)$$

$$\tau_M = \max c_{ij}, \quad (3)$$

$$\eta_A = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \eta_i, \quad (4)$$

$$\eta_M = \max \eta_i, \quad (5)$$

式中: $\mathbf{C}=[c_{ij}]$ 为通信代价矩阵, c_{ij} 表示 t_{FSA} 内卫星 i 到卫星 j 的激光链路平均最小端到端时延; $\boldsymbol{\eta}=[\eta_i]$ 为测量代价矩阵, η_i 表示 t_{FSA} 内卫星 i 的激光链路平均 PDOP 值。

建链约束条件为

$$\mathbf{V} : [v_{ij}] \rightarrow$$

$$\begin{cases} C_{\text{sat}} : \alpha \in [\alpha_S, 90] \\ C_{\text{laser}} : \alpha \in [\alpha_{L\min}, \alpha_{L\max}], \beta \in [\beta_{L\min}, \beta_{L\max}] \\ \quad |\alpha'| \in [0, \alpha'_{L\max}], |\beta'| \in [0, \beta'_{L\max}] \\ C_{\text{orb}} : \alpha \in [0, \alpha_E] \end{cases}, \quad (6)$$

$$v_{ij} \in \{0, 1\}, \quad (7)$$

$$c_{ij} \notin \infty, \forall i, j, \quad (8)$$

$$v_{ij} - l_{ij} \geq 0, \forall i, j, \quad (9)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^k l_{ij} \leq n, \forall i, n \text{ is the maximum}$$

number of single-satellite carrying laser links, (10)

$$v_{ij} = v_{ji}, \forall i, j, \quad (11)$$

式中: \mathbf{V} 为星间链路可视矩阵, 其构成与卫星平台约束 C_{sat} 、星载激光终端约束 C_{laser} , 以及卫星轨道约束 C_{orb} 有关; α 、 β 、 α' 、 β' 分别为他星在本星本体坐标系下的俯仰角、方位角、俯仰角速度、方位角速度; α_S 为卫星平台无遮挡最小俯仰角; $\alpha_{L\min}$ 、 $\alpha_{L\max}$ 分别为激光终端最小、最大俯仰角; $\beta_{L\min}$ 、 $\beta_{L\max}$ 分别为激光终端最小、最大方位角; $\alpha'_{L\max}$ 、 $\beta'_{L\max}$ 分别为激光终端俯仰、方位最大跟踪角速度; α_E 为在地球遮挡影响下他星在本星本体坐标系下最大可视俯仰角。

约束条件(6)式为星间链路可视性约束, 表示卫星建链需同时满足卫星平台约束、星载激光终端约束和轨道约束; 约束条件(7)式为可视性矩阵约束, 表示 t_{FSA} 时段内卫星 i 至卫星 j 的激光链路是否能够连续建链, 可连续建链时 v_{ij} 取值为 1, 不可连续建链时 v_{ij} 取值为 0; 约束条件(8)式为可达性约束, 表示任意卫星节点间至少存在一条可达路径; 约束条件(9)式为建链约束, 表示卫星间需满足可视性约束条件才可建立激光星间链路; 约束条件(10)式为每颗星携带的激光星间链路数量约束, 表示本星与星座内其他卫星可建立的激光链路最多为 n 条; 约束条件(11)式为矩阵对称性约束。

4 链路拓扑生成算法

星间链路拓扑生成算法的目标是在满足约束条件的拓扑矩阵 \mathbf{L} 中寻找全局最优解, 其特点是星间链

路的可视性约束在不同 FSA 状态内动态变化, 算法需根据多个约束条件寻求每个 FSA 状态内链路拓扑矩阵 \mathbf{L} 的全部集合。若遍历全部潜在的链路分配矩阵, 再通过约束条件筛选得到矩阵 \mathbf{L} , 计算效率较低, 仅考虑 24 颗 MEO 卫星时, 需遍历的取值空间就高达 $2^{24 \times (24-1)} \approx 10^{166}$ 。依次赋予各优化目标一定的权重并进行加权处理, 可能无法求得链路拓扑的全局最优解。因此, 本文提出一种基于 MOSA 的改进算法, 用于求解导航卫星激光星间链路的多目标优化问题。

4.1 基于 MOSA 的改进算法

按照前述多目标优化问题的数学模型, 选取平均时延、最大时延以及平均 PDOP 值、最大 PDOP 值为优化目标, 并对 MOSA 算法加以改进, 重新设计邻域解的生成策略并改进最小时延路由算法, 以满足复杂约束条件的限制, 同时提高运算效率。

MOSA 算法^[21] 属于一种迭代算法, 采用 Metropolis 准则并加以改进, 允许以一定概率接收未经改善的解, 从而概率性地跳出局部最优解, 最终趋向全局最优解。其算法流程如图 2 所示。若新链路拓扑 \mathbf{L}_N 的平均时延、最大时延、平均 PDOP 和最大 PDOP 均小于原链路拓扑, 则接收新的链路拓扑, 否则以一定概率接受新的链路拓扑, 接收概率为 $P = \min\{1, [\exp(-\Delta\tau_A/T_1) \times \exp(-\Delta\tau_M/T_2) \times \exp(-\Delta\eta_A/T_3) \times \exp(-\Delta\eta_A/T_4)]\}$, (12) 式中: $\Delta\tau_A = \tau_{A,N} - \tau_{A,O}$, $\Delta\tau_M = \tau_{M,N} - \tau_{M,O}$, $\Delta\eta_A = \eta_{A,N} - \eta_{A,O}$, $\Delta\eta_M = \eta_{M,N} - \eta_{M,O}$, 下角标 N 和 O 分别表示新建链矩阵和原建链矩阵; $T_1 \sim T_4$ 为温度参数, 其取值与算法冷却进度表的设计相关。

冷却进度表是影响 MOSA 算法性能的重要因素, 其合理选取是算法应用的关键。冷却进度表主要包括: 初始温度、温度更新函数、迭代终止条件等参数。实验表明, 初始温度参数越大, 获得最优链路分配的概率越大, 但运算时间将变长, 需折中考虑优化质量与优化效率, 以确定初始温度参数。本文通过均匀抽样若干拓扑状态, 计算该组状态的平均时延、最大时延、平均 PDOP 及最大 PDOP 的方差作为初始温度 $T_1 \sim T_4$ 。温度更新函数设计为: $T_{k+1} = \lambda T_k$, 式中 λ 为 Boltzmann 常数, 取值范围为 $0 < \lambda < 1$ 。迭代终止条件通过设置外循环迭代次数的方法进行控制, 经多次迭代最终趋向链路拓扑的全局最优解。

MOSA 算法通过搜索原有解的邻域解来逼近全局最优解, 若直接通过链路交换的方式生成新的拓扑, 可能与拓扑矩阵或约束条件相矛盾, 导致无效交换, 从而降低邻域解搜索效率。因此, 如何快速准

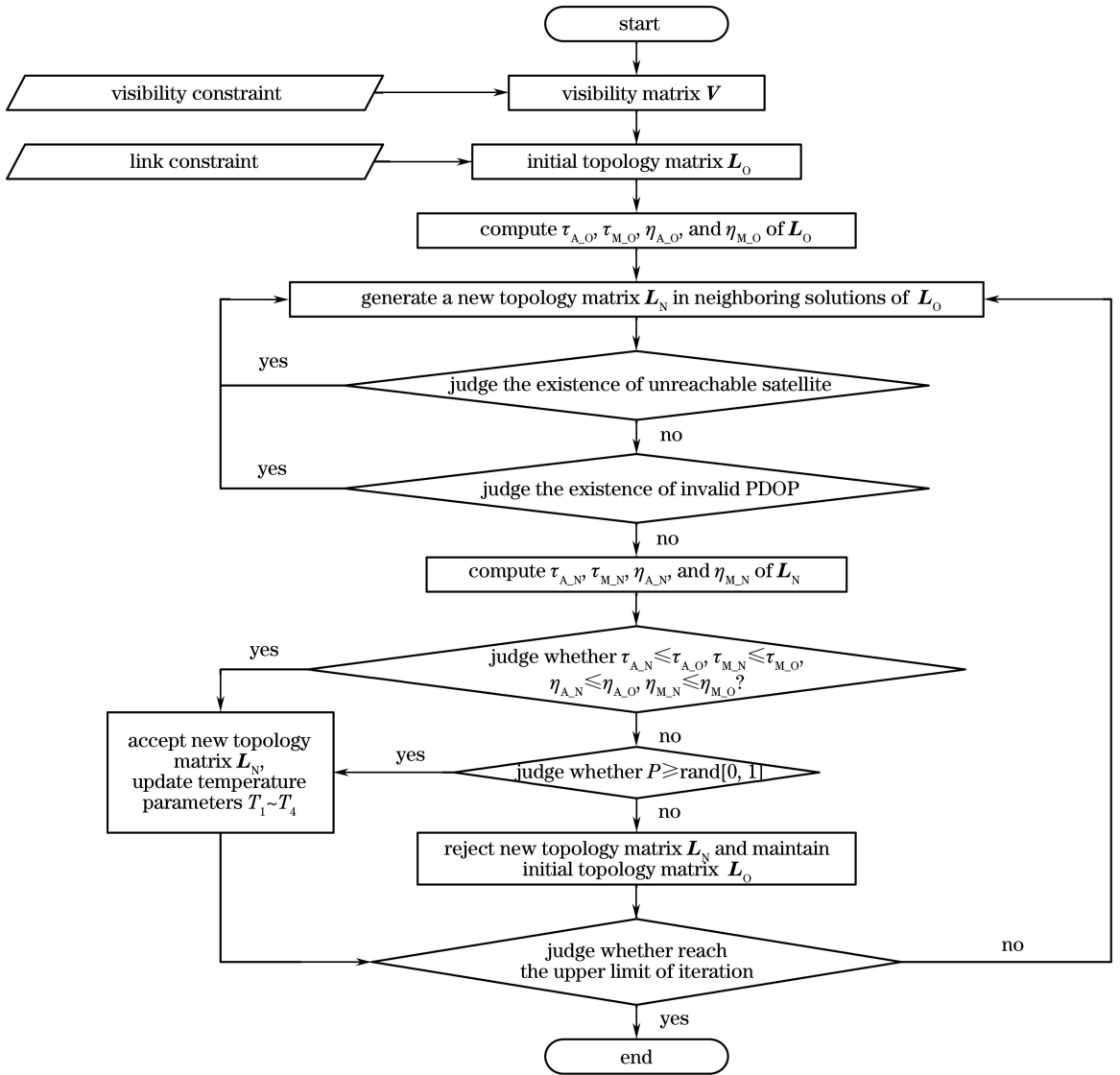


图 2 基于 MOSA 的改进算法流程

Fig. 2 Flow chart of improved algorithm based on MOSA

确的生成新的链路拓扑,是影响算法效率的关键。设计一种避免冲突的链路交叉更新算法,通过建链矩阵与可视矩阵的交叉变换防止链路交换与约束条件相矛盾。算法首先随机生成两个不同的卫星号 S_A 和 S_B , 并从原建链矩阵和可视矩阵中分别得到该卫星号对应的行(或列)向量, 记为 \mathbf{a}_A 、 \mathbf{a}_B 与 \mathbf{b}_A 、 \mathbf{b}_B ; 再经逻辑运算后求得新的向量 $\mathbf{a}_C = \mathbf{a}_B \& \mathbf{a}_A \& \mathbf{b}_B$, $\mathbf{a}_D = \mathbf{a}_A \& \mathbf{a}_B \& \mathbf{b}_A$; 然后分别随机选取 \mathbf{a}_C 及 \mathbf{a}_D 中“1”元素对应的卫星号, 记为 S_C 和 S_D ; 最后得到不产生冲突的待交换链路: S_A-S_D 及 S_B-S_C 。具体算法过程如附录 A 所示。

在改进的 MOSA 算法中, 计算星间链路最小时延部分的运算成本较高。由于导航星座卫星节点数量有限, 且星间链路为权重不均匀非负路径, 因此可

应用 Dijkstra 算法^[22] 进行求解。当导航星座中共有 k 个卫星节点, 每颗卫星携带 n 条星间链路时, 经典 Dijkstra 算法中求解队列最小元素共需运行 k^2 次, 降距操作共需运行 $nk^2/2$ 次。在搜寻最小时延路径过程中, 含有很多重复运算, 并且当拓扑出现不可达节点时, 原有算法无法剔除该拓扑结构。针对上述问题, 对 Dijkstra 算法进行优化和改进。由于导航卫星激光星间链路为全双工链路, 计算出卫星 S_A-S_B 的最小时延路径后, 该路径的逆序 S_B-S_A 即为反向最小时延路径, 因此通信代价矩阵 \mathbf{C} 为对称矩阵, 只需求出矩阵 \mathbf{C} 中的上三角元素, 即可得到所有源卫星至目的卫星的最小时延路径。算法通过增加内部环网判断策略, 当迭代中出现不可达卫星节点时, 能够跳出该次迭代并重新生成邻域解。

算法伪代码如附录 B 所示。

4.2 算法复杂度分析

基于 MOSA 的优化算法在每一次迭代过程中,运算复杂度较高的部分为新的链路拓扑生成过程、网络时延计算过程和星座 PDOP 值计算过程。

4.1 节中的链路拓扑生成过程采用了链路交叉分配算法,选取待交换的卫星节点组合属于重复、独立的随机实验,因此可视为伯努利实验。假定星座中共有 k 颗卫星,随机选定的卫星组合共有 k^2 种,其中满足交换条件的卫星组合共有 A_k^2 种,则实验成功的概率为 $p_c = A_k^2/k^2 = (k-1)/k$,取得成功的实验次数 M 的期望为 $E(M) = 1/p_c = k/(k-1)$,即:实验成功的平均运行次数为 $k/(k-1)$ 次,因此链路拓扑生成过程的时间复杂度为 $O(1)$ 。

网络时延计算过程中,对于每颗卫星,求队列最小元素的运行时间代价随着队列 Q 的减小而逐渐减小,因此求解最小元素的总运行时间代价为 $\Theta[k(k-1)^2/2] = O(k^3)$,降距运算的运行时间代价为 $\Theta(nk^2/4) = O(nk^2)$,求解最大平均时延需要在 k^2 个元素中搜索,其运行时间代价为 $\Theta(k^2-1) = O(k^2)$,因此,网络时延计算过程的时间复杂度为 $O[\max(k^3, nk^2, k^2)] = O(k^3)$ 。

在星座 PDOP 值计算过程中,每颗卫星只进行一次 PDOP 值查表计算,运行时间代价为 $O(k)$,搜索最大 PDOP 值的运行时间代价为 $\Theta(k-1) = O(k)$,因此,星座 PDOP 值计算过程的时间复杂度为 $O(k)$ 。

综上,基于 MOSA 的改进算法总时间复杂度为 $O(k^3)$ 。

5 性能分析

5.1 仿真环境

仿真采用 BDS 的卫星星座^[18],其中 MEO 层为 Walker 24/3/1 星座构型,轨道高度为 21528 km,轨道倾角为 55° 。IGSO 层轨道高度为 35786 km,轨道倾角为 55° ,3 颗卫星的星下点轨迹重合,交叉点经度为东经 118° ,卫星均匀分布在 3 个轨道面内,升交点赤经分别相差 120° 。卫星平台及激光终端相关参数如下:

- 1) 单星携带激光星间链路数量 $n=3$ 或 $n=4$;
- 2) 激光链路有效指向范围:俯仰角 $\alpha \in [20^\circ, 90^\circ]$,方位角 $\beta \in [-180^\circ, 180^\circ]$;
- 3) 激光链路跟踪角速度范围:俯仰角速度 $\alpha' \leq 0.1$ ($^\circ$)/s,方位角速度 $\beta' \leq 0.1$ ($^\circ$)/s。

由于拓扑生成过程中采用了整网星历携带的卫星位置信息,根据激光星间链路捕获时长、通信时长和整网连通性的要求,以及星历的有效时间范围,以 $t_{\text{FSA}} = 2.5$ h, $t_{\text{exch}} = 0.5$ h 为时间间隔,将星座轨道周期划分为 84 个 FSA 状态。同时,卫星运行过程中星间链路时延与 PDOP 值指标连续变化,为了便于计算分析,仿真过程将星座数据的采样周期设置为 1 min。由于激光终端的跟踪性能决定了激光星间链路能否维持正常建链,因此,在仿真环境中需通过设置卫星相对角速度约束条件,筛选满足可视性要求的星间链路。

5.2 仿真结果

MOSA 算法的冷却进度表中,初始温度的确定方法为:均匀抽样一组网络拓扑状态,以各状态的目标函数值的方差作为初始温度 $T_1 \sim T_4$,其取值根据不同的 FSA 时段和卫星中断数量而有所区别。根据 Kirkpatrick^[23]等的分析,温度更新函数中 Boltzmann 常数取 $\lambda = 0.95$,算法的迭代上限选取为 2500。

图 3 为某 FSA 状态内,基于 MOSA 的改进算法求解平均时延、最大时延以及平均 PDOP 值、最大 PDOP 值的收敛性能。当单星携带链路数量 $n=3$ 时,迭代次数达到 2200 次后,多目标函数值趋于稳定,即函数值对应的拓扑结构已接近全局最优解; $n=4$ 时,迭代次数达到 1600 次后,多目标函数值便已收敛至稳定值。由图 3 可知,收敛特性曲线在迭代过程中并不是单调减小,验证了 MOSA 算法能够跳出局部最优解,从而趋向全局最优解的结论。将图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)、图 3(d)对比可知,初始拓扑经算法优化后, $n=4$ 时的平均时延、最大时延、平均 PDOP 及最大 PDOP 与 $n=3$ 时相比分别改善了 12%,11%,27%,30%。

图 4 为星座仅考虑 MEO 层卫星时,系统周期中 3 种不同星座组网方式下的网络时延、PDOP 与中断重构性能对比,其中单星携带链路数量 $n=4$ 。第 1 种为每个时间段的初始状态所采用的拓扑结构;第 2 种为每颗卫星分别与同轨面相邻两颗卫星和异轨面相邻相位两颗卫星共建立 4 条固定激光星间链路,组成静态的链路拓扑结构;第 3 种为文中拓扑生成算法计算得到的拓扑结构。

为了比较 3 种组网方式下的中断重构性能,仿真在不同的时段内人为设置卫星中断数量,具体为:时段 15~30,单颗卫星中断;时段 31~45,2 颗卫星中断;时段 46~60,3 颗卫星中断;时段 61~75,4 颗卫星中断;时段 76~84,系统恢复。仿真结果表明:导航卫星正常运行或个别卫星中断时,算法生成的

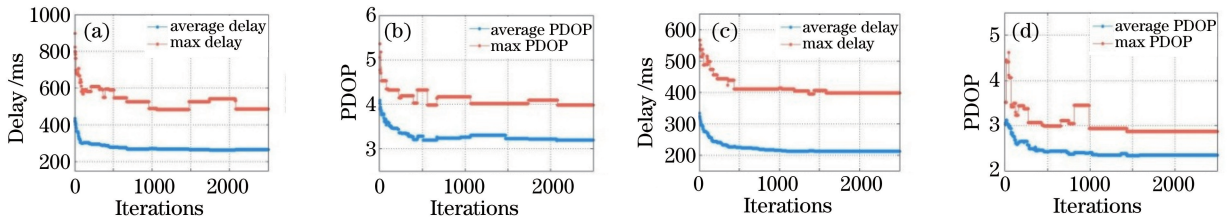


图 3 某 FSA 状态内基于 MOSA 的改进算法收敛特性。(a) $n=3$ 时网络时延收敛特性;(b) $n=3$ 时 PDOP 值收敛特性;
 (c) $n=4$ 时网络时延收敛特性;(d) $n=4$ 时 PDOP 值收敛特性

Fig. 3 Convergence properties of improved algorithm based on MOSA in FSA state. (a) Convergence property of network delay at $n=3$; (b) convergence property of PDOP at $n=3$; (c) convergence property of network delay at $n=4$; (d) convergence property of PDOP at $n=4$

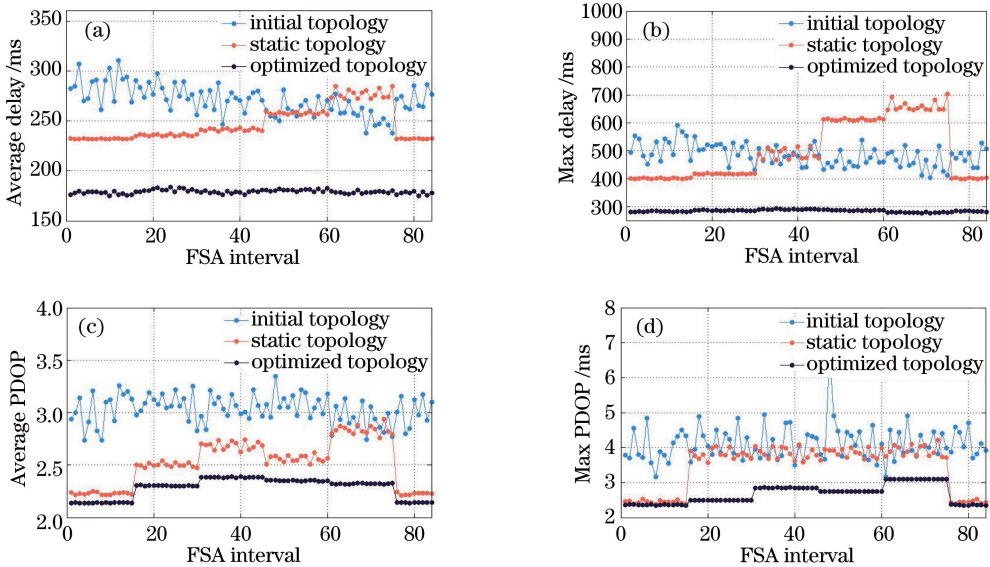


图 4 3 种拓扑结构的性能对比。(a)平均网络时延;(b)最大网络时延;(c)平均 PDOP;(d)最大 PDOP

Fig. 4 Comparison of performance between three kinds of topology structures. (a) Network average delay; (b) network maximum delay; (c) average PDOP; (d) maximum PDOP

拓扑网络时延与 PDOP 值均比静态拓扑及初始拓扑更小;静态拓扑随着卫星中断数量的增加,时延与 PDOP 值也大幅增加,而优化的拓扑随着中断卫星数量的增加,其 PDOP 值小幅提升,而时延并未大幅增加,甚至在某些时段内更优。这是由于:为了保证整网的全连通性,当个别卫星中断后,其他卫星携带的激光链路数量不变,经多目标优化算法生成的拓扑结构使受中断影响的链路重组,减少了某些端到端路径的路由跳数,或使链路几何构型更优,从而提升了时延性能和 PDOP 值。

表 1 给出了 $n=4$ 时星座分别在正常运行和单星中断的情况下,静态拓扑与算法优化后的动态拓扑在星座系统周期内通信代价与测量代价的平均值。从表 1 可知:在星座正常运行情况下,与静态拓扑相比较,经过算法优化后的动态拓扑平均时延改善了 19.0%,最大时延改善了 27.2%,平均 PDOP

改善了 4.0%,最大 PDOP 改善了 4.1%;在单星中断情况下,与静态拓扑相比较,经过算法优化后的拓扑平均时延改善了 20.8%,最大时延改善了 29.2%,平均 PDOP 改善了 10.0%,最大 PDOP 改善了 31.8%。这表明:优化算法得到的动态拓扑在星座正常及单星中断的情况下,对导航卫星系统的通信性能和测量性能均有改善。

当星座同时包括 MEO 和 IGSO 卫星时,不同层卫星之间不存在长期可视链路,无法采用静态拓扑结构,需根据每个 FSA 状态内的约束情况进行动态拓扑切换。图 5 所示为单星携带链路数量 $n=4$ 时,多层卫星星座初始拓扑与算法优化拓扑的时延、PDOP、中断重构性能对比。链路或卫星中断情况仿真模拟分别如图 5(a)、图 5(b)和图 5(c)、图 5(d)所示,具体为:时段 15~30,单条 MEO 链路中断(或单颗 MEO 卫星中断);时段 31~45,2 条 MEO 链

路中断(或 2 颗 MEO 卫星中断);时段 46~60, 3 条 MEO 链路中断(或 3 颗 MEO 卫星中断);时段 61~75, 3 条 MEO 链路及 1 条 MEO-IGSO 链路中断(或单颗 IGSO 卫星中断);时段 76~84, 系统恢复。仿真结果表明:与初始拓扑相比,优化后的拓扑在有链路中断或卫星中断的情况下,其时延性能和 PDOP 值均得到大幅改善。其中 1~3 条 MEO 链路中断或 1~3 颗 MEO 卫星中断对优化后的拓扑时延影响较小,优化后的 PDOP 值随链路或卫星中

断数量增加而少量增加,增加的幅度与发生中断的具体链路或卫星有关。与图 4 相比,优化的拓扑结构在系统正常运行及 MEO 卫星中断的情况下,其时延与 PDOP 值均高于仅含 MEO 卫星的拓扑结构,这是由于 MEO-IGSO 卫星的链路距离较长,当星座含有 IGSO 卫星时,算法为了保证网络的全连通性,需分配链路,使链路及 IGSO 卫星相连,导致时延与 PDOP 值增大。

表 1 静态拓扑与优化拓扑的性能统计

Table 1 Performance statistics of static topology and optimized topology

Topology type	Average delay /ms	Maximum delay /ms	Average PDOP	Maximum PDOP
Static topology	232	401	2.23	2.45
Optimized topology	188	292	2.14	2.35
Static topology (single satellite interrupted)	240	421	2.50	3.81
Optimized topology (single satellite interrupted)	190	298	2.25	2.60

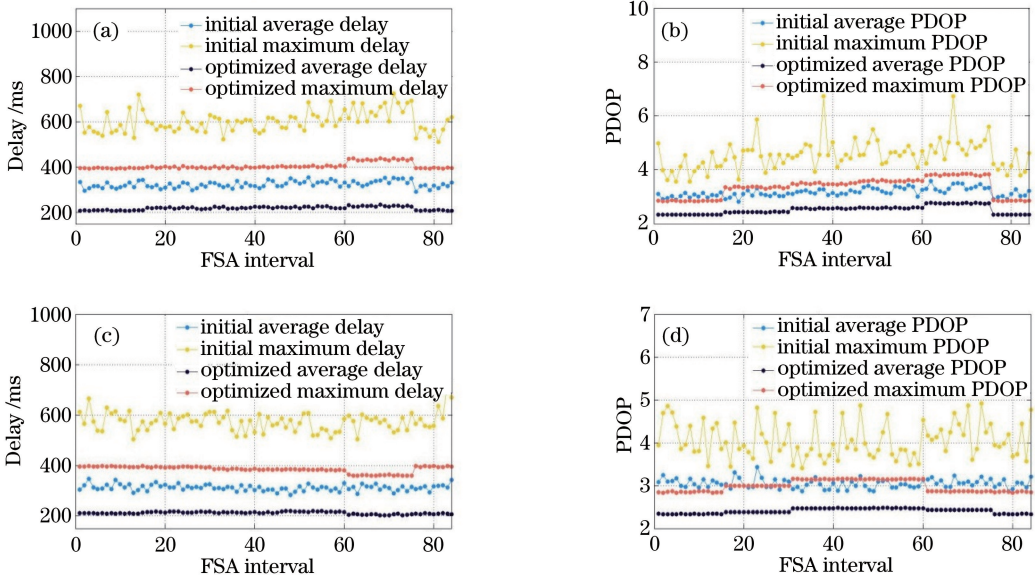


图 5 多层卫星优化拓扑性能对比。(a)链路中断情况下时延对比;(b)链路中断情况下 PDOP 值对比;(c)卫星中断情况下时延对比;(d)卫星中断情况下 PDOP 值对比

Fig. 5 Comparison of optimized topology performance for multi-layer satellite. (a) Comparison of delay when links are interrupted; (b) comparison of PDOP when links are interrupted; (c) comparison of delay when satellites are interrupted; (d) comparison of PDOP when satellites are interrupted

图 6 为 FSA 状态分别为状态 4 和状态 5 时,经算法优化后的拓扑构型。图中编号为 1~24 的卫星为 MEO 卫星,编号为 25~27 的卫星为 IGSO 卫星。由图 6(a)和(b)对比可知,当第 4、5 状态拓扑切换时,同轨面相邻相位卫星的链路连接关系并未改变,异轨面及不同层卫星间共有 24 条链路发生切换。

图 7 为星座系统周期内的拓扑切换性能。由图 7(a)可知,当优化的拓扑在不同状态之间切换

时,MEO 同轨面内的相邻卫星在系统周期内持续建链,不进行链路切换,而异轨面卫星所需切换的链路数量为 20~26 条不等。由图 7(b)可知,利用经典 FSA 思想划分的链路周期表在拓扑切换时,其链路利用率约为 55%~60%;改进的链路周期表在拓扑切换时,其链路利用率提高至 96%,切换完成后链路利用率为 100%,与改进前相比,拓扑切换时的链路利用率得到大幅改善。

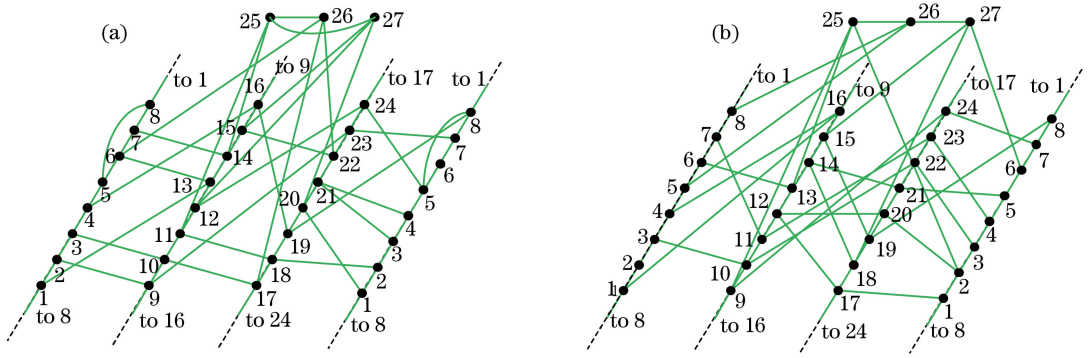


图 6 算法优化后的拓扑构型。(a)第 4 个 FSA 状态的优化拓扑;(b)第 5 个 FSA 状态的优化拓扑
Fig. 6 Topology structures optimized by algorithm. (a) Optimized topology at the 4th FSA state;
(b) optimized topology at the 5th FSA state

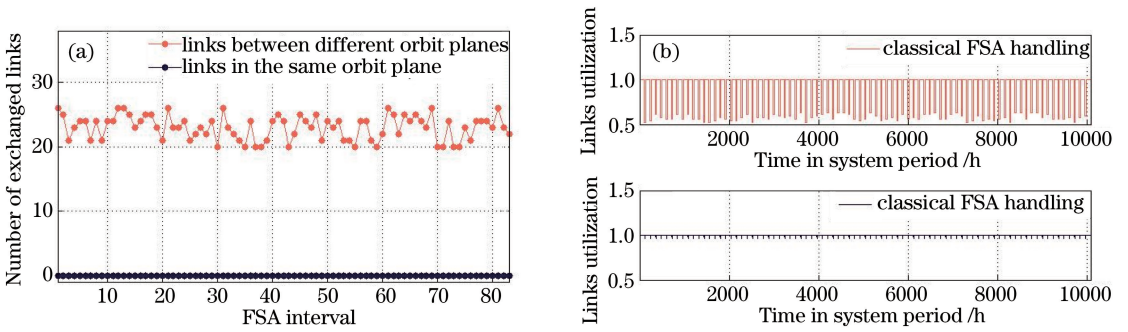


图 7 星座系统周期内拓扑切换性能。(a)链路切换数量对比;(b)链路利用率对比

Fig. 7 Number of exchanged links in constellation system period. (a) Comparison of exchanged links number;
(b) comparison of links utilization

6 结 论

针对导航卫星系统对激光星间链路兼顾通信、高速测量与自主定轨的多重需求,分析了 GNSS 激光星间链路的特点以及链路拓扑的优化目标,提出了以平均时延、最大时延为通信代价,以平均 PDOP 值、最大 PDOP 值为测量代价的多目标优化问题。根据约束条件和目标函数对基于 MOSA 的算法加以改进和优化,通过仿真分析可知提出的改进算法能够同时改善 BDS 激光星间链路的时延性能和 PDOP 值的问题,并能求解出动态链路拓扑的全局最优解。当个别卫星或激光链路中断时,经算法计算出的拓扑结构仍能较好地兼顾高速通信与高精度测量性能。根据仿真结果,BDS 激光星间链路可在同轨面内组成固定链路,异轨面(或不同层)的星间链路按照算法优化拓扑,并使优化拓扑在不同 FSA 状态之间切换,保证系统通信与测量性能最优。拓扑切换时,算法的链路利用率可从 55%~60%提高至 96%,得到大幅改善。

附录 A 链路交叉更新算法

在 MOSA 算法中,若直接通过交换星间链路的方式生成新的拓扑,该交换方式可能与拓扑矩阵或约束条件相矛盾,如图 A1 所示,若假设随机产生的链路交换过程为:拆除卫星 3-5 链路与卫星 6-7 链路,然后将 3-7 链路与 6-5 链路交叉建链,则产生如下冲突:

- 1) 原网络拓扑中已存在 6-5 链路;
- 2) 3-7 链路不满足可视性约束。

为此,本文设计了一种避免冲突的链路交叉更新算法,算法的运算流程如下:

- 1) 在导航星座的可用卫星节点中随机生成两个不同的卫星号 S_A 和 S_B ;
- 2) 从原建链矩阵 L_O 中分别取卫星 S_A 和 S_B 所对应的行(或列)的二进制向量,记为 a_A 、 a_B ;
- 3) 从可视矩阵中分别取 S_A 和 S_B 所对应的行(或列)的二进制向量记为 b_A 、 b_B ;
- 4) 将向量 a_B 按位取反后再先后与 a_A 及 b_B 进行按位逻辑与运算,得到新的二进制向量 a_C ,即 $a_C = a_B \& a_A \& b_B$;

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	1	1	0	0	0	0
2	1	0	0	1	0	0	0	1
3	1	0	0	0	1	0	0	1
4	1	1	0	0	0	1	0	0
5	0	0	1	0	0	1	1	0
6	0	0	0	1	1	0	1	0
7	0	0	0	0	1	1	0	1
8	0	1	1	0	0	0	1	0

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	1	1	0	1	1	1
2	1	0	1	1	1	0	1	1
3	1	1	0	1	1	1	0	1
4	1	1	1	0	1	1	1	0
5	0	1	1	1	0	1	1	1
6	1	0	1	1	1	0	1	1
7	1	1	0	1	1	1	0	1
8	1	1	1	0	1	1	1	0

图 A1 链路交换冲突过程示例($k=8, n=3$)。 (a)初始建链拓扑矩阵 L_0 ; (b)可视矩阵 V

Fig. A1 Example of conflict procedure in link exchange ($k=8, n=3$).

(a) Initial topology matrix L_0 ; (b) visibility matrix V

5) 将向量 a_A 按位取反后再先后与 a_B 及 b_A 进行按位逻辑与运算, 得到新的二进制向量 a_D , 即 $a_D = a_A \& a_B \& b_A$;

6) 将 a_C 及 a_D 中元素为 1 所对应的卫星号提取出来, 形成两组卫星集合, 若集合中包含卫星 S_A 或 S_B , 则将其从集合中删除, 若集合为空集, 则返回步骤 1) 执行;

7) 分别在集合中各随机选取一个元素, 记为 S_C 和 S_D , 则得到不产生冲突的两组待交换链路的卫星对: S_A 和 S_B, S_C 和 S_D 。

8) 拆除 S_A-S_C 链路以及 S_B-S_D 链路;

9) 建立 S_A-S_D 链路以及 S_B-S_C 链路, 实现链路交叉变换。

以图 A1 所示的拓扑结构为例说明算法过程, 其中图 A1(a) 为原建链拓扑矩阵 L_0 , 图 A1(b) 为可视矩阵 V , 过程示例如图 A2 所示。图中随机生成

的卫星号为 2 和 6, 分别从 L_0 中取两卫星号对应的行向量: $a_A = (1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1)$, $a_B = (0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0)$; 分别从 V 中取两卫星号对应的行向量: $b_A = (1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1)$, $b_B = (1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1)$ 。根据算法中 a_C 及 a_D 的计算公式, 可得 $a_C = a_B \& a_A \& b_B = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)$, $a_D = a_A \& a_B \& b_A = (0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0)$, 式中 $a_B \& a_A$ 的目的是求出已与卫星 2 建链, 且未与卫星 6 建链的卫星序列, 与 b_B 按位与运算的目的是剔除不符合卫星 6 可视性约束的链路。分别搜索 a_C 和 a_D 中元素为 1 对应的卫星号并组成集合 $\{1, 8\}$ 和 $\{5, 7\}$, 随机选取 $S_C = 1, S_D = 5$ 。拆除卫星 2-卫星 1 链路以及卫星 6-卫星 5 链路, 建立卫星 2-卫星 5 链路以及卫星 6-卫星 1 链路, 根据拓扑矩阵的对称性, 即将 L_0 矩阵中 $l_{12}, l_{21}, l_{56}, l_{65}$ 元素置为 0, 将 $l_{25}, l_{53}, l_{16}, l_{61}$ 元素置为 1, 得到新的拓扑矩阵 L_N 。

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	1	1	0	0	0	0
2	1	0	0	1	0	0	0	1
3	1	0	0	0	1	0	0	1
4	1	1	0	0	0	1	0	0
5	0	0	1	0	0	1	1	0
6	0	0	0	1	1	0	1	0
7	0	0	0	0	1	1	0	1
8	0	1	1	0	0	0	1	0

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	1	1	0	1	0	0
2	0	0	0	1	1	0	0	1
3	1	0	0	0	1	0	0	1
4	1	1	0	0	0	1	0	0
5	0	1	1	0	0	0	1	0
6	1	0	0	1	0	0	1	0
7	0	0	0	0	1	1	0	1
8	0	1	1	0	0	0	1	0

图 A2 避免冲突的链路交叉更新过程示例。 (a)初始拓扑矩阵 L_0 ; (b)新的拓扑矩阵 L_N

Fig. A2 Example of link exchange and update process with conflict avoidance:

(a) Initial topology matrix L_0 ; (b) new topology matrix L_N

附录 B 多源最小时延路由算法伪代码

多源最小时延路由算法伪代码如下:

Input L, D

Output S, C

1: for ($i=1, i \leq S_i-1, i++$) do

2: $C(i, i) = 0$;

3: for ($j=i+1, j \leq S_i, j++$) do

4: $C(i, j) = \infty$;

5: $S = \emptyset$;

6: $M = [1, 2, \dots, k]$;

7: $Q = M$

8: while $Q \neq \emptyset$ do

```

9:if exists SELECT-MIN ( $Q$ ) then
10: $u = \text{SELECT-MIN} (Q)$ ;
11: $S = S \cup \{u\}$ ;
12:else
13:return error;
14:exit;
15:end if
16:for each  $w \in \text{find}(L(u, :)=1)$  do
17:if  $w \notin S$  &  $w \notin \{1, \dots, i\}$  then
18:if  $C(i, w) > C(i, w) + D(u, w)$  then
19: $C(i, w) = C(i, w) + D(u, w)$ ;
20:end if
21:end if
22: $Q = M - S$ ;
23:for(  $j = i + 1, j \leq S_i, j++$ ) do
24: $C(j, i) = C(i, j)$ 

```

算法输入变量为 L 和 D , 其中 L 为拓扑矩阵, 矩阵 D 中存储了每个时间段内各卫星之间的直连链路平均传输时延。输出变量为 S 和 C , 其中 S 为已找到最小时延的目标卫星序号集合, C 为通信代价矩阵。中间变量 M 为待计算最小时延的目标卫星序号集合, Q 为 $M - S$ 优先队列。函数 SELECT-MIN 的作用是搜寻队列 Q 中距离源卫星时延最小的卫星序号 u , 当该卫星节点不唯一时, 选择序号较小的卫星, 当该卫星节点不存在时, 说明该次迭代的链路拓扑存在不可达卫星, 算法返回 error 信息, 终止本次运算并重新生成邻域解。

参 考 文 献

[1] Liu L R. Laser communications in space I optical link and terminal technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(1): 3-20.
刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术[J]. 中国激光, 2007, 34(1): 3-20.

[2] Esteban J J, García A F, Eichholz J, *et al.* Optical ranging and data communication in space-based applications [C] // 7th Workshop on Positioning Navigation and Communication, Dresden: IEEE, 2010: 19-22.

[3] Gregory M, Heine F F, Lange R, *et al.* Commercial optical inter-satellite communication at high data rates [J]. Optical Engineering, 2012, 51(3): 031202.

[4] Jiang L, Hu Y, Wang C, *et al.* Optical system in one-point to multi-point simultaneous space laser communications[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0506001.

江伦, 胡源, 王超, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学系统研究 [J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0506001.

[5] ESA. Laser link offers high-speed delivery[EB/OL]. (2014-12-05) [2017-05-06]. http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Laser_link_offers_high-speed_delivery.

[6] Xu Y X, Xu M M, Sun J F, *et al.* Integrated technology of communication and velocity measurement in satellite coherent optical communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 120603.
许云祥, 许蒙蒙, 孙建锋, 等. 卫星相干光通信测速一体化技术研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 120603.

[7] Zhang H F, Meng W D, Wu Z B, *et al.* One way laser ranging and its measuring experiment [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(3): 0308005.
张海峰, 孟文东, 吴志波, 等. 单向激光测距及其测量试验 [J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308005.

[8] Tang C P, Hu X G, Zhou S S, *et al.* Centralized autonomous orbit determination Beidou navigation satellites with inter-satellite measurements: preliminary results[J]. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2017, 47(2): 029501.
唐成盼, 胡小工, 周善石, 等. 利用星间双向测距数据进行北斗卫星集中式自主定轨的初步结果分析 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47(2): 029501.

[9] Yao Y B, Meng Y S, Bian L, *et al.* Research status and trends of space laser time and frequency transmission technology [J]. Space Electronic Technology, 2017, 14(5): 12-16, 21.
姚渊博, 蒙艳松, 边朗, 等. 空间激光时频传递技术研究现状及趋势 [J]. 空间电子技术, 2017, 14(5): 12-16, 21.

[10] Pasyukov V V, Sadovnikov M A, Sumerin V V, *et al.* The concept and preliminary results of use of satellite laser ranging for GLONASS accuracy improvement [C/OL] // The 18th International Workshop on Laser Ranging. Fujiyoshida, 2013:13-02-10. <https://cddis.nasa.gov/lw18/docs/papers/Session4/13-02-10-Pasinkov.pdf>.

[11] Chang H S, Kim B W, Lee C G, *et al.* FSA-based link assignment and routing in low-earth orbit satellite networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1998, 47(3): 1037-1048.

[12] Liu Z, Guo W, Deng C L, *et al.* Perfect match model based link assignment for optical satellite network[C] // 2014 Conference on Communications, June 10-14, 2014, NSW, Australia. Sydney: IEEE,

- 14545573.
- [13] Zhou Z H. Research of inter-satellite link assignment of LEO satellite networks [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015. 周泽华. 低轨卫星网络星间链路分配策略研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.
- [14] Sun H, Hao X P, Feng W Q, *et al.* Inter-satellite links topology scenario based on minimum PDOP criterion [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(10): 1245-1249. 孙桦, 郝晓鹏, 冯文全, 等. 基于最小 PDOP 准则的星间链路拓扑方案[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(10): 1245-1249.
- [15] Wang D H. Research on navigation inter-satellite links networking to optimize ranging and communication [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. 王东会. 面向测距与通信性能优化的卫星导航星间链路组网技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [16] Shi L Y, Xiang W, Tang X M. A link assignment algorithm applicable to crosslink ranging and data exchange for satellite navigation system [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(9): 1971-1977. 石磊玉, 向为, 唐小妹. 一种兼顾卫星导航系统星间观测及通信的链路分配算法[J]. 宇航学报, 2011, 32(9): 1971-1977.
- [17] Yan H C, Zhang Q J, Sun Y, *et al.* Link assignment problem of navigation satellite networks with limited number of inter-satellite links [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(7): 2329-2339. 燕洪成, 张庆君, 孙勇, 等. 星间链路数量受限的导航卫星网络链路分配问题[J]. 航空学报, 2015, 36(7): 2329-2339.
- [18] China Satellite Navigation Office. Beidou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal: version 2.1 [EB/OL]. (2016-11-07) [2017-10-08]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201805/P020180507527106075323.pdf>. 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号: 2.1 版 [EB/OL]. (2016-11-07) [2017-10-08]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201710/P020171202693088949056.pdf>.
- [19] Yu S Y, Ma J, Tan L Y, *et al.* Experimental study of acquisition with antenna scanning in intersatellite laser links [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(6): 498-502. 于思源, 马晶, 谭立英, 等. 激光星间链路中天线扫描捕获技术实验室模拟研究[J]. 中国激光, 2002, 29(6): 498-502.
- [20] Gong X Y, Xu S G, Feng W. Influence of cross-link configuration to auto-navigation's precision [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(11): 1161-1165. 龚晓颖, 徐韶光, 冯威. 星间链路构型对自主导航精度的影响分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(11): 1161-1165.
- [21] Lei D M, Yan X P. Multiobjective intelligent optimization algorithms and application [M]. Beijing: Science Press, 2009: 19-21. 雷德明, 严新平. 多目标智能优化算法及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 19-21.
- [22] Dijkstra E W. A note on two problems in connexion with graphs [J]. Numerische Mathematik, 1959, 1(1): 269-271.
- [23] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Jr, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing [J]. Science, 1983, 220(4598): 606-680.