



引文格式:王楠,孙乐园,丁前程,等.兼顾测距和通信需求的导航星座激光星间链路规划[J].武汉大学学报(信息科学版),
2025,50(9):1792-1801.DOI:10.13203/j.whugis20240471

Citation: WANG Nan, SUN Leyuan, DING Qiancheng, et al. Laser Link Assignment of Navigation Satellite Constellations Considering Inter-satellite Ranging and Communication[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(9): 1792-1801. DOI:10.13203/j.whugis20240471

兼顾测距和通信需求的导航星座激光星间 链路规划

王楠¹ 孙乐园² 丁前程³ 卢征凯¹ 方元坤² 黄文德⁴

1 国防科技大学智能科学学院,湖南 长沙,410073

2 西昌卫星发射中心,海南 海口,570100

3 西安交通大学电子与信息学部,陕西 西安,710049

4 深圳市北斗天宇科技有限公司,广东 深圳,518000

摘要:为在星间可见性、星上激光终端数量及链路体制约束下,实现导航星座基于激光链路的星间高效测距和与地面站通信,建立了导航星座稳态激光星间链路多目标规划模型,提出了基于第二代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithms-II, NSGA-II)的链路拓扑多目标优化算法。在稳态优化模型中引入过渡态拓扑边连通度约束,在保证稳态测距和通信性能的同时,实现了过渡态激光链路整网连通,并进行了全球导航星座激光星间链路规划仿真。仿真结果表明,NSGA-II生成的拓扑最优解集能够支配多目标模拟退火算法生成的最优解;各链路周期NSGA-II综合最优解对应的激光链路拓扑,稳态测距几何精度因子为1.9~3.2,通信时延为0.14~0.34 s,过渡态通信时延为0.14~0.43 s。所提出的激光链路规划方法能够实现链路稳态下的星间高效测距和通信,同时保证链路过渡态下的星座整网连通和对地通信。

关键词:导航卫星星座;激光星间链路;测距与通信;边连通度;第二代非支配排序遗传算法

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2025-04-11

DOI:10.13203/j.whugis20240471

文章编号:1671-8860(2025)09-1792-10

Laser Link Assignment of Navigation Satellite Constellations Considering Inter-satellite Ranging and Communication

WANG Nan¹ SUN Leyuan² DING Qiancheng³ LU Zhengkai¹ FANG Yuankun² HUANG Wende⁴

1 College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

2 Xichang Satellite Launch Center, Haikou 570100, China

3 Faculty of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

4 BeiDou Tianyu Technology Co. Ltd, Shenzhen 518000, China

Abstract: Objectives: Laser inter-satellite link (LISL) of the navigation constellation has been assigned with constraints of the inter-satellite visibility, the number of laser terminals and the link system to realize efficient inter-satellite ranging and communication with ground stations. **Methods:** According to the laser link system, each link period includes two states, transition state and steady state. The transition state completes the link switching and reconstruction, and maintains a static link topology when entering the steady state. Based on the static processing, a multi-objective assignment model of steady-state LISL of navigation constellations is established. A multi-objective optimization algorithm for link topology based on non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II) is proposed. By introducing the edge connectivity constraint of the transition topology into the steady-state optimization model, the whole network connectivity

基金项目:南宁市优秀青年科技创新创业人才培养项目(RC20210102)。

第一作者:王楠,博士,副研究员,主要从事人工智能与智能优化研究工作。acnwang@aliyun.com

通信作者:孙乐园,博士,工程师。sly_nudt@163.com

in the transition state is realized while ensuring the steady-state ranging and communication performance. **Results:** The assignment and simulation of a global navigation constellation LISL were carried out. The optimal solution set generated by NSGA-II could dominate the optimal solution generated by the multi-objective simulated annealing algorithm. The ranging position dilution of precision of steady-state LISL topologies corresponding to the comprehensive optimal solution of all link periods ranged from 1.9 to 3.2, and the communication delay ranged from 0.14 to 0.34 s. The transition state communication delay ranged from 0.14 to 0.43 s. **Conclusions:** The proposed laser link assignment method is able to realize efficient inter-satellite ranging and communication in steady link states, and ensures the whole constellation network connectivity and satellite-to-earth communication in link transition states.

Key words: navigation satellite constellation; inter-satellite laser link; ranging and communication; edge connectivity; non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II)

当前的全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)包括美国的GPS、俄罗斯的GLONASS、欧洲的Galileo以及中国的北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS),均在一定程度上实现了全球或区域性的定位、导航和授时(positioning, navigation and timing, PNT)服务功能。在系统建设初期,导航星座的测运控都由地面系统承担,以实现星座的精密定轨与时间同步、控制指令上注与运行信息回传。但随着导航星座规模越来越大,有限的地面测控资源逐渐无法承担庞大空间段的管理任务。特别是在BDS地面区域性布站的限制下,地面运控系统无法进行对空间段的全弧段监测,限制了系统PNT服务能力的提升。为了提高系统运行精度和效率,各大卫星导航系统都相继引入了星间链路技术。

目前绝大多数导航卫星系统采用微波星间链路进行星间测距和通信^[1]。GPS Block II R采用了超高频(ultra high frequency, UHF)宽波束微波星间链路,并基本实现了自主定轨功能^[2]。为了克服UHF频段宽波束链路抗干扰能力差等缺点,GPS III将改用更高频段的窄波束微波星间链路^[3-4]。BDS-3在所有卫星上均搭载了Ka波段窄波束星间链路载荷,实现了厘米级的星间测距精度以及对中圆轨道(medium earth orbit, MEO)卫星的全弧段观测^[5-7]。针对微波链路的规划问题,智能优化算法已广泛应用于链路测距和通信性能的优化,应用的关键是针对微波链路体制和建链约束的算法适应性改进^[8-9]。相比于微波链路,激光星间链路的无线光通信具有高传输速率、高安全性、低功耗、抗干扰能力强等优点。为了追求更高的测距精度和通信效率,激光星间链路被逐渐引入到卫星导航系统^[10-12]。但受限于极小的光束发散角,激光星间链路的建立需要经过

耗时的捕获、跟踪、瞄准(acquisition, tracking and pointing, ATP)过程,无法实现链路的灵活切换,因此需要每颗卫星上搭载多个激光链路终端以实现星座的实时整网连通。

受到星上激光链路终端数量限制,每颗卫星无法同时与所有可见卫星建链。为了实现激光星间链路效能的最大化,就需要解决激光星间链路的最优规划问题。文献[13]在无向图模型的基础上,将激光链路规划定义为一个受拓扑可靠性要求和节点度限制的多约束优化问题,并提出了基于可靠性约束的最小化时延优化算法。文献[14]分析了北斗激光链路网络的吞吐量,并提出了一种基于最长可见性Dijkstra算法的激光链路规划方法。文献[15]采用多目标粒子群算法(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)实现了对导航星座激光星间链路拓扑的几何精度因子(position dilution of precision, PDOP)、点对点通信时延以及链路终端利用率的优化。在星间激光链路稳定建立之前,处于ATP过程的过渡态链路不可用,导致星间通信性能下降。文献[16]提出了一种激光/微波混合链路方案,在激光链路过渡态由微波链路提供星间路由,从而实现导航星座的不间断通信,但由于微波链路体制的限制,星间通信时延达到数秒;针对混合网络中的激光链路规划问题,采用多目标模拟退火算法(multi-objective simulated annealing algorithm, MOSA)优化了网络通信时延和点连通度。文献[17]设计了基于轮询体制的激光链路切换方案,通过减少瞬时链路切换数量有效降低了激光链路切换对网络性能的影响,但轮询切换方案导致两个规划周期之间的链路切换过程需持续更长时间。

本文兼顾导航卫星星座的星间测距和通信需求,在星间可见性、星上激光终端数量及链路

体制约束下,首先,建立了导航星座激光星间链路多目标规划模型。根据激光链路的ATP过程将激光链路建立过程划分为过渡态和稳态,通过引入星间链路网络边连通度约束,在确保激光测距性能的前提下,维持过渡态与稳态的整网连通。然后,提出了基于第二代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithms-II, NSGA-II)的链路拓扑多目标优化算法。最后,开展全球导航星座激光星间链路规划仿真,验证了算法的有效性。

1 激光链路建立方案

1.1 激光链路体制

激光链路的能量密度高、终端质量小,可以有效降低卫星能耗及对卫星平台容量的要求,使得一颗卫星可搭载多个激光终端^[18]。与传统射频星间链路不同,激光信号是高度定向的,极窄的光束发散角导致仅在激光束路径上的接收器才能接收到信号,因此激光链路只能在卫星之间点对点建链。此外,链路两端更高的对准和跟踪精度要求,使得建立可靠稳定的激光星间链路需要经历一个较长的ATP过程,导致其无法像微波链路一样实现频繁的链路切换。为此,导航星座激光星间链路的建立采用有限状态机(finite state automaton, FSA)体制,其运行机理是将星座的运行过程划分为多个激光链路周期。根据链路建立的ATP过程,将每个链路周期划分为过渡态和稳态两个阶段。链路过渡态主要完成ATP过程,处于过渡态的链路短期不可用;完成ATP过程后链路进入稳态,激光链路网络维持固定的拓扑结构。在下一个激光链路周期按照此过程进行拓扑结构重建,如图1所示。

1.2 链路拓扑静态化处理

导航星座星间可见性和相对方位的变化决定了星间链路拓扑结构是动态变化的,但根据激光星间链路的FSA体制,星座激光链路在每个链路周期内维持固定的拓扑,因此可以将其视为一个静态结构。由于导航星座的空间运动具有周期性,可以将系统运行时间划分为多个运行周期。当需要考虑星地通信时,该运行周期为星座的回归周期。卫星及地面站的空间相对方位在各运行周期内具有重复性,因此可采用相同的链路拓扑。

激光链路建链过程的静态处理如图2所示。将星座回归周期划分为 C 个等时间长度的激光

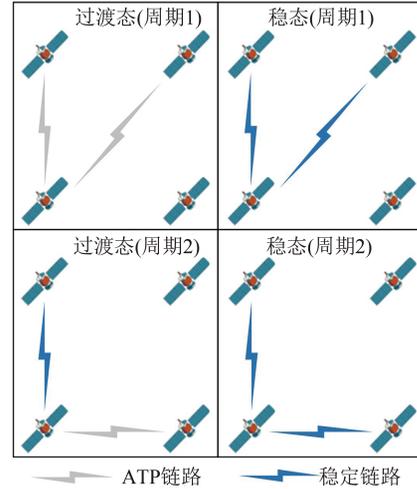


图1 基于FSA体制的激光链路建立与切换
Fig. 1 Establishment and Switching of Laser Inter-satellite Links Based on FSA

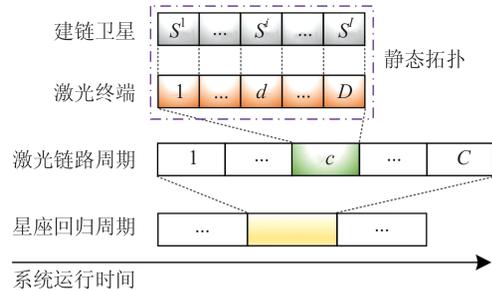


图2 激光链路建链过程的静态处理
Fig. 2 Static Processing of Laser Link Construction

链路周期,该周期为激光链路建立与维持的基本单元;在每个激光周期内,每颗卫星携带的 D 个激光终端分别与一颗可见卫星 $S^i(1 \leq i \leq I \leq D)$ 建链, I 为单颗卫星在一个链路周期内所建立的激光链路总数。由此整个星座在每个链路周期内构成的激光链路拓扑均维持静态结构。

2 激光链路规划模型

2.1 规划要素矩阵

导航卫星之间能够建立星间链路的基本前提是彼此之间相互可见。两颗卫星之间相互可见的充分必要条件是同时满足几何可见性和链路终端可见性。几何可见性即卫星之间的信号传递路径不被地球遮挡,链路终端可见性即两颗卫星位于彼此激光链路终端的覆盖范围内^[19]。文献[20]详细介绍了星间激光链路可见性的计算方法。

将链路拓扑进行静态化处理,激光链路在各周期内维持静态拓扑结构,相应要求星间可见

性在各周期内保持不变。对于一个由 S 颗卫星构成的导航星座,用一个对称的可见性矩阵 $V \in R^{S \times S}$ 描述各链路周期内的星间可见性。 V 为 0-1 矩阵,当卫星 i 与卫星 j 在整个周期内持续可见,则认为两颗卫星之间可见,相应的可见性矩阵元素 $v_{i,j} = v_{j,i} = 1$,满足激光链路的建立条件;否则认为两星之间不可见,相应的, $v_{i,j} = v_{j,i} = 0$ 。

激光链路在整个链路周期内维持静态拓扑结构,因此将激光链路周期作为链路规划的基本单元。每个链路周期稳态的激光链路拓扑以一个规划矩阵 $A \in R^{S \times D}$ 描述。矩阵第 i 行元素为卫星 i 各终端的建链目标, $1 \leq i \leq S$ 。矩阵元素 $a_{i,d} = j$ 表示卫星 i 的终端 d 与卫星 j 建链。在双向链路的体制约束下,卫星 j 的一个激光终端同时也与卫星 i 建链,相应地有 $i \in \{a_{j,d} | 1 \leq d \leq D\}$; $a_{i,d} = 0$ 则表示卫星 i 的终端 d 闲置。

激光链路规划矩阵 A 定义的链路拓扑可用对称的邻接矩阵 $L(A) \in R^{S \times S}$ 等价描述。 $L(A)$ 为 0-1 矩阵,矩阵元素 $l_{i,j} = 1$ 表示卫星 i 和卫星 j 建立激光链路,相应的, $i \in \{a_{j,d} | 1 \leq d \leq D\}$ 且 $j \in \{a_{i,d} | 1 \leq d \leq D\}$; $l_{i,j} = 0$ 表示卫星 i 和卫星 j 在当前周期未建立激光链路。受到每颗卫星激光链路终端数量的约束,满足 $\sum_{j=1}^S l_{i,j} \leq D$ 且 $\sum_{i=1}^S l_{i,j} \leq D$ 。

相对于上一周期的激光链路拓扑,当前周期拓扑存在部分旧链路断开以及新链路重建。而新建链路在当前周期过渡态处于不可用状态,因此当前周期过渡态可用链路为当前周期和上一周期稳态同时存在的链路,即网络拓扑为上一周期和当前周期稳态拓扑的交集。定义当前周期过渡态拓扑的邻接矩阵为:

$$\hat{L}(A) = L(A) \odot L(\bar{A}) \quad (1)$$

式中, \bar{A} 为上一周期稳态链路拓扑规划矩阵; $L(A)$ 和 $L(\bar{A})$ 分别为当前周期和上一周期稳态拓扑的邻接矩阵; \odot 为矩阵元素相乘运算; $\hat{L}(A)$ 为邻接矩阵,其矩阵元素可表示为:

$$\hat{l}_{ij}(A) = l_{ij}(A) \times l_{ij}(\bar{A}), \forall 1 \leq i, j \leq S \quad (2)$$

2.2 激光链路网络性能指标

2.2.1 星间测距性能

激光星间链路提供的星间测距信息主要用于导航卫星的精密定轨。待定轨的卫星 i 可等效为卫星定位中的用户,星座中其他建链卫星向其

提供定轨所需的测距信息。卫星 i 在每个链路周期内与其建链卫星形成的几何构型是影响卫星定轨精度的一个重要因素,可以用 PDOP 评估:

$$P_i^{\text{PDOP}} = \text{tr} \left[(H_i^T H_i)^{-1} \right] \quad (3)$$

其中,链路测量矩阵 H_i 为:

$$H_i = \begin{bmatrix} \frac{x_i - x_1}{R_{i1}} & \frac{y_i - y_1}{R_{i1}} & \frac{z_i - z_1}{R_{i1}} \\ \frac{x_i - x_2}{R_{i2}} & \frac{y_i - y_2}{R_{i2}} & \frac{z_i - z_2}{R_{i2}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_i - x_K}{R_{iK}} & \frac{y_i - y_K}{R_{iK}} & \frac{z_i - z_K}{R_{iK}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $\text{tr}[\]$ 为矩阵的求迹运算; (x_i, y_i, z_i) 为卫星 i 的空间位置坐标; (x_k, y_k, z_k) 为与卫星 i 建链的卫星 K 的空间坐标; R_{iK} 为卫星 i 与卫星 K 的星间几何距离。PDOP 值越小,表明测距链路几何构型越好,在同等级星间测距精度下,可得到更高的定轨精度^[5]。

2.2.2 星间通信性能

激光星间链路的通信功能是提供卫星之间的通信路由,以服务于卫星运控信息上注以及运行信息回传。特别是在地面区域布站的限制下,卫星运行至境外弧段时必须借助星间链路实现与地面段的信息交互。卫星与地面段的通信时延作为衡量星地通信效率的关键指标,主要包括了星间通信时延和星地通信时延。

星地通信通过星地链路实现,不占用星间链路资源,因此星间激光链路规划仅需考虑星间传输时延。可被地面段监测的境内星对地通信仅依靠星地链路实现,星间链路通信时延为 0;不可被地面段监测的境外星需要联合星间链路和星地链路才能实现对地通信。单条激光链路的通信时延由建链卫星之间的空间距离决定,即卫星 i 和卫星 j 之间的激光链路通信时延评价指标 t_{ij} 为:

$$t_{ij} = d_{ij}/c \quad (5)$$

式中, d_{ij} 为两颗卫星之间的空间距离; c 为真空光速。

星座中任一卫星 i ($1 \leq i \leq S$) 通过激光链路实现对地通信的星间时延 T_i 为:

$$T_i = t_{is_1} + \sum_{j=1}^{n-1} t_{s_j s_{j+1}} \quad (6)$$

式中, s_j ($1 \leq j \leq n$) 为构成卫星 i 到境内星最小时延通信路由的卫星节点。

2.2.3 网络的边连通度

对于由链路规划矩阵 A 或其邻接矩阵 L 描述的激光链路网络,可用图论中的边连通度来衡量网络拓扑的稳定性。在由 S 个卫星节点构成的激光星间链路网络 A 中,去掉任意 $k-1$ 条链路后所得的子网络仍然连通,去掉 k 条链路后不连通,则称 A 是 k 边连通图, k 即为网络 A 的边连通度,记作 $k(A)$ 或 $k(L)$ 。图3为边连通度示意图。由图3可知,当灰色链路断开,网络将不再连通。

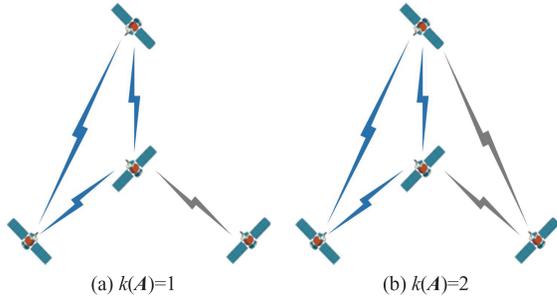


图3 边连通度示意图

Fig. 3 Examples of Edge-Connectivity

2.3 最优化模型

兼顾导航星座的测距和通信需求,同时保证链路过渡态下星座的对地通信,将激光星间链路网络拓扑的规划问题转化为一个带有多约束条件的多目标优化问题,相应的最优化模型可描述为:

$$\begin{cases} \min J_1(A) = \max_{1 \leq i \leq S} P_i^{\text{PDOP}} \\ \min J_2(A) = \max_{1 \leq i \leq S} T_i \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{s.t. } k[\hat{L}(A)] \geq 1 \quad (8)$$

$$v_{i,a,d} = 1, \forall a_{i,d} \neq 0, 1 \leq i \leq S, 1 \leq d \leq D \quad (9)$$

$$j \in \{a_{i,d} | 1 \leq d \leq D\}, \forall i \in \{a_{j,d} | 1 \leq d \leq D\} \cap i \neq 0 \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^S l_{i,j} \leq D, \sum_{i=1}^S l_{i,j} \leq D, \forall 1 \leq i, j \leq S \quad (11)$$

上述规划模型以链路稳态拓扑规划矩阵 A 作为链路规划变量。优化的性能指标 $J_1(A)$ 为卫星测距链路的最大 PDOP,性能指标 $J_2(A)$ 为星座对地通信的最大星间时延。约束条件式(8)为当前链路规划周期过渡态拓扑的边连通度约束,可保证当前链路周期过渡态下的星座整网连通和对地通信。约束条件式(9)为建链卫星之间的可见性约束。约束条件式(10)为双向链路约束。约束条件式(11)规定了各卫星的最大建链数量不超过搭载的激光终端数量 D 。

3 链路规划算法

3.1 NSGA-II 算法

式(7)~式(11)描述的激光星间链路规划问题本质上是一个带约束的多目标优化问题。多目标优化问题的一种处理方式是通过多目标的线性加权转化为单目标优化问题,但不同目标函数的量纲差异以及权重的确定都将直接影响最优解的性能。另一种方式则是通过求解 Pareto 前沿,得到解空间中的非支配解集,从而避免一个优化目标的改善导致其他目标的削弱。文献[21]提出带精英策略的 NSGA-II 算法,因其计算速度快、种群多样性高等优点被引入到微波星间链路规划问题的求解中^[22]。本文将首次引入到激光星间链路的规划问题中。在标准单目标遗传算法基础上,NSGA-II 增加了父代和子代种群合并、种群个体非支配排序以及拥挤度计算等操作,最终得到 Pareto 非支配解集。

在上述激光链路多目标规划问题中,任意两个优化变量 $A_{(1)}$ 和 $A_{(2)}$ 的 Pareto 非支配关系定义为^[23-24]:

1) $A_{(1)}$ 支配 $A_{(2)}$, 当且仅当 $\forall i \in \{1, 2\}$, 都有 $J_i(A_{(1)}) < J_i(A_{(2)})$;

2) $A_{(1)}$ 弱支配 $A_{(2)}$, 当且仅当 $\forall i \in \{1, 2\}$, 都有 $J_i(A_{(1)}) \leq J_i(A_{(2)})$, 且 $\exists j \in \{1, 2\}$, 使 $J_j(A_{(1)}) < J_j(A_{(2)})$;

3) $A_{(1)}$ 和 $A_{(2)}$ 互不支配, 当且仅当 $\exists i \in \{1, 2\}$, 使 $J_i(A_{(1)}) < J_i(A_{(2)})$, 且 $\exists j \in \{1, 2\}$, 使 $J_j(A_{(1)}) > J_j(A_{(2)})$ 。

所谓非支配解集,即集合中每个解都是非支配的,没有其他解在所有目标函数上都比它更优。在非支配解集的基础上改进任何一个目标函数,必然会削弱至少一个其他目标函数。拥挤度即个体在种群中的分布密度,以个体邻域解构成的最小矩形的周长来衡量。拥挤度越大,表示个体在目标空间中的分布越稀疏,有利于种群多样性的保持并且避免算法过早收敛到局部最优解。

NSGA-II 算法主要计算流程如图4所示,包含以下5个部分:

1) 初始化。生成规模为 N 的初始父代种群,并通过选择、交叉和变异遗传操作产生规模为 N 的子代种群。

2) 非支配排序与拥挤度计算。将父代与子

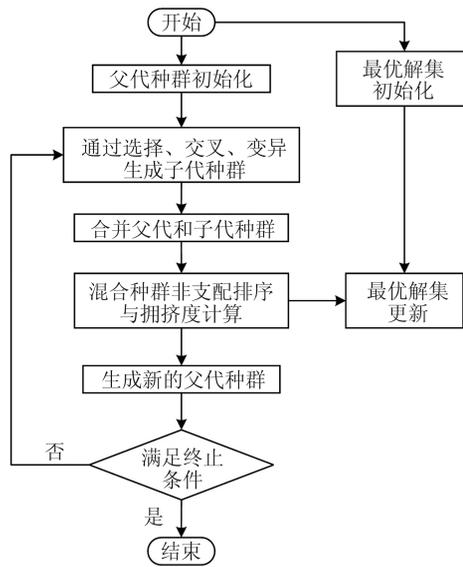


图 4 NSGA-II 算法流程

Fig. 4 Calculation Process of NSGA-II

代种群合并为规模为 $2N$ 的混合种群。对混合种群进行非支配排序,得到不同非支配排序等级的个体集合 P_1, P_2, \dots, P_r , 并计算个体拥挤度,其中非支配等级为 1 的集合 P_1 即为非支配解集。

3) 最优解集更新。将最优解集和非支配解集 P_1 合并重新进行非支配排序,以非支配解集更新最优解集。

4) 种群更新。根据混合种群的拥挤度及其降序排列结果,将拥挤度排序前 N 的个体作为新的父代种群,如图 5 所示。对新的父代种群进行选择、交叉和变异操作,产生新的子代种群。

5) 进化终止判定。若未达到终止条件,则返回步骤 2), 否则终止迭代。

进化终止后,最优解集的适应度构成了目标函数空间中的 Pareto 前沿。

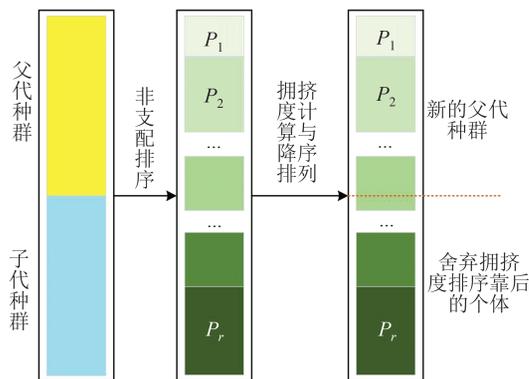


图 5 基于个体非支配关系和拥挤度更新父代种群

Fig. 5 Generation of New Parent Population Based on Non-dominated and Crowding Distance

3.2 遗传操作的实现

NSGA-II 算法中的遗传操作包括选择、交叉和变异,具体如下:

1) 遗传选择操作采用二元锦标赛实现,即首先从当前种群中随机选择两个个体,然后选择其中非支配等级小或拥挤度大的个体。

2) 遗传交叉操作以邻接矩阵为对象进行,该过程包括链路交换和拓扑修复两个步骤:(1) 链路交换。随机选择两个遗传个体,将其对应链路邻接矩阵 $L(A^{(1)})$ 和 $L(A^{(2)})$ 的第 i 行 ($1 \leq i \leq S$) 和第 i 列的所有元素交叉互换,互换元素后的邻接矩阵分别为 $\tilde{L}(A^{(1)})$ 和 $\tilde{L}(A^{(2)})$ 。(2) 拓扑修复。上述元素交换过程可以保证新的邻接矩阵仍然满足星间可见性约束,但可能导致单颗卫星的建链数量超过激光终端数量,为此需要对链路拓扑进行修复。对于邻接矩阵 $\tilde{L}(A^{(1)})$ 和 $\tilde{L}(A^{(2)})$ 中链路数量超出终端数量的所有卫星 i ,将邻接矩阵中第 i 行和第 i 列的部分 1 元素置为 0,即将多余链路逐条拆除,直至修复后的邻接矩阵元素满足终端数量约束。拆除多余链路选择的准则是建链对象的链路数量最多。

3) 遗传变异操作同样以邻接矩阵为对象进行。随机选择遗传个体邻接矩阵中 $l_{i,j} = 0$ 且满足 $v_{i,j} = 1$ 的一个元素,重置邻接矩阵元素 $l_{i,j} = 1$ 及 $l_{j,i} = 1$ 。变异后按照前述方法进行拓扑修复,以满足链路终端数量约束。

4 仿真评估与分析

4.1 仿真场景与参数配置

以搭载激光星间链路终端的全球导航星座为对象,基于本文的模型算法进行激光星间链路规划仿真。全球导航星座采用 Walker 24/3/1 构型,轨道高度为 21 528 km,轨道倾角为 55° 。卫星依次编号为 1~24,其中 1~7、8~16、17~24 号卫星分别运行在 3 个不同的轨道面,每颗卫星搭载 4 套激光星间链路终端。配置 2 个地面监测站,分别位于北京和三亚,地面站最小仰角为 5° 。星间链路终端指向地心,扫描范围为 60° 。

规划仿真时长为 7 d,共包含 168 个链路周期,即激光星间链路周期为 1 h。激光链路网络在 1 h 周期内维持固定的拓扑,其中前 10 min 为激光链路过渡态,后 50 min 为激光链路稳态。对于当前周期的任一链路,如果在上一周期已经存在,则不需要再经历 ATP 建链过程,在当前周期始终

可用;当前周期的新建链路需要经历ATP建链过程,在周期的前10 min为不可用的过渡状态。

NSGA-II算法的种群规模为100,种群交叉率和变异率均为0.2。种群进化过程以最大进化代数数为终止条件,最大进化代数设置为100。

图6为各轨道面卫星和地面站可见的卫星数量。所有卫星对地面站均是间隙可见,同一时段内对地面站可见的卫星数量为6~10颗,位于境外的大部分卫星均需要通过星间链路完成与境内地面站的通信。每颗卫星在各链路周期可见的卫星数量为13~16颗,但受到激光链路终端数量的限制,每个周期仅能与4颗卫星建链,远小于可见卫星数量,因此有必要对建链目标的选择进行优化。

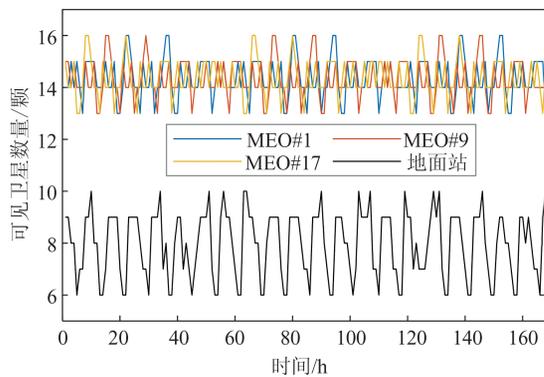


图6 卫星和地面站的可见卫星数量

Fig. 6 Number of Visible Satellites Between Satellites and Ground Stations

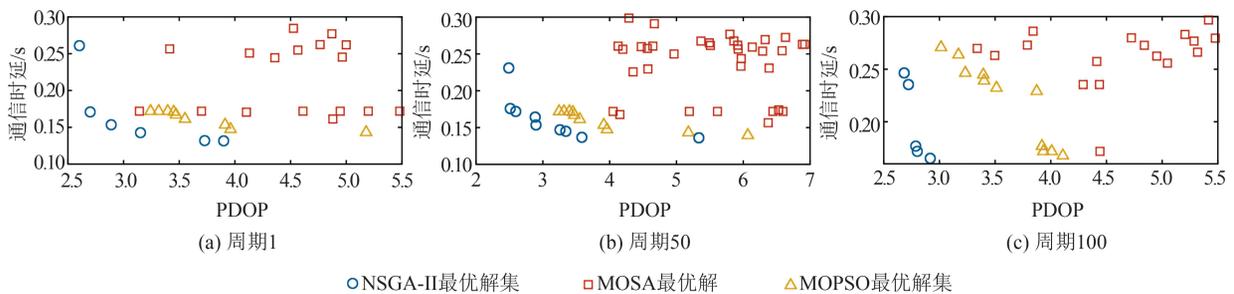


图7 不同算法的最优解

Fig. 7 Optimal Solutions of Different Algorithms

4.3 星间链路网络性能评估与分析

NSGA-II算法得到的是多目标优化问题的非支配最优解集,而非唯一最优解。定义综合最优解为:当非支配最优解集的PDOP不大于3时,最优解为通信时延最小的解;当非支配解集的PDOP均大于3时,最优解为PDOP最小的解。

进一步利用NSGA-II算法对7 d内168个周

4.2 NSGA-II算法性能分析

利用本文的NSGA-II算法进行激光链路拓扑优化,其本质就是为每颗卫星从可见卫星中选择建链目标,以实现整个星座激光链路网络的测距和通信性能最优。为验证NSGA-II算法应用于激光星间链路规划中的性能,将其与MOPSO算法^[15]和MOSA算法^[16]进行比较。

以第1、50、100个链路周期为例,利用3种算法分别进行50次链路规划仿真,规划结果的测距PDOP和对地面站的星间链路通信时延如图7所示。由图7可以看出,不同的链路周期内,基于NSGA-II算法得到最优解集的最小通信时延(3个链路周期分别为0.13 s、0.14 s、0.17 s)和最小测距PDOP(3个周期取值分别为2.6、2.5、2.6)均优于MOSA最优解和MOPSO最优解集。不同规划过程MOSA最优解在二维目标函数空间中散布较大,未稳定收敛,且总是被NSGA-II最优解集所支配。MOPSO算法得到的最优解集也是被NSGA-II最优解集所支配的。激光星间链路规划是一个变量离散优化问题,同时受到复杂约束的限制,导致解空间较为复杂且不连续。相比于MOPSO算法,NSGA-II算法具有更强的全局搜索能力。

另外,由于激光星间链路规划问题受到复杂约束,导致其可行域较小。在50次优化中,NSGA-II最优解集在目标函数空间中形成的Pareto前沿均为少量离散点,也表明了算法在50次仿真中能够稳定收敛到最优解集。

期的激光链路拓扑进行优化。图8为各规划周期稳态各卫星的建链数量,单星瞬时建链数量为3~4条,其中95%的单星建链数量为4,达到最大建链数量。基于综合最优规划矩阵建立激光链路拓扑,图9为稳态的测距链路PDOP和与地面站的通信时延。在导航星座7天的运行过程中,规划得到的激光链路测距链路PDOP指标最大约为3.2,最

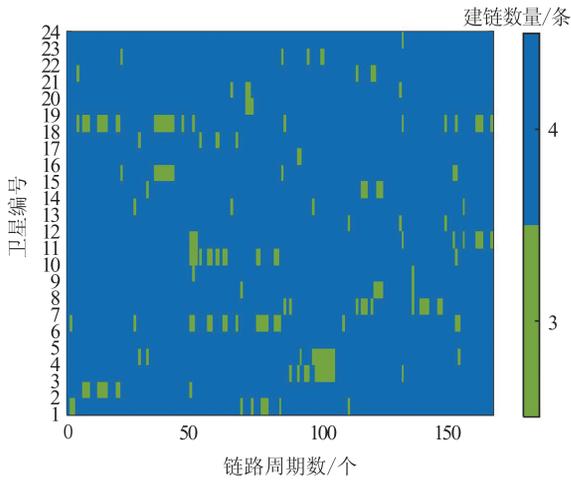


图 8 卫星建链数量

Fig. 8 Number of Laser Links Established by Satellites

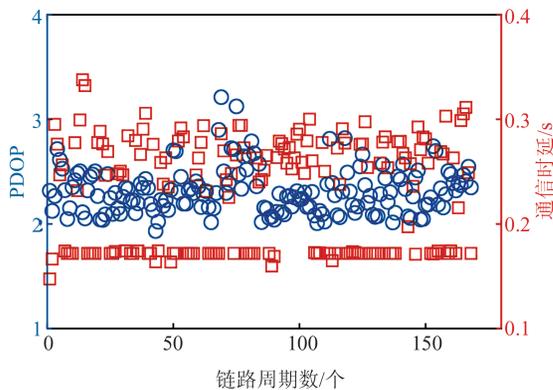


图 9 稳态拓扑性能

Fig. 9 Topological Performance in Steady States

小约为 1.9;同时,导航星座与地面站通信时延指标的最大值约为 0.34 s,最小值约为 0.14 s,表明稳态下的激光链路网络保持了良好的星间测距几何构型以及与地面站的通信效率。

本文的链路规划模型中,通过增加过渡态拓扑的边连通度约束来保证导航星座的整网连通和与地面监测站的通信。为对比过渡态通信性能的改善,在不考虑边连通度约束式(8)的情况下,同步进行各周期的链路拓扑优化。图 10 为链路过渡态下导航星座对地面站的通信时延。在不考虑过渡态边连通度约束的情况下,各个周期过渡态下导航星座与地面站的通信时延指标均为无穷大,即至少有一颗境外卫星不存在到境内卫星的通信路由。当增加过渡态网络边连通度约束后,实现了过渡态下星座的整网连通,保证了所有境外星到境内星的星间通信。通信时延指标的最大值约为 0.43 s,略差于稳态性能,而最小值约为 0.14 s,与稳态指标相当。

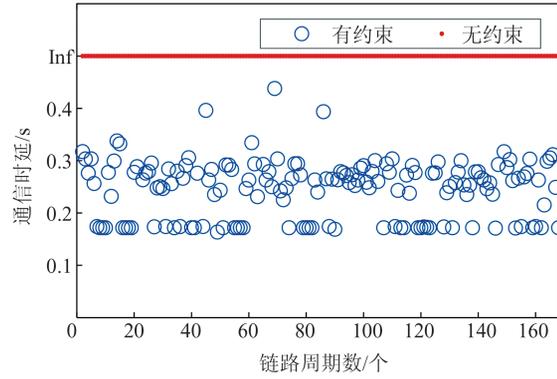


图 10 过渡态通信时延

Fig. 10 Communication Delay in Transition State

5 结 语

本文首先建立了兼顾导航星座星间测距和通信需求的激光星间链路多目标规划模型,规划模型中除了考虑传统的可见性、链路体制、链路终端数量约束外,还引入了链路过渡态拓扑边连通度约束,在保证稳态测距和通信性能的同时,实现链路过渡态的星座整网连通。进一步提出了基于 NSGA-II 算法的链路拓扑多目标优化算法,设计了复杂约束下的遗传操作实现方法。最后针对全球导航星座的激光星间链路规划问题进行了仿真分析。将 NSGA-II 算法与 MOSA 算法进行了对比,NSGA-II 生成的拓扑最优解集能够支配 MOSA 算法生成的最优解,且 NSGA-II 算法能够稳定收敛,更加适合于求解激光链路的多目标优化问题;并利用 NSGA-II 算法对 7 天内所有周期的激光链路进行规划,在 NSGA-II 综合最优解对应的稳态激光链路拓扑中,每颗星的最少建链数量为 3,95% 卫星建链数量为 4,测距 PDOP 为 1.9~3.2,通信时延为 0.14~0.34 s;过渡态的通信时延为 0.14~0.43 s。仿真结果表明,激光链路规划方法能够实现链路稳态下的星间高效通信以及过渡态下的星座整网连通,同时提供少量的星间高精度测距信息。但在激光链路体制约束下,卫星之间需要在链路周期内维持固定拓扑,且链路数量受到激光终端数量的限制,难以满足导航星座空间基准维持需求。在本文所建立的测距、通信性能综合最优激光链路拓扑基础上,下一步将考虑微波链路的最优规划问题,以进一步提升导航星座激光/微波混合链路性能。

参 考 文 献

[1] XIE X, GENG T, ZHAO Q L, et al. Precise Orbit

- Determination for BDS-3 Satellites Using Satellite-Ground and Inter-Satellite Link Observations [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(2): 40.
- [2] RAJAN J A. Highlights of GPS IIR Autonomous Navigation [C]//The 58th Annual Meeting of ION and CIGTF, Albuquerque, USA, 2002.
- [3] LI X B, WANG Y K, CHEN J Y, et al. Rapid Acquisition Assisted by Navigation Data for Inter-Satellite Links of Navigation Constellation [J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2014, E97. B (4): 915-922.
- [4] 王冬霞, 辛洁, 薛峰, 等. GNSS星间链路自主导航技术研究进展及展望[J]. 宇航学报, 2016, 37(11): 1279-1288.
WANG Dongxia, XIN Jie, XUE Feng, et al. Development and Prospect of GNSS Autonomous Navigation Based on Inter-Satellite Link[J]. *Journal of Astronautics*, 2016, 37(11): 1279-1288.
- [5] 李子强, 辛洁, 郭睿, 等. 基于北斗星间链路的卫星自主导航可行性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(1): 55-60.
LI Ziqiang, XIN Jie, GUO Rui, et al. Feasibility Analysis of Autonomous Orbit Determination of BDS Satellites with Inter-Satellite Links [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(1): 55-60.
- [6] PAN J Y, HU X G, ZHOU S S, et al. Time Synchronization of New-Generation BDS Satellites Using Inter-Satellite Link Measurements [J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(1): 145-153.
- [7] ZHANG C, GENG T, XIE X, et al. Analysis of BDS Inter-Satellite Link Ranging Performance [J]. *Advances in Space Research*, 2024, 73(10): 4955-4966.
- [8] 韩凯, 董日昌, 邵丰伟, 等. 基于改进遗传算法的导航卫星星间链路网络动态拓扑优化技术[J]. 航空学报, 2022, 43(9): 326095.
HAN Kai, DONG Richang, SHAO Fengwei, et al. Dynamic Topology Optimization of Navigation Satellite Inter-Satellite Links Network Based on Improved Genetic Algorithm [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(9): 326095.
- [9] XU B B, HAN K, REN Q Y, et al. An Optimized Strategy for Inter-Satellite Links Assignments in GNSS [J]. *Advances in Space Research*, 2023, 71(1): 720-730.
- [10] 李锐, 林宝军, 刘迎春, 等. 激光星间链路发展综述: 现状、趋势、展望[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(3): 133-147.
LI Rui, LIN Baojun, LIU Yingchun, et al. Review on Laser Intersatellite Link: Current Status, Trends, and Prospects [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 133-147.
- [11] 朱简尊, 林玉洁, 胡春源. 面向星间高动态链路的激光通信测距一体化技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2024, 19(7): 598-605.
ZHU Jianzun, LIN Yujie, HU Chunyuan. Integrated Laser Communication Ranging Technology for Inter-satellite High Dynamic Links [J]. *Journal of CAEIT*, 2024, 19(7): 598-605.
- [12] 李星星, 张伟, 袁勇强, 等. GNSS卫星精密定轨综述: 现状、挑战与机遇[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1271-1293.
LI Xingxing, ZHANG Wei, YUAN Yongqiang, et al. Review of GNSS Precise Orbit Determination: Status, Challenges, and Opportunities [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1271-1293.
- [13] 张子瑜, 严志博, 赵康健, 等. 一种考虑链路可靠性的GNSS星间激光链路分配算法[C]//第12届中国卫星导航年会, 南昌, 2021.
ZHANG Ziyu, YAN Zhibo, ZHAO Kanglian, et al. An Inter-Satellite Laser Link Assignment Algorithm for GNSS Considering Link Reliability [C]//The 12nd China Satellite Navigation Conference, Nanchang, China, 2021.
- [14] HUANG Z, GONG W B, SHAO F W. A BeiDou Laser Link Allocation Scheme Based on Network Throughput Optimization [C]//YANG C, XIE J. eds. China Satellite Navigation Conference (CSNC 2021) Proceedings. Singapore: Springer, 2022.
- [15] ZENG L C, LU X C, BAI Y, et al. Topology Design Algorithm for Optical Inter-Satellite Links in Future Navigation Satellite Networks [J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(2): 57.
- [16] LIU S Y, YANG J, GUO X Y, et al. Inter-Satellite Link Assignment for the Laser/Radio Hybrid Network in Navigation Satellite Systems [J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(2): 49.
- [17] 董明佶, 林宝军, 刘迎春, 等. 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[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 217-228.
DONG Mingji, LIN Baojun, LIU Yingchun, et al. Topology Dynamic Optimization for Inter-Satellite Laser Links of Navigation Satellite Based on Multi-Objective Simulated Annealing Method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 217-228.
- [18] CHAUDHRY A U, YANIKOMEROGLU H. Temporary Laser Inter-Satellite Links in Free-Space Optical Satellite Networks [J]. *IEEE Open*

- Journal of the Communications Society*, 2022, 3: 1413-1427.
- [19] 李爽, 李德仁, 程承旗, 等. 空天网格化星间通视及路由路径规划算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(1): 50-57.
LI Shuang, LI Deren, CHENG Chengqi, et al. Aerospace Grid-Based Algorithm of Inter-Satellite Visibility and Route Path Planning for Satellite Constellation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(1): 50-57.
- [20] 曾凌川. 导航卫星激光星间链路信号体制与组网拓扑优化技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学中国科学院国家授时中心, 2023.
ZENG Lingchuan. Research on Signal System and Networking Topology Optimization Technology of Laser Inter-Satellite Link of Navigation Satellite [D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [21] DEB K, AGRAWAL S, PRATAP A, et al. A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II [C]//Parallel Problem Solving from Nature, Berlin, Germany, 2000.
- [22] YAN J G, XING L N, WANG P, et al. A Scheduling Strategy to Inter-Satellite Links Assignment in GNSS [J]. *Advances in Space Research*, 2021, 67(1): 198-208.
- [23] 高媛. 非支配排序遗传算法(NSGA)的研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
GAO Yuan. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA) and Its Application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [24] ZHAO W G, ZHANG Z X, MIRJALILI S, et al. An Effective Multi-Objective Artificial Hummingbird Algorithm with Dynamic Elimination-Based Crowding Distance for Solving Engineering Design Problems [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2022, 398: 115223.