

混合激光/微波链路的导航星座拓扑管理与路由研究

张鑫毅¹, 朱立东¹, 李昕瞳¹, 陈林², 刘禹圻², 李黎², 宋坤²

(1. 电子科技大学通信抗干扰全国重点实验室, 四川成都 611731;

2. 中国电子科技集团公司第二十九研究所, 四川成都 610036)

摘要: 混合激光/微波链路系统能够结合激光链路高速、低时延的优势和微波链路在恶劣环境下的稳定性, 为卫星导航系统提供更可靠、高效的通信服务。以搭载混合激光/微波链路的导航星座为研究对象, 对其导航星座的拓扑与路由展开研究, 构建由 Walker- δ 24/3/1 中地球轨道星座与地球静止轨道、倾斜地球同步轨道卫星组成的混合星座模型, 分析星间链路体制特性。针对链路拓扑设计, 提出激光链路环状与跨环连接方案, 并使用模拟退火算法优化微波链路, 进一步提高定位精度因子; 在此基础上, 提出一种基于图论匹配的测量时隙分配策略与通信时隙路由算法, 并通过仿真验证其有效性。

关键词: 卫星导航星座; 星间链路; 拓扑方案; 时隙分布; 路由算法

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2026009

Research on Topology Management and Routing for Navigation Constellations with Hybrid Laser/Microwave Links

Zhang Xinyi¹, Zhu Lidong¹, Li Xintong¹, Chen Lin², Liu Yuqi², Li Li², Song Kun²

1. National Key Laboratory of Wireless Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

2. Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, China

Abstract: Hybrid laser/microwave links system can combine the advantages of high speed and low latency of laser links and the stability of microwave links in harsh environments to provide more reliable and efficient communication services for satellite navigation systems. Taking the navigation constellation equipped with hybrid laser/microwave links as the research object, and study the topology and routing of its navigation constellation. A hybrid constellation model based on Walker- δ 24/3/1 MEO constellation and GEO, IGSO satellites is constructed to analyse the characteristics of the inter-satellite link system. For the link topology design, a laser link ring and cross-ring connection scheme is proposed, and the microwave link is optimised using a simulated annealing algorithm to further improve the position accuracy factor. On this basis, a measurement time slot allocation strategy and communication time slot routing algorithm based on graph theory matching are proposed, and their effectiveness is verified by simulation.

Keywords: satellite navigation constellations, inter-satellite link, topological scheme, time slot distribution, routing algorithm

0 引言

卫星导航中的星间链路是提升定位精度和时效性的关键手段^[1]。目前各大卫星导航系统, 如全球定位系统

(global positioning system, GPS)、全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)、伽利略导航卫星系统和北斗导航卫星系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)都正积极发展星间链路技术^[2]。传统星间

收稿日期: 2025-09-02; 修回日期: 2025-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(No.62371098); 通信抗干扰全国重点实验室基础科研创新基金(No. FN20230203)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.62371098), National Key Laboratory of Wireless Communications Foundation under Grant(No. FN20230203)

链路多采用微波通信方式,虽具有抗干扰能力强、组网灵活等优点^[3],但在高精度、低时延需求下受限于带宽和传播时延,难以满足复杂环境需求。激光通信则因其高带宽、低时延等优势被视为下一代星间链路的核心技术^[4]。但星地激光链路易受天气、云层等因素影响,且星间激光链路建链还需经过复杂的瞄准捕获跟踪(pointing acquisition tracking, PAT)过程,无法实现全天候稳定工作^[5]。因此,以激光链路为高速率、大容量通信主干,微波链路满足基本测量与通信需求的混合激光/微波导航星座成为该领域的一个重要研究方向。已有学者针对这一方向研究提出多种导航星座拓扑设计方法^[7-9]与路由方案^[8,10]。

本文以混合激光/微波导航星座为研究对象,借鉴有限状态自动机(finite state automaton, FSA)思想,对导航星座进行建模和时隙划分;在此基础上,设计混合链路拓扑结构和分时隙路由策略,使定位精度因子(位置精度衰减因子(position dilution of precision, PDOP))达到最优,同时降低端到端时延,加速路由收敛。

1 混合导航星座模型与链路体制

1.1 导航星座模型

相关文献指出,混合型星座能显著增强GNSS的区域导航性能^[11]。因此,本文针对混合激光/微波导航星座进行研究,选取轨道高度20 000 km、轨道倾角55°的中轨Walker- δ 星座为分析对象,其轨道构型为24/3/1。该星座由24颗中地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星组成,均匀分布在3个轨道平面,每个轨道平面包含8颗MEO卫星。为了拓展卫星导航星座的覆盖区域,提高整个导航系统的性能和可靠性,本文在MEO卫星基础上,引入了3颗地球静止轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星和3颗倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO)卫星。3颗GEO卫星轨道高度为35 786 km,位于亚太区域上空。3颗IGSO卫星轨道高度同为35 786 km,轨道倾角为55°,升交点赤经分别设定为290°、173°和48°,且每两颗卫星之间的真近点角相位差均为120°。

为了清晰辨别每颗卫星所属的轨道类型及其在轨道中的具体位置,便于后续的计算分析和数据统计,本文将3颗GEO卫星分别命名为GEO1、GEO2和GEO3;将3颗IGSO卫星分别命名为IGSO1、IGSO2和IGSO3;将Walker- δ 星座中的24颗MEO卫星分别命名为M11~M38,其中,M后方数字编号的高位表示轨道平面1、2、3,数字编号的低位则表示同一轨道内的卫星编号,在1~8中取

值,导航星座模型如图1所示。例如,M35表示第3个轨道平面中的第5颗卫星。同时,将30颗卫星按GEO、IGSO、MEO的顺序进行1~30的编号。

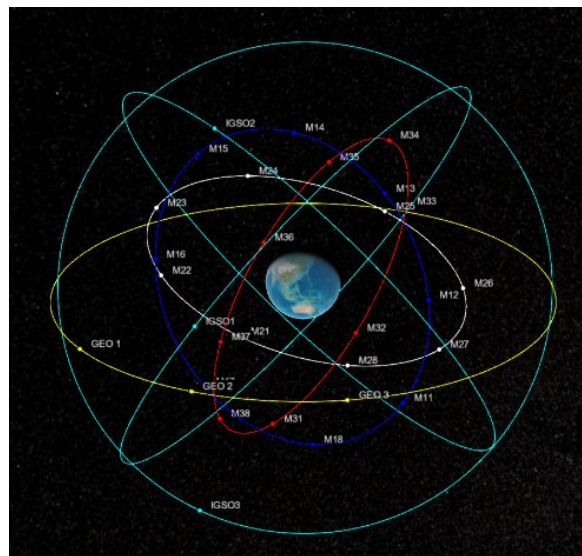


图1 导航星座模型

1.2 导航星座链路体制分析

在卫星链路体制方面,微波链路采用窄波束时分多址技术,支持时分、空分并发连接;激光链路则采用窄波束连续通信技术,每颗卫星可同时与多颗卫星保持长时间稳定连接。每颗卫星配置3个激光端口和一个微波端口,在一个时隙内可建立最多3条激光链路和1条微波链路。

本文基于FSA思想^[12]将卫星网络运行周期划分为若干个等时长的时间区间。每个区间为一个规划时间片段,区间内各卫星的相对位置和相互可见性均被视为恒定不变。本文中,每个时隙长度为3 s,20个时隙(即1 min)为一个子帧,10 min为一个规划时间片段^[8]。

激光星间链路与微波星间链路同时存在,其中激光链路构建通信网络主干,微波链路侧重实现导航星座测量功能,激光与微波协同进行通信服务。为此,本文将在卫星运行周期的一个子帧(1 min)内选取6个时隙作为测量时隙,该时隙内每颗卫星按拓扑设计建立微波链路,保证导航星座测量与自主导航功能的正常实现。在其他14个时隙内,卫星按照通信需求与可见卫星建立微波链路。为保证测量时隙的连续性,本文将每个子帧中的前6个时隙(即时隙1至时隙6)设定为测量时隙,其他14个时隙则为非测量时隙,如图2所示,图中砖红色时隙即为测量时隙,其他时隙为非测量时隙。

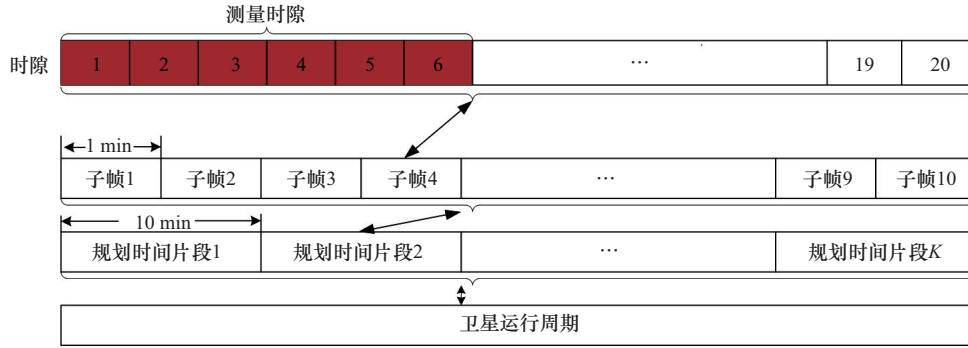


图2 微波测量时隙分布

2 混合导航星座拓扑设计

2.1 星间链路拓扑运行方案

考虑到卫星在实际运行过程中位置动态变化且相对位置呈周期性，本文采用FSA方法对微波拓扑进行分析。在每个时间片段内，认定各节点间的星间可见性不发生变化，因此每个时间片段内的微波链路拓扑结构也保持恒定。该方法能在一定程度上降低微波链路拓扑结构的变化频率，简化微波链路的拓扑设计。

基于以上认定，在一个等长的拓扑规划时间片段内，卫星间的可见性关系保持不变，并将各卫星间的可见性用一个星间可见性矩阵 $V = \{v_{ij}\}$ 表示，该矩阵是 n 维的 0、1 方阵，其中 n 为卫星数量。根据前文的混合星座模型，本文取 $n=30$ 颗。若卫星 i 与卫星 j 可见，则定义 $v_{ij}=1$ ；若卫星 i 与卫星 j 不可见，则定义 $v_{ij}=0$ 。定义 $v_{ii}=0$ 。

在一个规划时间片段内，采用星间链路拓扑矩阵 $L = \{l_{ij}\}$ 描述链路拓扑特征， L 同样为 n 维的 0、1 方阵。元素 $l_{ij}=1$ 表示卫星 i 与卫星 j 在该规划时间片段内建立了星间链路；元素 $l_{ij}=0$ 则表示卫星 i 与卫星 j 在该规划时间片段内未建立星间链路。定义 $l_{ii}=0$ 。

在对混合导航星座的拓扑进行设计时，主要将星间链路拓扑分为激光链路和微波链路两类，因此星间链路拓扑矩阵 L 也可以进一步细分为激光链路拓扑矩阵 L_l 与微波链路拓扑矩阵 L_m ，两者也均为 n 维的 0、1 方阵，且满足下述关系：

$$L = L_l + L_m \quad (1)$$

由于导航星座中卫星间的可见性及卫星间链路的建立在规划时间片段内均需要满足双向性，因此可见性矩阵 V 与星间链路矩阵 L 、 L_l 、 L_m 均为对称矩阵，满足：

$$\begin{cases} V = V^T, v_{ii} = 0 \\ L = L^T, l_{ii} = 0 \\ L_l = L_l^T, (l_l)_{ii} = 0 \\ L_m = L_m^T, (l_m)_{ii} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

2.2 激光链路拓扑设计

激光链路因其高带宽、低时延和强抗干扰能力特性，成为星座通信的骨干网络。每颗卫星配备 3 个激光通信载荷，可同时建立 3 条激光链路。激光链路设计目标是最大化网络连通性，本文将激光链路划分为环状连接与跨环连接两类。

利用 Walker- δ 星座的轨道特性，24 颗 MEO 卫星共构成 3 个轨道平面，每个轨道平面均匀分布 8 颗卫星，虽然卫星处于持续在轨运行状态，但同轨道平面内的 8 颗卫星的相对位置不会发生改变。因此，将同一轨道平面内的 MEO 卫星进行前后互联，构成环状连接。

根据上文对卫星的编号规则，7~14、15~22、23~30 号卫星分别表示 MEO 卫星的 3 个轨道平面，且每个轨道平面各有 8 颗卫星。每颗卫星与其同轨道平面内编号相邻的两颗卫星建立激光星间链路，形成环状拓扑结构。具体公式描述如下：

$$(l_l)_{ij} = \begin{cases} 1, j = i + 1, 7 \leq i \leq 30, (i - 6) \bmod 8 \neq 0 \\ 1, j = i - 1, 7 \leq i \leq 30, (i - 7) \bmod 8 \neq 0 \\ 1, j = i - 7, 7 \leq i \leq 30, (i - 6) \bmod 8 = 0 \\ 1, j = i + 7, 7 \leq i \leq 30, (i - 7) \bmod 8 = 0 \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

由于同轨道中 MEO 卫星的相对俯仰角不随时间发生改变，因此该连接方式的激光链路也不会随卫星运动而改变，能够长久存在，本文将这种连接方式称作激光环状连接。MEO 卫星轨道平面构成的环状连接能提高路由效率，且能确保即使某颗卫星失效，同一轨道平面内的其他 MEO 卫星仍能保持连通性，维持良好的通信性能，

有助于增强链路的鲁棒性。

此外，利用每颗卫星剩余的激光链路（MEO 卫星剩余 1 条、GEO/IGSO 卫星各剩余 3 条）设计跨环连接。跨环连接主要涉及 GEO/IGSO 卫星分别与 3 个 MEO 环进行连接，并通过 MEO-MEO 的激光星间链路将 3 个 MEO 轨道平面进行跨环连接。跨环连接能加强网络拓扑的全局连通性和拓扑容错性。

激光的通信持续时间较长，且跨环卫星间的相对位置会随卫星运动而时刻变化。因此在建立跨环连接时需考虑卫星间的可见性。这里规定：只有当两颗卫星间能保持 1 h 持续可见时，才能建立跨环激光链路。卫星是否满足 1 h 持续可见的条件通过矩阵 $\mathbf{H}=\{h_{ij}\}$ 表示，该矩阵是 n 维的 0-1 方阵，其中 n 为卫星数量。若卫星 i 与卫星 j 满足 1 h 持续可见，则定义 $h_{ij}=1$ ，反之定义为 $h_{ij}=0$ 。定义 $h_{ii}=0$ 。

为求解该问题，本文规定两颗卫星间是否建立连接的求解值为 x_{ij} ， $x_{ij}=1$ 表示卫星 i 与卫星 j 间分配激光星间链路，反之 $x_{ij}=0$ ，故 x_{ij} 的取值为 0 或 1，即：

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i, j \quad (4)$$

跨环激光链路的建立需要满足 1 h 持续可见的要求，即：

$$x_{ij} \leq H(i, j), \forall i, j \quad (5)$$

根据上文对卫星的编号规则，1~3 号对应 3 颗 GEO 卫星，4~6 号对应 3 颗 IGSO 卫星，7~14、15~22、23~30 号分别表示 3 个 MEO 轨道平面的 8 颗卫星。本文规定 MEO 的 3 个环为：

$$\begin{aligned} R_1 &= \{7,8,9,10,11,12,13,14\} \\ R_2 &= \{15,16,17,18,19,20,21,22\} \\ R_3 &= \{23,24,25,26,27,28,29,30\} \end{aligned} \quad (6)$$

在激光跨环连接中，每颗 GEO/IGSO 卫星分别与 3 个不同 MEO 环中的一个节点建立链路，即：

$$\sum_{j \in R_r} x_{ij} = 1, \forall i \in \{1,2,3,4,5,6\}, r \in \{1,2,3\} \quad (7)$$

且每颗 GEO/IGSO 卫星需要建立 3 条激光跨环星间链路，即：

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 3, \forall i \in \{1,2,3,4,5,6\} \quad (8)$$

GEO 和 IGSO 卫星分别与 3 个 MEO 环中的卫星节点进行连接后，每个 MEO 环中均有两颗 MEO 卫星剩余一条星间链路，恰好能实现 3 个 MEO 轨道平面的跨环连接，不同 MEO 环之间需要建立一条激光跨环星间链路，即：

$$\sum_{j \in R_u, j \in R_v} x_{ij} = 1, \forall u, v \in \{1,2,3\}, u \neq v \quad (9)$$

24 颗 MEO 卫星中，每颗卫星在跨环连接中都需要建立 1 条激光链路，即：

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \forall i \in R_r, r \in \{1,2,3\} \quad (10)$$

同时，激光跨环连接也为双向链路，即：

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

联立式(4)~式(10)与式(11)进行求解，得到求解值 x_{ij} 。后，通过式(12)得到激光跨环链路连接矩阵：

$$(L_l)_{ij} = x_{ij}, \forall i, j \quad (12)$$

在环状连接的基础上，将导航星座卫星进行跨环连接，不仅能实现全卫星连通，还能提高网络的容错性和鲁棒性，使整个激光链路构建通信主干网络。即使两颗卫星间的星间链路发生故障或断开，两颗卫星仍能通过其他卫星进行转发保持通信，从而提高整个网络的可靠性和抗干扰能力。

2.3 微波链路拓扑设计

微波链路用于导航测量和基本通信。根据混合星座测量时隙配置，每颗卫星在一个规划时间片段内共需建立 6 条双向微波测量链路，形成一个无向 6-正则图。微波链路设计以平均 PDOP 和平均传播时延为优化目标。其中，PDOP 由链路几何构型决定，值越小代表测量精度越高^[13]，其计算公式可参考文献[14]；传播时延为链路距离与光速的比值。本文将全星座的平均 PDOP 和平均传播时延进行归一化加权求和，最终形成目标函数 F ：

$$F = \alpha \cdot \text{normPDOP} + \beta \cdot \text{normD} \quad (13)$$

其中， α 、 β 分别为 PDOP 与传播时延的权重系数， normPDOP 、 normD 分别为整个卫星系统的平均 PDOP 与平均传播时延的归一化值。

微波链路拓扑优化可以描述如下：基于当前规划时间片段内所得到的卫星星座间的星间可见性矩阵 \mathbf{V} 和卫星间的距离 r_{ij} ，可求得微波链路拓扑矩阵 \mathbf{L}_m ，使优化目标函数 F 值达到最小。数学公式可以描述如下：

$$\begin{aligned} \min F &= \alpha \cdot \text{normPDOP} + \beta \cdot \text{normD} \\ \text{s.t. } C1. & \mathbf{L}_m(i, j) \leq V(i, j), \forall i, j \\ C2. & \sum_{j=1}^n \mathbf{L}_m(i, j) = M, \forall i \\ C3. & \mathbf{L}_m(i, j) \in \{0,1\}, \forall i, j \\ C4. & \mathbf{L}_m(i, j) = \mathbf{L}_m(j, i), \forall i, j \end{aligned} \quad (14)$$

其中，式(14)表示求得一个动态微波链路拓扑矩阵 \mathbf{L}_m ，使其计算得出的优化目标函数 F 值达到最小。约束条件 C1 表示微波链路的建立应满足卫星间的可见性；C2 表示每颗卫星需要建立 M 条微波链路；C3 为拓扑矩阵 \mathbf{L}_m 的取值

范围,即建立微波链路时值为1,不建链时值则为0; C_4 表示微波链路应为双向链路。

可采用模拟退火算法求解该多目标问题。模拟退火算法主要包含 Metropolis 算法和退火过程两部分。其中, Metropolis 算法能在搜索过程中跳出局部最优解,是退火过程实现的基础。Metropolis 算法的核心规则为:在温度为 T 时,设当前状态的代价为 $C_{current}$,新状态的代价为 C_{new} ,若 $C_{new} < C_{current}$,说明新状态优于当前状态,选择接受新状态;若 $C_{new} \geq C_{current}$,说明新状态更差,则只以一定概率接受新状态。综上,新状态的接受概率可描述为如下^[15]:

$$p = \begin{cases} 1, & C_{new} < C_{current} \\ \exp\left(-\frac{C_{new} - C_{current}}{T}\right), & C_{new} \geq C_{current} \end{cases} \quad (15)$$

其中, T 为当前状态的温度,其值会随搜索过程的推进不断下降。

基于模拟退火算法进行微波链路拓扑的优化,其算法流程主要包括以下步骤。

(1) 初始化

设定退火初始化温度 T_0 ,并基于当前规划时间片段所得到的卫星星座间的星间可见性矩阵 V 和卫星位置坐标,使用贪婪算法优先选择剩余度数较多的候选卫星进行建链,得到初始建链矩阵 A_0 。

(2) 迭代搜索

在每个温度状态下对解的邻域进行搜索,以寻找最优解。本文采用双链路交换策略进行邻域搜索:根据目前建链矩阵 $A_{current}$ 随机选择两条已建微波链路 (a,b) 和 (c,d) ,即卫星 a 与卫星 b 、卫星 c 与卫星 d 已建立连接。若卫星 a 与卫星 c 互相可见且未建链,同时卫星 b 与卫星 d 互相可见且未建链,则改变拓扑结构,将两条链路进行交换,即变为卫星 a 与卫星 c 、卫星 b 与卫星 d 的建链,得到当前温度下新状态对应的建链矩阵 A_{new} ,如图 3 所示。

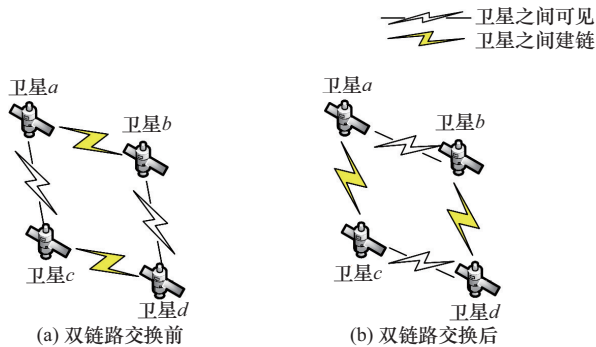


图 3 双链路交换示意

(3) 代价计算

在生成新状态建链矩阵 A_{new} 后,计算每颗卫星的平均 PDOP 与平均传播时延,并通过式(13)计算得到优化目标函数 F 值,即代价值 $C_{new} = F$ 。

(4) 状态转移

通过代价计算得到新状态建链矩阵 A_{new} 情况下的代价值 C_{new} 后,将其与 $C_{current}$ 进行比较,依据 Metropolis 算法并按照式(15)中的概率决定是否接受新状态。同时更新模拟退火温度 $T_{k+1} = \Delta T_k$,以逐步降低退火温度,其中 Δ 为温度衰减因子,通常取 $0 < \Delta < 1$ 。

若迭代次数达到预设值,则结束算法,输出当前建链矩阵 $A_{current}$ 作为最终优化结果 L_m 。本文设计的基于模拟退火算法的动态微波链路优化设计方法流程如图 4 所示。

3 混合导航星座路由方案

3.1 微波链路测量时隙分配方案

微波链路的时隙表模型构建为一个 20×30 的矩阵 S ,对应 20 个时隙、30 颗卫星的建链情况,其中每颗卫星在时隙中各建立一条微波链路:

$$S = \{ M_1, M_2, M_3, \dots, M_{19}, M_{20} \} \quad (16)$$

M_i 为 1×30 的行向量。例如 M_i 表示时隙 i 中卫星的微波链路连接情况:

$$M_i = \{ m_{i,1}, m_{i,2}, m_{i,3}, \dots, m_{i,30} \} \quad (17)$$

其中,元素 $m_{i,a} = b$ 表示卫星 a 与卫星 b 在第 i 个测量时隙中建立微波星间链路;元素 $m_{i,a} = 0$ 则表示卫星 a 在第 i 个测量时隙中未建立微波星间链路。由于微波链路的建立是双向的,因此可以得到:

$$m_{i,m_{ij}} = j \quad (18)$$

在时隙表 S 中, M_1, M_2, M_3, M_4, M_5 和 M_6 为 6 个测量时隙的微波链路分配矩阵。在前 6 个时隙内,卫星根据 6 条微波测量链路进行链路分配;在其余非测量时隙内,卫星按照通信需求选择可见卫星建立微波链路。

对测量时隙的分配可运用图论方法进行分析,该问题可描述为:现有一个无向 6-正则图 $G=(V, E)$,图中节点数量 $|V|=30$,且每个节点的度数 $d(v)=6$ 。将无向图 G 分解为 6 个完美匹配的子图 $\{G_1, G_2, \dots, G_6\}$,使每个子图中的节点度数均为 1,同时要求 6 个子图边集的并集等于原图边集,即原无向图 G 中的所有边均分配至 6 个子图中:

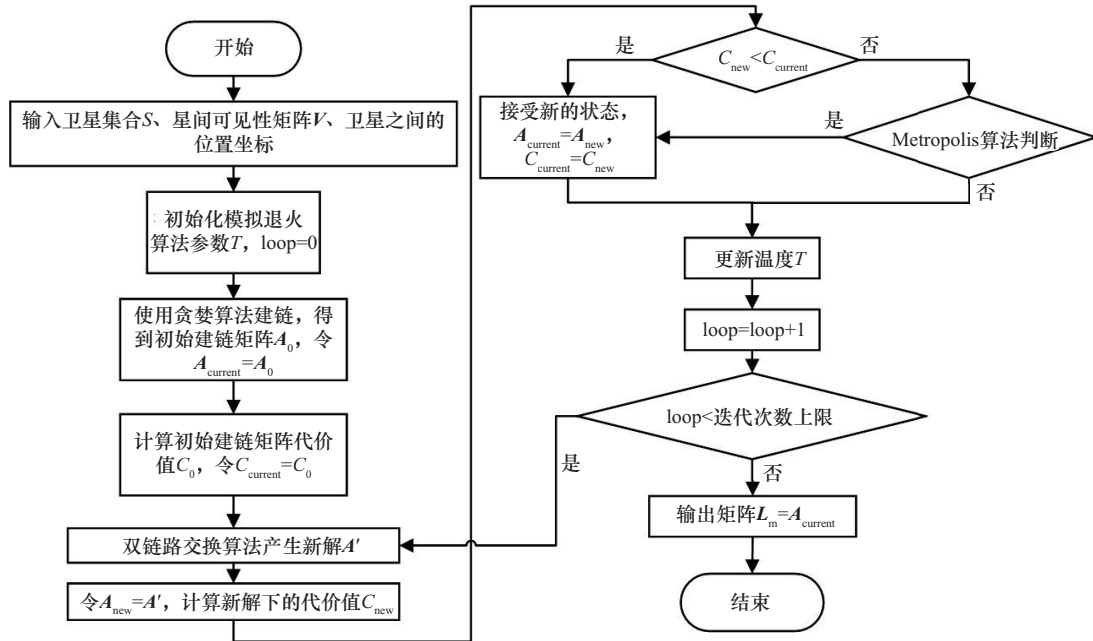


图 4 基于模拟退火算法的动态微波链路优化设计方法流程

$$\bigcup_{i=1}^6 E(G_i) = E \quad (19)$$

同时，不同子图的边集没有交集，原无向图 G 中的每条边只能出现在一个子图中：

$$E(G_i) \cap E(G_j) = \emptyset (i \neq j) \quad (20)$$

微波链路测量时隙分配的问题是将一个 6-正则图分解为 6 个完美匹配的子图，并将这些子图对应到不同时隙，使每个时隙内的微波链路不冲突。本文将该方法称为基于正则图的多时隙分解算法，算法主要包含以下步骤。

(1) 初始化

创建一个 6×30 的矩阵 S ，用于存储每个时隙的匹配结果，所有元素初始值设为 0。根据输入的微波链路邻接矩阵 L_m ，令 $A=L_m$ (A 表示待分配的边集)，并将最大迭代次数设为测量时隙数 (6 次)。

(2) 尝试完美匹配

算法首先根据当前邻接矩阵 A 提取上三角部分边集，生成边列表 $E=\{e\}$ ，并尝试寻找一个完美匹配的子图。定义一个变量 x_e 表示边 e 是否被选中。对于每个节点 $v \in V$ ，都需要满足与该节点相连的所有边中仅有一条边被选中，即：

$$\sum_{e \in \delta(v)} x_e = 1 \quad (21)$$

其中， $\delta(v)$ 表示与节点 v 相连的所有边，而 $x_e=1$ 表示边

e 被选中构成完美匹配的子图， $x_e=0$ 则表示边 e 未被选中：

$$x_e = \{0,1\} \quad (22)$$

(3) 使用最大匹配进行补全

如果在完美匹配搜索中未能找到满足条件的子图，则算法会寻找一个最大匹配子图进行补全。该步骤的主要目标是尽可能选择更多的边，使子图在无法达成完美匹配的情况下，最大程度覆盖图中节点。数学描述如下：

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{e \in E} x_e \\ \text{s.t.} \quad & C1. \sum_{e \in \delta(v)} x_e \leq 1 \\ & C2. x_e \in \{0,1\} \end{aligned} \quad (23)$$

(4) 迭代更新

根据完美匹配或最大匹配结果，将选中的边分配至矩阵 S 中，并更新邻接矩阵 A 。例如：若边 (u,v) 在第 k 次迭代中被选中，则将矩阵 S 中的 $m_{k,u}$ 和 $m_{k,v}$ 分别设为 v 和 u (表示卫星 u 和 v 在第 k 个测量时隙中配对连接)，同时将邻接矩阵 A 中第 u 行第 v 列元素和第 v 行第 u 列的元素设为 0。

若迭代次数达到预设值，则结束算法，并输出当前时隙分配矩阵 S 。本文设计的基于正则图的多时隙分配算法流程如图 5 所示。

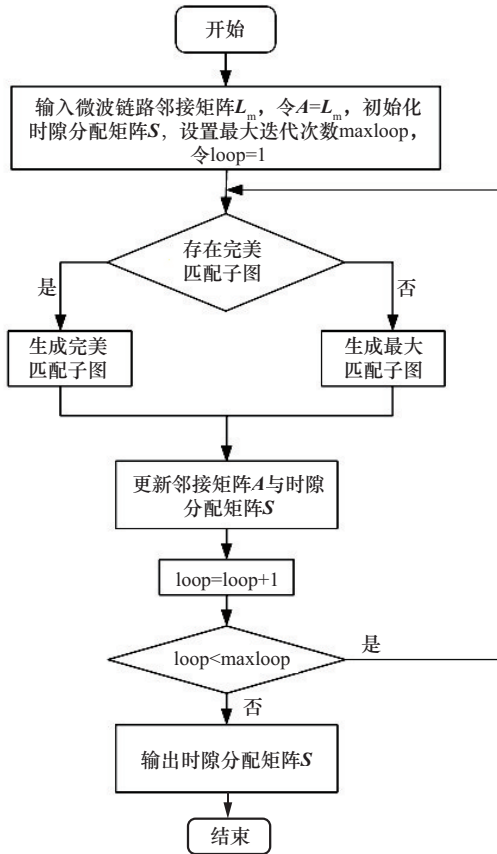


图5 基于正则图的多时隙分配算法流程

3.2 混合导航星座路由方案设计

本文研究的混合导航星座中，每个时隙长度为 3 s，激光链路通信持续时间较长，卫星的激光链路已实现所有卫星节点的互联互通，构成了强大的通信网络主干，且微波链路的分配在测量时隙与非测量时隙存在一定的差异：在前 6 个时隙内，卫星根据前文算法预分配的时隙表进行微波建链；而在其他 14 个非测量时隙内，卫星会在每个时隙开始前，根据当前时隙的通信需求在所有双向可见的卫星中选择链路进行连接。因此，在对混合导航星座路由方案进行设计时，需将路由方案分为测量时隙路由与非测量时隙路由两类分别设计。

本文已对测量时隙微波链路进行了分配，在每个测量时隙内，卫星按照预设的时隙表进行建链，此时的链路拓扑可视为一张静态图。因此在对测量时隙路由方案进行设计时，直接利用 Dijkstra 算法即可求解得到最短路由路径。

在本文的路由设计中，卫星 i 与卫星 j 间的链路代价定义为传输时延 d_{ij} ：

$$d_{ij} = \frac{r_{ij}}{c} \quad (24)$$

其中， r_{ij} 为两颗卫星间的距离， c 为光速。由于光速为确

定值，两颗卫星间的链路代价可简化为卫星间的距离 r_{ij} 。30 颗卫星间的代价矩阵可用 $P = \{p_{ij}\}$ 表示，其中 P 为 n 维对称矩阵， n 为卫星数量，且满足：

$$p_{ij} = r_{ij}, \forall i, j \quad (25)$$

在测量时隙内，若卫星 i 与卫星 j 间已建立星间链路，则将两者间的代价设为两颗卫星间的距离，若两颗卫星间未建链，则令代价为无穷大 (Inf)。

在非测量时隙内，卫星的微波链路没有进行分配，而是根据该时隙当前的通信需求，选择可见卫星进行微波建链。因此，在进行非测量时隙路由方案设计时，不能简单套用 Dijkstra 算法，本文为此设计了基于 Dijkstra 算法的嵌套路由方案。

该算法中设计了两个路径表：Path_available 与 Path_final。其中，Path_available 表用于保存从源节点到目的节点的可选择节点，Path_final 表用于保存最终选择的最优节点，下文分别简称为 PA 表与 PF 表。算法通过嵌套调用 Dijkstra 算法进行节点选择，最终得到最优路由路径，其具体流程如下。

步骤 1：输入初始节点 start、目的节点 end 及代价矩阵 P ，令 $st = start$ ， $en = end$ 。

步骤 2：根据 Dijkstra 算法寻找 st 与 en 间的最短路径，将其存于 PA 表中，并令计数变量 $i = 1$ 。

步骤 3：遍历 PA 表中的节点：若 $PA(i)$ 为目的节点 en ，则结束算法；否则对 PA 表中的每个相邻节点对 $(PA(i), PA(i+1))$ 进行如下处理。

步骤 3.1：若节点 $PA(i)$ 与 $PA(i+1)$ 间存在激光链路，则直接进入步骤 4。

步骤 3.2：若节点 $PA(i)$ 与 $PA(i+1)$ 间不存在激光链路，则判断 $PA(i)$ 与 $PA(i+1)$ 两个节点是否已连接微波链路：若两者均未连接微波链路，则将两个节点进行微波连接，更新时隙表 S 中当前时隙的连接情况，并更新代价矩阵，分别将节点 $PA(i)$ 、 $PA(i+1)$ 与其他节点间的链路代价设为 Inf，随后进入步骤 4。

步骤 3.3：若节点 $PA(i)$ 与 $PA(i+1)$ 之间不存在激光链路，且其中任一节点已连接微波链路，则令 $st = PA(i)$ ，返回步骤 2。

步骤 4：将节点 $PA(i)$ 存于 PF 表中，并令 $i = i + 1$ ，返回步骤 3。

在非测量时隙内，卫星 i 与卫星 j 间的链路代价定义也与测量时隙不同：若卫星间已建立激光链路，或两颗卫星互相可见，则将二者间的链路代价设为两颗卫星间的距离；若两颗卫星间既没建立激光链路也互相不可见，则令代价为 Inf。

4 仿真结果分析

本文使用 MATLAB 仿真软件对混合导航星座的拓扑设计与路由方案进行仿真，选定一个规划时间片段，在该规划时间片段内，卫星相对位置与星间可见性保持不变，仿真时间为 1 January 2025 04:00:00.000 UTCG。

4.1 混合导航星座拓扑仿真

在激光链路方面，MEO 轨道平面内的卫星按序形成环状激光连接，GEO/IGSO 卫星与 3 环及环间卫星建立跨环激光链路。最终，每颗卫星均具备 3 条激光链路，形成联通网络主干，其拓扑结构如图 6 所示。

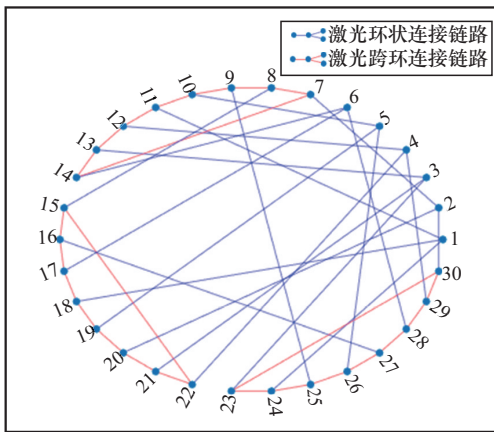


图 6 激光链路拓扑结构

由图 6 可知，每个节点均有 3 条连接，对应每颗卫星需要连接 3 条激光星间链路。其中，红色连接线表示 MEO 激光环状连接链路，可以看到 7~14、15~22、23~30 号卫星均形成了环状。蓝色连接线表示激光跨环连接链路，1~6 号卫星的 3 条连接分别连接至 3 个环状结构，且 3 个环也互联互通。

在微波链路拓扑设计中，本文基于模拟退火算法对网络拓扑优化性能进行仿真，具体的相关仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数

参数	值
卫星数量/颗	$n = 30$
每颗卫星微波链路数量/条	$M = 6$
初始温度	$T_0 = 0.2 \times C_0$
迭代次数/次	loop = $n \times 1000$
降温系数	$\Delta = 0.98$
平均 PDOP 权重	$\alpha = 0.5$
平均传播时延权重	$\beta = 0.5$

算法的初始退火温度由首次建链生成拓扑的优化目标函数值确定，且迭代次数与卫星数量有关。在本次仿真中，由于平均 PDOP 值与平均传播时延具有同等重要性，因此将二者的权重系数均设为 0.5。算法的收敛过程如图 7 所示。

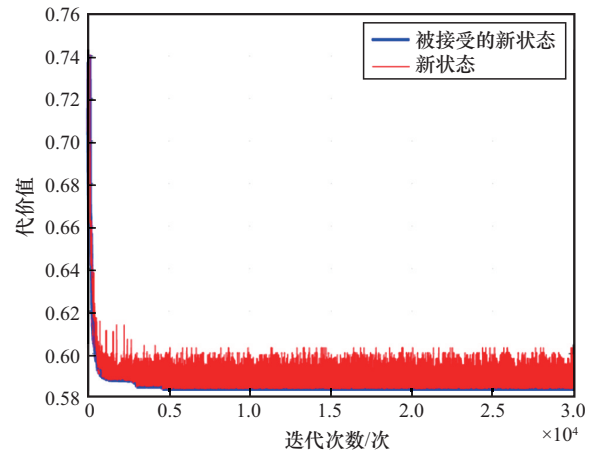


图 7 卫星模拟退火算法收敛过程

图 7 中的横轴为模拟退火算法的迭代次数，纵轴代价值表示由式(15)计算得到的优化目标函数值。红色曲线表示模拟退火算法迭代过程中产生的新状态代价值，蓝色曲线表示被接受的新状态代价值。由图 7 可知，算法在迭代 5 000 次后开始收敛，且收敛结果相较于初始状态提升了 21.16%。在收敛状态下，对卫星的平均 PDOP 值进行统计，并与传统的贪婪建链算法进行对比，所得结果如图 8 所示。

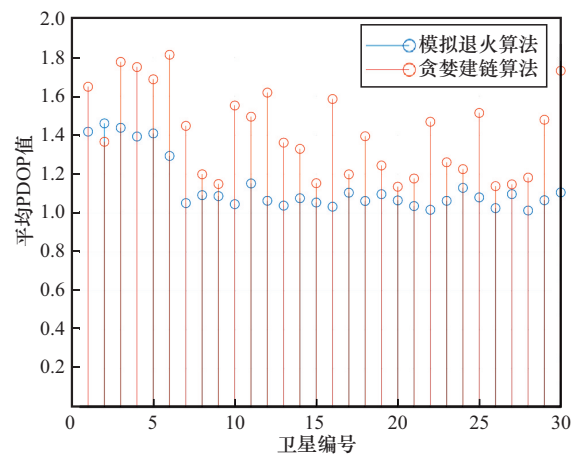


图 8 卫星平均 PDOP 值

由图 8 可以看出，在模拟退火算法下卫星 2（即 IGSO2 卫星）的平均 PDOP 值最大，为 1.46。且与传统贪婪建链算法对比，每颗卫星的平均 PDOP 值均更小，整体

定位精度更优。

基于上述优化结果，最终得到在本文设定的规划时间片段内的微波链路拓扑结构，如图9所示。

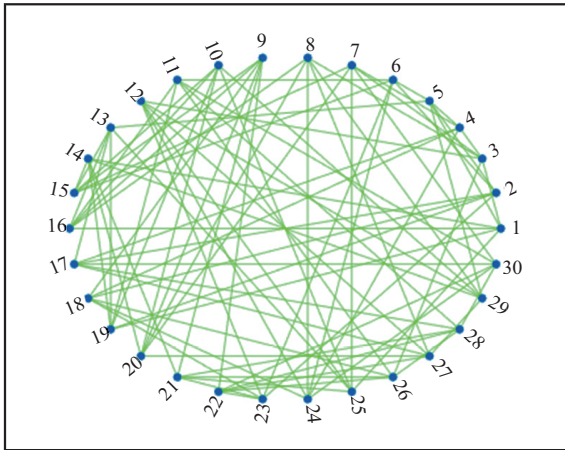


图9 微波链路拓扑结构

图9中拓扑为6-正则图，每个节点的度数均为6，表示每颗卫星在规划时间片段内共建立6条微波测量链路。

4.2 测量时隙链路分配结果仿真

本文对子帧中的前6个测量时隙进行微波链路分配，利用基于6-正则图的多时隙分解算法进行仿真，得到各测量时隙下的卫星微波链路连接情况，如图10所示。

	时隙1	时隙2	时隙3	时隙4	时隙5	时隙6
1	19	25	5	14	16	3
2	6	23	19	17	18	5
3	12	26	4	7	8	1
4	24	18	3	5	7	17
5	29	13	1	4	6	2
6	2	24	11	23	5	15
7	25	20	15	3	4	30
8	27	29	16	24	3	20
9	22	21	20	18	15	16
10	20	15	25	16	29	19
11	30	16	6	19	28	26
12	3	27	23	29	25	24
13	16	5	17	15	19	25
14	15	19	21	1	20	29
15	14	10	7	13	9	6
16	13	11	8	10	1	9
17	28	30	13	2	27	4
18	26	4	24	9	2	23
19	1	14	2	11	13	10
20	10	7	9	27	14	8
21	23	9	14	25	26	28
22	9	28	30	26	23	27
23	21	2	12	6	22	18
24	4	6	18	8	30	12
25	7	1	10	21	12	13
26	18	3	28	22	21	11
27	8	12	29	20	17	22
28	17	22	26	30	11	21
29	5	8	27	12	10	14
30	11	17	22	28	24	7

图10 测量时隙下的卫星微波链路连接情况

图10中，行表示卫星编号，列表示时隙，例如第3行第5列值为8，表示在时隙5内卫星3与卫星8建链。统计结果表明，每个时隙内每颗卫星均仅有一条微波链路，与设计的完美匹配一致，验证了所提算法成功实现了6-正则图到6个完美匹配的分解。

4.3 混合导航星座路由仿真

本文将路由方案分为测量时隙与非测量时隙两种，由于数据传输均只在一个时隙内完成，因此时延只包含传输时延与传播时延，不涉及等待时延。在本次仿真中，设定微波链路传输速率为1 Mbit/s，激光链路传输速率为10³ Mbit/s，数据包大小为10 kbit。本文选择时隙1与时隙7分别代表测量时隙与非测量时隙，对卫星的平均端到端时延及平均路由收敛时间进行分析。

卫星端到端时延定义为从起始节点到目的节点的时延。测量时隙与非测量时隙下的卫星平均端到端时延如图11所示。

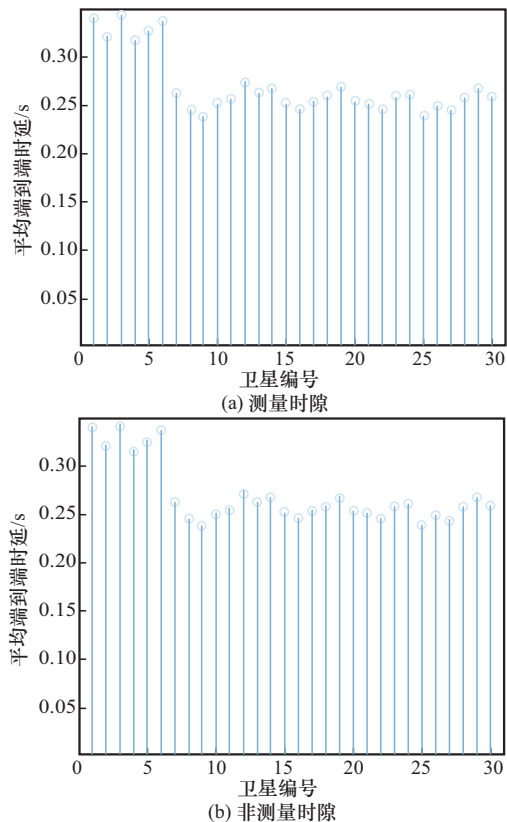


图11 测量时隙与非测量时隙下的卫星平均端到端时延

可以看出，在测量时隙内的系统平均端到端时延为0.271 s；在非测量时隙内，卫星可以根据通信需求选择最优链路进行连接，因此，其整体端到端时延低于测量

时隙，平均端到端时延为0.198 s。

路由收敛时间是指卫星向其他所有卫星同时广播同一数据消息时的最高时延。测量时隙与非测量时隙下的卫星平均路由收敛时间如图 12 所示。

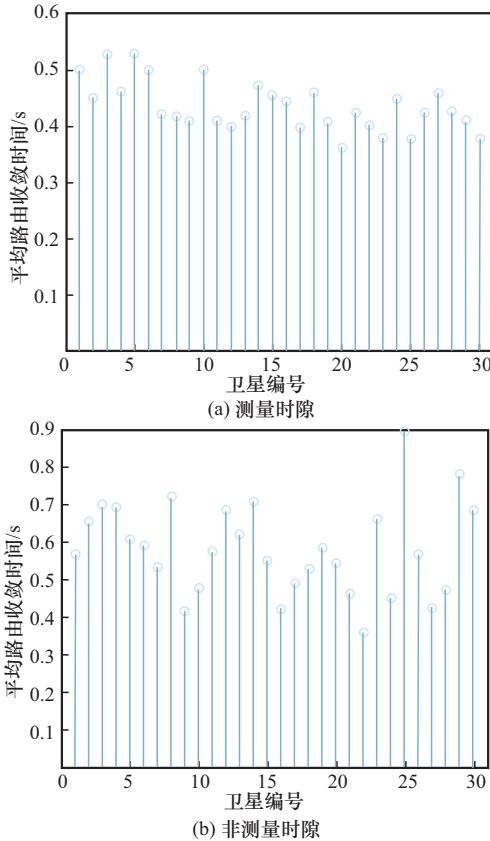


图 12 测量时隙与非测量时隙下的卫星平均路由收敛时间

测量时隙内的卫星平均路由收敛时间为0.436 s。非测量时隙内，当一颗卫星同时向其他所有卫星广播时，此时需求为单颗卫星同时发送多个业务，卫星首先根据广播需求得到该非测量时隙的微波建链关系，再根据时隙表进行路由计算，此时卫星的平均路由收敛时间为0.582 s。

将上述所有的测量时隙与非测量时隙中的平均端到端时延与平均路由收敛时间进行统计，结果见表 2。

表 2 不同时隙下的路由性能仿真结果

参数	测量时隙	非测量时隙
平均端到端时延	0.271 s	0.198 s
平均路由收敛时间	0.436 s	0.582 s

5 结束语

本文针对混合激光/微波导航星座的拓扑构建与路由

优化进行研究，取得了一定成果，但仍存在不足。未来研究将从以下方面展开：其一是优化拓扑设计方案，引入链路负载、地面回传跳数等指标，提升微波链路综合性能；其二是改进测量时隙分配机制，设计回溯算法以寻找最优分解结果，使卫星在单个时隙内连接更多链路；其三是优化路由方案，加入半双工体系并设计收发等待时延模型；其四是完善路由评价体系，加入吞吐量、吞吐率等指标，以期全面提升系统性能。

参考文献

- [1] 罗大成, 刘岩, 刘延飞, 等. 星间链路技术的研究现状与发展趋势[J]. 电讯技术, 2014, 54(7): 156-164.
Luo D C, Liu Y, Liu Y F, et al. Present status and development trends of inter-satellite link[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(7): 156-164.
- [2] 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 D X, Xin J, Xue F, et al. Development and prospect of GNSS autonomous navigation based on inter-satellite link[J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(11): 1279-1288.
- [3] 刘学武. 激光微波混合卫星通信网络 QoS 路由技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
Liu X W. Research on QoS routing technology of laser-microwave hybrid satellite communication network[D]. Xian: Xidian University, 2015.
- [4] 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): 125-139.
Li R, Lin B J, Liu Y C, et al. Review on laser intersatellite link: Current status, trends, and prospects[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(3): 125-139.
- [5] 徐森, 史浩东, 王超, 等. 空间目标多维度探测与激光通信一体化技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1206002.
Xu M, Shi H D, Wang C, et al. Technology for integrating space object multidimensional detection and laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1206002.
- [6] 冯刚. 混合激光/微波通信系统仿真与切换技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
Feng G. Research on simulation and switching technology of hybrid laser/microwave communication system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- [7] 王呈倬. 导航星座激光/微波星间链路协同网络拓扑与路由研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
Wang C Z. Research on topology and routing of cooperative network of laser/microwave inter-satellite links in navigation constellation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.

[8] 张方. 卫星导航系统星间链路拓扑及路由设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
Zhang F. Topology and routing design of inter-satellite links in satellite navigation system[D]. Xian: Xidian University, 2019.

[9] 熊珮云, 张毅, 商科峰, 等. 星间链路组网拓扑设计与优化技术综述与展望[J]. 航天技术与工程学报, 2025, 2(4): 11-23.
Xiong P Y, Zhang Y, Shang K F, et al. Review and prospect of inter-satellite link networking topology design and optimization technology[J]. Journal of Space Technology and Engineering, 2025, 2(4): 11-23.

[10] Liu Y J, Liu C Y. Distributed dynamic routing algorithm for satellite constellation[C]//Proceedings of the 2018 10th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN). Piscataway: IEEE Press, 2018: 300-304.

[11] 吴光耀. 星间链路网络高效组网与传输协议研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2017.
Wu G Y. Research on efficient networking and transmission protocol of inter-satellite link network[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.

[12] Xu Y, Chang Q, Yu Z J. On new measurement and communication techniques of GNSS inter-satellite links[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(1): 285-294.

[13] 张育林. 卫星星座理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Zhang Y L. Satellite constellation theory and design[M]. Beijing: Science Press, 2008.

[14] 刘文祥. 卫星导航系统高精度处理与完好性监测技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
Liu W X. Research on high-precision processing and integrity monitoring technology of satellite navigation system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.

[15] 陈华根, 吴健生, 王家林, 等. 模拟退火算法机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 802-805.
Chen H G, Wu J S, Wang J L, et al. Mechanism study of simulated annealing algorithm[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(6): 802-805.

[作者简介]



张鑫毅 (2003-), 男, 电子科技大学通信抗干扰国家重点实验室硕士生, 主要研究方向为卫星通信、卫星导航。



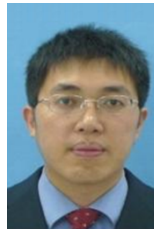
朱立东 (1968-), 男, 电子科技大学通信抗干扰国家重点实验室教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星通信、卫星导航、星地网络融合、抗干扰与安全通信等。



李昕瞳 (2001-), 男, 电子科技大学通信抗干扰国家重点实验室博士生, 主要研究方向为卫星网络路由、卫星资源分配等。



陈林 (1982-), 男, 中国电子科技集团公司第二十九研究所研究员, 主要研究方向为卫星导航、卫星对抗、侦查等。



刘禹圻 (1983-), 男, 中国电子科技集团公司第二十九研究所研究员, 主要研究方向为卫星导航。



李黎 (1994-), 男, 中国电子科技集团公司第二十九研究所工程师, 主要研究方向为卫星导航、人工智能等。



宋坤 (1983-), 男, 中国电子科技集团公司第二十九研究所高级工程师, 主要研究方向为卫星导航、高精度时间比对等。