

北斗导航系统星地/星间链路一体化规划

王楠¹, 孙乐园^{2*}, 牛轶峰¹, 黄文德³

(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. 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030)

摘要:为了解决仅依靠星间链路的自主运行导航星座缺乏时空基准的问题,北斗卫星导航系统引入地面锚固站,与空间卫星共同构成可自主运行的星地/星间一体化网络。在星间链路体制、可见性、载荷数量约束下,建立北斗系统星地/星间链路网络一体化规划模型,提出基于网络分层的层间链路规划算法,以及基于模拟退火算法的测距链路位置精度衰减因子(position dilution of precision, PDOP)和网络连通度多目标优化算法。根据规划仿真结果,锚固站可以最少链路跳数实现向空间卫星的信息分发;卫星测距链路PDOP均小于1.4,且接近其参考下限;星地/星间一体化网络连通度优于3。结果表明,一体化规划算法能够满足锚固站向卫星的信息快速分发、网络空间基准维持的测距以及网络稳健性等性能需求。

关键词:导航星座;锚固站;链路规划;测距与通信;网络连通度

中图分类号:V474.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2025)04-197-09



论文
拓展

Integrated assignment of satellite-station/inter-satellite links for the BDS

WANG Nan¹, SUN Leyuan^{2*}, NIU Yifeng¹, HUANG Wende³

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Xichang Satellite Launch Center, Haikou 570100, China; 3. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China)

Abstract: In order to solve the problem of lacking of time and space references of the autonomous navigation satellite constellation relying on inter-satellite links, the BeiDou satellite navigation system has introduced ground anchor stations which jointly constitute an integrated satellite-station network with the space satellites. With the constraints of inter-satellite link system, visibility and load quantity, the integrated assignment model of satellite-station/inter-satellite links was established. The shortest information transfer link assignment algorithm based on network layers, and the multi-objective optimization algorithm of ranging link PDOP(position dilution of precision) and network connectivity based on the simulated annealing algorithm were proposed. According to the simulation results, the reference information from the anchor station can be distributed to satellites with the fewest link hops. The PDOP of satellite ranging links is less than 1.4 and close to the lower limitation. The connectivity of the integrated network is better than 3. It is demonstrated that the integrated assignment algorithm can satisfy the requirements of fast information distribution from the anchor station to satellites, ranging for space reference maintenance and network robustness.

Keywords: navigation satellite constellation; anchor station; link assignment; ranging and transmission; network connectivity

为了在区域监测站条件下提供有竞争力的全球服务,第三代北斗卫星导航系统采用了窄波束时分星间链路技术^[1]。每颗卫星都搭载微波星间链路设备,进行星间测量和通信,从而提高导航星座的定轨和时间同步精度,并最终实现星座自主运行^[2-3]。但对于窄波束时分体制的星间链

路,由于载荷数量的限制,每颗卫星可建立的瞬时星间链路数量远小于可见卫星数量,由此就带来了兼顾测量和通信需求的星间链路资源规划问题^[4-6]。

导航星间链路的通信功能主要为地面运控系统控制指令分发和星座运行数据回传提供无线路

收稿日期:2024-01-29

基金项目:上海市空间导航与定位技术重点实验室开放课题资助项目(202105)

第一作者:王楠(1980—),男,湖北宜昌人,副研究员,博士,硕士生导师,E-mail:acnwang@aliyun.com

*通信作者:孙乐园(1980—),男,重庆奉节人,工程师,博士,E-mail:sly_nudt@163.com

引用格式:王楠,孙乐园,牛轶峰,等.北斗导航系统星地/星间链路一体化规划[J].国防科技大学学报,2025,47(4):197-205.

Citation: WANG N, SUN L Y, NIU Y F, et al. Integrated assignment of satellite-station/inter-satellite links for the BDS [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(4): 197-205.

径。对于星间通信功能的实现,导航星间链路规划主要关注星间路由的优化。Hou 等^[7]基于有向图理论描述了指向性导航星间链路的信息传递过程,提出了基于 Dijkstra 算法的最短路由确定方法。王彦等^[8]基于演化图理论建立了导航星座的动态网络拓扑结构。

导航星间链路的测量功能主要为导航系统时空基准维持提供星间相对时空测量信息。Kur 等^[9]仿真分析了不同星间链路方案所提供的星间测量信息对于导航卫星精密定轨和钟差估计的性能提升。Sun 等^[10]针对导航星座自主运行模式下时空基准维持的星间测量需求,以星座整网时间比对链路跳数和测距链路的位置精度衰减因子(position dilution of precision, PDOP)为链路规划量化指标,确定了自主运行模式下的导航星座最优链路拓扑。Xu 等^[11]引入链路代价模型并利用图论中的 Blossom 算法进行链路的传输时延和 PDOP 优化。Han 等^[12]考虑已分配链路对后续链路分配的反馈效应,提出了一种基于符号方差的自适应拓扑优化算法。

星间链路的设计初衷是通过星间相对测量和通信实现星座的自主运行^[13]。但是仅依靠星间相对测量进行精密定轨和时间同步是一个典型的自由网平差问题^[14]。为了解决缺乏空间惯性基准和时间基准的问题,抑制星座的整体旋转,北斗系统引入了锚固站技术。锚固站最早由 Rajan 等^[15]提出,其主要作用是向卫星提供地面时间和空间基准。通过装备与空间卫星相同的星间链路载荷,锚固站可在星间链路体制下与卫星之间进行双向通信和测量,为空间卫星提供测量节点的同时,完成时空基准信息的分发。锚固站的本质可视为布设在地面的伪卫星,相应的星地链路可看成星间链路,与导航星座构成一个天地一体化网络^[16]。与空间卫星不同的是已知伪卫星的坐标和钟差,从而为自主运行状态下的天地一体化网络引入惯性基准。在天地一体化网络中,地面和空间节点都基于统一的星间链路体制进行数据交互和时空测量,同时也受到了窄波束时分星间链路体制的约束。每个节点在任一时段内能够建立的链路数量受到链路载荷数量的限制,需要通过在不同时段与不同可见节点建链实现网络端到端连通。为了实现自主运行状态下的天地一体化网络高效精准通信和测量,就需要对网络有限的链路资源进行统一规划,这一问题在现有的公开研究中尚未涉及。当前北斗星间链路的规划主要针对有地面主控站、监测站支持的系统常规运行

状态。同时由于主控站和监测站采用了不同于星间链路的通信体制,难以用一个统一链路规划模型描述。

本文针对锚固站支持下的北斗星座自主运行状态,面向星地/星间链路一体化网络的稳健性以及测量通信需求,建立链路一体化规划模型,提出基于网络分层的最短信息分发链路规划算法,以及基于模拟退火算法的测距链路 PDOP 和网络连通度多目标优化算法。最后进行星地/星间链路网络一体化规划仿真,评估网络性能并验证方法有效性。

1 星地/星间链路一体化规划建模

1.1 链路拓扑的矩阵描述

在基于北斗时分窄波束链路体制的天地一体化网络中,地面锚固站以及空间卫星都可视为网络节点,各节点之间通过建立双单向链路分时进行信号收发。每个节点搭载一套星间链路载荷,每次只能与一个可见节点建立链路,并通过分时方式实现与不同节点的连接。每个节点与其他可见节点建立链路的过程可以等效为一个如图 1 所示的时间离散系统。由于锚固站和卫星在地心参考系中的空间位置都具有周期重复性,可以将系统时间划分为多个运行周期。该运行周期取卫星星座的回归周期。各个运行周期的锚固站与空间卫星相对位置具有重复性,因而可采用相同的链路拓扑。

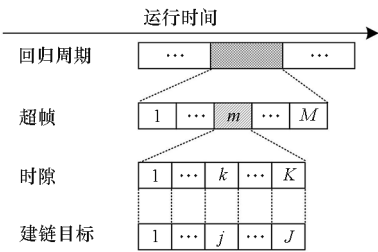


图 1 星地/星间链路的等效时间离散系统
Fig. 1 Equivalent time-discrete system of satellite-station/inter-satellite links

将每个运行周期划分为 M 个等时间长度的超帧。为将连续时间问题离散化,当两个节点在一个超帧内持续可见时则认为在该超帧可见,否则视为不可见。超帧是执行链路规划的基本单元。如果超帧的时间长度取得过大,将造成可见性的损失,如果取得过小又失去离散化的意义。当前相关研究通常将超帧时间长度取为 1 min ^[17]。经过上述离散化处理后,各网络节点之间的可见性在每个超帧内保持不变。各超帧内的节点间可见

性关系采用一个可见性矩阵 $\mathbf{V}_s \in \mathbf{R}^{S \times S}$ 进行描述,其中 S 为锚固站和空间卫星节点数量。矩阵元素 $v_{s(i,j)}$ 按 0 和 1 赋值: $v_{s(i,j)} = 1$ 表示节点 i 和 j 在当前超帧内可见,0 为不可见。两个节点之间能够建立链路的前提是相互可见^[18]。

超帧可进一步均分为 K 个等时间长度的时隙,时隙是链路建立和保持的基本单元。各节点在每个时隙可与一个可见节点建立链路,并轮流进行信号收发。时隙之间可切换建链目标,从而分时实现与多个节点建链,如图 1 所示。整个星地/星间链路网络中 S 个节点在时隙 k ($k = 1, 2, \dots, K$) 的建链关系形成了一个静态拓扑结构,用对称拓扑矩阵 $\mathbf{L}^{(k)} \in \mathbf{R}^{S \times S}$ 描述,该矩阵为 0-1 矩阵。元素 $l_{ij}^{(k)} = 1$, 表示节点 i 与 j 在时隙 k 建链; $l_{ij}^{(k)} = 0$, 表示 i 与 j 在当前时隙无链路连接。一个超帧内 K 个时隙的拓扑矩阵则描述了相应时段内网络的动态拓扑结构,可整合为一个链路规划矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{S \times K}$ 。时隙 k 的拓扑矩阵对应规划矩阵 $\mathbf{A}$ 的第 k 列。矩阵 $\mathbf{A}$ 的第 i ($i = 1, 2, \dots, S$) 行则定义了节点 i 在相应超帧内各时隙的建链目标。矩阵元素 $a_{i,k} = j$ 表示节点 i 与节点 j 在时隙 k 建立链路,相应有 $a_{j,k} = i, l_{ij}^{(k)} = l_{ji}^{(k)} = 1; a_{i,k} = 0$ 表示节点 i 在时隙 k 闲置,相应有 $l_{i,\cdot}^{(k)} = l_{\cdot,i}^{(k)} = 0$ 。

1.2 链路规划目标

1.2.1 信息分发链路跳数

在星地/星间一体化网络中,锚固站固连在地球表面,位置精确已知,并且可与导航系统地面段实时连接,因此可为一体化网络引入惯性空间基准和时间基准。北斗星地/星间一体化网络中的信息传输链路规划需要实现锚固站向所有星座卫星的信息快速分发。对于锚固站可见的空间卫星,可直接在闲置时隙建立星地链路完成信息传输,相应的数传链路跳数为 1。而对于锚固站不可见的空间卫星,需要同时借助星地链路和星间链路才可完成信息传输,当所需的星间链路数量为 $w-1$ 时,数传链路跳数为 w 跳。为了实现锚固站向导航星座的时空基准信息快速分发,需要锚固站向空间卫星分发信息所需的链路跳数尽可能少。以最小化锚固站向空间卫星信息分发链路最大跳数作为链路优化目标之一。

$$\min J_1(\mathbf{A}) = \max_{i \in D_{\text{Sat}}} \eta_i \quad (1)$$

式中, η_i 为锚固站向卫星 i 的信息传递链路跳数, D_{Sat} 为空间卫星编号集合, $J_1(\mathbf{A})$ 为锚固站完成向所有空间卫星信息分发所需的最大链路跳数。

1.2.2 测距链路 PDOP 与链路数量

除支持锚固站与空间卫星等网络节点信息传

递以外,导航星间链路还具备星间测距功能,从而为一体化网络的空间基准维持提供空间测量信息。空间基准维持通过星地/星间联合精密定轨实现。为保证定轨精度,要求卫星测距链路具有良好的几何构型,同时可提供足够的距离测量信息。卫星 i 在一个超帧内所建立的测距链路几何构型可以用 PDOP 量化,即

$$P_i = \text{tr}[(\mathbf{H}_i^T \mathbf{H}_i)^{-1}] \quad (2)$$

式中, $\mathbf{H}_i$ 为卫星 i 在一个超帧内所建立的 l_i 条测距链路所构成的测量矩阵^[19], P_i 即为相应的 PDOP 值。 P_i 越小,表明卫星 i 测距链路几何构型越好。因此,测距链路规划以最小化各卫星测距链路 PDOP 的最大值为目标。同时,通过约束每个卫星节点所建立的不同链路数量来保证测距链路提供的信息量。由此得到链路规划的另一个目标

$$\min J_2(\mathbf{A}) = \max_{i \in D_{\text{Sat}}} P_i \quad (3)$$

即最小化各卫星测距链路 PDOP 的最大值。式中, $J_2(\mathbf{A})$ 即为所有卫星测距链路 PDOP 的最大值。而每颗卫星所建立的测距链路数量约束为

$$l_i \geq L_{\min} \quad i \in D_{\text{Sat}} \quad (4)$$

式中, $L_{\min}$ 为每颗卫星在一个超帧内所要求建立的最少测距链路数量。

1.2.3 网络连通度

锚固站向星座信息分发链路的建立实现了网络的整网连通,但是无法保证连通网络的稳健性。当一颗卫星因轨道机动等原因在一段时间内不可用时,即可能导致网络不再连通。

天地一体化网络对于节点缺失的鲁棒性可以图论中的连通度来量化。在一个超帧内基于 $\mathbf{A}$ 将 S 个节点连接在一起的星地网络 G_A 中,去掉任意 $\kappa-1$ 个节点后 ($1 \leq \kappa \leq S$) 所得的子网络仍然连通,去掉 κ 个节点后不连通,则称 G_A 是 κ 连通图, κ 即为网络 G_A 的点连通度,记作 $\kappa(G_A)$ 。特别地,网络 G_A 的点连通度不大于任一节点可建立的最大链路数。对于地面锚固站与北斗星座在一个超帧通过星间链路构成的天地网络,满足

$$\kappa(G_A) \leq K \quad (5)$$

为保证天地一体化网络对部分节点缺失的稳健性,建立链路规划的第三个目标

$$\max J_3(\mathbf{A}) = \kappa(G_A) \quad (6)$$

即通过设计规划矩阵,使对应的一体化网络的点连通度最大。 $J_3(\mathbf{A})$ 即为规划矩阵 $\mathbf{A}$ 对应的一体化网络 G_A 的点连通度。

1.3 链路规划模型

基于上述对锚固站与北斗星座一体化链路拓扑规划问题所涉及的各要素的模型化描述,同时考虑锚固站向北斗星座信息分发链路跳数、测距链路 PDOP 值及数量、网络连通度等性能需求,在星间链路体制、节点可见性以及链路载荷数量约束下的链路拓扑规划模型为:

$$\begin{cases} \min J_1(A) = \max_{i \in D_{\text{Sat}}} \eta_i \\ \min J_2(A) = \max_{i \in D_{\text{Sat}}} P_i \\ \max J_3(A) = \kappa(G_A) \end{cases}$$
$$\text{s. t. } \begin{cases} l_i \geq L_{\min} & i \in D_{\text{Sat}} \\ v_{s(i, a_{i,k})} = 1 & \forall a_{i,k} \neq 0, i \in \{D_{\text{Sat}}, D_{\text{Sta}}\}, \\ & k \in \{1, 2, \dots, K\} \\ a_{a_{i,k}, k} = i & \forall a_{i,k} \neq 0, i \in \{D_{\text{Sat}}, D_{\text{Sta}}\}, \\ & k \in \{1, 2, \dots, K\} \\ a_{i,k} \neq a_{j,k} & \forall a_{i,k} \neq 0, i \neq j, \\ & i, j \in \{D_{\text{Sat}}, D_{\text{Sta}}\} \end{cases}$$

(7)

其中, D_{Sta} 为锚固站编号集合。第二项约束为节点间的可见性约束,即两个节点之间建链的必要条件为相互可见;第三项约束为两个节点所建立的链路为双向链路;第四项约束为载荷数量约束,即每个节点在一个时隙内最多只能与一个节点建立链路。

2 链路规划算法

基于星地/星间链路网络拓扑一体化规划模型(7)可知,在链路规划问题中提出了三个优化目标。但通常难以得到一个使三个目标同时最优的链路拓扑。为此,采用分步优化与组合优化相结合的方式寻找上述问题的次优解。将优化目标改写为

$$\min J_1(A) = \max_{i \in D_{\text{Sat}}} \eta_i$$

(8)

$$\min J_c(A) = \xi \frac{\max_{i \in D_{\text{Sat}}} P_i}{K} + (1 - \xi) \left[1 - \frac{\kappa(G_A)}{K} \right] \quad 0 < \xi < 1$$

(9)

其中, J_c 为兼顾测距链路 PDOP 值和网络连通度的组合目标函数,通过参数 ξ 对两者进行平衡。

在星间链路体制、载荷数量以及节点间可见性约束下,基于网络分层优化锚固站向北斗星座的信息分发链路跳数,保证锚固站与空间卫星存在至少一条最短路径连接。由此可以利用一部分

时隙资源构建地面锚固站向空间卫星信息传递的骨干网络。进一步基于模拟退火算法,利用骨干网络尚未占用的星间链路时隙资源对各节点测距链路 PDOP 和网络连通度进行组合优化,以提高测距链路质量以及星地网络稳健性,同时不改变锚固站向各卫星信息分发的最短路径。兼顾模拟退火算法初值生成和各节点链路数量约束,链路规划算法流程如图 2 所示。其中链路数量的增加通过文献[19]中的加权规划方法实现。

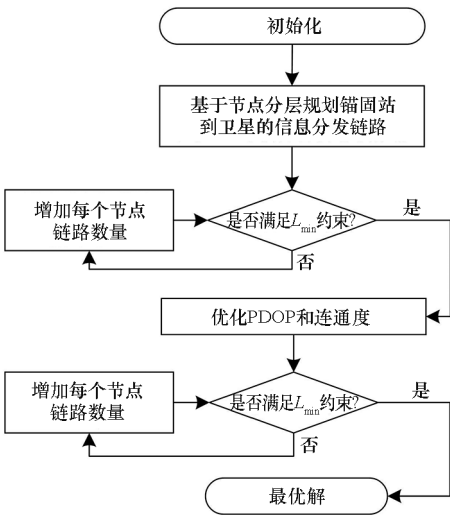


图 2 规划算法流程
Fig. 2 Brief flow of the assignment algorithm

在算法流程中,执行了两次增加链路数量的规划:第一次执行在完成信息传递链路规划后,此时信息传递链路构成的骨干网络在后续规划过程中不做更改,在骨干网络的基础上,利用闲置时隙使每个节点构建额外的链路,从而为 PDOP 和连通度的优化提供初始解;第二次执行在 PDOP 和连通度优化之后,为了保证输出解中每个节点建立的链路数量满足 $L_{\min}$ 约束。

2.1 信息分发链路规划

在地面锚固站向空间卫星的信息传递网络中,以锚固站为网络中心(第 0 层),与锚固站可见的卫星位于网络第 1 层,称为锚卫星,可直接与锚固站建立信息传递链路。因此锚固站向锚卫星进行信息传递的最优链路跳数为 1。而与锚固站不可见、与锚卫星可见的卫星位于网络的第 2 层。锚固站向第 2 层卫星的信息传递链路需要经过锚卫星中继,因此信息传递的最优链路跳数为 2,如图 3 所示。以此类推,可以将锚固站和导航星座构成的信息分发网络划分为 N 层。其中,锚固站向第 n 层卫星信息传递的最优链路跳数为 n 。

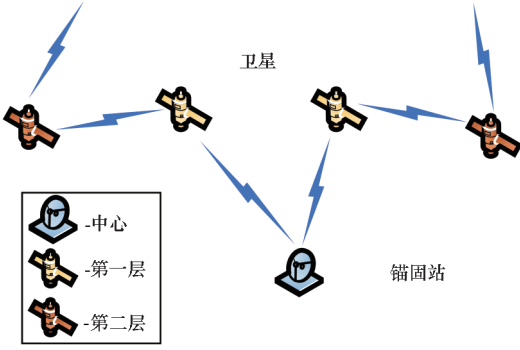


图3 基于可见性的节点分层

Fig.3 Nodes in different layers based on visibility

基于上述网络节点分层,信息分发链路规划原则是在每层节点与上一层节点之间建立一条链路,从而保证存在一条从锚固站到各节点的跳数最少路径。在此原则下,链路规划的具体内容为依次规划第 $n-1$ 层与第 n 层节点之间的链路 ($n=1, 2, \dots, N$)。层间链路规划采用轮询建链实现,具体流程如下。

步骤1:初始化在当前超帧尚未与 n 层节点建链的 $n-1$ 层节点集合 F_{n-1} 以及规划时隙 $k=1$ 。

步骤2:计算集合 F_{n-1} 中各节点可视的并且在时隙 k 闲置的 n 层节点的数量 $m_{n,k}$ 。

步骤3:若 F_{n-1} 中各节点的 $m_{n,k}$ 均为零,则令 $k=k+1$,返回步骤1;否则将 F_{n-1} 中的元素按照节点数量 $m_{n,k}$ 重新升序排列。

步骤4:规划 F_{n-1} 中 $m_{n,k}$ 最小且不为零的节点 $F_{n-1}^{(1)}$ 的层间链路,从与节点 $F_{n-1}^{(1)}$ 在时隙 k 可视且闲置的 n 层节点中随机选择一个节点建链。更新集合 F_{n-1} 。

步骤5:当 F_{n-1} 为空集时,则 $n-1$ 与 n 层间链路规划完成;否则返回步骤2。

2.2 PDOP和连通度组合优化

2.2.1 基于模拟退火的链路优化方法

模拟退火^[20] (simulated annealing, SA) 算法从某一较高初温出发,伴随温度参数的不断下降,概率性地跳出局部最优解并最终趋于全局最优。迭代寻优过程包含初始化、在当前解邻域内产生新解、概率性接受新解和更新当前温度等要素。基于模拟退火算法的链路优化问题即以链路规划矩阵 A 中骨干网络以外的时隙资源为优化变量,实现星地/星间一体化网络的连通度和测距 PDOP 综合最优,如式(9)所示。

为了扩大搜索区域以及便于在当前解邻域内产生新解,采用如图4所示的双线并行模拟退火优化方法。

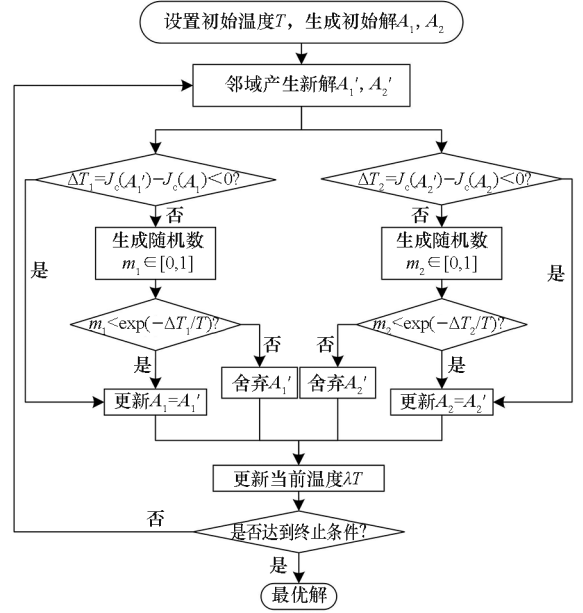


图4 并行模拟退火算法流程

Fig.4 Calculation process of the parallel SA algorithm

2.2.2 新解生成方法

在并行模拟退火算法框架中,模拟遗传算法交叉运算,通过对当前解 A_1 和 A_2 执行交叉操作在邻域内产生新解。规划矩阵 A_1 、 A_2 的每一列都定义了相应时隙的链路拓扑,对应着唯一一个拓扑矩阵。为了保证交叉产生的新解仍然满足式(7)中的链路约束条件,采用如下时隙拓扑交叉方式:

1) 随机选择规划矩阵 A_1 在时隙 k_1 的链路拓扑 $L^{(k_1)}$ 和规划矩阵 A_2 在时隙 k_2 的链路拓扑 $L^{(k_2)}$ 作为待交叉对象 ($k_1, k_2 \in \{1, 2, \dots, K\}$)。

2) 随机生成 $s \in \{1, 2, \dots, S\}$, 互换拓扑矩阵 $L^{(k_1)}$ 和 $L^{(k_2)}$ 的第 s 行和第 s 列的所有元素,产生新的 $L^{(k_1)'}$ 和 $L^{(k_2)'}$, 如图5所示。由于新产生的 $L^{(k_1)'}$ 和 $L^{(k_2)'}$ 仍然是对称矩阵,其所定义的链路拓扑仍然满足双向链路体制约束。

3) 由于链路载荷数量的限制,拓扑矩阵 $L^{(k_1)'}$ 和 $L^{(k_2)'}$ 第 s 行和第 s 列的所有元素所定义的新链路可能与旧链路存在冲突,因此需要对 $L^{(k_1)'}$ 和 $L^{(k_2)'}$ 第 s 行和第 s 列以外的元素进行修复,使拓扑矩阵每行、每列最多只有一个元素为1,从而确保相应时隙每个节点最多只与一个节点建链。修复后的拓扑矩阵分别记为 $L^{(k_1)''}$ 和 $L^{(k_2)''}$ 。

4) 将拓扑矩阵 $L^{(k_1)''}$ 、 $L^{(k_2)''}$ 分别转换并替换为规划矩阵 A_1 、 A_2 的 k_1 、 k_2 列,即为交叉产生的新规划矩阵 A_1' 、 A_2' 。

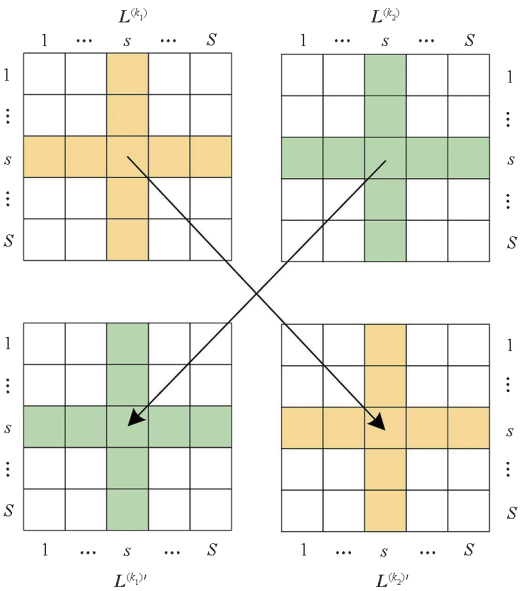


图 5 拓扑矩阵交叉
Fig. 5 Topological matrix crossing

3 仿真分析

3.1 仿真条件

基于本文的算法,进行北斗中地球轨道 (medium earth orbit, MEO) 星座和锚固站的一体化链路规划仿真,并评估链路性能。北斗 MEO 星座为 Walker 24/3/1 星座,运行轨道周期约为 12 h。星座主要轨道参数及备选地面锚固站位置参数见表 1。锚固站和每颗卫星均搭载一套 Ka 链路载荷,卫星天线对地心、锚固站天线沿地心反向安装,波束扫描范围为 $\pm 60^\circ$ 。每个超帧持续 1 min,

表 1 节点空间参数
Tab. 1 Spatial parameters of nodes

ID	节点	空间参数
1 ~ 24	北斗 MEO Walker 星座	构型 Walker 24/3/1
		轨道高度 21 528 km
		轨道倾角 55°
		经度 109.2°E
25	锚固站 1	纬度 34.2°N
		高程 480 m
		经度 115.7°E
26	锚固站 2	纬度 39.5°N
		高程 26 m
		经度 75.4°E
27	锚固站 3	纬度 37.1°N
		高程 132 m

每个时隙持续 3 s,仿真时长为 12 h,即星座运行周期,共包含 720 个链路规划周期。

每个节点在各超帧需要建立的不同链路数量 $L_{\min}$ 不少于 10。考虑到同一运行时段内北斗星座不可用卫星数量通常不会超过 3。为兼顾网络性能和优化效率,将连通度优化目标设为 3。在达到终止温度前,若连通度优于 3,且各节点测距链路 PDOP 相对参考下限不大于 0.3,即

$$\begin{cases} \kappa(G_A) \geq 3 \\ P_i \leq P_{i,\min} + 0.3 \quad i \in D_{\text{Sat}} \end{cases} \quad (10)$$

则终止迭代,将此时的最优解作为链路优化结果。节点 i 测距链路 PDOP 的参考下限 $P_{i,\min}$ 为一个超帧内该节点与其所有可见节点建立测距链路的 PDOP。但每颗卫星在各超帧的可见节点数量均超过 10,在载荷数量受限的窄波束链路体制下,在一个超帧内难以实现与所有可见节点建链,因此参考下限 $P_{i,\min}$ 是无法达到的,只能通过规划尽可能逼近 $P_{i,\min}^{[10,19]}$ 。

3.2 性能评估

3.2.1 锚固站配置的影响

在星地/星间一体化网络中,锚固站是空间卫星的测距节点,同时也是信息分发网络的中心节点。在本文的链路规划方案中,锚固站的配置决定了卫星分层,即信息分发链路跳数的理论最小值,同时也将影响卫星测距链路的 PDOP。

由于 Walker 星座分布的对称性,单个锚固站的地理坐标对卫星分层几乎无影响。表 2 统计了不同锚固站数量下,各网络分层所包含的卫星比例。由于锚固站 1 和锚固站 2 的空间位置分布较为集中,新增锚固站 2 后对星地可见性的改善有限,第一层卫星增加的比例小于 1%。而增加锚固站 3 后,由于锚固站的分布相对分散,锚固站可见的卫星数量显著增加。相对于仅 1 个锚固站,配置 3 个锚固站时,第一层卫星比例 (锚固站可见卫星比例) 增加了 6% 以上,卫星分层总数也从 3 层减少为 2 层,即最优状态下锚固站最多经过 2 跳链路即可实现向所有空间卫星的信息分发。

在测距链路质量方面,同样考虑到 Walker 星座空间分布的对称性,以一颗卫星为例,图 6 为增加锚固站后相对于仅配置锚固站 1 时的卫星测距链路 PDOP 参考下限的减小量。在 180 超帧后,由于卫星与锚固站不可见,因此增加锚固站对 PDOP 无影响。在 180 超帧前,增加锚固站后,PDOP 有所减小,但减小量不足 0.02。原因在于锚固站位置分布相对集中,新增锚固站虽然可增

加可见卫星的测距链路数量,但是对测距几何构型的改善效果有限。

表 2 各层卫星比例

Tab.2 Ratio of satellites in different layers

节点	%		
	第一层	第二层	第三层
锚固站 1	17.25	82.59	0.16
锚固站 1 + 2	18.14	81.86	0
锚固站 1 + 2 + 3	23.40	76.60	0

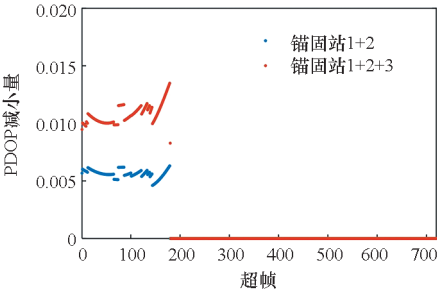


图 6 相对于仅有锚固站 1 的最优 PDOP 减小量

Fig.6 Optimal PDOP reduction relative to anchor 1

综合上述分析,增加锚固站虽然对测距链路质量的改善有限,但可以实现信息分发源节点的冗余,提高向空间卫星的信息分发效率。为了充分验证算法性能,后续分析中考虑最恶劣的条件,即仅配置锚固站 1 的场景,进行链路规划与分析。

3.2.2 平衡参数的影响

在模拟退火算法的优化中,需要同时兼顾测距链路 PDOP 和网络连通度,可通过平衡参数 ξ 对两种网络性能进行权衡。为评估不同平衡参数 ξ 的影响, ξ 分别取 0.1,0.3,0.5,0.7,0.9,以超帧 1 为例分别进行 50 次链路规划仿真。

图 7 和图 8 分别为不同平衡参数下各卫星测距链路 PDOP 的最大值和网络连通度。根据仿真结果,增大平衡参数 ξ ,迭代过程更加侧重于 PDOP 的优化,因此 PDOP 的收敛速度更快,而网络连通度的收敛速度则相应变慢。当 ξ 取 0.9 时,连通度在迭代过程中出现了非递增的情况,而当 ξ 取 0.1 时,PDOP 同样出现了非递减的情况。

但综合考虑连通度和 PDOP 两个性能,不同的平衡参数并不会影响优化过程的总体收敛性。达到连通度和 PDOP 均收敛的平均迭代次数均约为 65 次,且优化收敛后的网络连通度均为 4,收敛后测距链路的最大 PDOP 相对参考下限的差值均不大于 0.3。

综合考虑连通度和 PDOP 两个参数的收敛过

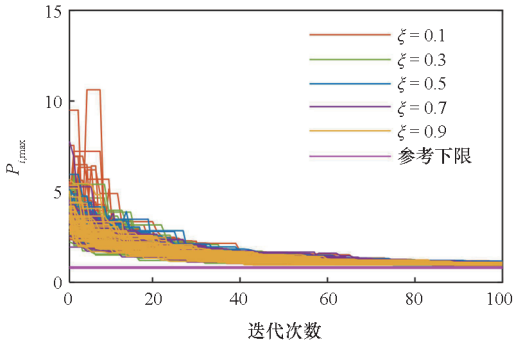


图 7 不同平衡参数下的测距链路 PDOP 最大值

Fig.7 The maximal PDOP of ranging links with different balance parameter values

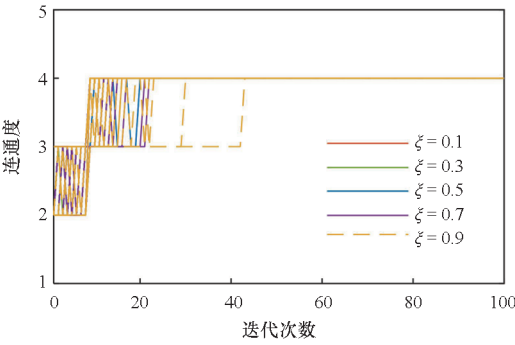


图 8 不同平衡参数下的网络连通度

Fig.8 Connectivity of the network with different balance parameter values

程,后续取平衡参数为 0.5 进行各个超帧的链路规划,并进行一体化网络性能分析。

3.2.3 信息分发链路性能

根据每个超帧锚固站以及卫星之间的可见性,对所有网络节点进行分层。再基于分层结果采用本文的算法完成层间链路规划,实现锚固站向空间卫星信息分发链路跳数最少的目标。

图 9 为各超帧星地信息分发链路跳数与节点分层数的比对结果。结果表明基于规划得到的链路拓扑,可以在 3 跳以内实现锚固站向空间卫星的信息分发。且各超帧的链路跳数均与节点所在层数一致,表明信息分发链路跳数达到了理论最优值。统计各超帧信息分发链路的时隙资源占用率,均不超过 10%。进一步利用剩余的超过 90% 时隙资源对星地一体化网络的测距链路和连通度进行优化。

3.2.4 测距链路性能与连通度

在星地信息分发骨干网络的基础上,对剩余的星间链路时隙资源进行规划,以优化测距链路性能和网络连通度。

图 10 为各卫星在各超帧内所建立的星间测距链路数量,平均链路数量为 13.5,最少链路数

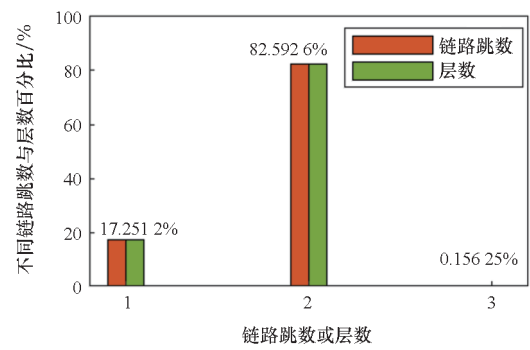


图 9 链路跳数与节点分层数
Fig. 9 Link hop and node layers

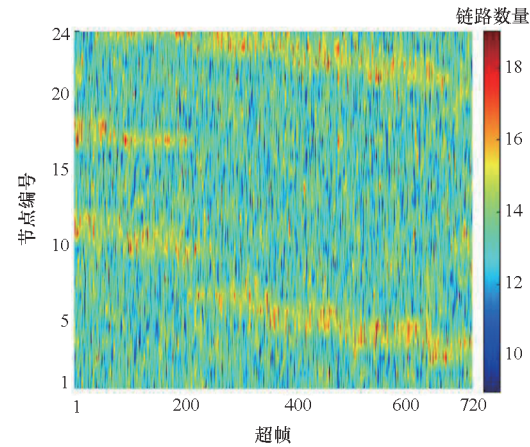


图 10 测距链路数量
Fig. 10 Number of ranging links

量为 10,满足最少链路数量约束。

图 11 为一颗卫星在各超帧所建立的测距链路 PDOP。规划结果表明,各超帧测距链路 PDOP 均小于 1.4,且接近其参考下限,比 $P_{\min}$ 大 0.05 ~ 0.3。这表明,所规划的卫星测距链路具有良好的几何构型,可以为卫星轨道确定提供有效的测距信息。图 12 同时给出了锚固站与空间卫星所建链路的 PDOP。由于本文中的逐层规划算法优先完成了锚固站与其所有可见卫星的建链,各超帧链路 PDOP 均达到其参考下限。

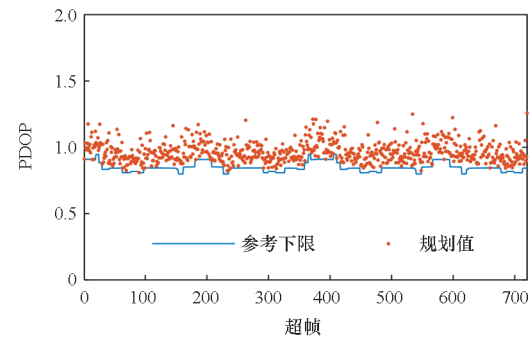


图 11 卫星各超帧的测距链路 PDOP

Fig. 11 PDOP of satellite ranging links in all superframes

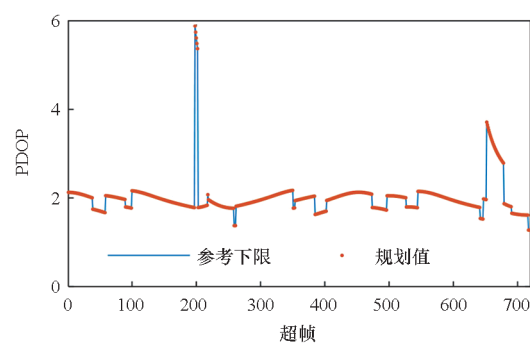


图 12 锚固站各超帧的测距链路 PDOP
Fig. 12 PDOP of station ranging links in all superframes

图 13 为各超帧网络连通度的优化结果。各超帧网络连通度均优于 3,表明 3 颗以内卫星不可用,不影响星地一体化网络的连通性。部分超帧的连通度达到 5 和 6,表明通过放宽式(10)中的连通度终止条件,可进一步提高一体化网络的稳健性。

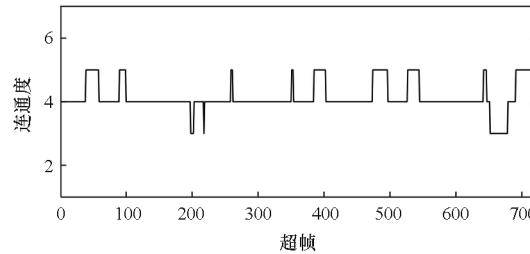


图 13 星地网络连通度

Fig. 13 Connectivity of the satellite-station network

4 结论

针对锚固站与导航星座共同构成的星地/星间一体化网络。本文在星间链路体制、可见性、载荷数量约束下,建立了北斗系统星地/星间链路网络一体化规划模型,提出了基于网络分层的层间信息分发链路规划算法,以及基于模拟退火算法的测距链路 PDOP 和网络连通度多目标优化算法。根据规划仿真结果,锚固站可在 3 跳内实现向空间卫星的信息分发,且链路跳数达到了理论最优值;卫星测距链路 PDOP 均小于 1.4,接近其参考下限;星地/星间一体化网络连通度优于 3。表明所提出的星地/星间链路一体化规划算法能够满足锚固站向卫星的信息快速分发、一体化网络空间基准维持的测距以及网络稳健性等功能性需求。

参考文献 (References)

[1] 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.

[2] WANG D X, GUO R, LIU L, et al. A method of whole-network adjustment for clock offset based on satellite-ground and inter-satellite link observations [J]. Remote Sensing, 2022, 14(20): 5073.

[3] 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. (in Chinese)

[4] 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.

[5] 高贺, 王玲, 黄文德, 等. 北斗全球卫星导航系统境外星数据快速回传的路由优化方法[J]. 中国空间科学技术, 2018, 38(2): 9 – 15.

GAO H, WANG L, HUANG W D, et al. Routing optimization method for fast return of data on overseas satellites in BeiDou global navigation satellite system [J]. Chinese Space Science and Technology, 2018, 38(2): 9 – 15. (in Chinese)

[6] 燕洪成, 张庆君, 孙勇. 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.

YAN H C, ZHANG Q J, SUN Y. 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. (in Chinese)

[7] HOU Z W, YI X Q, ZHAO Y, et al. Information transmission path selection of navigation satellite network based on directional crosslink [C]//Proceedings of China Satellite Navigation Conference, 2016.

[8] 王彦, 刘波, 虞万荣, 等. 基于演化图的导航星座星间路由算法[J]. 中国空间科学技术, 2012, 32(5): 76 – 83.

WANG Y, LIU B, YU W R, et al. Routing algorithm for navigation constellation based on evolving graph model[J]. Chinese Space Science and Technology, 2012, 32(5): 76 – 83. (in Chinese)

[9] KUR T, KALARUS M. Simulation of inter-satellite link schemes for use in precise orbit determination and clock estimation [J]. Advances in Space Research, 2021, 68(12): 4734 – 4752.

[10] SUN L Y, YANG J, HUANG W D, et al. Inter-satellite time synchronization and ranging link assignment for autonomous navigation satellite constellations [J]. Advances in Space Research, 2022, 69(6): 2421 – 2432.

[11] 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.

[12] HAN K, XU B B, SHAO F W, et al. An adaptive topology optimization strategy for intersatellite links in GNSS [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(6): 5894 – 5907.

[13] FERNÁNDEZ F A. Inter-satellite ranging and inter-satellite communication links for enhancing GNSS satellite broadcast navigation data [J]. Advances in Space Research, 2011, 47(5): 786 – 801.

[14] 任夏, 杨元喜, 朱俊, 等. 北斗导航系统自主定轨中锚固站的精度贡献分析[J]. 测绘科学技术学报, 2018, 35(2): 135 – 140.

REN X, YANG Y X, ZHU J, et al. The contribution of anchor stations on the precision of autonomous orbit determination of BDS[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2018, 35(2): 135 – 140. (in Chinese)

[15] RAJAN J A, BRODIE P, RAWICZ H. Modernizing GPS autonomous navigation with anchor capability [C]//Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2003.

[16] 张天昱, 刘建平, 朱志诚, 等. 基于导航系统的多优先级星间链路时隙规划方法研究[C]//第十一届中国卫星导航年会, 2020.

ZHANG T Y, LIU J P, ZHU Z C, et al. Research on timeslot scheduling method of multi-priority inter-satellite link based on navigation system [C]//Proceedings of the 11th Chinese Satellite Navigation Conference, 2020. (in Chinese)

[17] YANG D N, YANG J, XU P J. Timeslot scheduling of inter-satellite links based on a system of a narrow beam with time division[J]. GPS Solutions, 2017, 21(3): 999 – 1011.

[18] 伦伟成, 李群, 于芹章, 等. 运用动态规划的智能卫星集群星间通信路由算法[J]. 国防科技大学学报, 2022, 44(1): 137 – 145.

LUN W C, LI Q, YU Q Z, et al. Inter-satellite communication routing algorithm of smart-satellites-swarm using dynamic programming [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2022, 44(1): 137 – 145. (in Chinese)

[19] SUN L Y, WANG Y K, HUANG W D, et al. Inter-satellite communication and ranging link assignment for navigation satellite systems[J]. GPS Solutions, 2018, 22(2): 38.

[20] ODZIEMCZYK W. Application of simulated annealing algorithm for 3D coordinate transformation problem solution[J]. Open Geosciences, 2020, 12(1): 491 – 502.