

面向最优业务投递率的巨型星座渐进式部署算法

刘一恺¹, 张冬顺², 崔欣斌², 陆莉莉¹, 王兴梅³, 张 冬³, 郭秉礼¹, 周 宇¹, 黄善国¹

(1. 北京邮电大学信息光子学与光通信全国重点实验室, 北京 100876;

2. 中国运载火箭技术研究院北京航天万源科技有限公司, 北京 102600;

3. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

摘 要: 巨型星座的建设周期较长, 且投资成本高昂。在星座建设初期, 由于卫星在轨数量较少且分布较为稀疏, 星上数据回传等通信能力受到显著限制。为提高星座在渐进式部署过程中的数据回传服务能力, 提出一种新型渐进式星座部署算法。首先构建了一个综合考虑多平面部署时间与燃料成本的部署模型, 并设定了优化重访时间长度分布与提升网络可达概率的双重目标, 旨在确保在星座部署初期实现更高的网络连通性与数据回传效率。仿真结果表明, 与基于相同轨道平面的星座部署算法和基于最小重访时间标准差算法等传统星座部署算法相比, 所提算法能够将星座建设初期的业务投递成功率分别从 65.6% 和 76.8% 均提升至 90%。

关键词: 巨型低轨星座; 卫星部署; 业务投递率; 卫星网络仿真

中图分类号: TN927.2

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2026004

Progressive Deployment Algorithm of Mega-Constellations for Optimal Service Delivery Rate

Liu Yikai¹, Zhang Dongshun², Cui Xinbin², Lu Lili¹, Wang Xingmei³, Zhang Dong³,
Guo Bingli¹, Zhou Yu¹, Huang Shanguo¹

1. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and
Telecommunications, Beijing 100876, China

2. China Academy of Launch Vehicle Technology Beijing Aerospace Wanyuan Science & Technology Co., Ltd., Beijing 102600, China

3. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China

Abstract: Mega-constellations are characterized by a prolonged deployment lifecycle and significant capital expenditure. During the initial deployment phase, the limited number and sparse distribution of on-orbit satellites severely restrict communication capabilities, such as satellite-to-ground data transmission. To enhance the data transmission capability during the satellite deployment, this paper introduces a novel constellation deployment algorithm. The algorithm first establishes a deployment model that comprehensively considers multi-plane deployment time and fuel costs. It then sets the dual objectives of optimizing the duration of revisit times and improving network reachability, ensuring higher network connectivity and data transmission efficiency. Simulation results demonstrate that, compared to deployment based on the same orbital plane and a strategy based on minimizing the standard deviation of revisit times, our proposed algorithm significantly increases the data delivery success rate in the initial deployment phase from 65.6% and 76.8%, respectively, to 90%.

Keywords: mega LEO constellation, satellite deployment, service delivery rate, satellite network simulation

0 引言

近年来, 低地球轨道 (low earth orbit, LEO) 巨型星

座通信系统因其广覆盖、低时延、高吞吐量及网络结构灵活等特点受到广泛关注。随着政府和企业对 LEO 卫星潜力的日益认可, 诸如 Starlink、Kuiper 和 G60 等星座正

收稿日期: 2025-08-19; 修回日期: 2025-11-24

基金项目: 国家自然科学基金 (No.62401082, No. 6212500328)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62401082, No. 6212500328)

不断扩展规模^[1-2]。一个巨型低轨卫星星座可能由成千上万颗卫星组成，然而，由于运载火箭的单次运载能力有限，每次发射任务仅能搭载几十颗卫星^[3]。在这种情况下，构建大规模LEO星座可能需要数年甚至数十年的时间。在星座建设初期，空间网络中的卫星数量有限，星间网络没有持续稳定的连通能力，因此建设阶段（尤其是建设初期）的卫星网络难以提供即时的端到端通信服务^[4]。

目前，卫星星座系统最关键的应用之一是将对地观测数据（遥感数据等）传输到地面站（如气象和环境监测服务），这些服务需要在较短的时间内（近实时需求）将空间的观测数据回传地面^[5-6]。然而，由于成本和地理限制，早期的星座运营商通常在小范围区域内使用数量有限的地面站进行运营，且由于在轨星座的稀疏性，星间传输能力也受到制约，数据主要依靠携带数据的卫星过境时建立星地链路进行回传。在此情况下，星上载荷生成的数据往往需要长期占用本地存储单元，直到与地面站建立通信连接，这个过程可能会持续一个或多个轨道周期（对于低地球轨道，一个轨道周期约为2 h，每次星地链路传输时间为5~10 min）^[7]。该方案需要大量星上存储容量，数据实时性也较差，且未能在一定时间内接收到的数据会被视为无效，因此减少星上数据回传时间对于提高投递成功率至关重要。在应对稀疏网络下的数据通信挑战时，时延容忍网络（delay tolerant network, DTN）可以提供有效的解决方案。在DTN中，通信源和宿节点之间并不总具备端到端的实时连通路，而是通过节点的移动所产生的连接机会进行通信。当节点移动使得彼此位于对方的通信范围内时，节点可以交换数据。数据采用存储转发（store-forward, SF）的方式进行传输，即节点携带数据直到遇到合适的下一跳节点才进行转发。通过这种节点间的逐跳转发，数据从源节点传输到目的节点^[8-10]。在建设初期，鉴于卫星网络节点的稀疏性和可预测性，已部署的卫星和地面站网络可以作为DTN运行，充分利用星间链路资源，空间观测数据能够在更低的时延下通过多个卫星节点中继到地面站。因此，在星座建设初期，低轨星座运营商可以考虑结合DTN的存储转发机制，为时间敏感类的业务提供更高效的服务^[11]。

在低轨卫星星座建设过程中，由于巨型星座规模庞大，火箭的有效载荷能力和发射频率有限，星座建设通常分为多个阶段部署。星座的部署阶段是指运载火箭从地面上将一组卫星运输并释放到其目标轨道平面的操作阶段^[3]。在每个部署阶段，部署方案按照设定的策略从候选卫星中选择最佳卫星子集，所选卫星子集的差异将

直接影响卫星地面链路（satellite-to-ground link, SGL）和星间链路（inter-satellite link, ISLs）的持续时间和建立间隔，最终影响该阶段的业务服务能力。为了最大程度地提高低轨巨型星座不同部署阶段的数据传输能力，需要考虑结合存储-转发机制的星座分时连通特性，设计合理的卫星部署方案，进而提升星座稀疏情况下的业务传输能力。

当前的卫星部署策略主要分为单轨道平面部署与多轨道平面部署两种。单轨道平面部署因其具有等待时间短、燃料消耗低及变轨操作简单等优势，已成为目前巨型低轨卫星星座部署的常用方式。然而，该方法的局限性在于单次任务只能将卫星部署在同一轨道平面，导致候选卫星选择空间受限，且部署期间星座的覆盖范围增长缓慢。相比之下，多轨道平面部署在单次部署任务中卫星选择范围更广，但其时间与燃料成本也更高。针对这一问题，文献[12]对多平面部署中的变轨策略进行了改进，并构建了相应的时间与燃料成本评估模型。文献[4]提出了一个以最小重访时间标准差为优化目标的部署方案，显著提高了对特定地面站覆盖时间间隔的持续时间的均匀性，该文献虽在业务仿真时考虑了基于DTN的网络存储-转发能力，但在星座部署方案设计中没有充分考虑卫星间的分时连通性，使得DTN能力未得到充分发挥。由此可见，为了提升数据回传的实时性，具有大量数据但接触时间很少的卫星可以通过分时接触的星间链路将其数据卸载到与地面站有连通时间的其他卫星，进而提升数据在给定时间内的传递成功率。综上所述，在设计星座部署方案时，应同时考虑重访时间的分布情况和稀疏星间网络的分时连通性。

同时优化星地链路可用性和星间网络连通性以最大化稀疏网络下的DTN效能是本文区别于现有工作的核心贡献，本文首先建立一个考虑多轨道平面卫星部署时的时间和燃料成本等约束条件的星座建设模型，然后，在该模型的基础上，分别针对星地和星间的连通关系提出了两个评价指标：重访时间分布评价指标和星间网络可达概率。重访时间分布评价指标反映了对地通信服务持续时间的均匀性，而星间网络可达概率则反映了卫星网络自身的拓扑连通程度。之后，结合之前的模型和评价指标，提出了一种基于非支配排序遗传算法II（nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II）^[13]的星座部署算法，该方案同时考虑了上述两个评价指标作为目标函数。最后，在多种网络环境下进行了仿真，以评估其在现实场景中的性能，结果表明，与之前的解决方案相

比, 本文提出的方法在整个渐进式星座部署过程中显著提高了业务投递成功率。

1 星座模型构建

1.1 问题定义和卫星部署的约束条件

考虑有一个具有 N 颗卫星, 分布在 P 个轨道平面上的低轨卫星星座, 星座全部卫星的集合用 S 表示。通常, 一个巨型低轨卫星星座的部署分为若干个阶段, 每个阶段部署 N_x 颗卫星; 在每个阶段, 部署卫星到最多 N 个相邻的轨道平面。在第 k 个阶段前已经部署的卫星的集合 S_e 表示为:

$$S_e = \sum_{i=1}^{k-1} S_i, k \geq 2 \quad (1)$$

所以在第 k 个阶段可供选择的卫星集合 S_r 表示为:

$$S_r = S - S_e \quad (2)$$

此外, 为了表示某一颗卫星 s_i 属于哪个轨道平面, 定义了从卫星到卫星所属轨道的映射 $f(\cdot)$, 即:

$$f(s_i) = p, s_i \in S_k, p \in \{1, 2, \dots, P\} \quad (3)$$

$$T_k = \{f(s_i) | s_i \in S_k\} \quad (4)$$

其中, p 表示第 p 个轨道平面, T_k 表示 S_k 中的卫星所属的轨道平面的集合。据此, 最基本的 3 个部署方案约束条件定义为:

$$S_k \in S_r \quad (5)$$

$$|S_k| = N_x \quad (6)$$

$$\exists j \in \{1, 2, \dots, P\} \text{ s.t. } T_k \subseteq \bigcup_{a=j}^{j+N-1} ((a-1) \bmod P + 1) \quad (7)$$

约束条件(5)要求从尚未部署的卫星中选择卫星, 确保每颗卫星只部署一次。约束条件(6)要求每次部署选择的卫星数应等于提前计划的卫星数。为了限制部署花费的总时间, 约束条件(7)要求每次部署卫星所属的轨道集合属于任意一个具有相邻的 N 个轨道平面的集合, 这说明每次部署的卫星需要位于某一组 N 个相邻轨道平面中的任意一个或多个轨道平面上。

1.2 部署成本

对于多轨道平面部署, 需要一个非平面的机动方式把卫星运载到不同的轨道。根据文献[12]提出的方法, 预先将所有卫星发射到一个与目标轨道具有相同倾角和半长轴的静止轨道; 具有相同目标轨道的所有卫星会被放到同一个运载工具上。由于目标轨道与停泊轨道的半长轴不同, 在地球扁率的影响下, 其升交点赤经 (right ascension of ascending node, RAAN) 会以不同的速率变化, 且半长轴更小的停泊轨道会有更高的 RAAN 变化率, 两个轨道的 RAAN 会随时间产生相对漂移。当停泊轨道与目标轨道的 RAAN 相等时, 运载工具将通过霍曼转移 (Hohmann transfer, HT) 面内机动至目标轨道并释放卫

星, 这就完成了对当前目标轨道的一次部署。随后, 当停泊轨道的 RAAN 与下一个目标轨道的 RAAN 相同时, 下一组卫星将会被释放。此过程持续直到所有卫星都达到其期望的目标轨道平面。因此, 在停泊轨道和目标轨道六根数确定的情况下, 每次部署花费的总时间与部署卫星所属轨道集合内的最大 RAAN 差值呈正相关, 而该差值又与每次部署的最大相邻轨道平面的数量 N 呈正相关。因此, 限制 N 的最大值能够有效地控制每次部署花费的总时间。

根据文献[12], 对于有 P 个轨道平面的星座, 从一次面内机动开始到下一次面内机动开始前的等待时间叫作漂移时间, 其计算方法为:

$$t_s = \frac{4\pi}{3PJ_2 \sqrt{\mu} R^2 \cos i (a_p^{-7/2} - a_t^{-7/2})} \quad (8)$$

其中, J_2 为二次纬向谐波, μ 为标准引力参数, R 为地球半径, i 为轨道倾角, a_p 和 a_t 分别为停泊轨道和目标轨道的半长轴。每次 HT 面内机动花费的时间为^[12]:

$$t_t = \frac{\pi}{\sqrt{\mu}} \left(\frac{r_p + r_t}{2} \right)^{3/2} \quad (9)$$

其中, r_p 和 r_t 分别为停泊轨道和目标轨道的半径, 所以最后部署 N 个相邻的轨道平面花费的总时间为:

$$t_d = (N-1)t_s + Nt_t \quad (10)$$

从式(10)可以看出, 部署所花费的总时间和 N 线性相关, 而且系数为 $t_s + t_t$ 。所以单次部署平面的数量越多, 部署花费的时间越久。此外, 部署时间的长度主要由漂移时间 t_s 决定。由于轨道的偏心率对总时间 t_d 的影响很小, 因此在计算时被忽略。

使卫星从停泊轨道转移到目标轨道所需要的瞬时速度变化量为:

$$\Delta v = \sqrt{\frac{\mu}{a_p}} - \sqrt{\frac{\mu}{a_t}} \quad (11)$$

卫星进行霍曼转移需要的燃料质量占卫星初始质量的比例为:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{\Delta v}{I_{sp} \cdot g_0}} \quad (12)$$

其中, I_{sp} 为燃料的比冲, g_0 为重力加速度。

1.3 优化目标

通常来说, 星上数据下载的等待时间是成功投递时延的主要组成部分, 会直接影响数据的投递成功率。等待时间一共分为两部分: 一是由于地面站地理分布限制, 星上数据等待与地面站接入需要花费的时间; 二是在卫星网络建设过程中, 由于网络中卫星数量有限, 数据在

卫星之间转移所需的存储、转发和传输时间。下面将会通过调整每次部署卫星的空间位置分别对星地和星间通信窗口的分布进行优化。

1.3.1 重访时间分布评价指标

重访时间指的是多个地面站被给定卫星集合连续覆盖的时间间隔。由于在星座建设初期卫星数量有限，实现星座对地面站的持续覆盖是不可行的，在轨卫星只能对地面站实现间断覆盖。同时，为了确保卫星上数据的时效性，如果数据无法在预设的最大传输时间回传到地面站，数据将被认为投递不成功。所以，在进行卫星部署方案设计时，需要通过调整部署策略，使卫星对所有地面站的重访时间长度尽可能均匀，从而减少数据传输的平均成功投递时延。

重访时间分布评价指标被设计用来评估重访时间长度的分布情况，希望卫星的不同重访时间的长度尽可能一致且均值最小。首先，所有已部署卫星对地面站的重访时间被放到同一个时间轴上，计算出每两次通信窗口之间的间隔作为重访时间，通过统计得到重访时间的频率分布直方图。之后在频率分布直方图上放置一个一定长度的滑动窗口，该窗口会在直方图的 x 轴上按照一定的步长滑动，在到达任意位置时，滑动窗口内全部重访时间出现的频率与重访时间出现的总频率的比值即为滑动窗口在该位置时的集中度。最后需要找到具有最大集中度的滑动窗口，并计算出该窗口的重访时间的平均值。

具体流程如下。首先，通过计算得到一组包含 N 个重访时间的数据序列：

$$D = \{d_1, d_2, d_i, \dots, d_N\} \quad (13)$$

其中， d_i 表示第 i 个重访时间。对数据序列 D 进行去重并排序，得到排序后的重访时间集合 S ：

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_j, \dots, s_M\}, s_1 < s_2 < \dots < s_j < \dots < s_M, \\ j = 1, 2, \dots, M \quad (14)$$

其中，每个 s_j 是一个唯一的重访时间值， M 表示一共有多少个不同的重访时间值， s_M 表示集合 s 中持续时间最长的重访时间。随后统计每个重访时间出现的频率，得到对应的频率分布直方图。 $\text{count}(v)$ 为重访时间长度为 v 时出现的频率。其中， $1\{d_i = s_j\}$ 为示性函数，如果条件为真则输出1，条件为假则输出0，表示为：

$$\text{count}(s_j) = \sum_{i=1}^N 1\{d_i = s_j\}, j = 1, 2, \dots, M \quad (15)$$

之后，第 k 个滑动窗口 W_k 表示为：

$$W_k = [t_k, t_k + x] \quad (16)$$

$$t_k = (k-1)\delta, k = 1, 2, \dots, K \quad (17)$$

滑动窗口 W_k 包含的重访时间的长度为 x ，滑动窗口每次移动的步长为 δ ， t_k 表示当前位置窗口最左侧对应的坐标轴的重访时间值， t_1 为初始窗口的最左侧的位置。当滑动窗口两端的边界值正好和横坐标轴上数据点重合时，认为该数据被包含在滑动窗口内， K 的取值将会在后面讨论。

此外，还需要满足约束：滑动窗口的最左侧重访时间的值不超过重访时间集合 S 中的最大值。

需满足：

$$t_k \leq s_M \quad (18)$$

把式(17)代入式(18)中，得到：

$$(k-1)\delta \leq s_M \quad (19)$$

故：

$$k \leq \left\lfloor \frac{s_M}{\delta} \right\rfloor + 1 \quad (20)$$

因此，有效 k 的取值范围为：

$$k = 1, 2, \dots, K, \text{ 其中 } K = \left\lfloor \frac{s_M}{\delta} \right\rfloor + 1 \quad (21)$$

之后，定义第 k 个滑动窗口内所含数据的平均值 $\bar{d}_k$ 为：

$$\bar{d}_k = \frac{\sum_{s_j \in W_k} (s_j \cdot \text{count}(s_j))}{\sum_{s_j \in W_k} \text{count}(s_j)} \quad (22)$$

其中， $\bar{d}_k$ 表示了滑动窗口内重访时间的平均情况， $\bar{d}_k$ 的值越小表示该滑动窗口内的平均重访时间越短。随后，定义第 k 个滑动窗口内重访时间分布的集中度 γ_k ，集中度 γ_k 的值越大，表示通信时间间隔在该窗口内的分布越集中。集中度定义为：

$$\gamma_k = \frac{\sum_{s_j \in W_k} \text{count}(s_j)}{N} \quad (23)$$

在 K 个滑动窗口中， γ_k 的最大值 $\gamma_{\max}$ 为：

$$\gamma_{\max} = \max \{\gamma_k\}, k = 1, 2, \dots, K \quad (24)$$

取得最大值对应的窗口的序号 k^* 为：

$$k^* = \operatorname{argmax}_k \gamma_k \quad (25)$$

将最后的重访时间分布评价指标 Q^* 设置为最大集中度对应的滑动窗口内包含的重访时间的平均值和集中度的比值，表示为：

$$Q^* = \frac{\bar{d}_{k^*}}{\gamma_{\max}} \quad (26)$$

可以看出 Q^* 的值越小，当前阶段已经部署的卫星的重访时间集中的时间长度越短，且集中度越高。重访时间分布评价指标 Q^* 不仅能有效考虑重访时间长度的均匀程度，还能考虑其平均值的数值高低。

1.3.2 星间网络可达概率

除星地连通性外，星间网络的连通性在数据传输时

也起着重要作用。承载大量数据和有限接触时间的卫星可以通过星间链路将其数据卸载到具有地面站可用时间的其他卫星，这为数据传输提供了更多可选路径。节点间的可达性是指一个节点能够将信息传递给另一个节点的能力。网络的可达性描述全网所有节点间的可达程度。定量指标上，可达性常用可达概率来表示，可达概率可定义为在所有可能的源-宿对中，存在实际可达路径的比例。对于建设过程中的卫星网络，有些节点对无法通过中间节点互通，可达性一般不能达到100%，而更高的网络可达概率意味着更好的网络连通性。

在动态变化的卫星网络中，星间拓扑的构建是影响网络整体可达性的关键环节。由于卫星节点的高速运动，星间链路的建立与断开具有显著的时变特性。为了在给定的时隙内评估并保障网络的连通性能，需要从潜在的可用链路中选择一个子集来构成该时隙的拓扑快照。

本文采用的拓扑构建算法的核心思想是优先选择那些持续时间最长的星间链路。选择最长持续时间链路的根本原因在于可最大化拓扑的稳定性与持久性，这对于保障路径的持续连通至关重要。而其他策略，如优先“最短距离”或“最高带宽”，本质上是优化网络的瞬时性能（如传播时延或吞吐量）。然而，这些短暂的链路常以牺牲拓扑稳定性为代价，导致网络结构频繁变化，反而损害了长时期的平均可达概率。尤其在卫星网络这类典型的时延容忍场景下，因等待转发机会而产生的存储时延远超过优化物理距离所缩小的毫秒级传播时延。

此外，本文的重点在于巨型星座的渐进式建设方法。因此，为了确保仿真的公平性和一致性，对本文提出的

算法以及所有用于性能比较的基线算法，在后续仿真时均采用了相同的星间拓扑构建策略。这保证了不同建设方案的性能差异主要来源于建设方法本身，而非底层拓扑构建策略的不同，从而使得比较结果更加客观有效。

假设网络中的节点集合为 $\mathcal{V}$ ，节点的总数为 $|\mathcal{V}|$ ，对于任意一对不同的节点 $s, d \in \mathcal{V} (s \neq d)$ ，定义指示函数为：

$$I(s, d) = \begin{cases} 1, & \text{存在从} s \text{到} d \text{的可达路径} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (27)$$

网络可达概率的计算公式为：

$$p(x) = \frac{1}{|\mathcal{V}|(|\mathcal{V}| - 1)} \sum_{s, d \in \mathcal{V} \atop s \neq d} I(s, d) \quad (28)$$

为了评价网络长时间的连通性，在卫星星座的一个重复周期 T 内，将网络划分为 z 个时隙。其中第 i 个时隙的星间拓扑快照对应的网络可达概率表示为 $p_i(x)$ ，而对应的网络可达概率的均值 $\bar{P}$ 为：

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^z p_i(x)}{z} \quad (29)$$

图1为5颗卫星组成的星座在4个时隙的星间网络拓扑。其中一共得到4个时隙的卫星间网络的拓扑快照。每个拓扑快照的可达概率组成的集合为 $\{0.2, 0.3, 1, 0.4\}$ ，最终得到的网络可达概率均值为0.475。

1.4 问题定义和算法设计

本文分阶段部署优化问题优先考虑两个方面：最小化重访时间分布评价指标 Q^* 和最大化星间网络的可达概率均值 $\bar{P}$ 。通常，为了确保地面站始终与卫星保持连接，已部署的卫星应尽可能分布在多个轨道平面和均匀的空间中，而非集中在某一特定区域。随着地球的自转和卫

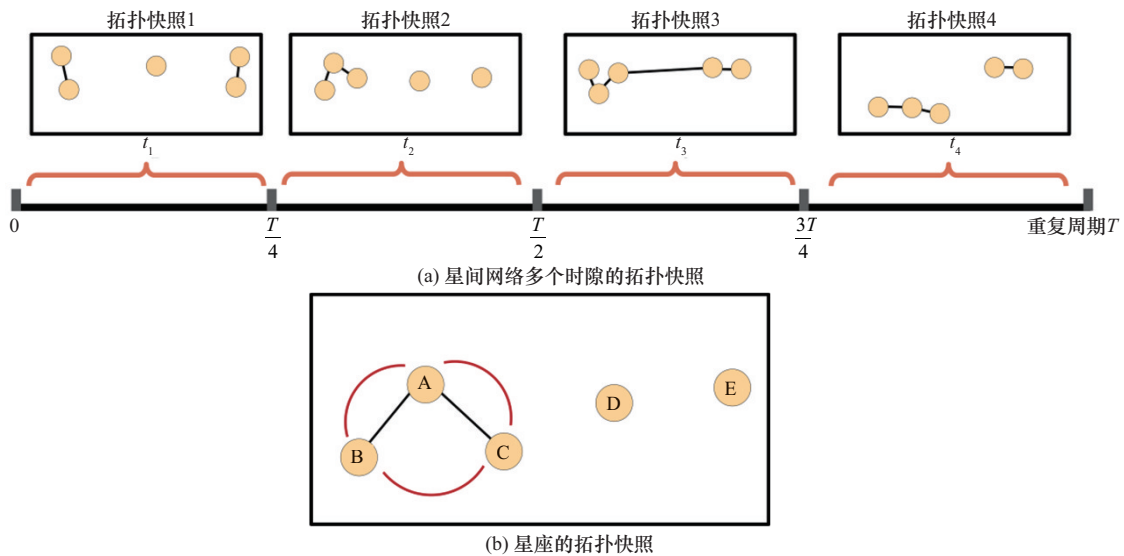


图1 5颗卫星组成的星座在4个时隙的星间网络拓扑

星在轨道上的运动，地面站可能实现对卫星星座的均匀访问。对于星间连通性，星间的地理距离需要彼此接近以满足建立星间链路的条件。在选择每次发射的卫星时，仅考虑重访时间可能导致星间的地理距离不能满足建链条件，从而减少星间链路的数量，降低可达概率，最终削弱卫星间的网络连通性。因此，本文提出的多目标优化算法的目标函数定义为：

$$\min F(x) = (f_1(x), f_2(x))^T, x \in \Omega \subseteq \mathbb{R}^2 \quad (30)$$

$F(x)$ 是将决策空间 Ω 映射到二维目标函数空间的函数，且在 $F(x)$ 中有两个子目标函数，分别是重访时间评价指标 Q^* 和星间网络可达概率均值 $\bar{P}$ 。因为 Q^* 的值越小说明卫星和地面站的重访时间长度越均匀，而 $\bar{P}$ 的值越大，说明卫星间连通性越好，所以，可以得到：

$$f_1(x) = Q^*, f_2(x) = -\bar{P} \quad (31)$$

此外，多目标优化需要满足以下约束，即：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{约束1: } S_k \in S_r \\ \text{约束2: } |S_k| = N_x \\ \text{约束3: } \exists j \in \{1, 2, \dots, P\} \text{ s.t. } T_k \subseteq \bigcup_{a=j}^{j+N-1} ((a-1) \bmod P + 1) \\ \text{约束4: } \theta_{\text{地面站}} \in [25^\circ, 90^\circ] \\ \text{约束5: } d_{\text{星间链路}} \in [0, 3\ 500] \text{ km} \\ \text{约束6: } N_{\text{星间链路}} \in [0, 4] \end{array} \right. \quad (32)$$

在式(32)中定义了星座建设场景下多目标优化问题的约束。其中，约束1确保每颗卫星只部署一次。约束2定义了为每个部署选择的卫星数量 S_k 应等于计划部署的卫星数 N_x 。约束3表示集合 S_k 中的卫星应位于 N 个相邻轨道平面中的一个或者几个轨道平面上。约束4定义了任何地面站的最小仰角 $\theta_{\text{地面站}}$ 在任何时候都不能小于 25° 。约束5表示卫星间通信终端 $d_{\text{星间链路}}$ 的最大范围不超过 $3\ 500 \text{ km}$ ^[14]。约束6定义了每颗卫星能够建立星间链路的数量 $N_{\text{星间链路}}$ 的最大值为4。

传统的多目标优化方法通常通过加权合并各个子目标，但这种方法存在若干问题，尤其是每个优化目标的权重难以准确确定，且权重的设置对优化结果具有显著影响。为了实现目标(30)，本文考虑了星间与星地的相对位置关系，并基于NSGA-II算法提出了一种用于卫星部署的星座部署算法，旨在确定每个卫星部署阶段所选择的卫星。NSGA-II是一种多目标优化算法，它利用遗传算法的原理解决多个冲突目标的问题。已有研究表明，NSGA-II在效率和效果方面均表现优异^[15]。NSGA-II的计算复杂度为 $O(MN^2)$ ，其中 N 为种群规模， M 为目标数

量^[16]。在NSGA-II算法中，非支配排序根据种群中个体间的支配关系，将种群划分为多个不同层级的帕累托前沿。位于第一帕累托前沿的个体不被种群中其他任何个体支配，共同构成帕累托最优解集。此外，NSGA-II还通过拥挤度保持种群的多样性，有效防止了过早收敛到局部最优解。然而，由于原始的NSGA-II算法主要针对连续搜索空间中的解生成进行优化，因此其无法直接应用于涉及离散解空间的卫星部署问题。鉴于此，本文对NSGA-II算法的几个关键组件进行了调整，包括种群初始化、交叉与变异操作，以适应卫星部署问题的离散特性。具体而言，传统的变异算子通常用于连续变量的微小扰动，而卫星部署问题本质上是离散的，因此变异操作必须进行相应调整，例如：从候选卫星列表中选择一颗卫星来替换当前部署方案中的另一颗卫星。

2 仿真与性能分析

2.1 仿真环境设置

为评估所提出算法在真实低轨卫星网络环境下的适用性与性能，本文基于OMNeT++网络仿真平台在一台配置Intel i7-13700KF处理器及32 GB内存的主机上，设计并搭建了一套完整的仿真环境，其详细参数配置见表1。

表1 NSGA-II算法和网络仿真参数

仿真参数	值
卫星数量	540颗
轨道平面数量	30个
每个轨道平面卫星数量	18颗
轨道高度	550 km
轨道倾角	53°
地面站数量	5个
地面站最小仰角	25°
卫星上通信终端数量	4个
星间链路最大距离	3 500 km
停泊轨道高度	100 km
每次部署卫星的数量	36颗
最大单次部署时间	65天
最大单次部署消耗燃料占比	10%
拓扑快照持续时间	120 s
仿真周期	1天
星地链路容量	2 Gbit/s
星间链路容量	10 Gbit/s
每小时流量强度	$\lambda = 500$ 的泊松分布
每次流量中数据包的数量	100个
数据包的大小	20 Mbit

表2反映了单次卫星部署所需时间随最大部署轨道平面数量的变化关系,随着最大部署轨道平面的增加,单次部署花费的时间也会线性增加。本次仿真将单次部署的最大时间限制设为65天,在停泊轨道和目标轨道根数确定的条件下,根据部署时间约束,可得每次部署所覆盖的最大相邻轨道平面数量 N 的最大值为7个。由于每次部署可选的轨道平面数越多,设计部署方案时可选的候选卫星数量也越多,有利于算法收敛于对DTN性能具有最大贡献的卫星星座构型。因此,为兼顾性能与时间约束,本文中最大相邻轨道平面数量 N 取为7。此时,多平面部署所需的额外燃料消耗占卫星初始质量的比例为5.71% (燃料比冲取450)。

表2 单次卫星部署所需时间随最大部署轨道平面数量的变化关系

最大相邻轨道平面数量 N /个	花费时间 t_d /天	最大相邻轨道平面数量 N /个	花费时间 t_d /天
1	0	7	60.24
2	10.04	8	70.28
3	20.08	9	80.32
4	30.12	10	90.36
5	40.16	11	100.40
6	50.20	12	110.44

2.2 重访时间和星间连通性分析

除了基于NSGA-II的星座部署算法外,本文还实现了两类传统算法(最小重访时间标准差算法和基于相同轨道平面的星座部署算法),用来评估所提算法的性能。具体而言,最小重访时间标准差算法考虑已部署的卫星星座对每个地面站的重访时间长度,并旨在最小化所有重访时间长度的标准差。基于相同轨道平面的星座部署算法则是在选择部署卫星时,力求最小化所占用轨道平面的数量,在该算法中,同样考虑了重访时间分布评价指标和星间网络可达概率两个目标。由于每次部署恰好占用两个相邻的轨道平面,因此无须采用NSGA-II算法,而是通过对所有可能的轨道平面进行两两遍历,便可直接得出结果。

图2展示了3种算法在不同卫星部署阶段下的重访时间分布评价指标。从结果可以看出,随着卫星部署阶段的推进,3种算法的重访时间分布评价指标均呈现下降趋势。这是因为该评价指标反映了重访时间长度的集中程度及其在集中区域内的平均值,随着空间网络中卫星数量的增加,地面站能够与卫星星座有更长的通信时间,从而减少了总体重访时间的长度,进而降低了重访时间

分布评价指标。此外,基于NSGA-II的星座部署算法始终表现出最低的评价指标数值,这表明该算法所部署的星座能够实现更均匀且较短的重访时间长度。相比之下,基于相同轨道平面的星座部署算法受到轨道平面数量限制,卫星不能在空间中广泛分布,对地面覆盖的时间较为集中,导致重访时间分布评价指标较高。

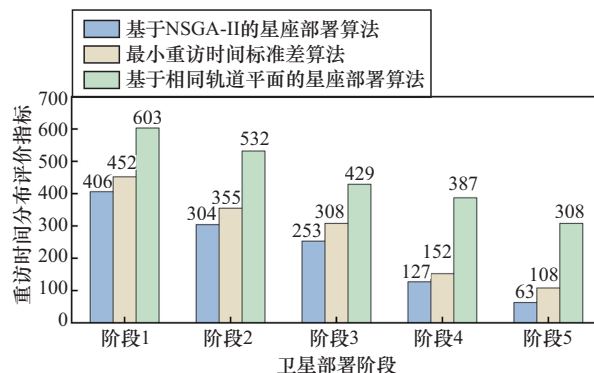


图2 3种算法在不同卫星部署阶段下的重访时间分布评价指标

图3展示了3种算法在不同卫星部署阶段下的星间网络可达概率。随着部署阶段的推进,空间网络中卫星数量逐步增加,原本不能连通的卫星群组之间可能会通过新加入的卫星建立的星间链路得到连接,从而有效提高了星间网络的可达概率。在不同部署算法性能的比较中,基于NSGA-II的星座部署算法表现出了最高的星间网络可达概率,这是因为在卫星选择过程中,该算法优先考虑能够与现有卫星建立星间链路的卫星,或者通过添加新的卫星在先前不连通的子网络之间创建星间链路。相对而言,基于相同轨道平面的星座部署算法部署的星座,其星间网络可达概率始终为100%。这是由于该算法所部署的卫星全部位于相邻的轨道平面内,因此卫星之间的连通性得到了保障。

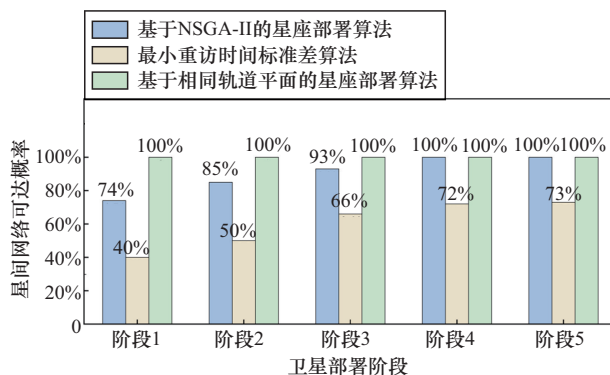


图3 3种算法在不同卫星部署阶段下的星间网络可达概率

2.3 业务投递成功率和平均成功投递时延分析

在网络仿真中,数据在随机选择的一颗卫星上生成,当数据包成功传输到地面时,即视为成功投递并停止计时。图4展示了3种算法在不同卫星部署阶段下的星地业务投递成功率与平均成功投递时延。数据包的生存时间(time to live, TTL)被设为60 s,如果在超过60 s的时间内数据包未被传输到地面,则会被丢弃。每颗卫星的存储空间为4 GB,当数据包暂时没有可用路径时,会被存储在存储空间中;当存储空间满时,新到达的数据包会被丢弃。在不同的部署阶段,基于NSGA-II的星座部署算法的投递成功率均高于其他两种算法。特别是在第5部署阶段,该算法实现了90%的投递成功率,相比最小重访时间标准差算法(76.8%)提高了17.19%,相比基于相同轨道平面的星座部署算法(65.58%)提高了37.24%。

图5展示了在数据包生存时间设置为600 s,每颗卫星的存储空间为8 GB时,3种算法的星地业务投递成功率和平均成功投递时延。随着数据包生存时间和卫星缓存容量的增加,所有算法的投递成功率均显著提高。这是因为更长的TTL为发现可行的传输路径提供了更多机会,而更大的缓存容量使每个卫星节点能够支持更多的数据传输路径,从而减少了因缓存溢出导致的数据丢失。同样,随着卫星部署阶段的推进,不同策略的投递成功率也都有所提升,这是因为其他卫星的加入为网络带来了更多的路由选择,使得那些之前没有可行路径的服务能够建立起至少一条传输路径。

在不同的网络条件和卫星部署阶段下,基于NSGA-II的星座部署算法始终保持最高的投递成功率,这主要归

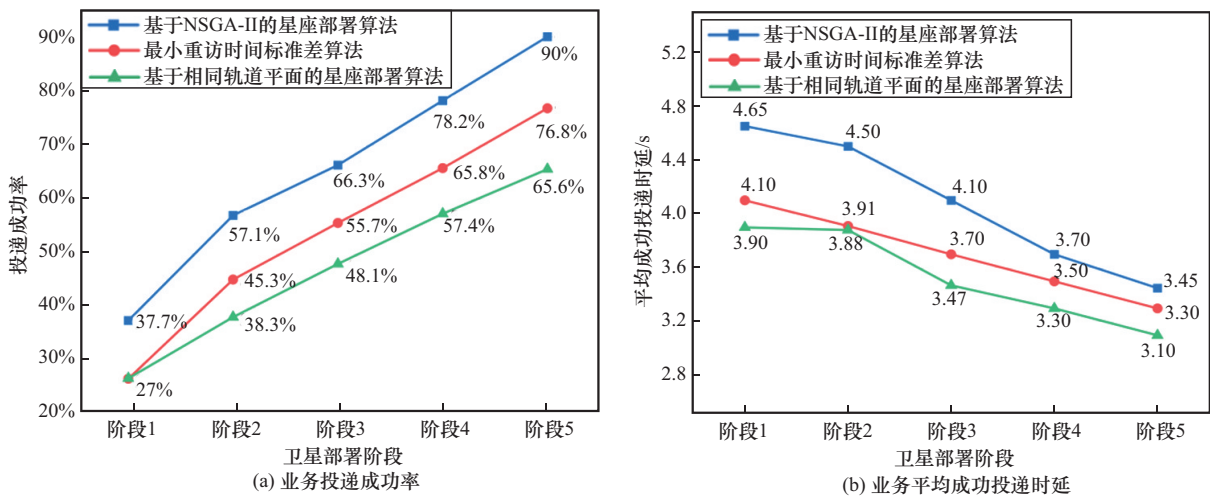


图4 3种算法在不同卫星部署阶段下的星地业务投递成功率和平均成功投递时延 (TTL=60 s, 星上存储空间为4 GB)

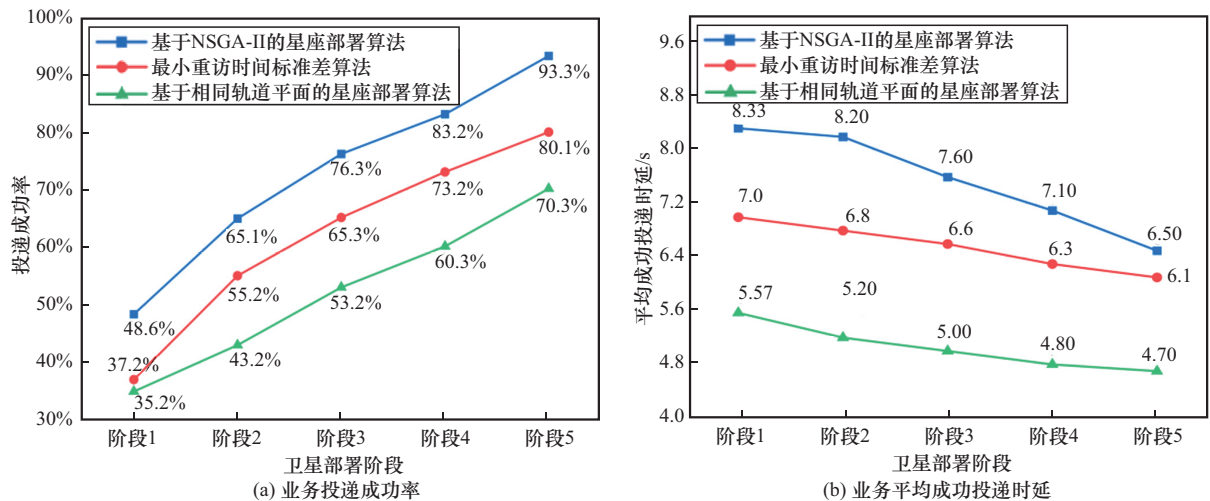


图5 3种算法在不同卫星部署阶段下的星地业务投递成功率和平均成功投递时延 (TTL=600 s, 星上存储空间为8 GB)

因于该算法在卫星部署过程中综合考虑了网络连通性的因素,使得星座拥有更多的可用投递路径。该算法同时考虑了星地链路和星间链路两个关键因素,其中最小重访时间分布评价指标保证了大部分时间内星座能够保持至少一条有效的星地链路,而最大星间网络可达概率确保了星间节点间的连通性,这为业务传输路径的计算提供了有力保障。然而,尽管其投递成功率最高,其在平均投递成功时延上却表现最差,这是因为它成功地处理了其他算法无法投递的一些高时延服务。

3 结束语

随着星座规模的持续扩大,巨型星座的部署策略问题日益突出。传统的同轨部署方式难以有效利用建设初期的在轨卫星资源,限制了星座的早期服务能力。为解决此问题,本文提出了一种分阶段的星座部署优化算法。首先,构建了一个包含部署燃料与时间约束的通用卫星部署模型。随后,基于该模型,提出了一种基于NSGA-II的星座部署算法,通过协同优化星间链路连通性与对地覆盖性能,规划出各建设阶段的最优卫星部署方案。仿真结果表明,该算法能显著提升星座建设期间的星地数据传输业务的投递成功率,有效验证了所提策略的优越性。

参考文献

- [1] Al Homssi B, Al-Hourani A, Wang K, et al. Next generation mega satellite networks for access equality: opportunities, challenges, and performance[J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(4): 18-24.
- [2] Shaengchart Y, Kraiwanit T. The SpaceX Starlink satellite project: business strategies and perspectives[J]. Corporate and Business Strategy Review, 2024, 5(1): 30-37.
- [3] Sung T, Ahn J. Optimal deployment of satellite mega-constellation[J]. Acta Astronautica, 2023, 202: 653-669.
- [4] Liu Z, Guo W, Hu W, et al. Delay minimization for progressive construction of satellite constellation network[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(10): 1718-1721.
- [5] Yin L, Liu Z, Mysore B S, et al. Integrated sensing and communications enabled low earth orbit satellite systems[PP]. arXiv Preprint, 2024, arXiv: 2304.00941.
- [6] 彭木根, 张世杰, 许宏涛, 等. 低轨卫星通信遥感融合: 架构、技术与试验[J]. 电信科学, 2022, 38(1): 13-24.
- [7] Peng M G, Zhang S J, Xu H T, et al. Communication and remote sensing integrated LEO satellites: architecture, technologies and experiment[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(1): 13-24.
- [8] Hossain A. Orbital decay of low earth orbit satellites: a numerical investigation[PP]. arXiv Preprint, 2019, arXiv: 1908.05273.
- [9] Fraire J A, De Jonckère O, Burleigh S C. Routing in the space Internet: a contact graph routing tutorial[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2021, 174: 102884.
- [10] Casteigts A, Flocchini P, Quattrociocchi W, et al. Time-varying graphs and dynamic networks[J]. International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems, 2012, 27(5): 387-408.
- [11] Wang R, Liu X, Yang L, et al. A study of DTN for reliable data delivery from space station to ground station[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2024, 42(5): 1344-1358.
- [12] Lee H W, Jakob P C, Ho K, et al. Optimization of satellite constellation deployment strategy considering uncertain areas of interest[J]. Acta Astronautica, 2018, 153: 213-228.
- [13] Mahdisoozani H, Bakhtiari M, Daneshjoo K. Developing novel multi-plane satellite constellation deployment methods using the concept of nodal precession[J]. Advances in Space Research, 2021, 68(8): 3141-3158.
- [14] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [15] Chaudhry A U, Lamontagne G, Yanikomeroglu H. Laser intersatellite link range in free-space optical satellite networks: impact on latency[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2023, 38(4): 4-13.
- [16] Liu Y, Wang L, Lu Z, et al. A stateless design of satellite-terrestrial integrated core network and its deployment strategy[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2024, 21(1): 953-966.
- [17] Davoodi Monfared M, Mohades A, Rezaei J. Convex hull ranking algorithm for multi-objective evolutionary algorithms[J]. Scientia Iranica, 2011, 18(6): 1435-1442.

[作者简介]



刘一恺 (2001—), 男, 北京邮电大学信息光子学与光通信全国重点实验室硕士生, 主要研究方向为卫星通信和网络。



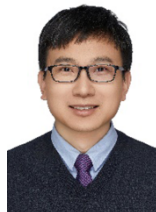
张冬顺（1993-），男，中国运载火箭技术研究院北京航天万源科技有限公司工程师，主要研究方向为卫星通信和网络。



张冬（1989-），男，博士，中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师，主要研究方向为卫星网络总体设计。



崔欣斌（1992-），男，中国运载火箭技术研究院北京航天万源科技有限公司工程师，主要研究方向为卫星通信和网络。



郭秉礼（1982-），男，博士，北京邮电大学信息光子学与光通信全国重点实验室副研究员，主要研究方向为卫星通信网络。



陆莉莉（2001-），女，北京邮电大学信息光子学与光通信全国重点实验室硕士生，主要研究方向为卫星通信和网络。



周宇（1990-），男，博士，北京邮电大学信息光子学与光通信全国重点实验室副研究员，主要研究方向为卫星通信和网络。



王兴梅（1984-），女，中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师，主要研究方向为卫星通信和网络。



黄善国（1978-），男，博士，北京邮电大学信息光子学与光通信全国重点实验室教授，主要研究方向为卫星通信和网络。