

面向非地面网络多 QoS 保障的低地球轨道卫星星座设计

王汝言^{1,2,3}, 叶显熠^{1,2,3}, 何鹏^{1,2,3}, 崔亚平^{1,2,3}, 吴大鹏^{1,2,3}, Alexander Fedotov⁴

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 先进网络与智能互联技术重庆市高校重点实验室, 重庆 400065;
3. 泛在感知与互联重庆市重点实验室, 重庆 400065; 4. 圣彼得堡彼得大帝理工大学, 圣彼得堡 195251)

摘要: 低地球轨道卫星星座 (LSC) 能够为非地面网络 (NTN) 提供无缝和快速连接, 但无法为用户提供足够的服务质量保障, 严重影响了 NTN 系统性能。综合考虑多个 QoS 指标, 建立了 LSC 的容量与下行链路预算模型, 进而, 将星间链路的建立制定为 QoS 保障的链路预算问题。提出了带有改进交叉和变异算子的非支配排序遗传算法 (INSGA-II) 优化 LSC 的配置, 实现多重覆盖率和系统容量的最大化以及星座成本的最小化。数值结果表明, 与 Telesat 和 Kepler 相比, 所设计的 LSC 具有相当甚至更高的性能, 且其星座规模仅为 Kepler 系统的 64%。

关键词: 非地面网络; 低地球轨道卫星星座设计; QoS 保障; 多目标优化; 星间链路

中图分类号: TN927

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2023225

LEO satellite constellation design with multi-QoS guarantee for non-terrestrial network

WANG Ruyan^{1,2,3}, YE Xianyi^{1,2,3}, HE Peng^{1,2,3}, CUI Yaping^{1,2,3}, WU Dapeng^{1,2,3}, Alexander Fedotov⁴

1. School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China
2. Advanced Network and Intelligent Connection Technology Key Laboratory of Chongqing Education Commission of China, Chongqing 400065, China
3. Chongqing Key Laboratory of Ubiquitous Sensing and Networking, Chongqing 400065, China
4. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg 195251, Russia

Abstract: LEO satellite constellation (LSC) offers seamless and fast connectivity for non-terrestrial network (NTN). However, the lack of QoS guarantees for users significantly impacts the performance of the NTN system. Considering multi-QoS metrics, a capacity and downlink budget model for LSC was established, and subsequently, the establishment of inter-satellite links was framed as a link budget issue for the QoS guarantee. The non-dominated sorting genetic algorithm (INSGA-II) with improved crossover and mutation operators was proposed to optimize LSC, aiming to maximize coverage and system capacity while minimizing constellation costs. The numerical results demonstrate that the designed LSC exhibits comparable or superior performance to Telesat and Kepler, and its scale is only 64% of the Kepler system.

Keywords: non-terrestrial network, LEO satellite constellation design, QoS guarantee, multi-objective optimization, ISL

收稿日期: 2023-09-05; 修回日期: 2023-10-18

通信作者: 何鹏, hepeng@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61901070, No.61801065, No.62271096, No.61871062, No.U20A20157, No.62061007); 重庆市教委科学技术研究基金资助项目 (No.KJQN202000603, No.KJQN201900611); 重庆市自然科学基金资助项目 (No.CSTB2022NSCQ-MSX0468, No.cstc2020jcyjzdxmX0024, No.cstc2021jcyjmsxmX0892); 重庆市高校创新研究群体基金资助项目 (No.CXQT20017); 重庆市研究生科研创新基金资助项目 (No.CYB22246); 重邮信通青创团队支持计划基金资助项目 (No.SCIE-QN-2022-04)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61901070, No.61801065, No.62271096, No.61871062, No.U20A20157, No.62061007), The Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (No.KJQN202000603, No.KJQN201900611), The Natural Science Foundation of Chongqing (No.CSTB2022NSCQ-MSX0468, No.cstc2020jcyjzdxmX0024, No.cstc2021jcyjmsxmX0892), The University Innovation Research Group of Chongqing (No.CXQT20017), The Chongqing Graduate Student Scientific Research Innovation Project (No.CYB22246), The Youth Innovation Group Support Program of ICE Discipline of CQUPT (No.SCIE-QN-2022-04)

0 引言

当前的地面网络 (TN, terrestrial network) 无法应对指数增长的数据业务^[1-2], 也难以以为偏远地区提供足够的网络覆盖^[3]。此外, 面对自然灾害等突发网络故障场景, TN 缺少足够的可靠性保障技术。随着星载处理能力的提高, 非地面网络 (NTN, non-terrestrial network) 被认为是 TN 服务补充和增强的有效方案。目前, 标准组织已经开始研究 NTN 的发展, 3GPP 在 Rel-15 中讨论了利用卫星为用户提供网络服务的相关方法与技术, 并在后续进行了 Rel-16、Rel-17 和 Rel-18 的研究, 以启动 NTN 的工作^[4]。

卫星星座根据不同的轨道高度和用途可分为地球同步轨道卫星星座、中地球轨道卫星星座和低地球轨道 (LEO, low earth orbit) 卫星星座 (LSC, LEO satellite constellation)。与地球同步轨道卫星系统相比, 拥有更佳通信性能与更大规模的 LSC 已被广泛开发并被视为 NTN 提供全球无缝连接的关键系统^[5-8]。为了实现高效的卫星通信, 以满足不同地区用户的服务质量 (QoS, quality of service) 要求, 星座设计是部署 LSC 的关键方面之一。高效的 LSC 可以在不浪费资源的情况下, 通过适当的星座规模来提高 TN 的 QoS, 多家公司目前正在进行着相关工作, 如 Telesat、OneWeb、SpaceX 和 Amazon 等^[9]。尽管已经提出了数个典型的星座模型来实现全球覆盖, 例如极 (Polar) 轨道模型^[10]、Walker 模型^[11]和 Flower 模型^[12], 但它们只能满足基本的通信需求。因此, LSC 设计的首要目标不仅是满足基本需求, 还需要进一步平衡卫星-地面网络的性能和 LSC 的部署成本^[13], 以实现高速和无缝的连接。

卫星星座设计是一个典型的多目标优化问题, 由于目标函数之间一般具有非线性、混合连续离散变量以及各优化目标之间相互冲突又相互耦合的关系, 传统的优化算法 (基于微积分的方法和穷举法) 不能有效求解。因此, 一般用于求解星座设计的方法包括覆盖带 (SoC, street of coverage) 法^[14-15]以及智能优化算法。文献[14]利用 SoC 的方法设计了一个基于 LEO 的全球导航 Walker 小规模星座, 主要考虑其覆盖以及导航性能。文献[15]提出了近赤道两倍覆盖宽度函数, 并利用 SoC 方法设计了连续多重覆盖的小卫星星

座。然而, 随着空间任务趋向复杂化、星座设计目标的多元化以及星座规模的巨型化, 基于 SoC 的方法变得低效且不适用于求解大规模星座^[16], 因此采用基于启发式思想的多目标进化算法用于寻求权衡解, 例如遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法等。

现有工作主要关注星座的覆盖^[17-18]、规模^[13,19-21]以及系统性能^[22-23]。文献[17]利用模拟退火算法设计了最佳 LSC, 并利用开发的模型计算星座的轨道参数, 旨在优化 LSC 的重访频率、覆盖性以及 ISL 连接性。文献[18]将多重覆盖率与覆盖百分比作为目标函数, 利用遗传算法设计了区域 LSC。文献[13]提出了满足回程要求的极轨道 LSC, 在满足每个地面终端无缝覆盖和回程要求的情况下, 最小化星座规模。文献[19]设计了染色体长度可变的遗传算法, 用于编码星座设计问题的解决方案, 在一次算法优化中探索不同规模的星座。文献[20]旨在减少满足回程容量和无缝全球覆盖所需的卫星总数, 提出了考虑卫星移动性的多层 LSC 部署方案。文献[21]针对当今流行的星座设计框架并不能很好地扩展到两百颗卫星之外的问题, 设计了一个可定制的大型星座设计优化框架, 然后利用所提出的框架设计了一组用于空间物联网的 LSC。文献[22]考虑了覆盖、星座容量以及系统成本之间的权衡, 使用非支配排序遗传算法 (NSGA-II, non-dominated sorting genetic algorithm-II) 来搜索最佳的 LSC。文献[23]使用多目标进化算法设计了全球导航 LSC, 并对比了不同算法的性能。然而, 现有的研究工作大多从覆盖性能或通信性能展开设计工作, 缺乏系统层面的设计。另外, 没有考虑 QoS 保障和链路预算约束而设计的 LSC 无法在任何时间、任何地点提供有效和可靠的服务, 导致了有限资源的极大浪费。此外, 大多数研究认为星间链路 (ISL, inter-satellite link) 的建立是静态和简单的^[24-26], 没有考虑到星座配置对链路预算的影响。

因此, LSC 设计仍然是开放且具有挑战的问题。首先, 卫星的高移动性使得在实际的星座中建立 ISL 是动态和不稳定的, 而不同的星座配置对链路预算的影响难以建模。其次, LSC 设计是典型的多目标优化问题, 由于目标函数和参数之间的离散和非线性关系而变得复杂, 星座设计难以求得最优解。另外, 要求解 LSC 设计中涉及的

众多参数，就必须深入讨论参数空间的简化和设计变量之间的权衡及其对星座任务的影响。

为了解决上述挑战，本文以最大化星座多重覆盖率与系统容量以及星座成本最小化为目标，提出了面向非地面网络多 QoS 保障的低地球轨道卫星星座设计方法。首先，分析了星座的覆盖性能，基于广泛使用的 Walker 模型简化参数空间。然后，根据人口密度分布建模用户需求模型并与星座提供的链路容量结合作为优化目标，对星地链路 (SGL, satellite-to-ground link) 和星间链路预算以及星座成本部分建模，进而提出设计 LSC 的多目标优化问题。接着，提出了增加种群多样性的非支配排序遗传算法 (INSGA-II) 算法以求解该优化问题。最后，设计了仿真场景对设计结果和算法进行了仿真验证，目标是在多 QoS 指标以及链路预算的约束下设计成本尽可能低的全球无缝覆盖 LSC。

1 QoS 指标与用户需求分析

QoS 指标的建立和用户需求建模是本文进行星座优化设计的基础和前提，只有获得用户的需求和网络的 QoS 要求，才能更好地优化网络布局。因此，本节首先描述了 LSC 中的 QoS 指标，随后对用户需求进行了分析。

1.1 QoS 指标

将 QoS 指标定义为误码率、星地信息速率、星间信息速率以及多重覆盖率 4 个参数^[27]，如表 1 所示。

表 1 LSC 的 QoS 指标

QoS 指标	等价参数
误码率	BER_0
星地信息速率	R_{user}
星间信息速率	R_{ISL}^0
多重覆盖率	ρ_0

误码率：表征信息符号解释中出现错误的概率，用 BER_0 衡量。

星地信息速率：表征卫星到地面之间传输信息的速度，由地面用户要求的信息速率 R_{user} 衡量。

星间信息速率：类似于星地信息速率，衡量卫星之间的信息传输速率，用 R_{ISL}^0 衡量。

多重覆盖率：表征地面用户在任何时间、任何地点下可以与 LSC 建立连接的卫星数量，用 ρ_0 衡量。

1.2 用户需求

用户需求是建立通信网络的主要标准之一。然而，描述用户的需求是一项困难的任务。本节将地球区域网格化，使用网格区域内的潜在用户数量表示用户的容量需求。用户需求模型将结合地球人口密度分布以及第 3 节中推导的星座容量模型来估计星座能提供 QoS 保障的最终用户数量^[28]。

根据联合国世界人口展望发布的 2020 年人口密度图，对地球进行网格划分。为了便于数据处理，接入网络的潜在用户需求基于归一化的人口分布密度^[29]，满足

$$\sum_{grid=1}^{N_g} D(grid) = 1 \quad (1)$$

其中， N_g 表示划分的网格总数， $D(grid)$ 表示每个网格的归一化人口总体密度。

每个目标网格中的用户需求容量 $DC(grid)$ 与网格区域内的人口数量、人口密度以及通过 LSC 接入网络的用户规模因子（请求卫星通信的概率）有关^[22]，用式(2)表示

$$DC(grid) = f_{LSC} N_{population} D(grid) \quad (2)$$

其中， $N_{population}$ 表示地面通信网络所服务的用户数量总数， $f_{LSC} \in (0,1)$ 表示随着 LSC 的发展规模发生变化的比例因子，代表通过 LSC 通信的用户占全球通信用户的比例。因此，总的用户需求容量 DC_{total} 表示为

$$DC_{total} = \sum_{grid=1}^{N_g} DC(grid) \quad (3)$$

2 星座系统设计

本节首先描述了 LSC 的网络架构，然后构建了星座几何模型、下行链路预算设计与容量模型、星间链路预算设计，最后分析了星座成本。

2.1 网络架构

基于 LSC 的 NTN 架构如图 1 所示，星地网络由空间段具备 ISL 的 LSC 和位于不同卫星波束区域内的地面区域组成。LSC 的主要用例为：1) 城镇区域的用户可以直接通过 TN 获得网络服务，而 LSC 可以在流量密度较高的区域作为 TN 的补充；2) 在

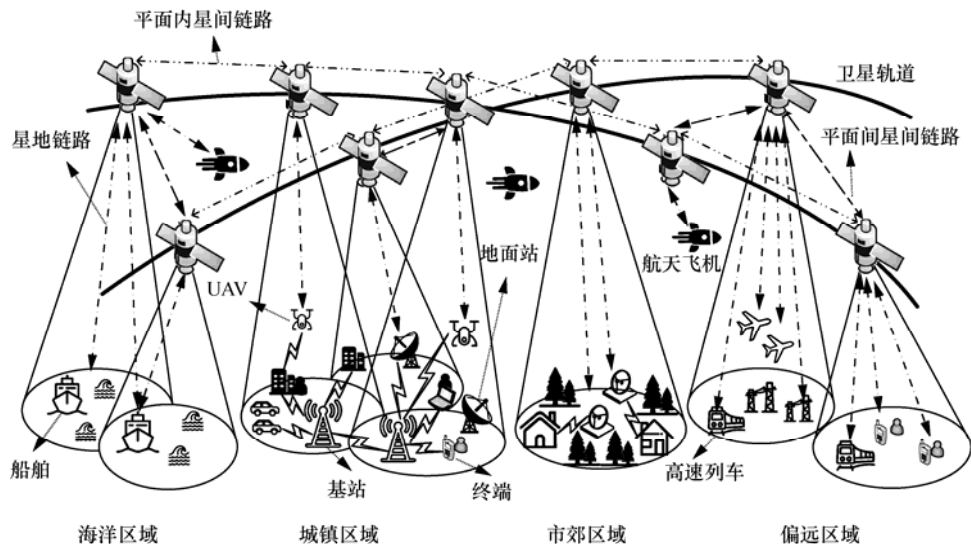


图 1 基于 LSC 的 NTN 架构

TN 无法为移动平台（例如高速列车、飞机等）提供正常服务的情况下，来自 LEO 卫星的波束覆盖可以确保服务的连续性以显著增强网络的可靠性；3) 在极端区域（例如海洋、极地或高山等）以及偏远区域不存在网络服务或服务不足，部署地面基础设施不切实际或者成本效益太低，LSC 可通过其覆盖和容量等优势为这些区域提供无缝网络覆盖，以补充 TN 的不足。

2.2 星座几何模型

卫星星座由多颗卫星按照一定的几何构型配置而成，这些卫星协同完成各种任务。因此，星座优化设计首先需要确定一合理的星座构型配置。首先，用于确定星座的几何构型需要获得的星座参数为轨道平面数 N_p 、单轨道平面卫星数 N_{sat}^p （显然，卫星总数 $N_{total} = N_p N_{sat}^p$ ）以及星座轨道高度 h 。然后，6 个轨道参数用于确定每颗卫星的具体位置，分别表示为轨道半长轴 a 、偏心率 e 、轨道倾角 i 、升交点赤经 Ω 、近地点辐角 w 以及平近点角 M 。不同的轨道参数对星座构型有不同的影响。例如，偏心率决定轨道的形状，当 e 为 0 时，轨道为圆形，当 e 越接近 1 时，椭圆度越大，轨道越扁； i 和 Ω 确定轨道平面的位置； w 指轨道近地点与升交点之间对地心的张角，表示轨道在轨道平面中的取向； M 表示卫星轨道经过近地点的平均近点角度，可用来描述 t 时刻轨道面上卫星与近地点间的相对位置。同时，一般用 t_0 时刻的真近点角 ν 以及偏近点角来表示平近点角。

卫星为用户提供服务的必要前提是满足其波束覆盖目标所在区域。假设地球为理想球体，单个卫星的覆盖示意如图 2 所示， $R_e \approx 6371 \text{ km}$ 表示地球平均半径， θ 表示卫星-用户终端对地心的张角（即地心角）， d 表示卫星到用户终端的视线线路（LoS, line-of-sight）距离， δ_{min} 表示卫星与用户终端建立通信连接所必需的最小仰角。

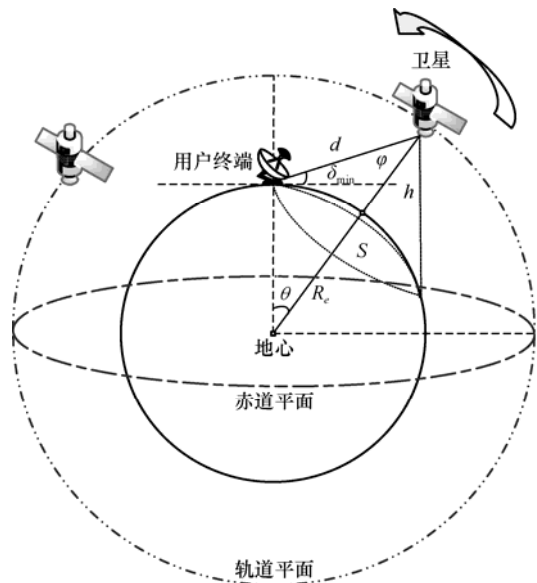


图 2 单个卫星的覆盖示意

由星座几何构型可知，单个卫星的覆盖范围与 δ_{min} 成反比。 δ_{min} 决定了通信质量的好坏，随着 δ_{min} 的减小，不仅 SGL 距离 d 会逐渐增加，在城市或山地等地区的 SGL 还会因建筑物或高山等障碍物而受到更严重的阴影效应和多径效应。相反， δ_{min} 越

大，多径效应和阴影带来的影响越小，通信链路更加稳定，可降低建立星地链路的成本，并且星地之间的传播时延也随之减小。然而， δ_{\min} 的增大使卫星覆盖范围 S 更小，满足一定覆盖要求所需的卫星数量会更多，发射卫星的成本会显著扩大。因此，最小仰角的大小应该合理设计。

根据卫星星座的轨道高度 h 、地球平均半径 R_e 以及用户最小仰角 δ_{\min} ，地心角 θ 为

$$\theta = \arccos\left(\frac{R_e}{h + R_e} \cos \delta_{\min}\right) - \delta_{\min} \quad (4)$$

确定地心角 θ 后，单颗卫星的覆盖面积为

$$S = 2\pi R_e^2 (1 - \cos \theta) \quad (5)$$

在第 p 取样时刻下对第 q 个地面网格的覆盖情况 $\text{cover}^{q,p}$ 进行评估，表示为

$$\text{cover}^{q,p} = \begin{cases} 1, & P_q \in G \\ 0, & P_q \notin G \end{cases} \quad (6)$$

其中， P_q 表示第 q ($q=1,2,\dots,K$) 个网格，其经纬度坐标为 $(\lambda_q, \phi_q | \lambda_q = \lambda_0 + q\Delta\lambda, \phi = \phi_0 + q\Delta\phi)$ ， (λ_0, ϕ_0) 表示参考网格的经纬度，卫星的覆盖区域表示为 $G = \{G_1, G_2, \dots, G_{N_{\text{total}}}\}$ 。如果 (λ_q, ϕ_q) 在 G 所确定的范围内，则表示该网格被覆盖（即 $\text{cover}^{q,p} = 1$ ）；如果不在该范围内，则表示该网格未被覆盖。

然后，卫星星座的覆盖百分比 ν 定义为^[18]

$$\nu = \sum_{q=1}^K \sum_{p=1}^L \frac{\text{cover}^{q,p}}{N_g L} \quad (7)$$

其中， L 表示取样瞬间总数。

显然，单颗卫星对用户可见是最低要求，如果

在信道条件不好或移动用户位于阴影效应严重的区域，单颗卫星的网络服务能力将受到挑战。因此，多颗可见卫星（即星座的多重覆盖）可用于提高网络性能。卫星的平均多重覆盖率定义为

$$\rho = \sum_{n=1}^{N_{\text{total}}} \sum_{q=1}^K \sum_{p=1}^L \frac{\text{cover}_n^{q,p}}{KL} \quad (8)$$

需要指出的是，确定每个星座的几何构型都需要多个参数，决策空间十分庞大，难以获取最优解，因此选择合适的基本星座模型来降低决策空间维数十分必要。为了实现全球覆盖并降低计算复杂度，通常选择基于圆形轨道的全局对称卫星星座构型，如 Walker 星座模型^[11]。

Walker 模型的轨道平面与轨道中的卫星分布在几何构型上为全局均匀对称，每个轨道面中的卫星数量以及轨道面倾角均相同。相邻轨道平面之间具有相等的升交点赤经 Ω 相差 $\Delta\Omega = \frac{2\pi}{N_p}$ ，在同轨道平面内的相邻卫星之间也具有相等的相位角间距 $\Delta\phi = \frac{2\pi}{N_{\text{sat}}}$ ，如图 3 所示。基于 Walker 星座模型的简化，卫星的位置由 Ω 和相邻平面内卫星之间的相位 ψ 即可确定

$$\Omega = \Omega_0 + (n-1) \frac{2\pi}{N_p} \quad (9)$$

$$\psi = \psi_0 + (n-1)F \frac{2\pi}{N_{\text{total}}} + (m-1) \frac{2\pi}{N_p} \quad (10)$$

其中， $\frac{2\pi F}{N_{\text{total}}}$ 表示相邻平面内卫星的真近点角；相

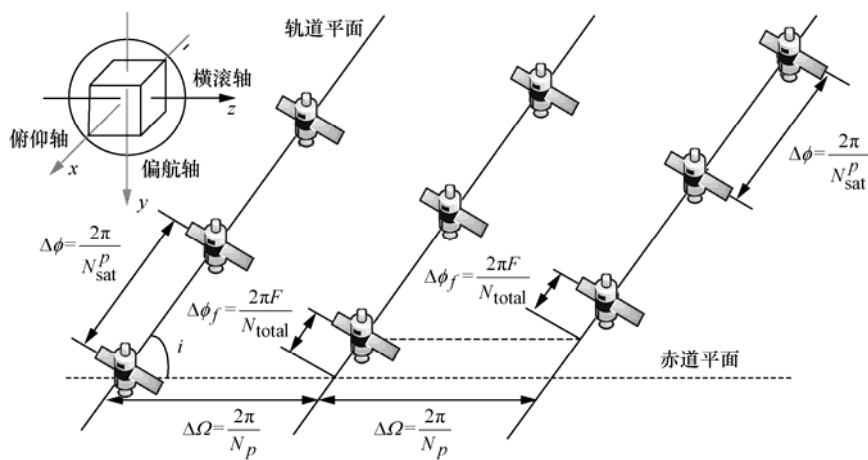


图 3 Walker 模型分布

位因子 F 是取值范围为 $0 \sim N_p - 1$ 的任意整数, 表示不同轨道平面间卫星的相对位置。

基于 Walker 星座模型圆形轨道的性质, 偏心率 e 以及近地点辐角 w 等轨道参数可近似为 0, 轨道半长轴 a 视为半径, 平近点角 M 可由真近点角 v 代替。当轨道平面 N_p 以及轨道平面卫星数量 N_{sat}^p 确定后, 真近点角和升交点赤经又可分别用式(9)和式(10)表示, 简化了参数空间。因此, 可用 $(N_p, N_{sat}^p, h, i, F)$

5 个参数描述整个星座的几何构型。
2.3 下行链路预算设计与容量模型

实际应用中的卫星能源系统通常由太阳能电池板以及化学电池驱动, 受到能耗和成本的限制, 用户下行链路会受到严重的卫星有效载荷功率资源与天线尺寸的限制。增加地面网关功率或网关天线尺寸比增加卫星有效载荷功率或卫星天线尺寸更可行。类似地, 用户上行链路也可以通过扩大和增强用户终端而得到类似的改善。因此, 假设网关链路和用户上行链路有足够的速率来回传地面网络流量, 本文主要关注用户下行链路的 QoS 支持能力, 星座所能提供的容量取决于用户下行链路设计。

链路预算根据发射机和接收机之间可靠连接的可用功率定义通信链路。下行链路的每比特能量-噪声频谱密度根据链路预算等式^[29]计算得到。假设 SGL 采用具有相干解调的四进制相移键控 (QPSK) 调制方案, 则误码率计算式为

$$P_{b-QPSK} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{n_0}}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{n_0}}\right) \quad (11)$$

给定 QoS 要求的误码率参数 P_{b-QPSK} , 地面站能正确判别的信噪比门限 $\operatorname{SNR}_{th} = \frac{E_b}{n_0}$ 可以由式(11)计算得出。

然后, 接收端所接收到的载干噪比 CINR 为

$$\operatorname{CINR} = \frac{C}{kB_n T + I} = \frac{E_b}{n_0} \frac{R_{user}}{B_n + \frac{I}{n_0}} = \frac{R_{user}}{B_n + \frac{I}{n_0}} \operatorname{SNR}_{th} \quad (12)$$

其中, C 表示载波功率, I 表示邻星干扰, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 表示玻尔兹曼常数, B_n 表示接收系统的等效噪声带宽, T 表示接收系统的噪声温度, E_b 表示每比特的能量, n_0 表示噪声功率谱

密度。

因此, 卫星发射天线所需的等效各向同性辐射功率 P_{EIRP} 表示为 (单位为 dB)

$$[P_{\text{EIRP}}] = [\operatorname{CINR}] + [L_{\text{Rain+Margin}}] + [\operatorname{BO}] + [L_{\text{atmos}}] + [L_{\text{trop}}] + [k] + [B_n] - [L_s] - [Y] - \left[\frac{G_r}{T_s}\right] \quad (13)$$

其中, $[\cdot]$ 表示取对数运算, $L_{\text{Rain+Margin}}$ 表示雨衰加上链路余量, BO 表示转发器的输出线性回退, L_{atmos} 表示大气吸收损耗, L_{trop} 表示对流层闪烁损耗, Y 是功率分配因子, 表示卫星转发器上某一载波的输出功率在总的卫星功率中所占的比例, G_r 表示接收端天线增益, T_s 表示接收端的系统噪声温度, $\frac{G_r}{T_s}$ 表示品质因数, L_s 表示信号传播的自由空间路径损耗, 计算式为

$$L_s = \left(\frac{c}{4\pi df}\right)^2 \quad (14)$$

其中, f 为传输频率, c 为光速, d 取决于 LSC 的轨道参数, 例如 δ_{\min} 、 θ 以及 h 。基于这些参数, d 计算式为^[30]

$$d = \sqrt{(R_e + h)^2 - R_e^2 \cos^2 \delta_{\min}} - R_e \sin \delta_{\min} \quad (15)$$

这时, 卫星的发射功率 P_t^{SGL} 为

$$[P_t^{\text{SGL}}] = [P_{\text{EIRP}}] - [G_{\text{sat}}] - [L_l] \quad (16)$$

其中, L_l 表示线路损失, G_{sat} 表示卫星发射天线增益, 计算式为

$$G_{\text{sat}} = \eta \frac{4\pi D_r^2 f^2}{c^2} \quad (17)$$

其中, D_r^2 表示发射天线有效孔径面积, η 表示下行天线效率。通过设置天线半径以及传输频率来决定 G_{sat} 的大小。因此, 在 SGL 预算中, 需要设计的参数是 P_t^{SGL} 。

此外, 一颗卫星和一个地球网格之间的链路容量是通过可以支持的用户数量来衡量的。为了与用户需求相匹配, 定义 LSC 可支持的总链路数量 (或用户数量) 来代表系统容量。为此, 根据链路方程^[31], LEO 卫星对地图网格所提供的总数据速率 R_{total} 可以通过式(18)求得

$$R_{\text{total}} = \frac{P_{\text{EIRP}} G_r L_s L_{\text{atmos}} L_{\text{trop}} L_{\text{Rain+Margin}}}{\left(\frac{E_b}{n_0}\right) k T_s} \quad (18)$$

因此，卫星可支持的链路数量 $C_{\text{sat}}(\text{grid})$ 为

$$C_{\text{sat}}(\text{grid}) = \frac{\eta_{\text{MA}} R_{\text{total}}}{R_{\text{user}}} \quad (19)$$

其中， η_{MA} 表示多接入效率。

根据式(3)推导出的用户需求容量，结合卫星容量生成容量需求图，LEO 星座系统提供的总容量 C_{total} 可以表示为

$$C_{\text{total}} = \sum_{\text{grid}=1}^{N_g} \min\{C_{\text{sat}}(\text{grid}), \text{DC}(\text{grid})\} \quad (20)$$

其中，总容量 C_{total} 由 $C_{\text{sat}}(\text{grid})$ 与 $\text{DC}(\text{grid})$ 中较小的数值表示，以减少卫星资源的浪费。

2.4 星间链路预算设计

ISL 的建立可以使星座在不依靠地面站的情况下实现星间组网，在减少所需地面站的数量和端到端时延方面是有效解决方案。ISL 的主要任务是实现星间通信与测量，由发射机、天线和接收机组成。在 Walker 模型中，通常假设每颗卫星具备 4 对星间收发器。LSC 通过建立同一轨道平面内卫星之间的 ISL 和相邻轨道平面内卫星之间的 ISL 以实现星间通信。

卫星的姿态确定和控制子系统通常由三轴坐标系规定，偏航轴 (y 轴) 指向天顶、横滚轴 (z 轴) 与卫星速度矢量对齐，俯仰轴 (x 轴) 与轨道角动量对齐 (即垂直于轨道平面)。平面内天线位于横滚轴的两侧，平面间天线位于俯仰轴的两侧，SGL 天线将在偏航轴指向地球球心，如图 3 所示。位于平面内的每颗卫星可与其在同一轨道的 2 个相邻卫星建立稳定的静态 (永久性) 星间链路。而轨道平面间的星间链路属于动态星间链路，其建立与星间链路的指向 (仰角和方位角)、可见性、指向变化率、星间距离以及距离变化率等因素有关。可见，不同星座构型下的星间链路能实现的网络性能是不同的。

然而，已有研究将 Walker 模型视为相对稳定的星座构型。实际上，在轨卫星除了会受地球中心引力作用外，还会受到地球非球形引力、天体引力、

大气阻力和地球潮汐力等轨道摄动力因素的影响。这些干扰会导致航天器偏离二体问题轨道的原始位置，当形成数据链路的 2 颗卫星偏离其计划位置时，会发生波束失准，并导致通信退化甚至中断^[26,32]。换句话说，卫星之间仍然存在相对运动，为 ISL 的建立问题寻找最佳解决方案是困难的。因此，将 ISL 的建立问题视为满足 QoS 要求的链路预算设计问题，并将其分解为 2 个易于处理的子任务：计算星间和平面间的视线距离；设计满足传输速率要求的最小卫星发射功率。这样做的好处在于，当满足 QoS 要求时，以最低链路预算建立的直接 ISL 可以节省多跳路由的网络开销。为了简化分析，忽略了与时间相关的参数 t 。根据链路预算等式，在任何给定的时间，卫星 j 处接收到来自卫星 i ($i \neq j$) 的每比特能量与噪声功率谱密度比 $\frac{E_b}{n_0}(i, j)$ 为

$$\frac{E_b}{n_0}(i, j) = \frac{P_t^{\text{ISL}} G_t^{\text{ISL}} G_r^{\text{ISL}}}{k T_s R_{\text{ISL}} L_p(i, j)} \quad (21)$$

其中， P_t^{ISL} 表示卫星发射功率， G_t^{ISL} 和 G_r^{ISL} 分别表示发射天线与接收天线增益， R_{ISL} 表示星间传输速率 (即需要保障的速率)， $L_p(i, j)$ 表示卫星 i 与卫星 j 之间的自由空间传播路径损耗，计算式为

$$L_p(i, j) = \left(\frac{4\pi l(i, j) f_{\text{ISL}}}{c} \right)^2 \quad (22)$$

其中， $l(i, j)$ 表示卫星之间的 LoS 距离， f_{ISL} 表示传输频率。进而，卫星之间的信噪比 $\text{SNR}(i, j)$ 计算式为

$$\text{SNR}(i, j) = \frac{E_b}{n_0} + 10 \lg M \quad (23)$$

其中， M 表示进制数。

令 $\mathcal{P}(m)$ 表示与卫星 $m \in \{1, 2, \dots, N_{\text{total}}\}$ 在同一轨道平面的卫星集合， $\{\mathcal{P}(n) | n \in \{1, 2, \dots, N_p\}\}$ 表示轨道平面集合。轨道平面 $P(i) = P(j)$ 内相邻卫星 i 和 j 之间的 LoS 距离 $l_{\text{intra}}(i, j)$ 以及不同轨道平面 $P(i) \neq P(j)$ 卫星 i 和 j 的 LoS 距离 $l_{\text{inter}}(i, j)$ 分别表示为^[33]

$$l_{\text{intra}}(i, j) = 2(R_e + h) \cos \frac{\pi}{N_{\text{sat}}^p} \tan \frac{\pi}{N_{\text{sat}}^p} \quad (24)$$

$$l_{\text{inter}}(i, j) = [2(h + R_E)^2 - 2(h + R_E)^2 \cos \theta_{a,i} \cos \theta_{b,j} - 2(h + R_E)^2 \sin \theta_{a,i} \sin \theta_{b,j}]^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

其中, $\theta_{a,i}$ 表示 t 时刻卫星 i 在轨道平面 a 中的轨道角度, T_p 表示轨道周期。

星座可实现的 ISL 速率受到链路预算参数的限制和星座构型的影响, 假设链路预算参数保持不变。通过设计星间最小发射功率 P_t^{ISL} 以满足卫星以最低要求的星间传输速率 R_{ISL}^0 进行通信^[33], 其本质是为了保障星间 QoS 需求而限制了链路预算更大的星座构型, 可以表示为

$$\min_{P_t^{\text{ISL}}} \{P_t^{\text{ISL}} \mid R_{\text{ISL}}^0 \leq B_{\text{ISL}} \text{lb}(1 + \text{SNR}(i, j))\} = \frac{\left(\frac{2R_{\text{ISL}}^0}{B_{\text{ISL}}}\right) k T_s R_{\text{ISL}}^0}{G_t^{\text{ISL}} G_r^{\text{ISL}}} \left(\frac{4\pi l(i, j) f_{\text{ISL}}}{c}\right)^2 \quad (26)$$

其中, B_{ISL} 为 ISL 的传输带宽。

2.5 星座成本分析

受到经济发展和商业竞争的影响, 当前的卫星星座系统需要充分考虑部署成本。因此, 在进行星座设计时, 加入对成本的分析是十分必要的。为此, 将卫星星座的成本问题描述为三部分: 制造成本、发射成本以及运行成本, 可由式(27)量化

$$\text{Cost} = C_{\text{manufacture}} + C_{\text{launch}} + C_{\text{operation}} \quad (27)$$

其中, $C_{\text{manufacture}}$ 表示星座制造成本, C_{launch} 表示轨道的发射成本, $C_{\text{operation}}$ 表示星座的运行成本。

星座的制造成本是由单卫星制造成本 $C_{\text{sat}}^{\text{manufacture}}$ 、卫星总数 N_{total} 以及学习曲线斜率 κ 决定的^[34], 表示为

$$C_{\text{sat}}^{\text{manufacture}} = 1064 \text{K\$} + 35.5 m_{\text{sat}}^{1.261} \quad (28)$$

$$C_{\text{manufacture}} = C_{\text{sat}}^{\text{manufacture}} N_{\text{total}}^{1 - \text{lb}\left(\frac{100\%}{\kappa}\right)} \quad (29)$$

其中, m_{sat} 表示卫星的质量, $\text{K\$}$ 表示以 1 000 美元为单位。另外, 当以一定数量制造相同的卫星时, 由于制造过程中的学习, 每颗卫星的成本会下降, 学习曲线表征了这种效果。曲线斜率 κ 表征学习效果的强弱, 是根据制造的卫星数量选择的。

另一方面, 发射成本是通过将单轨道发射的成

本 C_{LV} 乘以星座中轨道平面的数量 N_p 得出的, 即

$$C_{\text{launch}} = C_{\text{LV}} N_p \quad (30)$$

3 星座设计目标规划

卫星星座设计是典型的多目标优化问题 (MoP, multi-objective optimization problem)。为了便于处理, 将与星座设计有关的系统参数分为 3 种类型: 设计参数 \mathbf{X} 、中间参数 \mathbf{Y} 、静态参数 \mathbf{Z} 。首先, 3.1 节描述了星座的系统参数; 然后, 3.2 节建立了星座优化问题。

3.1 系统参数描述

将本文中提到的与星座设计有关的众多参数归纳为以下 3 种系统参数。

设计参数 (或决策变量) \mathbf{X} 是本文希望优化的系统参数, 由多个设计变量构成, 用于表征设计的 LSC, 表示为 $\mathbf{X} = [N_p, N_{\text{sat}}^p, h, i, F, P_t^{\text{SGL}}, P_t^{\text{ISL}}]^T$, 包括轨道平面数、单轨道平面卫星数、星座轨道高度、轨道倾角、轨道相位因子、SGL 卫星最小发射功率以及 ISL 卫星最小发射功率。通过设计的算法在参数空间为这些变量寻找到的最优值代表最优解, 即最优星座配置。

中间参数 \mathbf{Y} 是对设计参数进行操作得出的中间值。在星座设计问题的背景下, 中间参数由 $\mathbf{Y} = [N_{\text{total}}, \Omega, \nu]^T$ 给出, 其中的参数分别代表星座卫星总数 (即 $N_{\text{total}} = N_p N_{\text{sat}}^p$)、升交点赤经以及真近点角。

静态参数 \mathbf{Z} 是在整个星座优化设计过程中保持不变的量, 表示为 $\mathbf{Z} = [e, a, w, N_{\text{total}}^{\text{max}}, \delta_{\text{min}}, m_{\text{sat}}, \lambda_{\text{UB}}, \lambda_{\text{LB}}, \phi_{\text{UB}}, \phi_{\text{LB}}]^T$, 其中包括轨道偏心率、轨道半长轴、近地点辐角、星座最大规模、用户最小通信仰角、卫星质量、经度和纬度的上下限, 用于定义星座的覆盖范围。

3.2 星座优化问题建立

如前所述, 本文将多 QoS 指标、SGL 与 ISL 预算以及全球覆盖场景所涉及的参数作为约束条件, 通过不断优化不同的星座构型以实现 LSC 的总容量和多重覆盖率的最大化, 同时使星座的总成本最小。

首先, 给定初始的静态参数 \mathbf{Z} , 在求解优化问题之前基于 Walker 模型简化参数空间并定义全球覆盖场景。然后, 确定 \mathbf{X} 的最优值, 这将表征星座

设计结果中的最优构型与链路预算。通过优化设计参数，可以得到满足 QoS 和用户需求的星座布局，表示为

$$\begin{aligned} \text{Given: } \mathbf{Z} &= [e, a, w, N_{\text{total}}^{\max}, \delta_{\min}, m_{\text{sat}}, \lambda_{\text{UB}}, \lambda_{\text{LB}}, \phi_{\text{UB}}, \phi_{\text{LB}}]^T \\ \text{Find: } \mathbf{X} &= [N_p, N_{\text{sat}}^P, h, i, F, P_t^{\text{SGL}}, P_t^{\text{ISL}}]^T \end{aligned} \quad (31)$$

因此，将多目标优化问题定义为

$$\begin{aligned} \text{MoP} \triangleq & \begin{cases} \max f_1(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}) = C_{\text{total}} \\ \max f_2(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}) = \rho \\ \min f_3(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}) = \text{Cost} \end{cases} \\ C_1 : & \text{BER} \leq \text{BER}_0 \\ C_2 : & R_{\text{user}} \leq R_{\text{SGL}} \\ C_3 : & R_{\text{ISL}} \geq R_{\text{ISL}}^0 \\ C_4 : & \rho \geq \rho_0 \\ C_5 : & P_t^{\text{SGL}} = \min_{\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}} [P_t^{\text{SGL}}] \\ C_6 : & P_t^{\text{ISL}} = \min_{\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}} [P_t^{\text{ISL}}] \\ C_7 : & N_{\text{total}}^{\max} \geq N_{\text{total}} \\ C_8 : & h_{\text{max}} \geq h \geq h_{\text{min}} \\ C_9 : & i_{\text{max}} \geq i \geq i_{\text{min}} \\ C_{10} : & \phi_{\text{UB}} \geq \phi \geq \phi_{\text{LB}} \\ C_{11} : & \lambda_{\text{UB}} \geq \lambda \geq \lambda_{\text{LB}} \end{aligned} \quad (32)$$

其中，3 个优化目标 ($f_i(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}) | (i=1, 2, 3)$) 分别代表 LSC 的系统容量、多重覆盖率以及星座总成本，($\text{BER}_0, R_{\text{user}}, R_{\text{ISL}}^0, \rho_0$) 分别表示表 1 中给出的 QoS 指标， P_t^{SGL} 和 P_t^{ISL} 的最小化限定了链路预算更大的星座构型， N_{total}^{\max} 限定了星座的最大规模， h_{max} 和 h_{min} 分别限定了星座轨道高度的最大与最小范围， i_{max} 和 i_{min} 限定了轨道倾角的范围，最后 2 个约束的设置分别应用于不同任务经纬度要求下的星座覆盖。

4 多目标优化算法

本节利用 INSGA-II 算法以有效地求解所提出的优化问题，并在 3 个目标之间折中选择最优解。由于星座设计的参数空间复杂，涉及大量耦合且混合连续离散的变量，以轨道高度和用户最小通信仰角之间的权衡为例，它显著影响覆盖率和系统容量等。因此，在求解优化问题之前，首先选择 Walker 模型简化了参数空间。

为了解决 LSC 设计中复杂的参数空间和目标耦合问题，使用 NSGA-II 多目标优化算法^[35]来搜索

最优的 LSC，该算法是带有精英策略的多目标进化算法，其基本思想是根据目标函数构造种群的适应度评价函数，对包含多个解的种群进行适应度评价、进化等操作，经过多代繁殖与计算后，得到适应度最好的一组帕累托前沿 (PF, pareto front)。该算法包含的主要步骤为快速非支配排序、拥挤度距离计算以及种群进化。

在 LSC 设计问题中，NSGA-II 算法更倾向于在父代个体中进行小规模突变和交叉，而且由于严重依赖初始种群，优化结果的表现趋于局部最优。为了不使解决方案朝局部最优收敛，以尽可能接近最优解，在原始 NSGA-II 的基础上改进了算法进化过程中的交叉算子与变异算子，提出了 α -交叉算子与 β -变异算子，替代了原始的交叉过程与变异过程，以增加种群多样性，算法的具体过程描述如下。

1) 快速非支配排序

对于种群中的个体 $\xi^0 = (\mathbf{X}^0, \mathbf{Y}^0, \mathbf{Z}^0)$ ，逐个计算每一个优化目标值 $f_k(\xi^0)$ (即种群个体的适应度函数)，然后与种群中其他个体进行比较，如果该个体的所有优化目标优于被比较个体，则说明该个体支配被比较个体，将后者加入被支配集合。在被支配集合中，重复非支配排序。由此种群中的个体被划分到不同的集合，过程描述为

$$\begin{cases} \xi^0 \in F_1, & \bigcap_{j=1}^n f_j(\xi^0) \leq \bigcap_{j=1}^n f_j \left(\bigcap_{i=1}^{\text{idv}} \xi^i \right) \\ \xi^0 \in F_i, & \text{其他} \end{cases} \quad (33)$$

其中， F_1 和 $F_i (i \neq 1)$ 分别表示最优非支配集合和支配集合，idv 表示种群规模，即拥有的最大个体数量。

2) 计算拥挤度距离

根据个体之间的拥挤度选择候选个体可以增加种群的多样性，避免种群的进化过程朝单一方向进行。对个体进行拥挤度距离计算的过程由式(34)表示

$$\text{CD}_{im} = \frac{f_m(\xi^{i+1}) - f_m(\xi^{i-1})}{f_m^{\max}(\xi) - f_m^{\min}(\xi)}, i = 1, \dots, \text{idv} - 1 \quad (34)$$

其中， CD_{im} 表示第 m 个目标函数中个体 ξ^i 的拥挤度距离， f_m^{\max} 和 f_m^{\min} 分别表示种群中适应度函数 f_m 的最大值与最小值。

3) 种群进化

种群的进化过程包含锦标赛选择、交叉与变

异。在锦标赛选择算子中，选择个体用于遗传的概率取决于个体非支配集序号 F_i 和拥挤度大小 CD_{im} ， F_i 较小且 CD_{im} 较大的个体被选择的概率较大，由式(35)描述

$$p_{select} = \begin{cases} \xi^i, & F(\xi^i) \leq F(\xi^j) \wedge CD_{im} > CD_{jm} \\ \xi^j, & \text{其他} \end{cases} \quad (35)$$

其中，对于种群中的个体 ξ^i 和其他个体 ξ^j ($j \neq i$)，若 ξ^i 所在非支配集的序号小于或等于 ξ^j 所在非支配集的序号且 ξ^i 的拥挤度距离 CD_{im} 大于 CD_{jm} ，则个体 ξ^i 被选择参加遗传过程。

α -交叉算子利用线性重组进行染色体交叉，以一定的概率交换个体之间的基因片段，从而为种群增加新的个体。首先生成随机数 u ，取值范围为 0 到 1，其大小与交叉参数共同确定 α 的大小，然后在交叉操作中根据 α 交叉染色体，由下述过程表示

$$\alpha = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{p_{crossover}+1}}, & 0 < u \leq 0.5 \\ (2(1-u))^{\frac{1}{p_{crossover}+1}}, & 0.5 < u < 1 \end{cases} \quad (36)$$

$$\begin{cases} \xi_{t+1}^i = \frac{\xi_t^i + \xi_t^j}{2} + \alpha \left| \frac{\xi_t^i - \xi_t^j}{2} \right| \\ \xi_{t+1}^j = \frac{\xi_t^i + \xi_t^j}{2} - \alpha \left| \frac{\xi_t^i - \xi_t^j}{2} \right| \end{cases}, t = 0, \dots, Gen_{max} \quad (37)$$

其中， ξ_t^i 和 ξ_t^j 与 ξ_{t+1}^i 和 ξ_{t+1}^j 分别表示交叉前的父代个体以及交叉后的子代个体， $p_{crossover}$ 表示交叉参数， Gen_{max} 表示最大进化代数。

β -变异算子作用于个体 ξ_t^i 以产生新的子代个体 ξ_{t+1}^i 。首先根据随机数 q (取值范围为 0~1) 与变异参数确定 β 的大小，然后在变异操作中根据 q 的不同产生变异个体，由式(38)表示

$$\beta = \begin{cases} \left[\frac{1}{(2q)^{p_{mutate}+1}} - 1 \right], & 0 < q < 0.5 \\ \frac{1}{[2(1-q)]^{p_{mutate}+1}}, & 0.5 \leq q < 1 \end{cases} \quad (38)$$

$$\begin{cases} \xi_{t+1}^i = \xi_t^i + \beta(\xi_t^i - \min[\xi]), & 0 < q < 0.5 \\ \xi_{t+1}^i = \xi_t^i + \beta(\max[\xi] - \xi_t^i), & 0.5 \leq q < 1 \end{cases} \quad (39)$$

其中， $\max[\xi]$ 和 $\min[\xi]$ 分别表示染色体的上下边界

(即设计参数取值范围的最大值和最小值)， p_{mutate} 表示基因的变异参数。

图 4 展示了 INSGA-II 与文献[36]给出的 NSGA-II、SMS-EMOA、AGE-MOEA2 以及 MOEA/D 等先进算法针对本文星座设计优化问题的种群多样性(由个体拥挤度距离 CD_{im} 表示)比较。设置种群的最大进化代数 $Gen_{max} = 100$ ，种群的初始规模 $p_0 = 200$ 。从图 4 可以看出，本文提出的改进算法相较于 NSGA-II 的搜索速度更快，种群个体的 CD_{im} 增幅更大，这是因为基于式(37)和式(39)的交叉与变异算子能够根据不同的 $p_{crossover}$ 和 p_{mutate} 以及随机数同时决定个体是否参与交叉与变异以及改变的幅度，产生更丰富的解决方案。另外，INSGA-II 算法相较于 SMS-EMOA 的种群个体拥挤度距离 CD_{im} 之差随着迭代次数的增加呈现先负后正的趋势，当种群进化到 30 代左右时，两者的个体拥挤度距离之差已近似为 0，但 SMS-EMOA 针对同一优化问题需要进化至 63 代，且其最大 CD_{im} 为 0.26。此外，AGE-MOEA2 算法进化至 37 代左右就停止了迭代，MOEA/D 算法应用于该优化问题的性能较差，这是因为针对不同特定问题而设计的新的算子或策略很难具有泛化性能^[37]，不同修改算法在特定问题上难以保持约束和目标之间的权衡。因此，求解中可能导致出现过早收敛但又局部最优、种群多样性不丰富、对计算资源要求高、收敛过慢等性能差异问题，实际应用优化算法时可以针对不同多目标优化问题权衡选择。本文选择了具有更好搜索效率的 INSGA-II 算法求解星座设计问题，INSGA-II 的求解过程在算法 1 中描述。

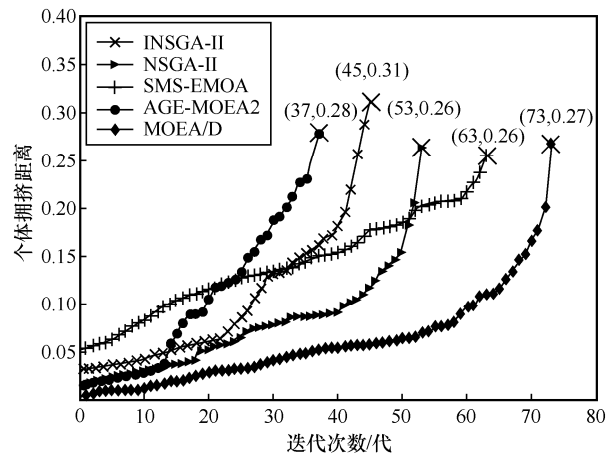


图 4 算法的种群多样性比较

算法 1 最小化非支配排序遗传算法

输入 静态参数 \mathbf{Z} ，种群规模 p_0 ，进化代数 Gen_{\max} ，交叉参数 $p_{\text{crossover}}$ ，变异参数 p_{mutate} ，选择算子个体数 x_c ，选择概率 p_{select}

输出 最优星座构型 \mathbf{X}^* ，pareto 前沿 $S_p = [C_{\text{total}}^*, \rho^*, \text{Cost}^*]^T$

- 1) 生成 p_0 ，大小为 N ，初始化 $t=0$
- 2) for $\xi \in p_0$ do
- 3) 计算 $f_k(\xi)$
- 4) 计算 F_i 和 CD_{im}
- 5) end for
- 6) while $\text{Gen} < \text{Gen}_{\max}$ do
- 7) 基于 F_i 和 CD_{im} 从 p_0 中选择候选个体 x_c
- 8) 在 x_c 中交叉、变异
- 9) 从 x_c 中获得子代种群 p_1 ，大小为 N
- 10) $R_t = p_0 \cup p_1$ ，大小为 $2N$
- 11) for $\xi \in R_t$ do
- 12) 计算 $f_k(\xi)$
- 13) 计算 F_i 和 CD_{im}
- 14) 生成 F_i 的列表 $F = (F_1, F_2, \dots, F_l)$
- 15) end for
- 16) 基于 F_i 和 CD_{im} 从 R_t 中获得新种群
- 17) 设置 $t = t + 1$
- 18) end while

使用 INSGA-II 进行求解的详细过程如下，具体地，目标是最大化星座的多重覆盖率以及系统容量，同时最小化星座的设计成本。首先，设置静态参数 \mathbf{Z} ，根据决策变量 \mathbf{X} 的类型选择编码方案，对 N_p 、 N_{sat}^p 以及 F 进行整数编码，对其他参数进行实数编码，生成随机的初始父代染色体 $p_0 = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N]^T$ 。然后，计算种群中每个个体的适应度函数以及拥挤度距离，并对所有个体进行快速非支配排序。在种群进化操作前，精英保留策略的使用确保了非支配序号低且拥挤度距离大的个体不参与自然进化过程，这样做的好处在于避免流失更好的解。在锦标赛选择过程中基于 F_i 和 CD_{im} 选择用于遗传的个体 x_c ，通过交叉、变异算子产生新的子代种群 p_1 。最后，在融合种群 R_t 中重新执行快速非支配排序以及拥挤度距离计算过程。在种群经过多次进化后，达到最大进化代数 Gen_{\max} ，算法输出最优非支配集 F_1 （即一组

最优的星座配置 \mathbf{X}^* ）以及由 F_1 组成的 pareto 前沿 S_p 。

5 数值分析

使用基于 Python3.9 和系统工具箱 (STK, system tool kit) 联合仿真的框架设计了最佳的 LSC。为了说明设计结果的有效性，本节首先基于第 2 节的理论分析描述了星座不同参数与覆盖性能的关系，然后讨论了不同星座构型对 SGL 和 ISL 发射功率的影响。基于上述分析，设置了设计参数的合理范围，进而展示了 LEO 星座的 Pareto 最优设计结果的分布与其形成的 PF，然后在 STK 中评估了 4 组具有代表性的设计结果的性能。此外，对比了设计星座与现有星座解决方案的性能。

5.1 仿真参数设置

为了使种群中的个体在多目标优化过程中合理的进化，在每次迭代过程中除了设计变量之外的参数需保持恒定。表 2 列出了主要仿真参数。

表 2 主要仿真参数

参数	符号	值
误码率	BER_0	10^{-6}
用户数据速率/(Mbit·s ⁻¹)	R_{user}	40
星间信息速率/(Mbit·s ⁻¹)	R_{ISL}^0	200
下行链路频率/GHz	f	30
星间链路频率/GHz	f_{ISL}	40
发射天线增益/dB	G_{sat}	52.1
接收天线增益/dB	G_r	35
Ka 频段噪声功率/(dBm·Hz ⁻¹)	n_0	-174
UE 系统噪声温度/K	T_s	135
雨衰+链路余量/dB	$[L_{\text{Rain+Margin}}]$	15.6
对流层闪烁损耗/dB	$[L_{\text{trop}}]$	5.8
大气吸收损耗/dB	$[L_{\text{atmos}}]$	8.4
卫星质量/kg	m_{sat}	500

5.2 覆盖与链路预算性能分析

基于第 2 节对星座系统设计中几何模型以及链路预算的讨论，本节分析了星座不同几何构型以及 QoS 需求对覆盖性能以及链路预算的影响。

图 5 展示了星座不同轨道倾角与轨道高度对覆盖性能的影响。受到人口密度分布的影响，轨道倾角对多重覆盖率的变化随着倾角的增大呈现先增加后减小的趋势，倾角越接近 90°，卫星的可见性

越小, 其在 $40^\circ \sim 65^\circ$ 的卫星可见性最高。考虑到倾角越大越容易导致卫星相互碰撞以及人口密度分布等因素, 星座的倾角一般设置在 $40^\circ \sim 70^\circ$ 。显然, 星座的覆盖性能与轨道高度成正比, 并且星座规模越大, 覆盖性能受到轨道高度的影响更明显, 这是因为星座规模的扩大使卫星间具有更紧密的分布, 同样的轨道高度星座的覆盖性能更好。受到内外范艾伦带对电磁信号的影响, 一般设置 LSC 的轨道高度为 $900 \sim 2\,000$ km。

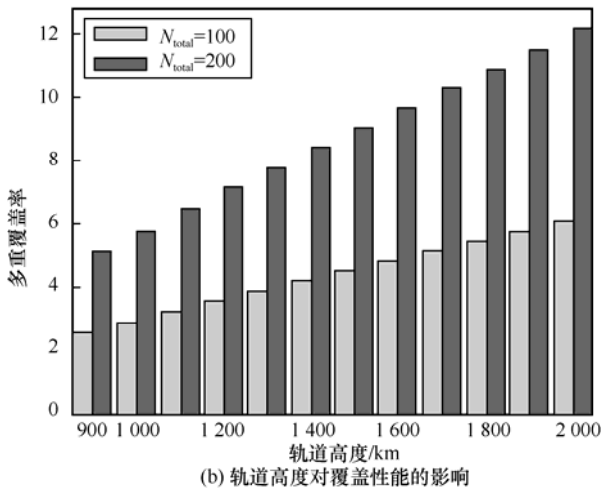
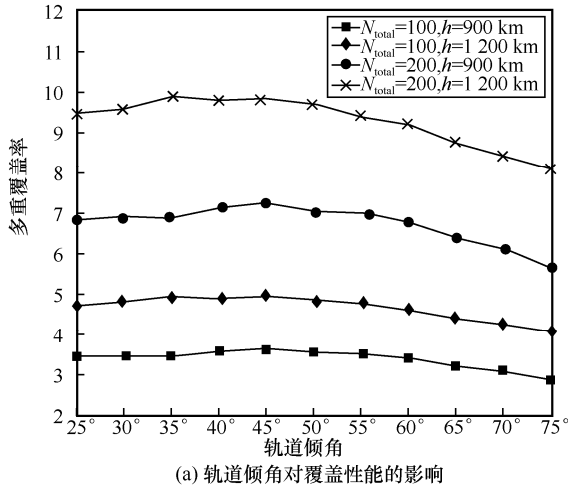


图5 星座不同轨道倾角与轨道高度对覆盖性能的影响

受到能耗的影响, 卫星发射功率应当在满足 QoS 要求下最小化, 基于式(16)和式(26), 分析了链路预算的主要因素对最小发射功率的影响, 如图6所示。

图6(a)展示了不同用户需求速率 R_{user} 、轨道高度 h 以及最小仰角 δ_{min} 对星地发射功率 P_t^{SGL} 的影响。随着用户需求速率与轨道高度的增加, 所需的星地最小发射功率逐渐增加。假设链路参数保持不

变, 不同的最小通信仰角决定了不同的 LoS 距离, 从而产生不同的路径损耗, 以影响最小发射功率的大小。图6(b)展示了在不同的星间信息速率 R_0^{ISL} 要求下, 轨道平面卫星数 N_{sat}^p 对最小星间发射功率 P_t^{ISL} 的影响。随着 N_{sat}^p 的增加, 最小星间发射功率迅速减小。值得注意的是, 当 N_{sat}^p 为5时, 无论星间信息速率多大, 都需要显著的发射功率以实现星间通信。这是因为 N_{sat}^p 过小导致星座卫星分布分散, 使星间 LoS 距离显著增加, 满足 R_0^{ISL} 要求下所需的发射功率将非常大, 构建 ISL 困难。然而, N_{sat}^p 过大, 星座规模急剧扩大, 导致成本上升。因此, N_{sat}^p 的范围同样需要合理设计。

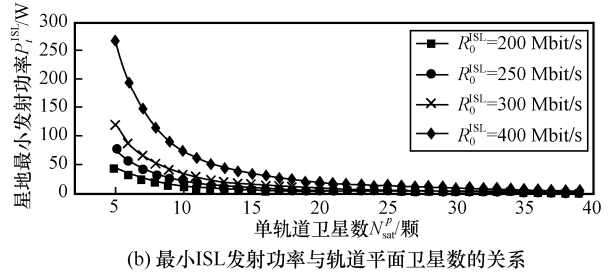
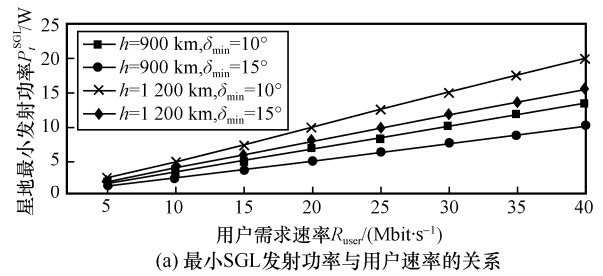


图6 链路预算的主要因素对最小发射功率的影响

5.3 数值结果讨论

全球无缝覆盖范围定义为南纬 70° 到北纬 70° 之间以 $6^\circ \times 6^\circ$ 的点粒度网格化的区域, 星座卫星的最大规模 $N_{\text{total}}^{\text{max}}$ 限制在 150 颗左右, 轨道平面数 N_p 和单轨道平面卫星数 N_{sat}^p 分别限制在 (5,11) 以及 (6,11) 以内, 考虑到内外范艾伦带对通信性能的影响, LSC 的轨道高度 h 范围设置为 $900 \sim 1\,500$ km, 轨道倾角 i 设置为 $40^\circ \sim 70^\circ$ 。在 INSGA-II 算法参数设置中, 需要根据问题的规模与复杂性确定不同的搜索方案, 表3列出了根据上述变量范围设置的算法参数。

基于表3, 设置种群规模 p_0 的大小为 40, 经过 100 代的进化, 得到用户最小通信仰角分别为 5° 、 10° 、 15° 以及 20° 时 LSC 的 Pareto 第一前沿优化结果, 如图7所示。根据式(20), 不同 δ_{min} 下设计结

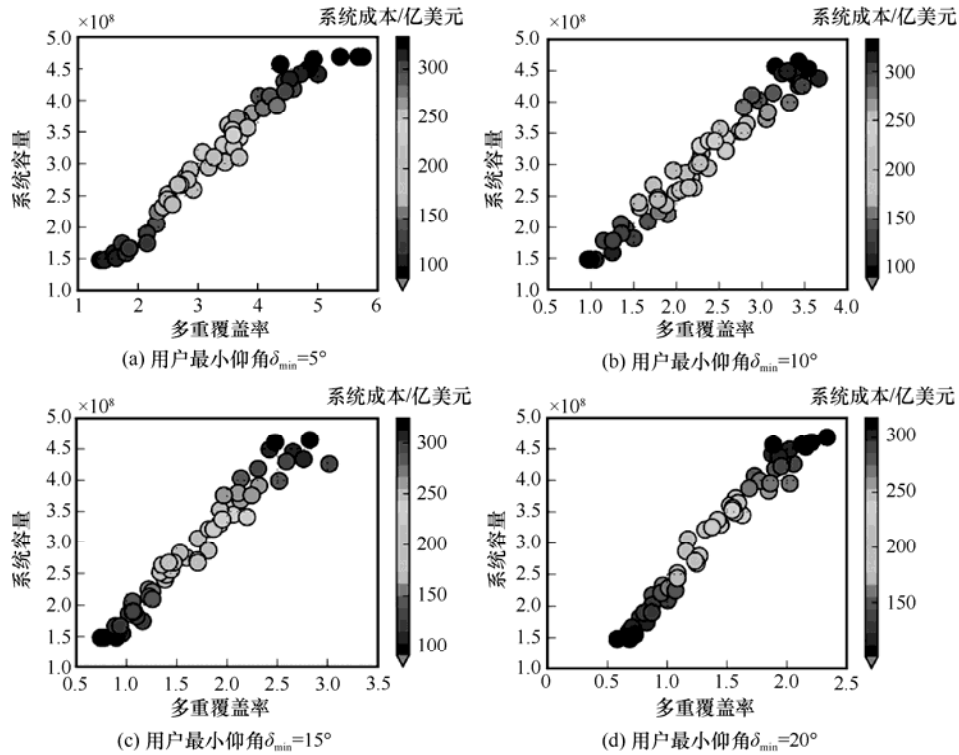


图 7 INSGA-II 优化结果

果的系统容量 C_{total} 均能达到 $1.5 \times 10^8 \sim 5.0 \times 10^8$ ，随着多重覆盖率的增大，LSC 的系统成本也相应上升。根据设计结果中的权衡，表 4 列出了 4 种 δ_{min} 下的最终 LSC 构型（以下分别称为设计结果 1~设计结果 4）以及计算得到的链路预算。

表 3 INSGA-II 算法参数设置

参数	值
种群规模 p_0	40
进化代数 Gen_{max}	100
交叉参数 $p_{crossover}$	m_{sat}
变异参数 p_{mutate}	2
锦标赛选择算子个体数 x_c	2
锦标赛选择概率 p_{select}	0.9

表 4 不同最小仰角下设计的 LSC

δ_{min}	N_p	N_{sat}^p	h/km	i	F	P_t^{SGL}	P_t^{ISL}
5°	11	11	905	60°	1	18.3	7.9
10°	7	7	990	63°	1	15.3	18.6
15°	10	9	1 013	69°	1	12	11.6
20°	10	8	1 263	70°	1	13.3	14.5

然后，将表 4 中顺序给出的 4 个设计结果与现有的先进星座解决方案（例如 Astrocast、Iridium

NEXT、Kepler 和 Telesat）在链路容量以及系统成本上的性能进行对比，如图 8 所示，用于对比的解决方案参数在表 5 中列出。由式(20)和式(27)对链路容量以及系统成本的估算可以看出，不同星座构型的 LSC 的链路容量与其系统成本不成正比关系。其中，设计结果 3 ($\delta_{min} = 15^\circ$, $h = 1013$ km 的最佳 LEO 卫星星座（以下简称 Designed LSC）能够以相对较低的系统成本提供较高的链路容量。Kepler 系统则因其星座规模更庞大而具有最大的链路容量，同时其成本也是最高的。另外，Telesat 系统在成本上拥有较大优势，但还需要进一步评估不同系统的覆盖性能。

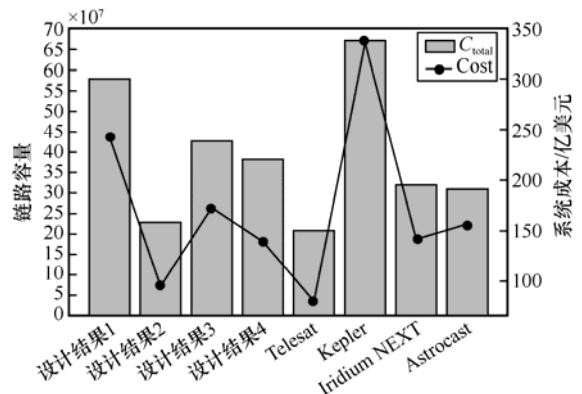


图 8 4 种设计结果与现有先进解决方案的性能比较

表5 用于性能对比的星座参数

星座系统	星座构型 $[N_p, N_{\text{sat}}^p, h, i, F]^T$
Designed LSC	$[10, 9, 1013, 69.1, 1]^T$
Telesat	$[5, 9, 1248, 37.4, 1]^T$
Kepler	$[20, 7, 600, 98.6, 1]^T$
Iridium NEXT	$[11, 6, 780, 86.4, 1]^T$
Astrocast	$[8, 8, 575, 97.69, 1]^T$

接下来, 将 Designed LSC 与现有先进解决方案进行比较, 如图9所示。比较基于第3节所定义的多重覆盖率指标, 定义 \mathcal{P}_{sc} 表示覆盖区域的满意度标准, 它考虑了 QoS 指标对覆盖率的要求, 即 $\rho \geq \rho_0$ 。只有当地面节点对星座卫星的可见性大于2时, 才被认为有效覆盖, 分别表示为

$$\mathcal{P}_{\text{sc}} = \sum_{n=1}^{N_{\text{total}}} \sum_{q=1}^K \sum_{p=1}^L \frac{\text{satisfaction}_n^{q,p}}{KL} \quad (40)$$

$$\text{satisfaction}_n^{q,p} = \begin{cases} 1, & P_q \in G \wedge \rho \geq \rho_0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (41)$$

其中, $\text{satisfaction}_n^{q,p}$ 表示第 p 采样时刻时第 q 地面网格 P_q 对星座覆盖性能的满意度。

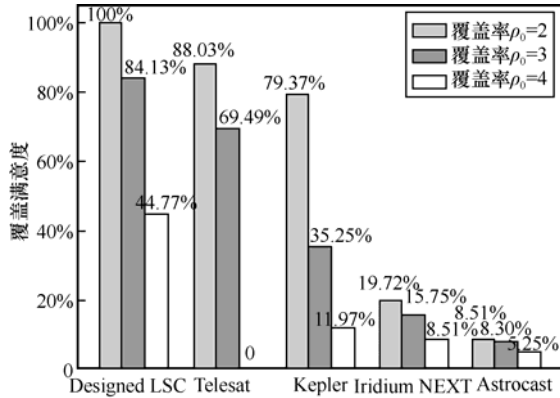


图9 Designed LSC 与现有先进解决方案的覆盖性能对比

图9表明, 当多重覆盖率 ρ_0 分别为2、3、4时, 地面网格对 Designed LSC 的覆盖满意度分别达到了100%、84.13%、44.77%。此外, Astrocast、Iridium NEXT 实现了几乎相同的性能, 而 Designed LSC 分别比这2种解决方案提供了39.52%~91.49%以及36.26%~80.28%的显著改进。另一方面, Designed LSC 能够实现比 Kepler 星座更好的性能, 而星座规模只有 Kepler 的64%。然而, 当 ρ_0 为2和3时, Designed LSC 与 Telesat

和 Kepler 相比优势不大, 在这种情况下, Telesat 是最优解决方案。但随着 ρ_0 的增大, Designed LSC 的优势逐渐显现出来。观察到 $\rho_0 = 4$ 时, Telesat 星座系统无法实现4颗卫星同时可见, 这时 Designed LSC 无疑是最优解决方案。

此外, 为了分析星座的抗毁性能, 在 STK 中对 Designed LSC 与 Telesat 系统的粒子撞击性能进行了评估。对于给定的 LSC 配置和轨道, 确定在其任务寿命期间暴露于潜在的破坏性轨道碎片粒子和流星撞击的程度, 如图10所示。图10表明, 对卫星构成潜在威胁的每个轨道流星撞击通量 (y_1 轴) 以及撞击速率 (y_2 轴) 都有短暂的上下波动, 这是因为卫星绕地球运行时, 根据其轨道和各流星雨的运行方向, 卫星有时会“藏”在地球后面, 导致遭遇的流星体数量出现短暂的波动^[38]。值得注意的是, 不同星座系统在不同时间范围内的流星撞击通量趋势不是固定的, 它会在一年中变化, 因为它取决于多个流星雨的特定活动期。这些流星雨的活动记录在流星环境数据库中, 这意味着卫星系统需要准备应对这些高活动期, 以减少潜在的损害。

最终, 得到了针对 QoS 保障设计的最佳 LSC, 星座构型如图11所示。该星座具有10个位于海拔1013 km处倾角为69.1°的轨道平面, 每个轨道具有9颗卫星。决定星座空间构型的相位因子 F 为1, 具体配置参数为 $[10, 9, 1013, 69.1, 1]^T$ 。基于式(20)的理论计算, 当误码率低于 10^{-6} 以及用户需求速率为40 Mbit/s时, Designed LSC 可以在用户最小通信仰角为15°下提供 $C_{\text{total}} = N_{\text{total}} \cdot$

$$\left(\frac{\eta_{\text{MA}} P_{\text{EIRP}} G_r L_s L_{\text{atmos}} L_{\text{trop}} L_{\text{Rain}+\text{Margin}}}{\frac{E_b}{n_0} kT} \right) = 4.36 \times 10^8 \text{ 的}$$

支持用户链路容量 (星座卫星数量 $N_{\text{total}} = 90$, 单星覆盖面积 $D_r^2 = 1.478 \times 10^7 \text{ km}^2$, 最小星地发射功率 P_{SGL} 为12 W), 而地球网络的总需求用户链路数量 DC_{total} 为 1.48×10^8 左右, 表明设计的星座满足用户需求。此外, 图12展示了 Designed LSC 历经24个小时的平均卫星可见性的统计结果, 图中不同灰度区域分别表示不同可见的卫星数量。图12表明, 位于少部分低纬度的地区的平均可见卫星数在2~4颗, 随着纬度的增加, 星座的覆盖性能逐渐增强, 大部分区域普遍拥有4~5颗的平均卫星波束覆盖。

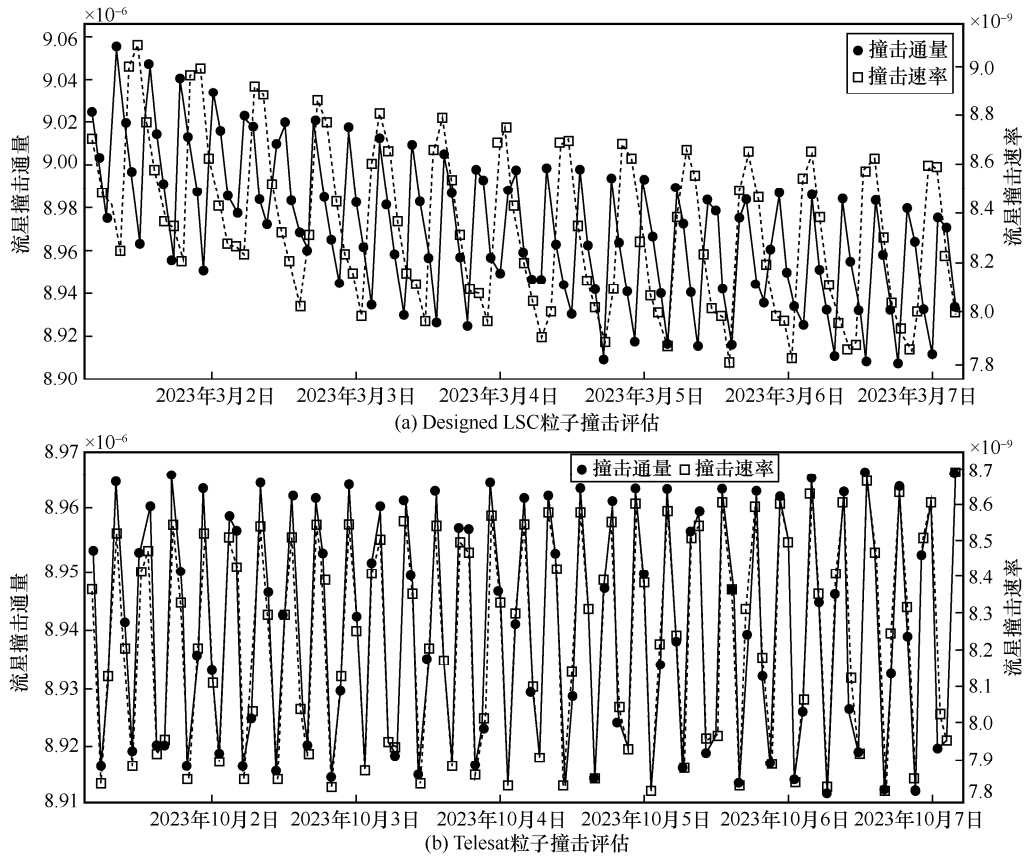


图 10 星座抗毁性能分析

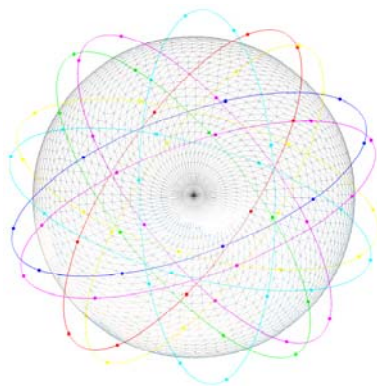


图 11 Designed LSC 的星座构型

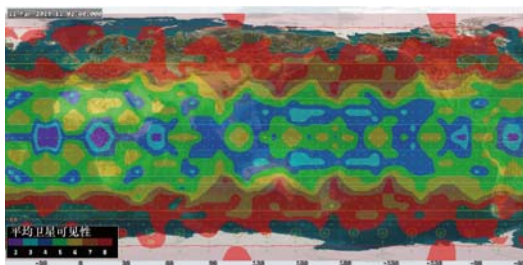


图 12 Designed LSC 的平均卫星可见性

此外，虽然在本文中将星座的最大规模 N_{total}^{max} 限制在了 150 颗左右，但本文所研究的方法依然适用

于大规模星座设计。目前，用于星座优化设计的不同算法求解速度主要受限于星座的创建以及性能评估等因素。根据软硬件环境的不同，在与星座构型有关的参数中，星座规模的大小对 INSGA-II 的收敛速度以及求解速度影响最大。设计用时与星座规模的关系如图 13 所示。当 $N_{total}^{max} = 100$ 颗时，获得一个星座构型并进行性能评估所花费的时间为 23 s 左右；当 $N_{total}^{max} = 3\ 000$ 颗时，单次优化设计则需要耗时 1 566 s 左右。因此，星座卫星对地面网格大量的覆盖计算是耗时的主要原因。

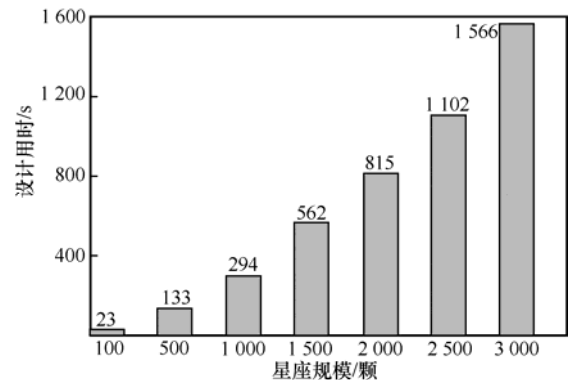


图 13 设计用时与星座规模的关系

6 结束语

本文深入研究了在考虑链路预算对星座构型限制时多 QoS 保障的 LSC 设计问题。首先,建立了多 QoS 指标并构建了与星座设计有关的各个模块,为了简化参数空间,基于 Walker 模型将星座构型简化为了 5 个参数的集合。然后,提出了 INSGA-II 算法求解不同仰角约束下的最佳 LSC。数值分析验证了 INSGA-II 在种群多样性以及求解速度上相对基准算法的优势。此外,通过仿真分析获得了设计变量的合理范围,并考虑 QoS 指标对覆盖率的要求定义了覆盖满意度标准用于性能比较。与现有星座相比,设计的 LSC 性能突出,在低覆盖率下表现出与 Telesat 相当的性能,在高覆盖率下超过其他系统,且规模仅为 Kepler 系统的 64%。在后续研究中,计划对 LSC 规模的逐步扩大所产生的移动性管理、系统性能问题以及设计用时的影响进行广泛调查。

参考文献:

- [1] DENG R Q, DI B Y, ZHANG H L, et al. Ultra-dense LEO satellite constellations: how many LEO satellites do we need[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(8): 4843-4857.
- [2] SU Y T, LIU Y Q, ZHOU Y Q, et al. Broadband LEO satellite communications: architectures and key technologies[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(2): 55-61.
- [3] HASSAN S S, KIM D H, TUN Y K, et al. Seamless and energy-efficient maritime coverage in coordinated 6G space-air-sea non-terrestrial networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(6): 4749-4769.
- [4] GIORDANI M, ZORZI M. Non-terrestrial networks in the 6G era: challenges and opportunities[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(2): 244-251.
- [5] WANG P F, DI B Y, SONG L Y. Mega-constellation design for integrated satellite-terrestrial networks for global seamless connectivity[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(8): 1669-1673.
- [6] AZARI M M, SOLANKI S, CHATZINOTAS S, et al. Evolution of non-terrestrial networks from 5G to 6G: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(4): 2633-2672.
- [7] KODHELI O, GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A. Integration of satellites in 5G through LEO constellations[C]//*Proceedings of IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [8] 薛文浩, 潘恬, 卢诚承, 等. 低轨卫星网络星间路由安全机制研究[J]. *天地一体化信息网络*, 2023, 4(2): 13-23.
XUE W H, PAN T, LU C C, et al. Research on LEO satellite network routing security[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2023, 4(2): 13-23.
- [9] PACHLER N, DEL PORTILLO I, CRAWLEY E F, et al. An updated comparison of four low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.
- [10] BESTE D C. Design of satellite constellations for optimal continuous coverage[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1978, 14(3): 466-473.
- [11] WANG C J. Structural properties of a low Earth orbit satellite constellation - the Walker delta network[C]//*Proceedings of IEEE Military Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2002: 968-972.
- [12] MORTARI D, WILKINS M P. Flower constellation set theory. part I: compatibility and phasing[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(3): 953-962.
- [13] DENG R Q, DI B Y, ZHANG H L, et al. Ultra-dense LEO satellite constellation design for global coverage in terrestrial-satellite networks[C]//*Proceedings of IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [14] WEI Y B, LI H J, DU X J. An efficient LEO global navigation constellation design based on walker constellation[C]//*Proceedings of IEEE Computing, Communications and IoT Applications*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [15] ZHENG G, YAO Y P, HE D S, et al. Optimization design of global low-orbit satellite constellation for multi-fold coverage[C]//*Proceedings of IEEE 3rd International Conference on Electronics and Communication Engineering*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [16] LARSON W J, WERTZ J R. *Space mission analysis and design*[M]. 3rd ed. Berlin: Springer, 1999.
- [17] KAK A, AKYILDIZ I F. Large-scale constellation design for the Internet of space things/CubeSats[C]//*Proceedings of IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [18] DAI C Q, ZHENG G M, CHEN Q B. Satellite constellation design with multi-objective genetic algorithm for regional terrestrial satellite network[J]. *China Communications*, 2018, 15(8): 1-10.
- [19] HITOMI N, SELVA D. Constellation optimization using an evolutionary algorithm with a variable-length chromosome[C]//*Proceedings of IEEE Aerospace Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-12.
- [20] WANG P F, DI B Y, SONG L Y. Multi-layer LEO satellite constellation design for seamless global coverage[C]//*Proceedings of IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.
- [21] KAK A, AKYILDIZ I F. Designing large-scale constellations for the Internet of space things with CubeSats[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(3): 1749-1768.
- [22] DAI C Q, YU T, CHEN Q B. Capacity-oriented satellite constellation design in disaster emergency communication network[C]//*Proceedings of International Conference on Wireless Communications and Signal Processing*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 666-671.
- [23] XU X H, JU Z H, LUO J. Design of constellations for GNSS reflectometry mission using the multiobjective evolutionary algorithms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-15.
- [24] LEYVA-MAYORGA I, RÖPER M, MATTHIESEN B, et al. Inter-plane inter-satellite connectivity in LEO constellations: beam switching vs. beam steering[C]//*Proceedings of IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.

- [25] LEYVA-MAYORGA I, SORET B, POPOVSKI P. Inter-plane inter-satellite connectivity in dense LEO constellations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(6): 3430-3443.
- [26] NIE S, AKYILDIZ I F. Channel modeling and analysis of inter-small-satellite links in terahertz band space networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(12): 8585-8599.
- [27] DONG F H, HAN H, GONG X W, et al. A constellation design methodology based on QoS and user demand in high-altitude platform broadband networks[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2016, 18(12): 2384-2397.
- [28] JIANG J, YAN S, PENG M G. Regional LEO satellite constellation design based on user requirements[C]//Proceedings of IEEE/CIC International Conference on Communications in China. Piscataway: IEEE Press, 2019: 855-860.
- [29] JILLA C, MILLER D. A multiobjective, multidisciplinary design optimization methodology for the conceptual design of distributed satellite systems[C]//Proceedings of 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Reston: AIAA, 2002: 1-8.
- [30] ALMONACID V, FRANCK L. Extending the coverage of the Internet of things with low-cost nanosatellite networks[J]. Acta Astronautica, 2017, 138: 95-101.
- [31] KASHITANI T. Development and application of an analysis methodology for satellite broadband network architectures[C]//Proceedings of 20th AIAA International Communication Satellite Systems Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 2002: 1-8.
- [32] 曹进, 石小平, 马如慧, 等. 融合双层卫星网络的星地和星间 AKA 协议[J]. 网络与信息安全学报, 2023, 9(1): 18-31.
- CAO J, SHI X P, MA R H, et al. Fusion of satellite-ground and inter-satellite AKA protocols for double-layer satellite networks[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2023, 9(1): 18-31.
- [33] SORET B, LEYVA-MAYORGA I, POPOVSKI P. Inter-plane satellite matching in dense LEO constellations[C]//Proceedings of IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [34] BUZZI P G, SELVA D, HITOMI N, et al. Assessment of constellation designs for earth observation: application to the TROPICS mission[J]. Acta Astronautica, 2019, 161: 166-182.
- [35] 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.
- [36] BLANK J, DEB K. Pymoo: multi-objective optimization in python[J]. IEEE Access, 2020, 8: 89497-89509.
- [37] QIAO K, YU K, QU B, et al. An evolutionary multi-tasking optimization framework for constrained multi-objective optimization problems[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2022, 26(2): 263-277.
- [38] MANDEVILE J C, PERRIN J M, VIDAL L. Experimental hyper-velocity impacts: implication for the analysis of material retrieved after exposure to space environment: Part I. Impacts on aluminium targets[J]. Acta Astronautica, 2012, 81(2): 532-544.

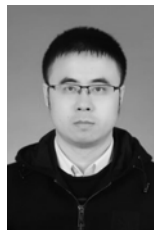
[作者简介]



王汝言 (1969-), 男, 湖北浠水人, 博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为泛在网络、多媒体信息处理等。



叶显熠 (1999-), 男, 四川成都人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为空地一体化、多目标优化。



何鹏 (1990-), 男, 重庆人, 博士, 重庆邮电大学讲师, 主要研究方向为低地球轨道卫星通信、移动通信。



崔亚平 (1986-), 男, 河南新乡人, 博士, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为人机无线互联、天地一体化组网。



吴大鹏 (1979-), 男, 黑龙江大庆人, 博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为泛在网络、互联网服务质量控制等。

Alexander Fedotov, 男, 博士, 圣彼得堡彼得大帝理工大学教授, 主要研究方向为物联网、无线网络、边缘计算以及网络安全和隐私。