

## 面向差异化QoS需求的低轨算力卫星星座设计

彭煜明, 孙仪静, 邸博雅

(北京大学电子学院, 北京 100871)

**摘要:** 日益增长的物联网终端设备数量对地面网络的服务能力提出了巨大挑战。超密集低地球轨道卫星星座成为弥补地面网络覆盖区域有限以及用户终端计算能力不足的技术手段。通过建立卫星与地面连接模型, 分析用户可获得的平均算力和回程容量, 构建了多目标优化问题, 旨在最小化所需卫星数量, 同时满足用户任务卸载的差异化服务质量 (QoS, quality of service) 需求。提出了一种两阶段星座设计算法, 首先优化算力卫星的资源分配策略, 随后确定最优 QoS 下的星座参数。仿真结果验证了模型的准确性, 并探讨了轨道高度、任务量和覆盖率对星座设计的影响。与 Kuiper、OneWeb 和 SpaceX 星座相比, 该算法设计的星座在相同卫星数量下, 平均覆盖率分别提高了 29.52%、48.73% 和 34.82%。

**关键词:** 卫星物联网; 低轨卫星星座; 算力卫星网络; 多目标优化

**中图分类号:** TN927

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00479

## LEO computing satellite constellation design for heterogeneous QoS requirements

PENG Yuming, SUN Yijing, DI Boya

School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract:** The rapidly increasing number of Internet of things devices poses significant challenges to the service capabilities of terrestrial networks. Ultra-dense low earth orbit satellite constellations have emerged as a promising solution to address the limited coverage area of terrestrial networks and the insufficient computing capabilities of user terminals. By establishing a satellite-to-terrestrial connection model, the average computational resources and backhaul capacity available to ground users were analyzed and a multi-objective optimization problem for designing ultra-dense LEO constellations was modelled, aiming to minimize the total number of satellites while meeting the heterogeneous quality of service (QoS) requirements for user task offloading. A two-stage constellation design algorithm was proposed, which firstly optimized the resource allocation strategy of computational satellites and then determined the constellation parameters under optimal QoS conditions. Simulation results validate the accuracy of the theoretical model and analyze the impact of orbital altitude, task volume, and coverage requirements on constellation design. Compared with the Kuiper, OneWeb, and SpaceX constellations, the proposed constellation achieved an average coverage rate increase of 29.52%, 48.73%, and 34.82%, respectively, with the same number of satellites.

**Key words:** satellite IoT, LEO satellite constellation, satellite-based computing network, multi-objective optimization

收稿日期: 2025-01-15; 修回日期: 2025-02-28

通信作者: 邸博雅, diboya@pku.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62322101); 广东省基础与应用基础研究基金项目 (No. 2023B0303000019)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No. 62322101), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No. 2023B0303000019)

## 0 引言

随着物联网技术的迅猛发展,接入网络的物联网终端数量正以爆炸式速度增长,推动人类稳步迈向万物互联互通的物联网时代<sup>[1]</sup>。不断增长的物联网终端数量也对网络的传输速率、时延、通信可靠性提出了更高的要求<sup>[2-4]</sup>。同时,由于终端设备的计算能力有限,这些终端设备不仅需要向云中心回传数据,还有任务卸载的需求<sup>[5]</sup>。任务卸载是指将计算密集型任务从终端设备迁移到云端服务器进行处理,这能有效解决终端设备计算能力不足的问题<sup>[6]</sup>。随着越来越多的物联网设备接入网络,海量的原始数据在无线网络边缘产生并汇入通信网络,这不仅占用了大量的带宽资源,还对数据的快速、可靠传输和计算提出了巨大的挑战。然而,地面网络由于其传输资源和计算能力有限,覆盖范围也相对较小,可能面临巨大的业务压力,难以支持日益增长的业务需求<sup>[7]</sup>。

超密集低地球轨道卫星网络作为一项新兴技术,具有覆盖范围广、传输容量大等特点,为解决地面网络的局限性提供了可能<sup>[8-11]</sup>。与地面基础设施容易受损且覆盖范围有限的特点不同,卫星可以在偏远地区、大型活动和紧急情况中提供可靠的通信和计算服务。超密集低地球轨道卫星网络可以为地面用户提供多样化的业务需求,将成为6G的重要组成部分<sup>[12]</sup>。然而,在传统卫星网络架构中,每颗卫星仅被作为传输大量原始数据的中继站,自身并不具有计算能力<sup>[13]</sup>。因此,基于卫星的算力网络作为一种有效的解决方案被提出,算力卫星网络在卫星上部署星载边缘服务器,为地面用户提供广泛覆盖的计算服务。由于星载服务器的引入,传统只考虑数据传输的星座设计方法将不再适用。同时,不同类型的任务还有着不同的服务质量(QoS, quality of service)要求,应结合用户任务卸载问题,考虑卫星网络的传输资源和计算资源,提出新的基于算力卫星网络的星座设计方案。

现有文献分别对基于卫星的算力网络和星座设计进行了研究。星地融合算力网络的研究取得了实质性进展,特别是在端到端时延、能效和资源分配等方面。文献[5]研究了一种多卫星的天地算力网络,利用网络中星地节点的算力资源进行数据压缩,进而缓解天地一体化网络中的传输压力,降低

系统时延。文献[14]提出了一种新型计算架构,将边缘计算引入星地融合中继网络架构体系,提高业务流管理和控制的灵活性,同时可控制时延且优化能耗。文献[8,15]都考虑了通过优化任务卸载策略和资源分配方案来降低计算时延。文献[16-18]则制定了卫星边缘计算的任务卸载和资源分配算法,在任务可容忍时延限制下最小化总能耗。而文献[19]进一步考虑同时优化计算任务时延和能耗。在星座设计的研究方面,各种智能算法已被应用到星座设计中。文献[20]使用了精英战略遗传算法来设计服务航空和海洋用户的极低地球轨道卫星星座。文献[21-22]分别采用模拟退火和多目标蝠鲞觅食优化算法设计低轨卫星星座。文献[23-24]考虑卫星网络的多个QoS需求,采用非支配排序遗传算法II和多层禁忌搜索算法解决多目标优化问题。

然而,现有关于算力卫星网络的研究都聚焦于区域性算力卫星网络方向,大多基于静态化假设——将卫星视为固定服务节点,这种区域化范式忽视了低轨卫星星座固有的全球动态覆盖特性。此外,由于不同地区对QoS的需求也不完全相同,区域性的研究没有考虑同时满足不同地区的不同QoS需求的场景。而涉及全球覆盖的星座设计的相关工作都只考虑了卫星的通信功能,致力于通信服务能力的提升,并没有考虑携带算力的卫星星座设计,无法满足未来物联网对任务卸载的需求。因此,全球覆盖的算力卫星星座的设计仍然是一个有待解决的问题。为算力卫星网络设计可靠、高效的低轨道卫星星座是提高网络性能的关键挑战之一。首先,由于卫星的高移动性和地球自转的特点,地面用户终端(UT, user terminal)与卫星之间的通信链路不断变化,这种动态特性使得计算覆盖模型更加复杂。其次,与传统卫星星座以全球或区域无缝覆盖为目标相比,算力卫星网络更注重通过合理的星座布局提供可靠的计算资源并实现地面物联网终端计算任务和卫星资源的供需平衡。此外,算力卫星星座的设计需要综合考虑计算能力、通信性能和覆盖需求等多方面因素,这种多维性能优化的需求不仅增加了设计复杂性,也使得星座的最佳配置方案难以确定。

与现有研究工作相比,本文的创新性体现在构建了一个融合QoS差异化特性的低轨算力卫星星座设计算法。本文研究的卫星在具有传统的通信数据

中继和通信传输功能的基础上，集成了星载计算节点，可实现星上数据处理和任务卸载。此外，考虑不同纬度的人口密度有所不同，对QoS的需求也不同，本文针对差异化的QoS需求进行了研究，提出算法在不同的QoS需求下具有普适性。本文的主要贡献可以概括如下：1)基于倾斜轨道星座与地球在三维空间的数学关系，构建星地连接模型，该理论模型能够快速准确地计算出卫星对地面UT的多连接覆盖率；2)综合考虑算力卫星网络的QoS，本文提出了星座设计的多目标优化问题，并针对这一问题设计了一种两阶段倾斜轨道星座设计算法，在给定QoS要求的情况下，获得近最优星座配置；3)仿真结果表明，本文所提出的算力卫星星座可以实现用最少的卫星数量满足目标区域内物联网终端用户的卸载需求并最大化QoS。

## 1 系统模型

### 1.1 场景描述

算力卫星网络场景如图1所示。

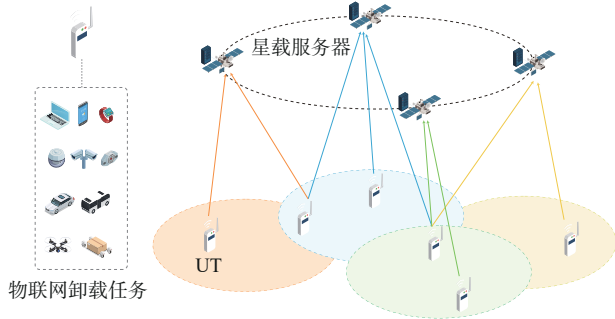


图1 算力卫星网络场景

本文考虑一个上行任务卸载过程，其中低轨卫星为地面物联网UT提供计算服务。物联网卸载任务具有对QoS差异化需求的特点。具体而言，不同的物联网终端任务具有不同的时延限制需求，在时延限制需求下完成不同终端任务的计算资源即算力和传输速率存在显著差异。此外，物联网终端在地面上分布的不均匀性导致不同地表区域的物联网终端密度不同，因此不同区域对低轨卫星的覆盖需求也存在差异。通过调整算力卫星网络的资源分配策略和星座参数，可以在有限的卫星数量下满足地面物联网任务卸载的差异化QoS需求。星座类型采用倾斜轨道星座，因为倾斜轨道星座可以通过调整轨道倾角来调整关注区域的覆盖情况<sup>[25]</sup>，从而通过灵

活的设计来为物联网终端设备密集区域提供更好的卫星覆盖。整个任务卸载过程可以细分为3个关键步骤：首先，地面物联网UT利用正交频分多址方案访问低轨卫星，并将待处理的任务发送给卫星；然后，每颗低轨卫星会根据预先分配任务的计算资源，对收到的任务进行星载计算；最后，当计算任务完成后，卫星会将计算结果通过无线链路传输回地面用户。

本文考虑的星座中有 $K$ 颗卫星和若干个地面UT。每个地面UT有 $L$ 个类型的任务需要卸载给卫星进行计算。假设UT和低轨卫星都配备多天线，即UT可将任务卸载给多颗卫星，卫星也可通过分配卸载资源在其覆盖范围内同时为多个UT服务。UT和卫星之间采用Ka频段连接。

### 1.2 低轨卫星星座模型

本文考虑的倾斜轨道星座参数可表示为 $(N/M/F/h/i)$ 。其中， $N$ 代表轨道平面数； $M$ 代表每个轨道平面上的卫星数量，星座中的卫星总数 $K = NM$ ； $F$ 代表相位因子，表示相邻轨道平面上对应卫星之间的相位差，其值为 $[0, N-1]$ 中的一个整数； $h$ 代表卫星轨道高度； $i$ 代表轨道倾角。低轨卫星轨道可近似为一个圆形，则其偏心率 and 近地点幅角均为0。用 $k_{n,m}$ 表示星座内轨道平面 $n$ 上的卫星 $m$ ，则星座内的所有卫星组成一个集合 $\mathcal{K} = \{k_{1,1}, \dots, k_{n,m}, k_{n+1,m+1}, \dots, k_{N,M}\}$ 。给定参考卫星的升交点赤经 $\Omega_{\text{ref}}$ 和真近点角 $v_{\text{ref}}$ ，则卫星 $k_{n,m}$ 的升交点赤经 $\Omega_{n,m}$ 和真近点角 $v_{n,m}$ 可表示为

$$\Omega_{n,m} = \Omega_{\text{ref}} + \frac{2\pi(n-1)}{N} \quad (1)$$

$$v_{n,m} = v_{\text{ref}} + \frac{2\pi(m-1)}{M} + \frac{2\pi(n-1)F}{NM} \quad (2)$$

单卫星覆盖示意图如图2所示，每颗卫星在地球表面的覆盖圆的角半径可表示为

$$\varphi = \arccos\left(\frac{R_e}{R_e + h} \cos \theta_{\min}\right) - \theta_{\min} \quad (3)$$

其中， $R_e$ 是地球的平均半径， $\theta_{\min}$ 表示UT处的最小通信仰角，对应的覆盖面积 $S$ 为

$$S = 2\pi R_e^2 (1 - \cos \varphi) \quad (4)$$

通过推导卫星与地球之间的三维坐标关系，可以计算出卫星 $k_{n,m}$ 正下方地球表面的星下点的纬度为

$$\psi_{n,m} = \arcsin(\sin v_{n,m} \sin i) \quad (5)$$

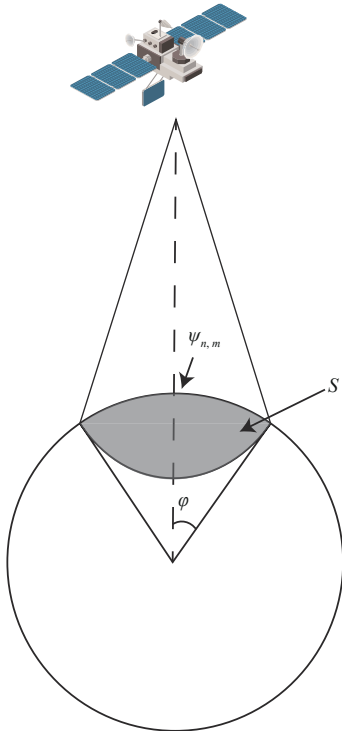


图2 单卫星覆盖示意图

### 1.3 任务卸载模型

本文研究了UT将任务卸载至所有可为其提供计算服务的卫星的情形。假设任务类型的总数为 $L$ 。UT在地球表面的空间分布以及每个UT卸载至卫星的任务数量分布均符合齐次泊松点过程<sup>[26]</sup>。其中，UT分布密度为 $\rho$ ，每个UT中任务类型 $l$ 的到达强度为 $\lambda_l$ 。任务类型 $l$ 的卸载需求由 $(c_l, r_l)$ 表示，其中 $c_l$ 表示该类任务的计算资源需求， $r_l$ 表示该类任务的传输数据速率需求，则卸载任务类别集合为 $\mathcal{L} = \{1, 2, \dots, l, \dots, L\}$ 。

#### 1.3.1 计算模型

本文采用CPU频率表征星载服务器上的计算资源。令每颗卫星的最大计算资源为 $F_{\max}$ ，分配给任务类型 $l$ 的计算资源为 $F_l$ 。任务类型 $l$ 在目标区域内可获得的单颗卫星计算资源 $E(C_l)$ 可以表示为卫星覆盖区域内的平均UT数量和任务 $l$ 的平均达到数量之积再乘上分配给任务 $l$ 的计算资源。根据泊松分布的期望， $E(C_l)$ 可以计算如下

$$E(C_l) = F_l E(\tilde{C}_l) = F_l \left( \sum_{u=1}^{\infty} (\rho S)^u \frac{e^{-\rho S}}{u!} \frac{1}{u} \right) \left( \sum_{v=1}^{\infty} (\lambda_l)^v \frac{e^{-\lambda_l}}{v!} \frac{1}{v} \right) = F_l (E_i(\rho S) - \ln(\rho S) - \gamma) e^{-\rho S} (E_i(\lambda_l) - \ln(\lambda_l) - \gamma) e^{-\lambda_l}$$

其中， $E_i(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^t}{t} dt$ 为指数积分函数， $\gamma$ 为欧拉

常数。式(6)的推导可由指数积分函数的级数得到，即 $E_i(x) = \gamma + \ln(x) + \sum_{u=1}^{\infty} \frac{x^u}{u \cdot u!}$ 。每颗卫星上的计算资源应满足算力约束

$$\sum_{l=1}^L F_l \leq F_{\max} \quad (7)$$

则满足目标区域第 $l$ 类任务算力需求的卫星总数可表示为目标区域总的计算资源需求除以单颗卫星可以提供的计算资源

$$K_C^l = \frac{c_l}{E(C_l)} \frac{S_{\text{tar}}}{S} \quad (8)$$

其中， $S_{\text{tar}}$ 为目标区域总地表面积。

#### 1.3.2 传输模型

令目标区域内每颗卫星在Ka波段上可用传输带宽资源为 $B_{\max}$ ，并将其划分为 $J$ 个正交子信道。每颗卫星分配给任务类型 $l$ 的传输资源表示为 $B_l$ 。UT和一个卫星之间通信的频谱效率可表示为

$$E \left( \text{lb} \left( 1 + \frac{PGd^{-\alpha}}{\sigma^2 + E(I)} \right) \right) = \frac{1}{S \ln 2} \int_{u \in S} \ln \left( 1 + \frac{PGd_u^{-\alpha}}{\sigma^2 + E(I)} \right) du = \frac{1}{2\pi R_c^2 (1 - \cos \varphi) \ln 2} \int_{\frac{\pi}{2} - \varphi}^{\frac{\pi}{2}} 2\pi R_c^2 \cos \psi \ln \left\{ 1 + \frac{PG}{\sigma^2 + E(I)} \left[ R_c^2 + (R_c + h)^2 - 2R_c(R_c + h) \sin \psi \right]^{\frac{\alpha}{2}} \right\} d\psi = \frac{1}{2 \ln 2 R_c (R_c + h) (1 - \cos \varphi)} \int_{h^2}^{d_{\max}^2} \ln \left( 1 + \frac{PGv^{-\frac{\alpha}{2}}}{\sigma^2 + E(I)} \right) dv = \frac{1}{2 \ln 2 R_c (R_c + h) (1 - \cos \varphi)} \left\{ d_{\max}^2 \left[ -\frac{\alpha}{2} {}_2F_1 \left( 1, -\frac{2}{\alpha}; 1 - \frac{2}{\alpha}; -\frac{PGd_{\max}^{-\alpha}}{\sigma^2 + E(I)} \right) + \ln \left( 1 + \frac{PGd_{\max}^{-\alpha}}{\sigma^2 + E(I)} \right) + \frac{\alpha}{2} \right] - h^2 \left[ -\frac{\alpha}{2} {}_2F_1 \left( 1, -\frac{2}{\alpha}; 1 - \frac{2}{\alpha}; -\frac{PGh^{-\alpha}}{\sigma^2 + E(I)} \right) + \ln \left( 1 + \frac{PGh^{-\alpha}}{\sigma^2 + E(I)} \right) + \frac{\alpha}{2} \right] \right\}$$

其中,  $P$ 为连接到一颗低轨卫星的UT的发射功率,  $G$ 为天线放大器提供的功率增益系数,  $d$ 为UT和卫星之间的距离,  $\alpha$ 为路径损耗指数,  $\sigma^2$ 为加性高斯白噪声的方差,  $u$ 为卫星覆盖范围内的用户,  $d_{\max}$ 为从卫星到其覆盖区域的最大距离, 可以表示为

$$d_{\max} = \sqrt{2R_c(R_c + h)(1 - \cos \varphi) + h^2} \quad (10)$$

当路径损耗值为 $\alpha = 2$ 时, 式(9)可表示为

$$\begin{aligned} E\left(\text{lb}\left(1 + \frac{PGd^{-2}}{\sigma^2 + E(I)}\right)\right) = & \frac{1}{2\ln 2R_c(R_c + h)(1 - \cos \varphi)} \\ & \left\{ \left[ d_{\max}^2 \ln\left(1 + \frac{PG}{d_{\max}^2(\sigma^2 + E(I))}\right) + \right. \right. \\ & \left. \frac{PG}{\sigma^2 + E(I)} \ln\left(d_{\max}^2 + \frac{PG}{\sigma^2 + E(I)}\right) \right] - \\ & \left[ h^2 \ln\left(1 + \frac{PG}{h^2(\sigma^2 + E(I))}\right) + \right. \\ & \left. \left. \frac{PG}{\sigma^2 + E(I)} \ln\left(h^2 + \frac{PG}{\sigma^2 + E(I)}\right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $E(I)$ 表示任务卸载的平均网络干扰, 考虑低轨卫星随机分配子信道给任务, 地面UT平均密度为 $\rho$ , 因此不同任务之间有概率为 $\rho' = \rho \sum_{l=1}^L \lambda_l / J$ 的可能使用相同的子信道。根据坎贝尔定理<sup>[26-27]</sup>,  $\alpha = 2$ 时任务卸载的平均网络干扰可表示为

$$\begin{aligned} E(I) = \rho' PG \int_{k' \in D} d_k^{-2} dk' = & \frac{\rho' \pi PGR_c}{R_c + h} \left[ \ln(h^2 + 2R_c h) - \ln(d_{\max}^2) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $k'$ 为造成干扰的卫星,  $D = \{k' | d_{\max} \leq d_{k'} \leq \sqrt{h^2 + 2R_c h}\}$ 为造成干扰的卫星的集合。

因此, 每个卫星类型 $l$ 任务提供的传输容量 $E(R_l)$ 可以表示为卫星覆盖区域内的平均UT数量和任务 $l$ 的平均达到数量之积再乘上单个UT任务 $l$ 能够获得的传输容量

$$\begin{aligned} E(R_l) = B_l E(\tilde{R}_l) = B_l \left( E_i(\rho S) - \ln(\rho S) - \gamma \right) \left( E_i(\lambda_l) - \right. \\ \left. \ln(\lambda_l) - \gamma \right) e^{-(\rho S + \lambda_l)} E\left(\text{lb}\left(1 + \frac{PGd^{-\alpha}}{\sigma^2 + E(I)}\right)\right) \end{aligned} \quad (13)$$

同时需要满足带宽资源限制

$$\sum_{l=1}^L B_l \leq B_{\max} \quad (14)$$

则满足目标区域第 $l$ 类任务传输速率需求的卫星总数可表示为目标区域总的传输速率需求除以单颗卫星可以提供的传输速率

$$K_R^l = \frac{r_l}{E(R_l)} \frac{S_{\text{tar}}}{S} \quad (15)$$

## 2 算力卫星网络星座设计问题建模

### 2.1 QoS指标

本节首先给出代表算力卫星网络QoS的关键指标, 包括多连接覆盖率 $\eta_q$ 、最低覆盖率 $\eta_{\min}$ 、平均覆盖率 $\eta_{\text{avg}}$ 、平均计算资源 $C_{\text{avg}}$ 、平均传输速率 $R_{\text{avg}}$ 以及QoS函数 $F(\eta_{\text{avg}}, C_{\text{avg}}, R_{\text{avg}})$ 。

#### 2.1.1 多连接覆盖率 $\eta_q$

地面UT与卫星之间的连接数直接影响算力网络的性能。本文从倾斜轨道结构的几何关系出发, 建立了计算速度快、精度高的星地连接模型。考虑密集低轨卫星星座分析的长期平均条件, 可将UT可连接卫星数转化为多连接覆盖率<sup>[22]</sup>。本文将目标区域 $\Theta_{\text{tar}}$ 根据纬度划分为 $Q$ 个不相交的环形区域, 目标区域的纬度上、下界分别为 $\Theta_{\text{tar}}^{\max}$ 和 $\Theta_{\text{tar}}^{\min}$ 。区域 $q$ 的纬度上、下界分别为 $\Theta_q^{\max}$ 和 $\Theta_q^{\min}$ 。本文定义区域 $q$ 内UT的多连接覆盖率为该区域内所有卫星覆盖的总面积与该区域地球表面积之比

$$\eta_q = \frac{\sum_{k_{n,m} \in \mathcal{K}_q} S_c^{q,n,m}}{S_g^q} \quad (16)$$

其中,  $\mathcal{K}_q$ 表示可以与区域 $q$ 内UT建立通信链路的卫星集合,  $S_c^{q,m,n}$ 和 $S_g^q$ 分别表示卫星 $k_{n,m}$ 在区域 $q$ 的覆盖面积和该区域内的地球表面积。

区域 $q$ 的地球表面积可表示为

$$S_g^q = 2\pi R_c^2 (\sin \Theta_q^{\max} - \sin \Theta_q^{\min}) \quad (17)$$

目标区域 $\Theta_{\text{tar}}$ 总面积可表示为

$$S_{\text{tar}} = 2\pi R_c^2 (\sin \Theta_{\text{tar}}^{\max} - \sin \Theta_{\text{tar}}^{\min}) \quad (18)$$

区域 $q$ 中卫星 $k_{n,m}$ 的覆盖面积 $S_c^{q,m,n}$ 可表示为

$$S_c^{q,m,n} = S_c^{\Theta_q^{\min}, \varphi, \psi_{n,m}} - S_c^{\Theta_q^{\max}, \varphi, \psi_{n,m}} \quad (19)$$

其中,  $S_c^{\Theta_q^{\min}, \varphi, \psi_{n,m}}$ 和 $S_c^{\Theta_q^{\max}, \varphi, \psi_{n,m}}$ 分别为纬度高于 $\Theta_q^{\min}$ 和 $\Theta_q^{\max}$ 的卫星覆盖区域示意图如图3所示。

**命题1**  $S_c^{\Theta_q^{\min}, \varphi, \psi_{n,m}}$ 可计算如下

$$\begin{aligned}
S_c^{\Theta_q^{\min}, \varphi, \psi_{n,m}} = R_c^2 \cdot \mathcal{R} & \left\{ 2\pi - 4\sin\Theta_q^{\min} \arcsin \left[ \frac{\sin\left(\frac{1}{2}(\Theta_q^{\min} + \varphi - \psi_{n,m})\right) \sin\left(\frac{1}{2}(\psi_{n,m} + \varphi - \Theta_q^{\min})\right)}{\cos\Theta_q^{\min} \cos\psi_{n,m}} \right] - \right. \\
& 4\cos\varphi \arcsin \left[ \frac{\cos\left(\frac{1}{2}(\Theta_q^{\min} + \varphi + \psi_{n,m})\right) \sin\left(\frac{1}{2}(\psi_{n,m} + \varphi - \Theta_q^{\min})\right)}{\sin\varphi \cos\psi_{n,m}} \right] - \\
& \left. 4\arcsin \left[ \frac{\sin\left(\frac{1}{2}(\Theta_q^{\min} + \varphi - \psi_{n,m})\right) \cos\left(\frac{1}{2}(\Theta_q^{\min} + \varphi + \psi_{n,m})\right)}{\cos\Theta_q^{\min} \sin\varphi} \right] \right\} \quad (20)
\end{aligned}$$

证明：见附录1。

同理，将式(20)中  $\Theta_q^{\min}$  替换为  $\Theta_q^{\max}$  可计算得到  $S_c^{\Theta_q^{\max}, \varphi, \psi_{n,m}}$ 。

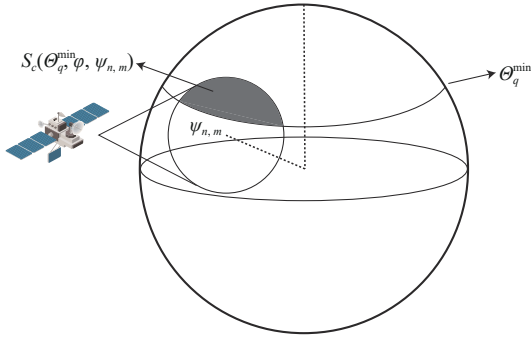


图3 目标区域卫星覆盖示意图

### 2.1.2 最低覆盖率 $\eta_{\min}$

参数  $\eta_{\min}$  用于衡量目标区域内的最低覆盖率，作为特定纬度范围内的覆盖能力基准，以确保 UT 始终能够连接足够数量的卫星。 $\eta_{\min}$  可以表示为

$$\eta_{\min} = \min_q \eta_q \quad (21)$$

### 2.1.3 平均覆盖率 $\eta_{\text{avg}}$

卫星接收 UT 任务卸载时，人口密集地区的计算和传输需求远高于人口稀少地区。因此，为实现卫星网络计算和传输资源供需平衡，倾斜轨道星座设计中采用了平均覆盖率这一指标，其具体计算为

$$\eta_{\text{avg}} = \boldsymbol{\beta}^T \boldsymbol{\eta} \quad (22)$$

其中， $\boldsymbol{\beta} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_q, \dots, \beta_Q]^T$ ， $\boldsymbol{\eta} = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_q, \dots, \eta_Q]^T$ ， $\beta_q$  为区域  $q$  内人口比例。最大化平均覆盖率可以增强多连接覆盖率与地面物联网卸载任务需求密度的一致性，从而提高算力卫星网络的整体

性能。

### 2.1.4 平均计算资源 $C_{\text{avg}}$ 和平均传输速率 $R_{\text{avg}}$

根据泊松分布的期望，定义各 UT 获得的平均计算资源  $C_{\text{avg}}$  为 UT 可连接的平均卫星数量所拥有的计算资源总和除以地面上 UT 的平均数量，可表示为

$$\begin{aligned}
C_{\text{avg}} = \frac{\sum_{q=1}^Q \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M S_c^{q,m,n}}{S_{\text{tar}}} \quad (23) \\
\left[ (E_i(\rho S) - \ln(\rho S) - \gamma) e^{-\rho S} \right] F_{\text{max}}
\end{aligned}$$

同理，本文定义  $R_{\text{avg}}$  为每个 UT 获得的平均任务卸载传输速率，可表示为

$$\begin{aligned}
R_{\text{avg}} = \frac{\sum_{q=1}^Q \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M S_c^{q,m,n}}{S_{\text{tar}}} \left[ (E_i(\rho S) - \ln(\rho S) - \gamma) e^{-\rho S} \right] \quad (24) \\
B_{\text{max}} E \left( \text{lb} \left( 1 + \frac{PGd^{-\alpha}}{\sigma^2 + E(I)} \right) \right)
\end{aligned}$$

### 2.1.5 QoS 函数 $F(\eta_{\text{avg}}, C_{\text{avg}}, R_{\text{avg}})$

本节提出 QoS 函数来表示计算卫星网络的 QoS，QoS 函数取值越高，表示计算卫星网络的 QoS 越好，采用传统的加权目标函数模型作为 QoS 函数，可表示为

$$F(\eta_{\text{avg}}, C_{\text{avg}}, R_{\text{avg}}) = w_{\eta} \eta_{\text{avg}} + w_C C_{\text{avg}} + w_R R_{\text{avg}} \quad (25)$$

其中， $w_{\eta}$ 、 $w_C$ 、 $w_R$  分别表示平均覆盖率、平均计算资源、平均传输容量的权重。

## 2.2 问题建模

本文考虑在满足各类型任务计算传输需求和地面 UT 覆盖率需求的约束下，通过优化卫星星座计算传输资源分配和参数配置，最小化星座内卫星数

量的同时最大化QoS函数。为了简化星座设计同时保证卫星覆盖性能，本文将星座参数中相位因子 $F$ 设置为1<sup>[23,28]</sup>。因此，星座设计多目标优化问题可以建模为

$$\text{P1:MOOP} \triangleq \left\{ \begin{array}{l} \min_{(F, B, N, M, h, i)} NM \\ \max_{(F, B, N, W, h, i)} F(\eta_{\text{avg}}, C_{\text{avg}}, R_{\text{avg}}) \end{array} \right\} \quad (26)$$

$$\text{s.t. } \eta_{\text{avg}} \geq \eta_{\text{avg}}^{\text{Th}} \quad (27)$$

$$\eta_{\text{min}} \geq \eta_{\text{min}}^{\text{Th}} \quad (28)$$

$$NM \geq K_C^l, \forall l \in \mathcal{L} \quad (29)$$

$$NM \geq K_R^l, \forall l \in \mathcal{L} \quad (30)$$

$$\sum_{l=1}^L F_l \leq F_{\text{max}} \quad (31)$$

$$\sum_{l=1}^L B_l \leq B_{\text{max}} \quad (32)$$

$$F_l \geq 0, \forall l \in \mathcal{L} \quad (33)$$

$$B_l \geq 0, \forall l \in \mathcal{L} \quad (34)$$

$$h_{\text{max}} \geq h \geq h_{\text{min}} \quad (35)$$

$$i_{\text{max}} \geq i \geq i_{\text{min}} \quad (36)$$

$$\theta^q \geq \theta_{\text{min}}^q, \forall q \in \mathcal{Q} \quad (37)$$

其中， $\mathbf{F} = [F_1, F_2, \dots, F_l, \dots, F_L]$ 和 $\mathbf{B} = [B_1, B_2, \dots, B_l, \dots, B_L]$ 分别为计算和传输资源分配向量， $\eta_{\text{avg}}^{\text{Th}}$ 和 $\eta_{\text{min}}^{\text{Th}}$ 分别为平均覆盖率阈值、最低覆盖率阈值， $\theta^q$ 为地区 $q$ 用户的通信仰角， $\theta_{\text{min}}^q$ 为地区 $q$ 用户最小通信仰角。考虑不同地区的地形因素，在高山密集的地区，由于山脉的阻挡，卫星与地面之间的通信质量较差，因此应增大这些区域用户的最小通信仰角以提高通信质量。最小化卫星数量和最大化QoS函数的目标相互冲突，不存在最优星座参数，并且所有目标函数和约束都与优化参数表现出高度非凸性，因此上述多目标优化问题很难直接解决。为此，本文提出了一种两阶段倾斜轨道星座设计算法。

### 3 算力卫星网络星座设计算法

本节提出一种两阶段倾斜轨道星座设计算法来优化星座设计多目标优化问题。首先，通过优化资源分配方案，计算得到满足计算和传输需求所需的最小卫星总数。然后，基于资源分配优化结果，选取满足计算和传输需求所需的最小卫星总数的最大值作为星座参数优化的初始卫星数量。最后，通过动态调整星座参数设置来最小化星座中的卫星数

量，同时最大化QoS函数。

#### 3.1 资源分配优化

计算资源分配优化子问题可以建模为

$$\text{SP1: } \min_F \max_l K_C^l \quad (38)$$

$$\text{s.t. } \sum_{l=1}^L F_l \leq F_{\text{max}} \quad (39)$$

$$F_l \geq 0, \forall l \in \mathcal{L} \quad (40)$$

其中，优化目标SP1是最小化目标区域内所需计算服务总卫星数。对于计算资源分配优化子问题SP1的求解，通过引入辅助变量 $W$ ，使变换优化问题可以建模为

$$\overline{\text{SP1:}} \min_{\{F, W\}} W \quad (41)$$

$$\text{s.t. } K_C^l \leq W, \forall l \in \mathcal{L} \quad (42)$$

$$\sum_{l=1}^L F_l \leq F_{\text{max}} \quad (43)$$

$$F_l \geq 0, \forall l \in \mathcal{L} \quad (44)$$

该优化问题的拉格朗日函数可以表示为

$$\mathcal{L}(W, F_l, \delta_l, \mu) =$$

$$W + \sum_{l=1}^L \delta_l \left( \frac{c_l}{E(C_l)} \frac{S_{\text{tar}}}{S} - W \right) + \mu \left( \sum_{l=1}^L F_l - F_{\text{max}} \right) \quad (45)$$

根据卡罗需-库恩-塔克（KKT, Karush-Kuhn-Tucker）条件可以计算得到最优的计算资源分配方案。任务卸载的最优计算资源分配方案为

$$F_l^* = F_{\text{max}} \frac{c_l}{E(\tilde{C}_l) \sum_{l=1}^L \frac{c_l}{E(\tilde{C}_l)}} \quad (46)$$

满足计算要求所需的最小卫星数为

$$K_C^{\text{min}} = \frac{S_{\text{tar}}}{F_{\text{max}} S} \sum_{l=1}^L \frac{c_l}{E(\tilde{C}_l)} \quad (47)$$

同理，可以得到任务卸载的最优传输资源分配方案为

$$B_l^* = B_{\text{max}} \frac{r_l}{E(\tilde{R}_l) \sum_{l=1}^L \frac{r_l}{E(\tilde{R}_l)}} \quad (48)$$

满足传输要求所需的最小卫星数量为

$$K_R^{\text{min}} = \frac{S_{\text{tar}}}{B_{\text{max}} S} \sum_{l=1}^L \frac{r_l}{E(\tilde{R}_l)} \quad (49)$$

本文所提两阶段倾斜轨道星座设计算法具体步骤如下。

#### 算法1 算力卫星星座设计算法

输入：QoS需求式(27)~式(30)、式(37)；星座参数

限制条件式(35)、式(36);最大迭代次数 $I_{\max}$

输出:最优星座配置 $(N^*, M^*, h^*, i^*)$

初始化:初始卫星个数 $K_0 = \max(K_C^{\min}, K_R^{\min})$ , 迭代次数 $I = 0$

选择一个星座参数配置 $(N_0, M_0)$ , 其中,  $K_0 = N_0 M_0$ ;

repeat

可行性检查: 检查当前星座配置是否满足约束条件;

if当前星座配置满足约束条件 then

if  $N_0 > M_0$  then 令  $N_0 = N_0 - 1$

else 令  $M_0 = M_0 - 1$

else if  $N_0 > M_0$  then 令  $M_0 = M_0 + 1$

else 令  $N_0 = N_0 + 1$

until  $I > I_{\max}$

取所有可行解中最大化 QoS 函数的解 $(N^*, M^*, h^*, i^*)$ 。

### 3.2 卫星数量最小化

本文基于资源分配优化方案, 可得到最小可行卫星数量。具体而言, 方案从初始卫星数量开始, 在多次迭代中反复调整星座轨道数量和每个轨道上的卫星数量, 最终以最少的卫星数量搜索出可行的星座设计。具体流程如下: 1)算法初始化, 设置初始卫星数量 $K_0$ 为同时满足计算和传输要求所需的最小的卫星数量, 即 $K_0 = \max(K_C^{\min}, K_R^{\min})$ , 选择满足 $K_0 = N_0 M_0$ 的一种轨道数和卫星数配置 $(N_0, M_0)$ ; 2)可行性检查, 检查当前星座配置是否满足约束条件; 3)调整卫星数量, 若当前星座配置满足约束条件, 则减少卫星数量, 反之则增加卫星数量, 直到达到最大迭代次数, 如算力卫星星座设计算法所示。

计算和传输速率限制条件可通过初始化卫星个数满足。在规定的QoS约束之外, 为了最小化任意两颗卫星之间最短路径的最大跳数, 本文的设计算法对星座进行了调整, 使得卫星轨道面数 $M$ 和轨道面上卫星数 $N$ 更加接近<sup>[29]</sup>, 利用这些约束来进行可行性检查并更新可行解。

### 3.3 QoS 函数优化

得到最小卫星数量后, 方案通过搜索给定卫星数量的所有可行的星座参数配置, 得到QoS函数最大的星座参数配置, 即

$$(h^*, i^*) = \arg \max_{(h,i)} F(\eta_{\text{avg}}, C_{\text{avg}}, R_{\text{avg}}), h \in \mathcal{H}, i \in \mathcal{I}, \quad (50)$$

其中,  $\mathcal{H}$ 、 $\mathcal{I}$ 分别为所有可行的轨道高度和轨道倾角。

### 3.4 算法复杂度分析

本文提出的两阶段倾斜轨道星座设计算法的复杂度由资源分配优化算法和星座参数优化算法的复杂度共同决定。其中, 资源分配优化算法的复杂性由式(46)、式(48)式决定, 在进行资源分配优化时, 每个任务都要进行两次KKT条件的计算, 因此资源分配优化算法的复杂度为 $\mathcal{O}(L)$ 。在星座参数优化算法中, 每次迭代都需要对 $Q$ 个区域进行覆盖率的计算, 每次计算覆盖率需要遍历至多 $M_{\max} N_{\max}$ 个卫星, 其中 $N_{\max}$ 和 $M_{\max}$ 分别代表最大轨道数和轨道面上最大卫星数, 则每次迭代的复杂度为 $\mathcal{O}(QM_{\max} N_{\max})$ , 最多迭代 $M_{\max} + N_{\max}$ 次, 因此卫星最小化的算法复杂度为 $\mathcal{O}(QM_{\max} N_{\max} (M_{\max} + N_{\max}))$ 。因此本文所提算法的复杂度为 $\mathcal{O}(QM_{\max} N_{\max} (M_{\max} + N_{\max}) + L)$ 。在实际应用中, 即使是设计大规模低轨卫星星座, 最大轨道数和轨道面上最大卫星数也不会超过100, 而纬度区域的数量 $Q$ 不会超过200, 因此本文所提算法的复杂度的实际应用是可行的, 即使在大规模星座设计时仍然适用。

## 4 仿真结果

本节通过实验仿真评估了本文所提算法在算力卫星网络星座设计中的性能, 并验证了理论与仿真结果的一致性。为此, 本文首先设置了仿真的关键参数。对于星地信道参数, 各UT的发射功率为 $P = 2 \text{ W}$ , 天线增益为 $G = 43.3 \text{ dBi}$ 。Ka波段通信的噪声密度 $\sigma^2 = -174 \text{ dBm/Hz}$ , 路径损耗因子 $\alpha = 2$ 。每颗卫星的计算能力和传输资源分别设定为 $F_{\max} = 20 \text{ G cycles/s}$ 和 $B_{\max} = 800 \text{ MHz}$ 。任务卸载的相关参数见表1, 每个UT卸载给卫星进行计算的任务类型数量为 $L = 3$ 。UT的平均密度为 $\rho = 4 \times 10^{-6} \text{ km}^{-2}$ , UT与卫星之间的最小通信仰角为 $10^\circ$ 。目标区域选取 $56^\circ\text{N}$ 到 $56^\circ\text{S}$ 之间的地理区域, 该区域覆盖了全球99%以上的人口。目标区域被均匀划分为多个不相交的纬度带, 每个纬度区的最大纬度与最小纬度之差为 $1^\circ$ 。最后, 考虑低轨卫星星座的基本特性, 本文选定的轨道高度和轨道倾角范围分别为 $(300, 1500) \text{ km}$ 和 $(30^\circ, 60^\circ)$ 。仿真中的参数及其默认值主要按照3GPP Rel-15<sup>[30]</sup>标准设置。

表1 任务卸载仿真参数

卸载任务类型 $l$	传输容量需求 $r_l / (\text{Mbit} \cdot \text{s}^{-1})$	计算资源需求 $c_l / (\text{G cycles} \cdot \text{s}^{-1})$	到达强度 $\lambda_l$
1	25	0.25	4
2	50	0.5	8
3	100	1	1

图4展示了本文提出的多连接仿真模型与卫星仿真软件卫星工具包 (STK, satellite tool kit) 仿真结果对比。具体而言, 本文选取 OneWeb 和 Kuiper 星座作为对比对象, 采用精度为  $3^\circ$  的 STK 网格划分计算结果, 与本文所提出的多连接覆盖模型进行比较分析。从图4中可以明显看出, 本文所提出的星地连接模型的解析建模结果与 STK 仿真结果高度一致, 但该模型在计算速度方面却能实现显著提升。此外, 通过对 OneWeb 与 Kuiper 星座的对比分析可知, 在大规模星座设计中, 本文所提出的计算模型相较于 STK 展现出更为明显的优势。

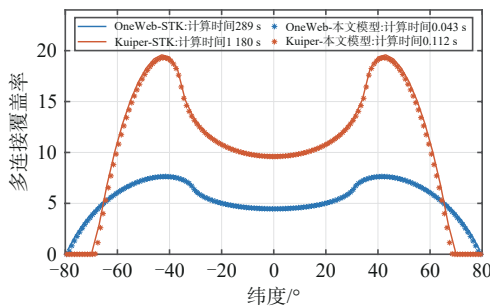
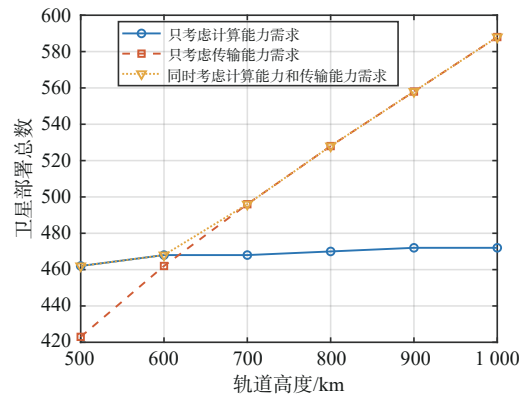


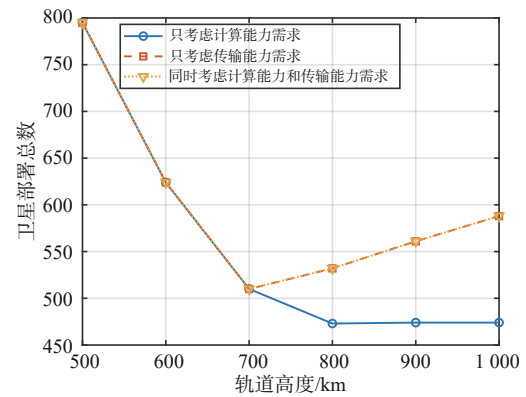
图4 本文提出的多连接仿真模型和卫星仿真软件 STK 仿真结果对比

图5展示了不同轨道高度下的卫星部署数量, 并分析了覆盖率对卫星部署总数的影响。如图5(a)所示, 考虑算力需求的卫星部署总数对轨道高度变化表现出较强的鲁棒性, 而满足传输需求的卫星部署总数则随着轨道高度的增加而显著增多。其原因在于, 用户可获得的平均算力受轨道高度的影响相对较小, 而平均传输速率则会因轨道高度增加导致的路径损耗而迅速下降。当综合考虑覆盖率需求时, 如图5(b)所示, 卫星部署总数会随着轨道高度的增加先减少后增加。这是因为较低的轨道高度会缩小卫星的覆盖面积, 进而导致覆盖率降低。而增大轨道高度虽然扩大了覆盖范围, 但同时也会带来平均传输速率和算力的下降。因此, 存在一个最优的轨道高度, 使得在满足算力、传输和覆盖率需求的前提下, 卫星的总部署总数实现最小化。

不同QoS要求下的最优星座参数见表2。随着



(a) 最低覆盖率和平均覆盖率阈值均为0



(b) 最低覆盖率阈值为5, 平均覆盖率阈值为15

图5 不同轨道高度下的卫星部署数量

任务量和覆盖率要求的提升, 所需的卫星部署总数相应增加。此外, 在保持相同覆盖率要求的前提下, 当卸载任务数量增多时, 卫星部署总数和轨道倾角均呈现上升趋势, 而卫星轨道高度则有所下降。出现这一现象的原因是卫星数量的增加能够带来更广泛的覆盖范围, 这使得在较低的轨道高度和较大的轨道倾角条件下, 既定的覆盖率标准依然能够被满足。与此同时, 在任务量保持不变的情况下, 若覆盖率需求有所提高, 则会促使卫星轨道高度上升, 而轨道倾角则相应降低, 以确保在满足更高覆盖率要求的同时, 用户可获得相应的计算资源和卸载传输速率。

在多目标优化问题中, 不同的覆盖率阈值设定会对多个优化目标的结果产生显著影响, 不同覆盖率阈值下的QoS如图6所示。

表2 不同QoS要求下的最优星座参数

QoS 要求			星座配置					
卸载任务到达强度 $\lambda_i$	最小覆盖率	平均覆盖率	$K$	$N$	$M$	$h$	$i$	$F$
[1,2,0.5]	3	9	169	13	13	1 480	34.0	1
[2,4,1]	3	9	246	6	41	855	40.5	1
[4,8,2]	3	9	465	15	31	507	44.5	1
[2,4,1]	5	15	250	10	25	1 379	36.0	1
[4,8,2]	5	15	504	21	24	711	42.0	1
[8,16,4]	5	15	793	61	13	498	44.5	1

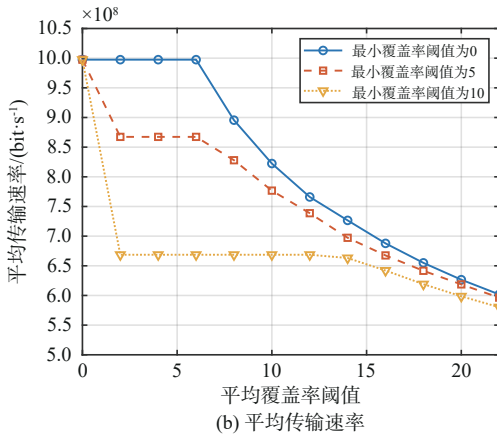
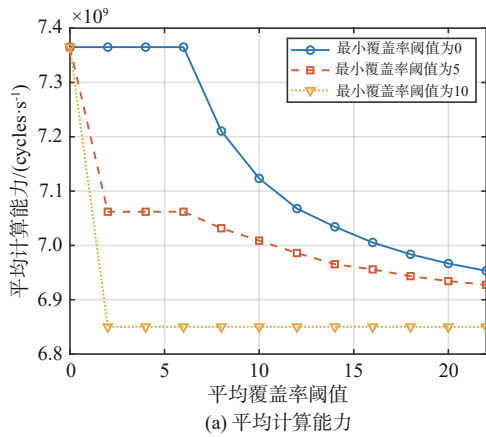


图6 不同覆盖率阈值下的QoS

具体而言，随着最小覆盖率和平均覆盖率的逐步提升，高纬度地区以及物联网UT密集区域得以实现更有效的覆盖。然而，这一过程中部分资源被分配至目标区域之外，进而导致平均计算资源和传输速率出现一定程度的下降。优化卫星轨道高度和倾角，能够在一定程度上保障平均计算资源不下降，但随着最小或平均覆盖率的进一步增加，计算资源也会相应地降低。从图6中可以观察到，在固定条件下，平均传输容量起初保持相对稳定，而后随着平均覆盖率的持续增长而逐渐减少。其主要原因在于，当平均覆盖率阈值处于较低水平时，借助对星座参数的优化调整，

能够确保平均计算资源和传输容量维持在恒定状态。然而，一旦平均覆盖率阈值继续增加，由路径损耗加剧所引发的回程容量下降将超出星座参数的可调节范围，从而导致传输速率持续衰减。

不同用户密度下的卫星部署总数如图7所示。

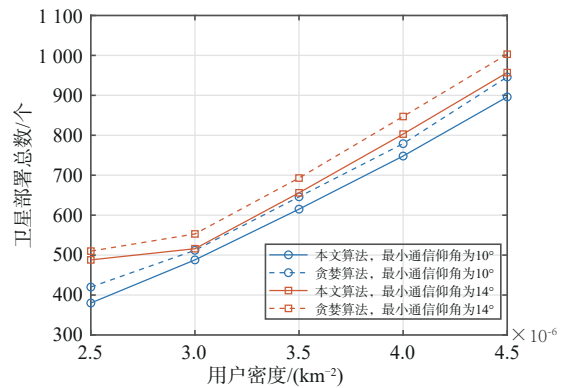


图7 不同用户密度下的卫星部署数量

图7对比了本文提出的两阶段倾斜轨道星座优化算法和基于贪婪算法的星座设计算法。首先，在性能方面，从图7中可以观察到，本文提出的两阶段星座设计算法优于基于贪婪算法的星座设计算法。与贪婪算法优化的卫星星座相比，本文所提算法设计的卫星星座能够以较少的卫星数量满足地面用户的QoS需求。其次，从算法原理上来说，基于贪婪算法的星座设计算法先构造了一个均匀的初始星座，再在初始星座上去除冗余的卫星，每次只删除一颗卫星，在每次删除时都选择删除后星座性能最佳的卫星进行删除。因此，贪婪算法在每次删除卫星时不仅需要遍历每颗卫星以判断是否其可以删除，还需要判断哪一颗卫星删除后星座的性能最佳，而本文所提算法在迭代中只需要判断当前星座参数设置下是否符合约束条件，因此本文所提算法在复杂度上也优于贪婪算法。最后，在应用场景的适应性上，通过图7可以看出，在不同的用户密度和最小通信仰

角下,本文所提算法都比贪婪算法更优,这说明在不同的应用场景中,本文所提算法都更加适用,体现了其在面对不同场景时的适用性和有效性。

为了进一步评估算法在倾斜轨道星座设计中的性能,本文将其与其他具有代表性的低轨卫星星座的倾斜轨道层进行了对比分析,详细性能对比见表3<sup>[31]</sup>①。为了验证结果的稳定性,本文将实验次数重复1 000次得到平均值作为评估指标。从表3中可以看出,相较于其他星座,在卫星数量保持一致的前提下,本文所提出的星座在卫星网络性能方面展现出了优势。具体而言,在相同卫星数量下,本文所提出的星座设计算法较Kuiper、OneWeb和SpaceX在平均覆盖率方面分别提升29.52%、48.73%和34.82%。同时,该算法还可实现最高提升10.98%的平均计算资源和13.29%的平均传输速率。这些结果表明,本文所提出的星座设计在性能方面相较于现有星座实现了显著的提升,同时也验证了本文所提出的两阶段优化算法在处理星座设计多目标优化问题方面的有效性。此外,尽管在与OneWeb星座对比时平均计算资源增长有限,但本文所提出星座部署方案将UT计算资源标准差由3.08 G cycles/s降低至1.52 G cycles/s,说明所提算法在计算资源分配均匀性方面,相比于OneWeb星座有显著提升。

同时,从表3中可以看到,不同权重下得到的星座参数配置和QoS都有所不同,当覆盖率为主要关注的QoS指标时,卫星的轨道高度更高,轨道倾角

更低。这是因为卫星轨道越高,卫星的覆盖面积越大,因此覆盖率也会越高。而卫星轨道倾角低则可以有更多的卫星为人口更加密集的低纬度地区提供服务,同样也可以提高覆盖率。当通信速率为主要QoS指标时,卫星轨道高度更低。这是因为通信速率的提升主要依赖于轨道高度降低带来的路径损耗减小。

图8展示了多连接覆盖率随人口密度的变化关系。比较Kuiper、OneWeb和SpaceX星座可以看出这些星座卫星多连接覆盖率集中的区域已经偏离了人口密集的区域,最大多连接覆盖率地区主要集中在纬度40°~50°区域内,这导致了卸载资源分配的不均衡。在卫星部署总数相同的情况下,本文提出的星座设计能够更好地契合人口分布变化趋势。这是由于本文所提出的星座基于对地面物联网终端的QoS差异化需求分析进行优化设计,从而在相同卫星数量的条件下,实现了与人口分布变化趋势更为匹配的多连接覆盖率,最大覆盖率地区主要集中在纬度20°~40°区域内。相比之下,Kuiper、OneWeb和SpaceX等传统非算力卫星星座主要侧重于全球覆盖,以确保低轨卫星网络能够为地面用户提供无缝通信服务。然而,这种设计并不完全适用于为地面UT提供计算卸载能力的卫星星座。本文提出的算力卫星星座则充分考虑了地面UT的差异化需求,通过优化设计,使得物联网任务卸载需求集中的地区能够获得足够数量的卫星连接,从而有效利用卫星的计算资源和传输资源。

表3 详细性能对比

星座类型	星座配置						QoS		
	$K$	$N$	$M$	$h$	$i$	$F$	$\eta_{\text{avg}}$	$C_{\text{avg}}/10^9$	$R_{\text{avg}}/10^8$
Kuiper	578	17	34	630	51.9	1	13.04	6.26	6.11
本文星座 $w_{\eta} = 1$	578	17	34	693	42.5	1	16.89	6.80	6.50
本文星座 $w_R = 1$	578	17	34	585	44.5	1	13.38	6.73	6.88
OneWeb	128	8	16	1 200	55	1	5.89	1.49	1.07
本文星座 $w_{\eta} = 1$	128	8	16	1 499	35	1	8.76	1.51	1.03
本文星座 $w_R = 1$	128	8	16	1 052	41	1	6.06	1.51	1.20
SpaceX	1 584	72	22	550	53	1	29.21	16.66	17.30
本文星座 $w_{\eta} = 1$	1 584	44	36	612	43.5	1	39.38	18.49	18.59
本文星座 $w_R = 1$	1 584	44	36	503	45.5	1	29.91	18.06	19.60

① 考虑实际应用中不同地区的地形因素会对卫星通信链路产生影响,本文在实验中选择4个具有代表性的复杂地形区域,包括亚马逊雨林(10°S~10°N, 40°W~70°W)、阿尔卑斯山脉(40°N~50°N, 5°E~20°E)、喜马拉雅山脉(25°N~35°N, 75°E~95°E)、横断山脉与四川盆地(25°N~35°N, 95°E~105°E)。这些地区地形复杂,信号遮挡和多径效应显著,因此在这些地区的用户终端会出现通信链路质量下降的情况,本文将这些用户终端与卫星建立链路的路径损耗指数增大,验证模型在更广泛场景下的有效性和稳定性。

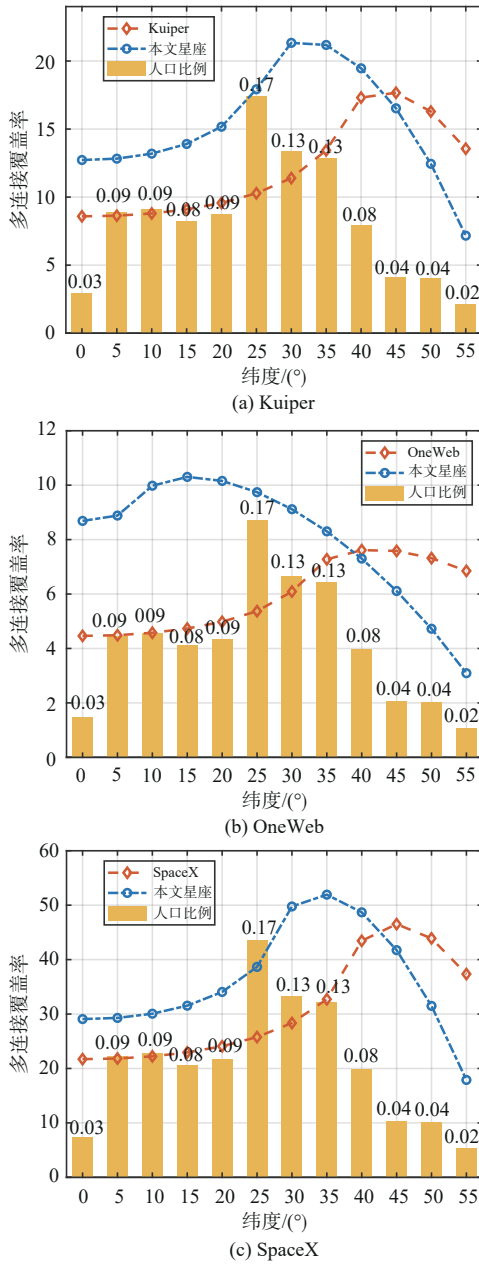


图8 覆盖率随人口密度的变化关系

### 5 结束语

本文就超密集的低轨卫星算力网络星座设计展开研究。首先，利用随机几何和概率论等方法对地面用户平均可获得的计算资源和回程容量进行推导和计算。然后，通过卫星与地球的几何关系构建多

重覆盖率计算模型，从而提升计算平均覆盖率的计算速率并用STK软件进行验证。本文设计了一个两阶段的星座设计算法来解决资源分配和星座参数配置的联合优化问题。最后，从仿真结果可以得出以下结论：1)改变星座参数可以调节地表不同区域的覆盖率；2)存在最优的轨道高度在满足QoS需求的情况下最小化总卫星部署数量；3)综合考虑地面用户计算任务量和覆盖率需求，分析了不同任务量和覆盖率下的卫星网络部署方式。通过仿真发现，地面用户任务量越多、覆盖率需求越高，所需部署的卫星数量越多，并且物联网终端用户可获得的传输计算资源与覆盖率出现优化性能矛盾问题。

### 附录1 命题1证明

球冠相交区域面积示意图如图9所示。

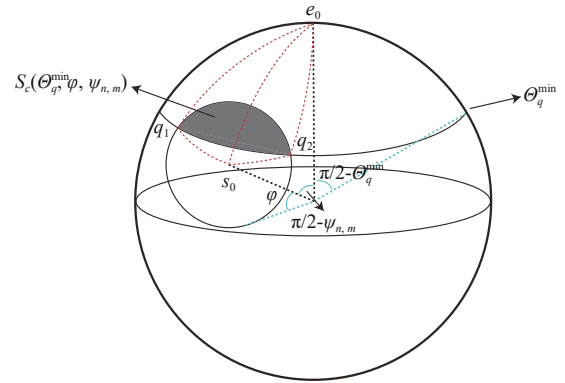


图9 球冠相交区域面积示意图

从图9可以看出， $S_c^{\Theta_q^{\min}, \varphi, \psi_{n,m}}$  可以通过规则图形区域计算得到，具体计算方法可表示为

$$S_c^{\Theta_q^{\min}, \varphi, \psi_{n,m}} = S_{e_0 q_1 q_2} + S_{s_0 q_1 q_2} - 2S_{e_0 q_1 s_0} \quad (51)$$

其中， $S_{e_0 q_1 q_2} = 2R_c^2 \angle s_0 e_0 q_1 (1 - \sin(\Theta_q^{\max}))$ ， $S_{s_0 q_1 q_2} = 2R_c^2 \angle e_0 s_0 q_1 (1 - \cos \varphi)$ 。根据球面三角形<sup>[32]</sup>计算定理可知

$$S_{e_0 q_1 s_0} = R_c^2 (\angle s_0 e_0 q_1 + \angle e_0 s_0 q_1 + \angle e_0 q_1 s_0 - \pi) \quad (52)$$

其中， $\angle s_0 e_0 q_1$ 、 $\angle e_0 s_0 q_1$ 、 $\angle e_0 q_1 s_0$  可通过图9球冠之间角度关系得到<sup>[32]</sup>

$$\angle s_0 e_0 q_1 = 2 \arcsin \left( \sqrt{\frac{\sin\left(\frac{1}{2}(\Theta_q^{\min} + \varphi - \psi_{n,m})\right) \sin\left(\frac{1}{2}(\psi_{n,m} + \varphi - \Theta_q^{\min})\right)}{\cos \Theta_q^{\min} \cos \psi_{n,m}}} \right) \quad (53)$$

$$\angle e_0 s_0 q_1 = 2 \arcsin \left( \sqrt{\frac{\cos\left(\frac{1}{2}(\Theta_q^{\min} + \varphi + \psi_{n,m})\right) \sin\left(\frac{1}{2}(\psi_{n,m} + \varphi - \Theta_q^{\min})\right)}{\sin \varphi \cos \psi_{n,m}}} \right) \quad (54)$$

$$\angle e_0 q_1 s_0 = 2 \arcsin \left( \sqrt{\frac{\sin\left(\frac{1}{2}(\Theta_q^{\min} + \varphi - \psi_{n,m})\right) \cos\left(\frac{1}{2}(\Theta_q^{\min} + \varphi + \psi_{n,m})\right)}{\cos \Theta_q^{\min} \sin \varphi}} \right) \quad (55)$$

经过整理化简， $S_c^{\Theta_q^{\min}, \varphi, \psi_{n,m}}$  可表示为

$$S_c^{\Theta_q^{\min}, \varphi, \psi_{n,m}} = R_c^2 \cdot \mathcal{R} \left\{ 2\pi - 4 \sin \Theta_q^{\min} \arcsin \left( \sqrt{\frac{\sin\left(\frac{1}{2}(\Theta_q^{\min} + \varphi - \psi_{n,m})\right) \sin\left(\frac{1}{2}(\psi_{n,m} + \varphi - \Theta_q^{\min})\right)}{\cos \Theta_q^{\min} \cos \psi_{n,m}}} \right) - \right. \\ \left. 4 \cos \varphi \arcsin \left( \sqrt{\frac{\cos\left(\frac{1}{2}(\Theta_q^{\min} + \varphi + \psi_{n,m})\right) \sin\left(\frac{1}{2}(\psi_{n,m} + \varphi - \Theta_q^{\min})\right)}{\sin \varphi \cos \psi_{n,m}}} \right) - \right. \\ \left. 4 \arcsin \left( \sqrt{\frac{\sin\left(\frac{1}{2}(\Theta_q^{\min} + \varphi - \psi_{n,m})\right) \cos\left(\frac{1}{2}(\Theta_q^{\min} + \varphi + \psi_{n,m})\right)}{\cos \Theta_q^{\min} \sin \varphi}} \right) \right\} \quad (56)$$

## 参考文献：

- [1] 张更新, 揭晓, 曲至诚. 低轨卫星物联网的发展现状及面临的挑战[J]. 物联网学报, 2017, 1(3): 6-9.  
ZHANG G X, JIE X, QU Z C. Development status and challenges of LEO IoT[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2017, 1(3): 6-9.
- [2] 王鹏飞, 邸博雅, 宋令阳, 等. 6G 异构边缘计算[J]. 物联网学报, 2020, 4(1): 121-130.  
WANG P F, DI B Y, SONG L Y, et al. Heterogeneous multi-layer mobile edge computing for 6G[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(1): 121-130.
- [3] DENG R Q, DI B Y, ZHANG H L, et al. Reconfigurable holographic surface-enabled multi-user wireless communications: amplitude-controlled holographic beamforming[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(8): 6003-6017.
- [4] ZHANG S P, DI B Y, KAUSHIK A, et al. Holographic-pattern based multi-user beam training in RHS-aided hybrid near-field and far-field communications[J]. arXiv preprint, 2024, arXiv: 2411.04382.
- [5] 张雨童, 彭煜明, 邸博雅, 等. 天地算力网络中的异构资源协同博弈[J]. 通信学报, 2023, 44(12): 15-27.  
ZHANG Y T, PENG Y M, DI B Y, et al. Heterogeneous resource cooperative game in space-ground computing power network[J]. Journal on Communications, 2023, 44(12): 15-27.
- [6] 李贤, 毕宿志, 曾泓儒, 等. 基于智能化用户协作的边缘计算任务卸载与资源分配优化[J]. 物联网学报, 2022, 6(4): 41-52.  
LI X, BI S Z, ZENG H R, et al. Collaborative task offloading and resource allocation optimization for intelligent edge devices[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2022, 6(4): 41-52.
- [7] DENG R Q, DI B Y, ZHANG H L, et al. Holographic MIMO for LEO satellite communications aided by reconfigurable holographic surfaces[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(10): 3071-3085.
- [8] CAO X L, YANG B, SHEN Y L, et al. Edge-assisted multi-layer offloading optimization of LEO satellite-terrestrial integrated networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, 41(2): 381-398.
- [9] CASSARÁ P, GOTTA A, MARCHESE M, et al. Orbital edge offloading on mega-LEO satellite constellations for equal access to computing[J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(4): 32-36.
- [10] HASSAN N U L, HUANG C W, YUEN C, et al. Dense small satellite networks for modern terrestrial communication systems: benefits, infrastructure, and technologies[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(5): 96-103.
- [11] 王鹏飞, 邸博雅, 唐斌, 等. 面向广域海洋覆盖的密集低轨卫星星座[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(4): 402-409.

- WANG P F, DI B Y, TANG B, et al. Ultra-dense LEO satellite constellation design for wide ocean coverage area[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(4): 402-409.
- [12] ZHOU D, SHENG M, LI J D, et al. Aerospace integrated networks innovation for empowering 6G: a survey and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(2): 975-1019.
- [13] WANG S G, LI Q. Satellite computing: vision and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(24): 22514-22529.
- [14] 张美楠, 张鸣琪, 丁飞, 等. 星地融合中继网络时延与能耗边缘优化卸载策略[J]. 物联网学报, 2022, 6(3): 124-132.
- ZHANG M N, ZHANG M Q, DING F, et al. Offloading strategy with edge optimization of time delay and energy consumption in integrated satellite-terrestrial relay network[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2022, 6(3): 124-132.
- [15] LAKEW D S, TRAN A T, DAO N N, et al. Intelligent self-optimization for task offloading in LEO-MEC-assisted energy-harvesting-UAV systems[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2024, 11(6): 5135-5148.
- [16] WANG Q, CHEN X M, QI Q. Energy-efficient design of satellite-terrestrial computing in 6G wireless networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 72(3): 1759-1772.
- [17] SONG Z Y, HAO Y Y, LIU Y W, et al. Energy-efficient multi-access edge computing for terrestrial-satellite Internet of Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(18): 14202-14218.
- [18] XI S Y, SHANG B D, ZHANG H X, et al. Energy optimization in multisatellite-enabled edge computing systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(12): 21715-21726.
- [19] JIA M, WU J, ZHANG L, et al. Joint optimization communication and computing resource for LEO satellites with edge computing[J]. Chinese Journal of Electronics, 2023, 32(5): 1011-1021.
- [20] CHEN G Q, WU S H, DENG Y J, et al. VLEO satellite constellation design for regional aviation and marine coverage[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2023, 11(1): 1188-1201.
- [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] TANG X R, XU Y N, HUANG L Y, et al. A multiarea on-demand classification constellation design for satellite IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(13): 23889-23905.
- [23] WANG R Y, YE X Y, HE P, et al. LEO satellite constellation design for seamless global coverage with QoS guarantee[C]//Proceedings of the GLOBECOM 2023 - 2023 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2023: 2329-2334.
- [24] DAI C Q, ZHANG M J, LI C, et al. QoE-aware intelligent satellite constellation design in satellite Internet of Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(6): 4855-4867.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] HAENGGI M. Stochastic geometry for wireless networks[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012.
- [28] HAN K, XU B B, GUO S J, et al. Non-grid-mesh topology design for MegaLEO constellations: an algorithm based on NSGA-III[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 72(5): 2881-2896.
- [29] LAI Z Q, WANG Y B, LI H W, et al. Your mega-constellations can be slim: a cost-effective approach for constructing survivable and performant LEO satellite networks[C]//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2024 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2024: 521-530.
- [30] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non terrestrial networks:TR 38.811[S]. 2017.
- [31] 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 the 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, 2021: 1-7.
- [32] OLSEN A A. Introduction to celestial navigation[M]. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 209-223.

## [作者简介]



彭煜明(1999-), 男, 北京大学电子学院博士生, 主要研究方向为卫星通信、星座设计等。



孙仪静(2002-), 女, 北京大学电子学院博士生, 主要研究方向为卫星通信、星座设计等。



邸博雅(1992-), 女, 博士, 北京大学电子学院研究员、助理教授, 主要研究方向为天地一体化通信网络、大规模全息天线传输与感知等。