

面向干扰管控的多星协同波束资源调度方法

姬思敬¹, 白卫岗¹, 郝斯宁¹, 周 笛¹, 曾 媛², 刘 亮³, 盛 敏¹

(1. 西安电子科技大学空天地一体化综合业务网全国重点实验室, 陕西 西安 710071;

2. 上海航天电子通讯设备研究所, 上海 201109;

3. 中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部, 北京 100086)

摘 要: 低轨卫星星座的密集部署加剧了波束同频干扰和资源管理挑战。针对非均匀业务分布与有限星载资源的矛盾, 提出多星协同波束资源优化方法, 通过星群协同调度与功率智能再分配, 有效抑制干扰并实现了空闲资源的高效利用, 提升了系统容量与业务满意度。首先, 建立多星波束间干扰模型; 然后, 构建波束资源分层协同调度架构, 通过星间信息共享、空间隔离约束及负载均衡策略, 综合优化波束调度, 从而有效抑制干扰并提升系统容量与负载均衡性; 最后, 针对高纬度波束过饱和问题, 提出基于波束关停的功率再分配优化模型, 并基于融合改进粒子群与模拟退火的混合算法进行求解, 仿真结果验证了所提算法的有效性和高效性。

关键词: 低轨卫星星座; 跳波束; 干扰管控; 多星协同; 资源分配

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2026002

Multi-Satellite Collaborative Scheduling Method for Beam Resources with Interference Control

Ji Sijing¹, Bai Weigang¹, Hao Sining¹, Zhou Di¹, Zeng Yuan², Liu Liang³, Sheng Min¹

1. State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China

2. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China

3. China Academy of Space Technology, Beijing 100086, China

Abstract: Resource management has become more difficult due to the increased co-frequency interference between beams caused by the dense deployment of low earth orbit (LEO) satellite constellations. This work presents a multi-satellite collaborative beam resource optimization method to resolve the conflict between limited onboard satellite resources and uneven traffic distribution. The technique successfully suppresses interference and achieves efficient utilization of idle resources through intelligent power reallocation and coordinated satellite scheduling, enhancing system capacity and service satisfaction. First, a model of inter-beam interference between multiple satellites is developed. Additionally, a hierarchical collaborative beam resource scheduling architecture is built. The beam scheduling problem is thoroughly optimized by utilizing intersatellite information sharing, geographic isolation limitations, and load balancing techniques. This efficiently suppresses interference and improves system capacity and load balance. Lastly, a power reallocation model based on beam shutdown is proposed to address the beam oversaturation problem in high-latitude regions. A hybrid technique that combines simulated annealing and improved particle swarm optimization is employed to solve the problem. The usefulness and efficiency of the proposed method are confirmed by the simulation results.

Keywords: LEO satellite constellations, beam hopping, interference management, multi-satellite collaboration, resource allocation

收稿日期: 2025-08-19; 修回日期: 2025-10-16

基金项目: 国家自然科学基金 (No.62461160329, No.62401440); 中国博士后科学基金 (No.2024M762541); 中国航天科技集团公司第八研究院产学研合作基金 (No.CCSN-2025-06)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62461160329, No.62401440), China Postdoctoral Science Foundation (No.2024M762541), The Project of Industry-University Cooperation Funding of Shanghai Academy of Spaceflight Technology (No. CCSN-2025-06)

0 引言

低轨卫星通信系统凭借广域覆盖和低部署成本等显著优势,在下一代移动通信系统中占据重要地位^[1-2]。然而,受卫星高速移动与地面业务分布不均匀等的影响,卫星覆盖区域的业务需求通常呈现时空分布不均匀的特征,如何充分利用多波束多重覆盖特性实现有限星载资源与非均匀业务间的精准适配,是低轨卫星系统面临的核心挑战之一^[3-4]。然而,传统的固定波束资源分配策略采用平均分配的模式,难以适应地面业务需求的时空非均匀分布特性。因此,在传统多波束基础上,又发展了跳波束技术。跳波束技术通过动态调整激活波束时序,在资源分配方面展现出显著优势^[5]。文献[6]建立了基于遗传算法的跳波束调度模型,吞吐量相比传统功率和带宽分配系统提高了约30%,文献[7-9]提出干扰抑制导向的最小化干扰和最大化信干噪比算法,但其优化维度局限于带宽分配与共信道消除,且未考虑时延敏感性。文献[10]使用排队论构建时延公平性保障机制,采用分时解耦与随机梯度逼近来降低计算复杂度,保障了长期时延公平性。但是,上述方法均存在计算复杂度高以及难以适应大规模动态星座场景的问题。

近年来,人工智能技术的发展为解决上述问题开辟了新的路径。文献[11]首次提出了一种基于深度强化学习的方法来解决多波束卫星系统中的跳波束照明计划问题,实现了吞吐量与传输时延的双优化。文献[12]构建了多目标强化学习的资源分配模型,将资源分配问题转化为多目标优化问题,实现了资源的高效利用。文献[13-16]分别从分簇调度、优先级保障及时空隔离等维度完善了干扰管理机制,相较于传统的资源分配方法,充分利用跳波束的灵活性来减轻同频干扰,提高了卫星系统的综合性能。

当前低轨卫星波束资源调度研究在系统架构维度呈现双轨演进格局。其一是基于局部最优的单星自主优化体系,聚焦于星载资源受限条件下的多维异构资源约束问题,文献[17-19]在流量与业务需求匹配、排队时延优化以及基于用户密度的波束位置设计等方面取得了进展。其二是面向全局效能的多星协同博弈机制,致力于解决星座级联效应引发的干扰和动态业务负载均衡挑战,其中,文献[20]建立了干扰感知的多星联合优化模型,分析了不同波束之间的干扰,采用一种基于模拟退火的算法来寻找最优的跳波束资源分配方案,但每一颗卫星的跳波束资源分配方案都依赖于前一颗卫星的资源分配结果,导致所需要的响应时间较长,影响了算法的效率和解的

质量,在大规模低轨卫星场景中实用性较差;文献[21]提出了空间隔离的跳波束图案设计方法,采用分层优化策略同步解决负载均衡与干扰抑制问题,但分层优化导致每层优化目标割裂,在负载均衡进行小区-卫星绑定时没有考虑到对后续多星干扰的潜在影响,且一旦小区被分配给一颗卫星,在整个波束跳变周期内都无法改变,这种分配方式难以较好地适应业务需求的快速变化。

综上所述,当前研究多聚焦单星资源调度,对大规模低轨卫星星座的多重覆盖干扰抑制、星间协同机制及星间波束动态关闭导致的星上波束功率资源空置等关键问题尚未形成系统性解决方案。仍存在以下局限:其一,多重覆盖场景下的干扰累积效应尚未建立精确模型;其二,随着星座规模的增长,缺乏多星协同算法的设计;其三,在高纬度区域,卫星波束动态关闭,星上波束功率资源需重新分配。本文相较文献[20-21]等传统方案,设计了一种多星分级协同的波束调度架构,通过联合优化负载均衡、干扰避免和波束图样设计,有效提升了资源调度效率。同时,本文创新性地引入了功率再分配模型,弥补了现有文献对功率维度考量的缺失,提出了当干扰管控关闭波束后,将空闲功率分配给其他波束的功率分配方案。

1 系统模型

1.1 多星协同波束干扰模型

低轨道多星协同波束干扰场景如图1所示,仅考虑卫星前向链路下行传输,设有 M 颗低轨卫星,每颗卫星区域均匀划分为 N 个小区、配置 K 个动态激活波束,每个用户设备仅可接入服务卫星的单一波束。地面运控中心通过高可靠馈电链路将调度方案上传至星载处理器,进而实现波束资源的动态时空分配。系统采用全频带复用机制以提升频谱效率,但这种机制会导致多重覆盖区域内的同频干扰问题。

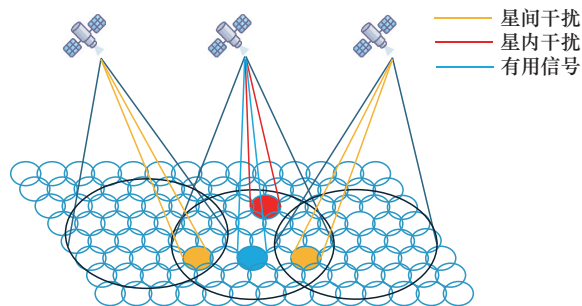


图1 低轨道多星协同波束干扰场景

在某个时隙内，地面小区中的用户接收到的有用信号功率 P_r 可以表示为：

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_f - A \quad (1)$$

其中， P_t 为发射天线功率， G_t 为发射天线增益， G_r 为接收天线增益， L_f 为自由空间损耗， A 为降雨衰减。

本文假设天线发射功率 P_t 和接收天线增益 G_r 保持不变^[22]。由于采用跳波束模式，波束中心指向地面用户，故发射天线增益 G_t 也可视为不变。多普勒频移通过补偿的方式进行控制。因此，有用信号只受自由空间损耗和降雨衰减影响。需要说明的是，在卫星密集部署、全频复用的典型场景下，该系统可视为干扰受限系统，由于降雨衰减，接收功率可能变小，本文提出的干扰协调策略有效。恶劣天气或遮挡导致接收功率和干扰功率严重下降，系统转化为噪声受限系统，本文提出的干扰协调策略有效性降低。

地面小区用户 j 在 t 时刻受到的干扰信号功率 I_j^t 的表达式为：

$$I_j^t = \sum_{l=1}^{LK} (P_t + G_t(\varphi_{j,l}) + G_r - L_f - A) \quad (2)$$

其中， $\varphi_{j,l}$ 表示用户 j 与第 l 个波束之间的角度， L 表示干扰卫星数量， K 为每颗干扰卫星的激活波束数量， A 为降雨衰减。国际电信联盟（international telecommunication union, ITU）无线电通信部门建议书给出的降雨衰减模型为：

$$A_r = a \cdot R_p^b \cdot L_e \quad (3)$$

其中， a 、 b 为经验拟合参数，其取值随频率、极化方式及雨滴粒径分布变化。其中， a 是乘性系数，主要控制雨衰的整体幅度，与频率、极化方式、雨滴粒径分布及雨温相关； b 是指数系数，决定雨衰随雨强变化的非线性程度，反映雨滴尺寸分布对衰减的影响^[23]。 R_p 表示降雨强度，当 p 值取0.01时，表明全年0.01%时间有超过1 mm的雨量， L_e 表示有效传输路径长度，通常与降雨区范围、地面站天线仰角等相关。

卫星天线在不同方向上的增益基于ITU文档RS.672-4定义为：

$$G(\varphi) = \begin{cases} G_m - 3(\varphi/\varphi_0)^2, & \varphi_0 \leq \varphi \leq \alpha\varphi_0 \\ G_m + L_s, & \alpha\varphi_0 < \varphi \leq \beta\varphi_0 \\ G_m + L_s + 20 - 25\log(\varphi/\varphi_0), & \beta\varphi_0 < \varphi \leq \varphi_1 \\ 0, & \varphi_1 < \varphi \end{cases} \quad (4)$$

其中， $G(\varphi)$ 为方向角 φ 处的增益， G_m 为最大主瓣增益， φ_0 为3 dB波束宽度的半波束角， L_s 为旁瓣增益。当 $G_m = 43.3$ dBi， $\varphi_0 = 3^\circ$ ， $\alpha = 3.16$ ， $\beta = 6.32$ ， $L_s = -20$ dBi时， φ_1 通过下式计算：

$$\varphi_1 = \varphi_0 \times 10^{(G_m + L_s + 20)/25} \quad (5)$$

天线离轴角的计算方法为：

$$\varphi = \arccos\left(\frac{R_{BS2D}^2 + H^2 - R_{BS3D}^2}{2 \times R_{BS3D} \cdot H}\right) \quad (6)$$

其中， R 是地球半径， R_{BS2D} 是地面小区中心到卫星星下点的距离， R_{BS3D} 是地面小区中心到卫星的距离， H 是卫星到卫星星下点的距离。地面小区中心、卫星及卫星星下点位置关系如图2所示。

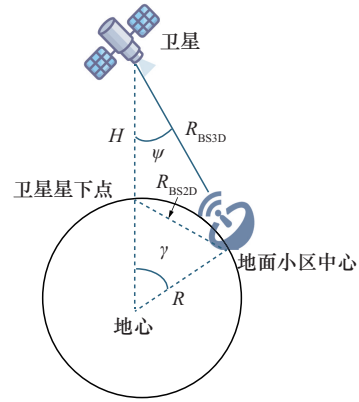


图2 地面小区中心、卫星及卫星星下点位置关系示意

1.2 多星协同模型

当覆盖区域存在多颗低轨卫星，且各卫星采用全带宽波束覆盖模式时，同频干扰成为制约系统容量的关键因素。本文将具有潜在干扰关系的卫星群构建为协同调度单元，能够有效解决传统单星独立决策调度引发的资源分配冲突问题；同时设计了分级协同的波束调度机制，该机制步骤如下。

(1) 基于星座的构型、卫星运行轨迹和干扰来源构建协同星群，采用骨干卫星节点和协同卫星节点的层级化架构。

(2) 协同卫星节点通过广域波束获取区域业务需求，并利用星间链路向骨干卫星节点同步传输业务需求及地面小区空间坐标信息。

(3) 骨干卫星节点整合全域业务数据，生成包含时隙资源分配和波束指向的优化决策方案。

(4) 骨干卫星节点通过星间链路分布式发布调度指令，保障协同卫星节点间的策略一致性。

(5) 协同星群内各卫星节点依据统一调度策略执行波束调度，实现多星协同下的干扰协调与服务保障。

根据香农公式，在第 t 时隙，第 j 个小区的信道容量为：

$$C_j^t = B \log_2 \left(1 + \frac{P_r^t}{N + I_j^t} \right) \quad (7)$$

其中， B 为卫星带宽， $\frac{P_r^t}{N + I_j^t}$ 表示小区 j 在第 t 时隙的信干噪

比。 p_i^t 代表第 t 时隙小区 j 的接收功率, N 代表噪声功率, I_j 代表第 t 时隙小区 j 受到的干扰功率。

设跳波束调度周期包含 T 个时隙,低轨卫星 i 在第 t 个时隙的可见小区集合为 V_i^t ,卫星 i 与第 j 个小区之间的服务关系可表示为:

$$X_{ij} = [x_{ij}^1, x_{ij}^2, \dots, x_{ij}^t, \dots, x_{ij}^T] \quad (8)$$

其中, $x_{ij}^t \in \{0, 1\}$ 表示第 i 颗卫星在第 t 个时隙内是否服务地面小区 j 。本文以最大化信道容量为优化目标,旨在规避单星波束调度冲突引发的同频干扰问题,进而提升系统整体性能。优化问题模型为:

$$\begin{aligned} P: \quad & \max \sum_{j=1}^M C_j \\ \text{s.t.} \quad & C1: x_{ij}^t = 0, \forall j \notin V_i^t, t = 1, \dots, T, i = 1, \dots, N \\ & C2: \sum_{j=1}^M x_{ij}^t \leq K, t = 1, \dots, T, i = 1, \dots, N \\ & C3: \sum_{i=1}^N x_{ij}^t = 1, t = 1, \dots, T, j = 1, \dots, M \end{aligned} \quad (9)$$

其中, M 为地面小区个数, N 为卫星颗数, t 为时隙记数, K 为每颗卫星的激活波束数量,约束条件C1为可见性要求,保证地面小区由可视的卫星提供服务;约束条件C2为卫星激活波束数目要求,保证在每个时隙卫星最多有 K 个激活波束;约束条件C3为归属要求,保证在每个时隙地面小区只能由一颗卫星提供服务。

需要特别说明的是,本文所构建的多星协同模型,基于各卫星节点间可实现信息完美同步与瞬时交互的理想假设,这为研究资源分配的核心问题提供了上界,然而在实际环境中,星间链路的可靠性和有效性极易受到各种空间环境因素的影响^[24],如太阳辐照、单粒子翻转等。后续将重点考虑上述非理想环境下的多星协同模型和波束调度方法。

1.3 功率分配模型

在卫星跳波束下行系统中,地面小区业务需求存在差异性。为解决业务非均匀性及波束关停导致的功率资源闲置问题,本文提出了功率分配模型,构建了面向容量失配最小化的目标函数,即最小化信道容量与业务需求容量差的平方,以实现系统资源的最优适配。该优化模型的数学表述为:

$$\begin{aligned} P: \quad & \min \sum_{j=1}^{NK} |C_j - D_j|^2 \\ \text{s.t.} \quad & C1: \sum_{j=1}^K p_i^j \leq P, i = 1, \dots, N \\ & C2: p_i^j \geq 0, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, K \end{aligned} \quad (10)$$

其中, N 为卫星颗数, K 为每颗卫星的激活波束数量, C_j 表示信道容量, D_j 表示业务需求容量,C1表示单星下所有激活波束的功率总和不能超过单星功率总和,C2表示波束分配得到的功率要大于0。

2 算法设计

2.1 基于多星协同的跳波束图案设计算法

基于文献[25]建立卫星波束同频干扰模型,如图3所示。波束间的同频干扰强度与小区间的空间距离密切相关。该模型表明,当两个波束在相近的空间区域同时激活时,服务于一小区(如小区A)的波束会对邻近小区(如小区B)的用户产生显著的同频干扰,且干扰强度随服务波束与受干扰用户之间空间间距的减小而急剧增大。这一关系可以从地面小区A、B之间的夹角 φ 及其相对位置直观反映:小区空间间距 d_{AB} 越小,波束辐射方向图在对方服务区域内的重叠程度越高,导致接收端信干噪比下降,从而严重制约系统容量。因此,有效管控同频干扰的关键在于:在跳波束图案设计中引入空间隔离约束,避免距离过近的小区在同一时隙被激活。

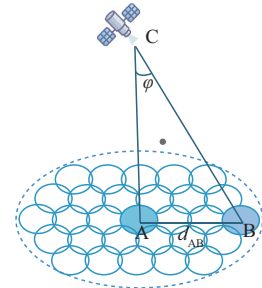


图3 卫星波束同频干扰模型

本文提出一种基于多星协同的跳波束图案设计算法,通过多维联合优化机制,实现了系统性能的提升,其创新性设计如下。

(1) 星群协同机制:将卫星之间的干扰源规划为一个整体,采用全局调度的策略,避免单星决策带来的波束调度冲突等问题。

(2) 干扰抑制机制:基于波束空间相关性的干扰评估模型,发现随着小区空间间距的增大,波束间同频干扰强度下降。根据后续仿真设定,本文定义隔离距离门限约束为80 km,隔离距离门限指的是使相邻小区对应波束产生的同频干扰可以被接受的最小小区间距离。通过遍历激活波束的位置,当剩余激活波束的空间距离不满足门限值时,启动选择性波束休眠机制,实现时隙级动

态干扰规避。

(3) 负载均衡策略：地面小区在选择服务卫星时，在可视卫星中，优先选择负载较轻的卫星，避免热点区域的业务负载集中在某一个卫星节点上。

算法：基于星群协同的低轨卫星跳波束资源调度算法

```

1  初始化
2  跳波束卫星系统场景参数
3  执行
4  for  $j = 1, 2, \dots, M$ 
5      依据地面小区经纬度和覆盖半径，收集地面小区业务需求量  $D_j$ 
6  end
7  for  $t = 1, 2, \dots, T$ 
8      按照业务需求量从大到小的顺序，重新排列  $D_j$ 
9      for  $D_j = D_1, D_2, \dots, D_M$ 
10         if  $D_j$  是当前时隙第一个选中的小区
11             为地面小区  $j$  选择可视卫星中负载最低的卫星  $i$ ，更新  $x'_{ij}$ ，将  $D_j$  置为 0
12         else
13             if 地面小区  $j$  与当前时隙选中的其余地面小区的距离大于隔离距离门限
14                 if 可视卫星中负载最低的卫星  $i$  的激活波束数目小于  $K$ 
15                     更新  $x'_{ij}$ ，将  $D_j$  置为 0
16                 else
17                     跳过该地面小区
18             end
19         else
20             跳过该地面小区
21         end
22     end
23     if 当前激活波束数量达到上限
24         执行步骤 7
25     else
26         执行步骤 9
27     end
28 end
29 end
30 if 存在未分配服务卫星的地面小区  $j$ 
31     随机插入距离最近且负载最轻的卫星跳波

```

束图案中

32 end

33 输出卫星跳波束图案

进一步，对该算法的时间复杂度进行分析。令 M 表示地面小区总数， N 为卫星总数， T 为调度周期内的时隙总数（固定常数）， K 表示单星最大波束数。算法的执行过程可以分为 3 个阶段进行分析。

1) 在初始化阶段中，对所有小区按业务需求进行降序排序，时间复杂度为 $O(M \cdot \log M)$ ，初始化各卫星负载 $S_n = 0$ ，时间复杂度为 $O(N)$ ，初始化总时间复杂度为 $O(M \cdot \log M + N)$ 。

2) 在小区分配阶段中，遍历 M 个小区，为每个小区寻找可见卫星集合 θ_i 的时间复杂度均为 $O(M \cdot N)$ 。从可见卫星中选择负载最低的卫星，时间复杂度为 $O(N)$ 。更新卫星负载，时间复杂度为 $O(1)$ 。此阶段总时间复杂度为 $O(M \cdot N + N + 1) = O(M \cdot N)$ 。

3) 在波束调度阶段中，对于每个时隙 t ，遍历已排序的 j 个小区，检查空间隔离约束（距离计算时间复杂度为 $O(1)$ ）和波束数量约束，最坏情况下时间复杂度为 $O(M \cdot T)$ 。对于未分配小区进行随机插入，时间复杂度为 $O(M)$ 。此阶段总时间复杂度为 $O(M \cdot T + M)$ 。

综合以上 3 个阶段，总时间复杂度为 $O(M \cdot \log M + N + M \cdot N + M \cdot T)$ ，考虑到 T 为固定常数，其可简化为 $O(M \cdot (\log M + N))$ 。

2.2 基于模拟退火算法的粒子群波束功率分配算法

在非均匀业务场景下，对高业务需求区域仅优化波束的“开关”状态难以实现资源与需求的最佳匹配，且波束关停策略会导致星上功率资源闲置。如何将这些闲置的功率动态智能地重新分配给激活的波束，以最大化系统容量并满足各地面小区的业务需求，是进一步提升系统性能的关键。为求解优化模型，本文提出了一种基于模拟退火算法的粒子群波束功率分配算法，相较于文献[21]中的模拟退火算法，本文所提算法采用粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 群体协作的并行搜索策略提升了搜索效率，并基于模拟退火算法的概率突跳机制保证了跳出局部最优的能力，从而在收敛速度和全局搜索能力之间取得了更好平衡。

针对高纬度区域波束动态关闭策略，本文对标准 PSO 算法进行如下修改。

(1) 粒子初始化：每一种波束功率分配方式用粒子 x 表示，粒子的维度由波束的数量决定，每一个维度表示

一个波束的功率分配结果,取值范围为0到 $w_{\max}$, $w_{\max}$ 表示单波束最大功率,采用随机方式初始化粒子的位置和速度 v 。

(2) 评估适应度:将随机生成的波束功率分配结果代入目标函数值中,存储各粒子的个体极值 $pbest$, $P_i = (p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,D})$ 并更新种群当前全局最优解 $gbest$, $P_g = (p_{g,1}, p_{g,2}, \dots, p_{g,D})$ 。

(3) 概率突跳机制:为了避免粒子陷入局部极值中,在标准PSO算法中引入模拟退火的概率突跳机制:当初始温度较高时,算法对差解的接受概率增大,促使粒子群在解空间中进行广域探索;随着退火过程的演进,接受概率逐步降低,算法从粗粒度全局搜索向邻域精细搜索过渡,最终聚焦于潜在最优区域。需要引入设置初始温度、适配值和退火操作3个步骤,实现对粒子群算法的改造,即:

$$t_0 = \frac{f(p_g)}{\ln 5} \quad (11)$$

$$TF(p_i) = \frac{e^{\frac{-(f(p_i) - f(p_g))}{t}}}{\sum_{i=1}^N e^{\frac{-(f(p_i) - f(p_g))}{t}}} \quad (12)$$

$$t_{k+1} = \lambda t_k \quad (13)$$

其中, t_0 为初始温度, $f(p_i)$ 和 $f(p_g)$ 分别表示第 i 个粒子的个体最优适应度值和当前全局最优粒子的适应度值, e 为自然数, N 为粒子规模, λ 为退火常数。

(4) 引入收缩因子:标准PSO算法需要进行速度和位置的更新,传统学习因子设置方法容易使粒子过多地在局部范围内徘徊或者会促使粒子过早收敛到局部最小值。为了有效地控制粒子的飞行速度,使算法实现全局探测与局部开采间的有效平衡,引入基于收缩因子的PSO算法,其速度更新式表示为:

$$v_{ij}(t+1) = \varphi(wv_{ij}(t) + c_1 \cdot r_1(p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 \cdot r_2(p_{gj}(t) - x_{ij}(t))) \quad (14)$$

其中, φ 为收缩因子, w 为惯性权重, c_1 和 c_2 为学习因子, r_1 和 r_2 为0到1之间均匀分布的随机数, x_{ij} 为第 i 个粒子在第 j 维的位置。

$$\varphi = \frac{2}{|2 - C - \sqrt{C^2 - 4 \times C}|} \quad (15)$$

$$C = c_1 + c_2 \quad (16)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (17)$$

本文提出的基于模拟退火算法的粒子群波束功率分配算法如下。

算法:基于模拟退火算法的粒子群波束功率分配算法

```

1  初始化
2  跳波束卫星系统场景参数
3  粒子群算法参数和模拟退火相关参数
4  for  $i = 1, 2, \dots, N$ 
5      for  $j = 1, 2, \dots, D$ 
6          随机初始化每个粒子的位置  $x_{ij}$  和
          速度  $v_{ij}$ 
7      end
8  end
9  评估每个粒子的适应度,将当前各粒子的位置
  和适应值存储在各粒子的 $P$ 中,将所有 $pbest$ 中适应值
  最优个体的位置和适应值存储在 $gbest$ 
10  根据式(11),确定初始温度
11  for  $t = 1, 2, \dots, k$ 
12      根据式(12)确定当前温度下各 $P_i$ 的适配值
13      采用轮盘赌策略从所有 $P_i$ 中确定全局最
      优的某个替代值 $P_g$ ,然后根据式(14)和式(17)更新各粒子
      的速度和位置
14      计算各粒子新的目标值,更新各粒子的
       $P_i$ 值及群体的 $P_g$ 值
15      根据式(13),进行退温操作
16      if 满足迭代次数的要求
17          搜索停止,输出功率分配结果
18      else
19          执行步骤12
20      end
21  end

```

进一步,对所提算法的时间复杂度进行分析。令 M 表示最大迭代次数, N 为粒子种群规模, D 为解空间维度, F 表征适应度函数单次计算的时间复杂度。算法的执行过程可以分为两个阶段进行渐进式分析:在初始化阶段中,初始化粒子位置和速度,时间复杂度为 $O(N \cdot D)$,每个粒子调用一次适应度函数,时间复杂度为 $O(N \cdot F)$,遍历所有粒子寻找初始全局最优解,时间复杂度为 $O(N \cdot F)$,初始化总时间复杂度为 $O(N \cdot (D + F))$;在主循环中,计算当前温度下的适应值和进行轮盘赌操作的时间复杂度均为 $O(N)$,其余操作的时间复杂度参照上述分析,进而单次迭代总时间复杂度为 $O(N \cdot (D + F))$,主循环总时间复杂度为 $O(M \cdot N \cdot (D + F))$,综合初始化和主循环,总时间复杂度为 $O(M \cdot N \cdot (D + F))$ 。

3 仿真验证

3.1 仿真场景

在仿真实验中，每个时隙持续 2 ms，假设卫星和地面小区在这个时间段内相对位置保持不变。星座参数构型见表 1，星座参数参照 ITU 第 3001 期 SRS 数据库中的 GW-A59 星座第 3 层子星座设置^[26]，区别为：本文设定轨道面数为 30 个、轨道高度为 500 km，系统参数见表 2^[22]；基于模拟退火算法的粒子群波束功率分配算法参数基于文献^[27]设定，经过调优后的参数见表 3。

表 1 星座参数构型

星座参数	取值
卫星总数	1 800 颗
轨道面数	30 个
轨道高度	500 km
轨道倾角	55°
相位因子	1

表 2 系统参数

仿真参数	取值
通信频率	20 GHz
单星小区数	349 个
单星波束数	16 个
工作带宽	250 MHz
波束总功率	500 W
用户天线增益	17 dBi
接收品质因数 G/T	18.5 dB/K
卫星天线增益	43.3 dBi
3 dB 波束宽度半波束角	3°
小区半径	35 km
单时隙时长	2 ms

表 3 基于模拟退火算法的粒子群波束功率分配算法部分参数

仿真参数	取值
种群规模	200 个
迭代次数	100 次
学习因子 c_1	2.05
学习因子 c_2	2.05
退火常数 λ	0.5
自变量个数	72 个

3.2 仿真结果及分析

(1) 干扰仿真结果及分析

卫星在不同纬度和激活波束数目下的干扰分布特征

如图 4 所示。可以看出，系统干扰功率与纬度密切相关，在 16 个激活波束工作模式下，北纬 55°附近的干扰功率是南纬 1.57°的 11.43 倍。这种纬度带来的效应主要由两个原因引起：第一，从星座构型中可以看出，高纬度区域存在更密集的卫星，导致星间同频干扰波束数量增加；第二，受人口密度分布的影响，高纬度区域地面业务需求降低，迫使波束资源向有限服务区域集中，进而产生波束叠加效应。同时，干扰功率与波束数量有关，当激活波束数量从 16 个提升至 32 个时，在北纬 40°区域的干扰功率升高；激活波束数量增至 64 个波束时，该值进一步提升。需要注意的是，在单星 64 个波束全激活状态下，系统干扰在高纬度区域达到峰值，该区域通信系统的频率复用策略将受到严重影响，此时可以考虑采用动态波束关闭策略或者采用自适应功率控制算法。

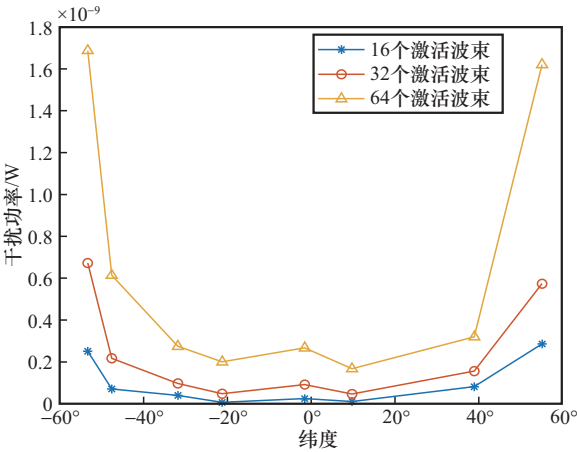


图 4 卫星在不同纬度和激活波束数目下的干扰分布特征

表 4 给出了激活波束分别为 16 个、32 个和 64 个时，10301 卫星在南纬 1.57°区域的干扰来源和占比情况。从表中可以看出，赤道区域的干扰呈现显著集聚特征。具体而言，在不同数量激活波束下，本星星内干扰、同轨道相邻卫星及邻近轨道相邻卫星形成的三重干扰叠加效应，分别占总干扰的 97.87%、97.78% 和 96.84%，其占比均值达到 97.50%。该现象主要归结于 3 个原因：第一，赤道地区卫星覆盖密度相对稀疏，有效避免了多星共位引发的密集干扰；第二，根据自由空间路径损耗模型，其他卫星的同频干扰信号在经历大气衰减后，其等效全向辐射功率较近端干扰源下降，导致干扰可忽略不计；第三，赤道地区干扰卫星数目较少，且干扰卫星主要来源于同轨道相邻卫星及邻近轨道相邻卫星。

表4 10301卫星在南纬1.57°区域的干扰来源及占比情况

激活波束数目/个	卫星干扰分类	干扰数值占比
16	本星区内	41.94%
	同轨道相邻卫星	51.98%
	邻近轨道相邻卫星	3.95%
	其他卫星	2.13%
32	本星区内	29.22%
	同轨道相邻卫星	65.07%
	邻近轨道相邻卫星	3.49%
	其他卫星	2.22%
64	本星区内	29.65%
	同轨道相邻卫星	63.18%
	邻近轨道相邻卫星	4.01%
	其他卫星	3.16%

(2) 多星协同波束调度算法仿真结果及分析

以协同星群中卫星数量为9颗为例,系统容量定义为协同星群在跳波束周期内实际传输的业务总量,即业务请求量与用户速率的较小值:

$$R = \sum_{i=1}^N \min(C_i, D_i) \quad (18)$$

同时,使用归一化负载性能指标来验证算法的负载均衡性:

$$\hat{S} = S_i / \sum_{i=1}^9 S_i \quad (19)$$

其中, S_i 表示第 i 颗卫星的负载。

图5展示了4种不同波束调度算法下的系统容量,可以看出本文提出的星群协同调度算法系统容量更高。相较于随机分配调度、最长队列分配调度和按需轮询分配调度算法,系统容量分别提升了31.80%、10.29%和18.93%。

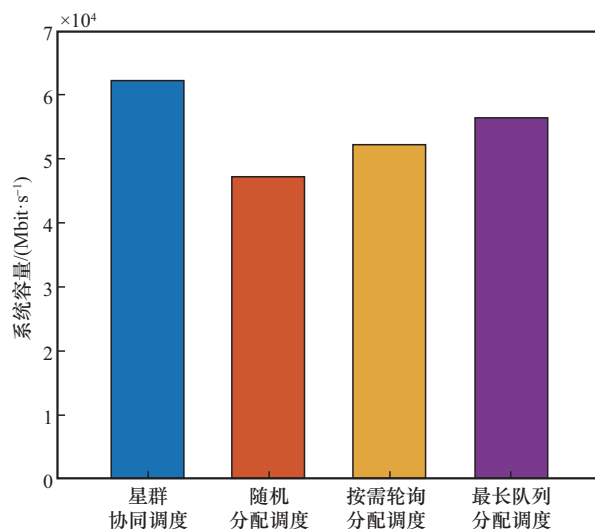


图5 不同波束调度算法下的系统容量

图6展示了4种不同调度算法生成的激活波束空间分布情况。可以看出,相较于其他3种基准算法,本文提出

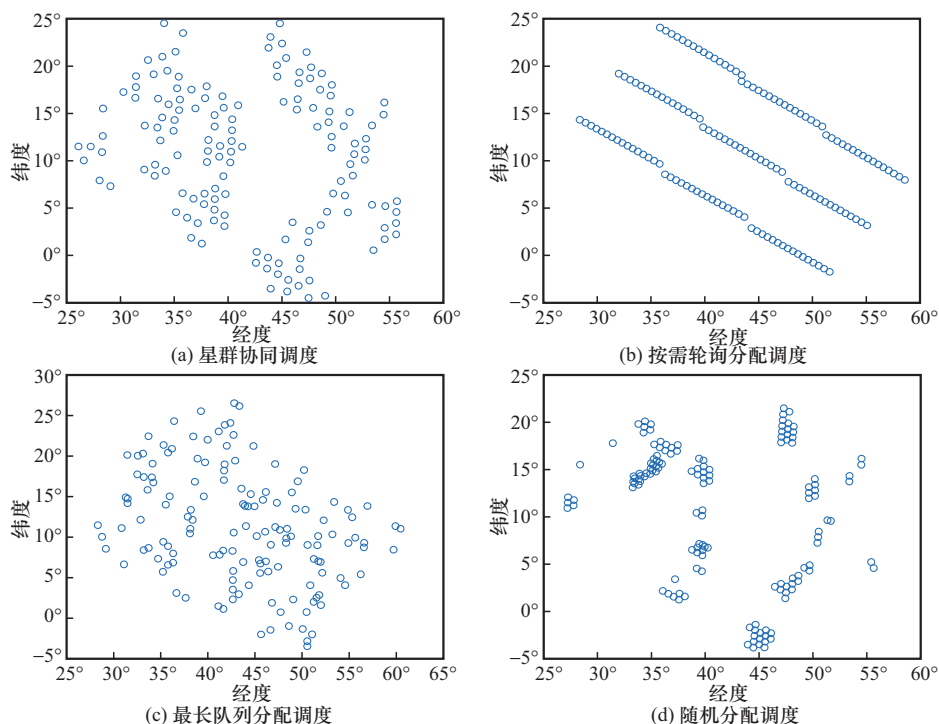


图6 不同调度算法生成的激活波束空间分布情况

的星群协同调度算法展现出显著的空间隔离优势，其激活波束的空间位置严格满足空间隔离约束条件，能够有效控制波束间同频干扰。传统最长队列分配算法虽然在宏观层面保持了集群间距，但各簇内部的波束间距均值难以满足空间隔离约束条件；随机分配调度算法虽具有全局分散特征，却会在局部区域形成波束聚集异常区，引发局部干扰峰值；按需轮询分配调度算法在同轨维度上满足了隔离条件，但在跨轨维度和星内维度上存在波束间交叠现象，造成系统性干扰。

表5展示了上述4种不同调度算法的激活波束干扰总和，相较于3种对比算法，本文提出的星群协同调度算法干扰强度明显下降，优于3种对比算法。

表5 不同调度算法的激活波束干扰总和

波束分配调度算法	波束干扰总和/W
星群协同调度	2.59×10^{-10}
随机分配调度	5.57×10^{-10}
最长队列分配调度	3.50×10^{-10}
按需轮询分配调度	4.82×10^{-10}

图7展示了星群协同的负载均衡效果，系统在实施负载均衡策略前后呈现显著差异：卫星归一化负载标准差从初始状态的0.147 9降至优化后的0.074 1，降幅达到49.9%，验证了算法对负载分布的调控能力。原始状态下，卫星3、4、8和9承担了业务需求总量的66.96%，形成明显的负载热点区域。经过算法优化以后，业务请求被动态分配到其他卫星上，有效缓解了传统资源调度中“旱涝不均”的矛盾。

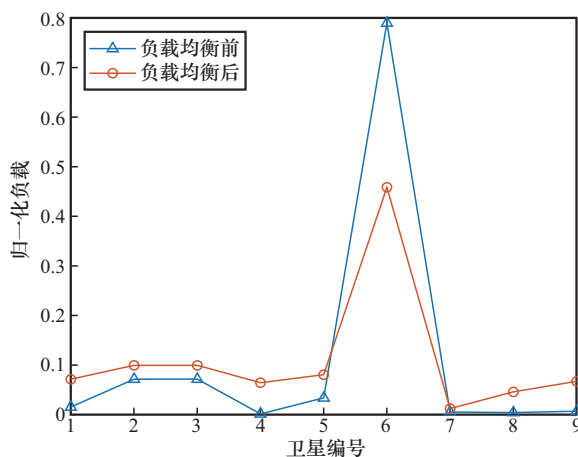


图7 高业务需求场景下的卫星归一化负载

(3) 功率分配算法结果分析

本文考虑均匀业务分布和实际非均匀业务分布两种场景，通过业务平均满意度、二阶失配容量、系统容量和算法收敛速度4个指标验证所提波束功率分配算法的性能，其中业务平均满意度表示卫星所服务小区的平均业务满意度，小区业务满意度为实际提供小区的业务量与小区需求量的比值。基线对比算法包括：粒子群功率分配算法，在标准粒子群算法的基础上引入收缩因子；按需比例功率分配算法，按照地面小区业务请求量占据总业务需求量的比例，给每个激活波束分配对应的功率；均分功率分配算法，将总的功率资源重新均分到每个激活波束上。

非均匀业务场景和均匀业务场景的小区业务需求量分别如图8和图9所示。非均匀业务地面小区业务需求量峰值达4 350.34 Mbit/s，基准值维持在36.65 Mbit/s水平，平均值为809.71 Mbit/s；均匀业务地面小区业务需求量峰值为650 Mbit/s，最小值为300 Mbit/s，平均值为480.94 Mbit/s。

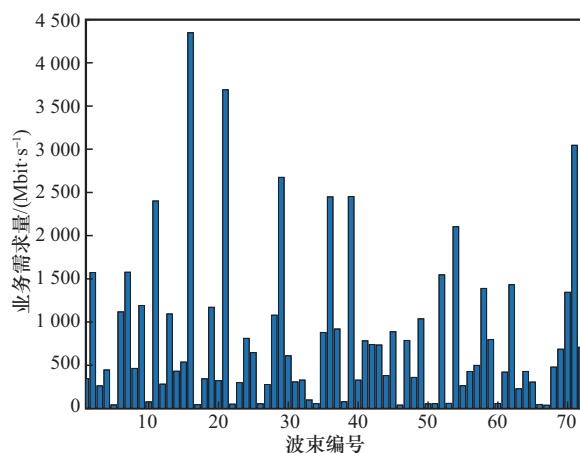


图8 非均匀业务场景的小区业务需求量

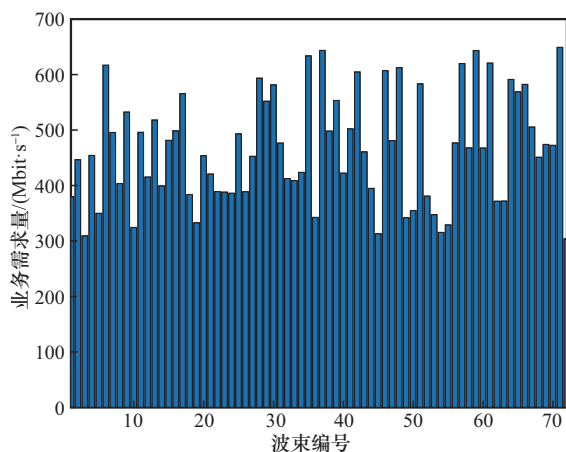


图9 均匀业务场景的小区业务需求量

非均匀业务场景和均匀业务场景的业务平均满意度分别如图 10 和图 11 所示。图 10 和图 11 的仿真数据表明,在非均匀业务场景下,本文算法在整体性能上占据优势,在卫星 1 和 2 中优势尤为显著。相比之下,粒子群功率分配算法在 7 和 8 号卫星的业务场景下的业务平均满意度表现较差,功率资源利用率较低。在其余卫星中,本文算法与按需比例功率分配算法之间差距较小。在均匀业务分布场景下,相较于对比算法,本文算法的业务平均满意度提升显著,实现了卫星业务平均满意度的提升。

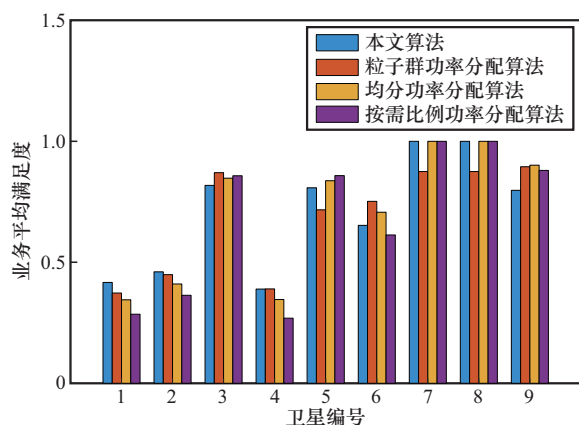


图 10 非均匀业务场景的业务平均满意度

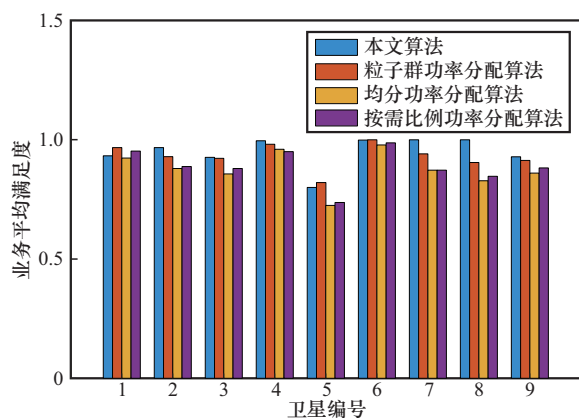


图 11 均匀业务场景的业务平均满意度

表 6 展示了不同业务场景下使用不同功率分配算法能达到的系统容量。在非均匀业务场景下,本文算法相较于粒子群功率分配算法、均分功率分配算法和按需比例功率分配算法,系统容量分别实现了 1.20%、5.39% 和 6.28% 的容量增幅。在均匀业务场景下,本文算法相较于粒子群功率分配算法、均分功率分配算法和按需比例功率分配算法,分别实现了 0.99%、7.72% 和 5.14% 的容量增幅,且均匀业务场景下的容量增益比非均匀业务场景高 20.87%,揭示算法在均匀业务密度环境中具有独特优势。

表 6 不同业务场景下使用不同功率分配算法能达到的系统容量

功率分配算法	非均匀业务场景 系统容量/(Mbit·s ⁻¹)	均匀业务场景 系统容量/(Mbit·s ⁻¹)
本文算法	2.54×10^4	3.07×10^4
粒子群功率分配算法	2.51×10^4	3.04×10^4
均分功率分配算法	2.41×10^4	2.85×10^4
按需比例功率分配算法	2.39×10^4	2.92×10^4

表 7 展示了不同功率分配算法下的二阶失配容量。可以看到,本文算法的二阶失配容量指标均低于基线算法,这是因为所提算法能有效提升卫星波束与地面小区的供需匹配度,并将冗余功率重新定向至高需求小区。

表 7 不同功率分配算法下的二阶失配容量

功率分配算法	非均匀业务场景的二阶 失配容量/(Mbit·s ⁻¹) ²	均匀业务场景的二阶 失配容量/(Mbit·s ⁻¹) ²
本文算法	5.72×10^7	7.51×10^5
粒子群功率分配算法	5.80×10^7	8.18×10^5
均分功率分配算法	6.43×10^7	1.27×10^6
按需比例功率分配算法	5.76×10^7	8.05×10^5

图 12 和图 13 对比了非均匀业务和均匀业务场景下所提算法与基线算法的收敛速度,其中横轴为迭代次数,纵轴是根据业务平均满意度、系统容量和二阶失配容量归一化得到的 4 种算法的解的质量。其中均分功率分配算法和按需比例功率分配算法无须迭代,为方便对比,这两种算法性能在图 12 和图 13 中表示为一条水平直线。可以看到,均分功率分配算法和按需比例功率分配算法复杂度最低,无须迭代,收敛速度最快,但解的质量显著受限;粒子群功率分配算法和本文算法作为迭代优化算法,收敛速度相对较慢,但经迭代解的质量高于前两者。在 4 种算法中,迭代后本文算法综合解的质量最优,实现了收敛效率与优化性能的良好平衡。

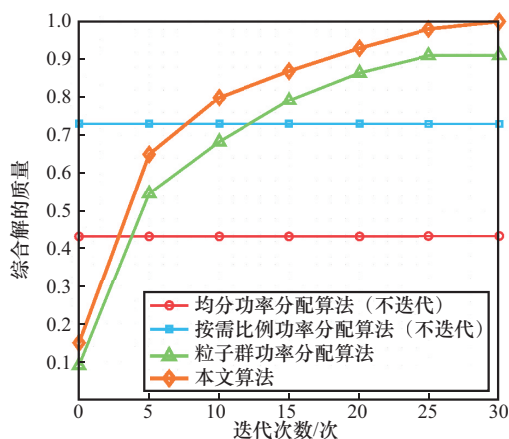


图 12 非均匀业务场景下算法收敛速度对比

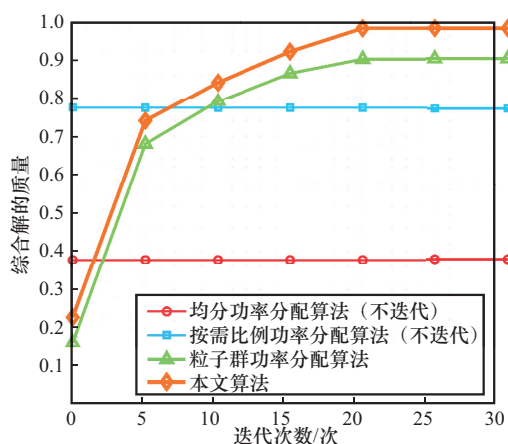


图13 均匀业务场景下算法收敛速度对比

4 结束语

低轨星座规模的不断扩张加剧了多星多波束叠加覆盖下的同频干扰,本文提出了基于多星协同的跳波束图案设计算法和基于模拟退火算法的粒子群波束功率分配算法,创新性地采用星群协作、空间隔离约束及负载均衡机制,同时引入功率再分配模型,有效地抑制了干扰,提升了星上资源的利用效率和系统容量,实现了波束资源的智能动态最优调配。未来将围绕更精确的信道与干扰建模、星间协同的非理想通信约束,以及更低复杂度的调度算法等对波束图样设计及其资源分配问题开展进一步研究。

参考文献

- [1] Luo X W, Chen H H, Guo Q. LEO/VLEO satellite communications in 6G and beyond networks - technologies, applications, and challenges[J]. IEEE Network, 2024, 38(5): 273-285.
- [2] Ben Ati S, Dahrouj H, Alouini M S. An overview of performance analysis and optimization in coexisting satellites and future terrestrial networks[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2025, 6: 3834-3852.
- [3] Lei L, Wang A Y, Lagunas E, et al. Spatial-temporal resource optimization for uneven-traffic LEO satellite systems: beam pattern selection and user scheduling[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2024, 42(5): 1279-1291.
- [4] Jia H Q, Wang Y, Peng H X, et al. Dynamic beam hopping and resource allocation for non-uniform traffic demand in NGSO satellite communication systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(1): 816-830.
- [5] Anzalchi J, Couchman A, Gabellini P, et al. Beam hopping in multi-beam broadband satellite systems: system simulation and performance comparison with non-hopped systems[C]//Proceedings of the 2010 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop. Piscataway: IEEE Press, 2010: 248-255.
- [6] Angeletti P, Fernandez Prim D, Rinaldo R. Beam hopping in multi-beam broadband satellite systems: system performance and payload architecture analysis[C]//Proceedings of the 24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference. AIAA, 2006: 2006-5376.
- [7] Alberti X, Cebrian J M, Del Bianco A, et al. System capacity optimization in time and frequency for multibeam multi-media satellite systems[C]//Proceedings of the 2010 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop. Piscataway: IEEE Press, 2010: 226-233.
- [8] Lei J, Vázquez-castro M Á. Multibeam satellite frequency/time duality study and capacity optimization[J]. Journal of Communications and Networks, 2011, 13(5): 472-480.
- [9] Alegre-godoy R, Alagha N, Vázquez-castro M A. Offered capacity optimization mechanisms for multi-beam satellite systems[C]//Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2012: 3180-3184.
- [10] Han H, Zheng X Q, Huang Q F, et al. QoS-equilibrium slot allocation for beam hopping in broadband satellite communication systems[J]. Wireless Networks, 2015, 21(8): 2617-2630.
- [11] Hu X, Liu S J, Wang Y P, et al. Deep reinforcement learning-based beam Hopping algorithm in multibeam satellite systems[J]. IET Communications, 2019, 13(16): 2485-2491.
- [12] Hu X, Zhang Y C, Liao X L, et al. Dynamic beam hopping method based on multi-objective deep reinforcement learning for next generation satellite broadband systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2020, 66(3): 630-646.
- [13] Wang L, Zhang C, Qu D X, et al. Resource allocation for beam-hopping user downlinks in multi-beam satellite system[C]//Proceedings of the 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 925-929.
- [14] Zhang T, Zhang L X, Shi D Y. Resource allocation in beam hopping communication system[C]//Proceedings of the 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [15] 王琳, 张晨, 王昱煜, 等. 基于多波束卫星系统的跳波束技术研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2019, 39 (3): 25-30.
Wang L, Zhang C, Wang X Y, et al. Research of beam-hopping technology based on multi-beam satellite system[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications Natural Science, 2019, 39 (3): 25-30.
- [16] 王亚昕, 边东明, 胡婧, 等. 基于分簇的全带宽跳波束图案优化方法[J]. 计算机工程, 2020, 46 (4): 169-176.

Wang Y X, Bian D M, Hu J, et al. Optimization method for full bandwidth beam hopping pattern based on clustering[J]. Computer Engineering, 2020, 46 (4): 169-176.

[17] Tang J Y, Bian D M, Li G X, et al. Resource allocation for LEO beam-hopping satellites in a spectrum sharing scenario[J]. IEEE Access, 2021, 9: 56468-56478.

[18] Tang J Y, Bian D M, Li G X, et al. Optimization method of dynamic beam position for LEO beam-hopping satellite communication systems[J]. IEEE Access, 2021, 9: 57578-57588.

[19] Lyu L Y, Qi C H. Beam position and beam hopping design for LEO satellite communications[J]. China Communications, 2023, 20(7): 29-42.

[20] 胡金龙, 刘继红, 周一青, 等. 基于干扰感知的多星协同跳波束资源分配[J]. 电信科学, 2023, 39 (8): 17-28.

Hu J L, Liu J H, Zhou Y Q, et al. Interference-aware multi-satellite cooperative beam hopping resource allocation[J]. Telecommunications Science, 2023, 39 (8): 17-28.

[21] Lin Z Y, Ni Z Y, Kuang L L, et al. Multi-satellite beam hopping based on load balancing and interference avoidance for NGSO satellite communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(1): 282-295.

[22] Del Portillo I, Cameron B G, CRAWLEY E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. Acta Astronautica, 2019, 159: 123-135.

[23] ITU-R. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods: P.838-3[S]. 2005.

[24] Sheng M, Zhou D, Ji S J, et al. Effects of space environment on satellite mega-constellations: from nodes and links to network performance[J]. Engineering, 2025, 54: 93-102.

[25] 舒晴, 张校宁, 费泽松. 基于系统容量最大化的多星跳波束资源分配[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3 (4): 12-21.

Shu Q, Zhang X N, Fei Z S. Resource allocation of multi-satellite beam hopping technology based on system capacity maximization[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3 (4): 12-21.

[26] ITU. Space radiocommunications stations database (the 3001st edition)[DB]. 2024.

[27] Wang D S, Tan D P, Liu L. Particle swarm optimization algorithm: an overview[J]. Soft Computing, 2018, 22(2): 387-408.

[作者简介]



姬思敬 (1993-), 男, 博士, 西安电子科技大学副研究员, 主要研究方向为大规模卫星星座组网方法、多星协同通信技术等。



白卫岗 (1987-), 男, 博士, 西安电子科技大学副教授, 主要研究方向为卫星星座可靠组网、大规模星座仿真技术等。



郝斯宁 (2000-), 男, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为多星协同通信技术、跳波束通信技术等。



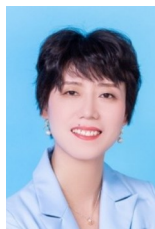
周笛 (1991-), 女, 博士, 西安电子科技大学教授, 主要研究方向为卫星网络任务规划、资源管控技术等。



曾媛 (1979-), 女, 博士, 上海航天电子通讯设备研究所研究员, 主要研究方向为大规模卫星组网关键技术、天基数据链组网技术等。



刘亮 (1986-), 男, 博士, 中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部高级工程师, 主要研究方向为卫星通信、空间网络协议等。



盛敏 (1975-), 女, 博士, 西安电子科技大学教授、空地一体化综合业务网全国重点实验室主任, 主要研究方向为空地一体化组网技术等。