

面向卫星物联网的柔性波束调度与资源分配策略研究

李福临¹, 王靖超¹, 董延杰², 王威³, 马骁¹

(1. 陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710119; 2. 深圳北理莫斯科大学人工智能研究院, 广东 深圳 518172;
3. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏 南京 211106)

摘要: 基于多波束技术的卫星通信系统能够为 5G 的海量物联网通信应用场景、海量物联网设备接入和传输、泛在通信等下一代通信愿景提供更强大的支撑。在卫星物联网 (IoT, Internet of things) 面向的海量终端应用场景中, 物联网终端的流量分布是非均匀的。进一步提高多波束卫星系统的通信资源利用效率成为重要的研究方向。多波束调度和无线资源的分配是提高系统资源利用率和公平性的关键问题。首先, 分析了波束调度和无线资源分配之间的耦合性, 随后, 提出了一种柔性波束调度和资源分配的联合优化策略。提出了分离式群优化算法 (SSO-BSA, beam scheduling algorithm based on separated swarm optimization) 来求解灵活波束指向坐标, 并设计了基于服务价值度的按需资源分配算法 (ORAA-SVD, on-demand resource allocation algorithm based on service value degree), 为波束和物联网终端提供灵活的资源分配。仿真验证了在不同流量强度下所提算法与基准算法的各项指标性能。仿真结果表明, 相比于基准算法, 所提算法在公平性和资源利用率方面有着更优的性能表现。

关键词: 卫星物联网; 多波束卫星; 柔性波束调度; 资源分配; 群优化

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00465

Flexible beam scheduling and resource allocation strategies for satellite Internet of things

LI Fulin¹, WANG Jingchao¹, DONG Yanjie², WANG Wei³, MA Xiao¹

1. School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

2. Artificial Intelligence Research Institute, Shenzhen MSU-BIT University, Shenzhen 518172, China

3. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

Abstract: Satellite communication systems based on multi-beam technology can provide strong support for massive machine type communication application scenarios of 5th generation mobile communication technology as well as for next-generation communication visions, such as access and transmission of massive Internet of things (IoT) devices and ubiquitous communication. In the satellite IoT-oriented massive terminal application scenario, the traffic distribution of IoT terminals is non-uniform. Further, improving the communication resource utilization efficiency of multi-beam satellite systems has become an important research direction. Multi-beam scheduling and wireless resource allocation are the key issues to improve the resource utilization and fairness of the system. Firstly, The coupling between beam scheduling and wireless resource allocation was analyzed. Subsequently, a joint optimization strategy for flexible beam scheduling and resource allocation was proposed. The beam scheduling algorithm based on separated swarm optimization (SSO-BSA) was

收稿日期: 2024-12-04; 修回日期: 2025-01-02

通信作者: 董延杰, ydong@smbu.edu.cn

基金项目: 陕西省重点产业创新链项目 (No. 2023-ZDLGY-15, No. 2023-ZDLGY-51, No. 2019ZDLGY09-03, No. 2020ZDLGY15-09); 陕西省自然科学基金基础研究计划-一般项目-青年项目 (No. 2023-JC-QN-0762)

Foundation Items: The Key Industry Innovation Chain Project of Shaanxi (No. 2023-ZDLGY-15, No. 2023-ZDLGY-51, No. 2019ZDLGY09-03, No. 2020ZDLGY15-09), The Natural Science Basic Research Program of Shaanxi-General Program-Youth Program (No. S2023-JC-QN-0762)

proposed to solve the flexible beam pointing coordinates, and an on-demand resource allocation algorithm based on service value degree (ORAA-SVD) was designed to provide flexible resource allocation for beams and IoT terminals. The simulation verifies the performance of the proposed algorithm and the benchmark algorithms under different traffic intensities for each metric. The simulation results show that the proposed algorithm has better performance than that of the benchmark algorithms in terms of fairness and resource utilization.

Key words: satellite IoT, multi-beam satellite, flexible beam scheduling, resource allocation, joint optimization

0 引言

随着全球信息化的快速发展,人们日常生活所涵盖的各类业务已经不断地转向移动端的互联网平台,如常见业务电子支付、在线学习、多媒体娱乐等。在过去十年间,无线通信的需求量因为上述业务形式的变化而不断激增^[1-2]。相关研究表明,在下一代5G通信对未来通信场景和需求的设想方面,卫星通信技术将发挥核心作用^[3-7]。

近几年,卫星通信在海上航运、数据协同、航空航天、军事通信等若干领域均得到了广泛的应用,基于卫星物联网的应用场景也在不断扩大,卫星物联网应用场景如图1所示。综合多方面来看,现阶段卫星通信技术的发展关键涉及以下几个方面:1)对卫星系统容量的需求急剧增长;2)对卫星载荷灵活性提出了更高的要求,如软件定义网络、在轨配置、在轨更新、柔性载荷等;3)对卫星系统的资源分配和管理提出了更高的要求,如资源动态配置等;4)对卫星网络灵活组网、网络自适应能力等方面提出了更迫切的需求。

得益于多波束技术,卫星通信朝着高通量和宽带化不断发展^[8-9]。如Ka-sat、Jupiter-1等一系列卫星基于多点波束和频率重用,显著地提高了单颗卫星的容量^[10]。

2010年之后,OneWeb、Starlink等大规模低地球轨道(LEO, low earth orbit)星座在提供更广泛的连接服务和更高的通信速率方面表现出了巨大的潜力^[11-13]。2017年,我国发射的首颗高通量多波束卫星,其容量已超过20 Gbit/s。

近期,多波束技术依然是卫星通信系统研究的热点之一,产生了许多相关研究内容。现有的工作主要从跳波束技术、资源分配、功率控制和抗干扰等几个维度对多波束卫星系统中的有关问题展开研究。

在跳波束技术方面,文献[14]研究了跳波束策略可能带来的灵活性增益。文献[15]提出了一种针对LEO卫星的多波束覆盖区划分方法和频率复用策略,重点优化波束的覆盖效率并降低干扰,从而提高资源利用效率。然而,该工作主要集中在波束的空间覆盖和频率复用上,并未涉及基于流量或用户分布的波束调度策略设计和资源分配优化。文献[16]提出了一种基于遗传算法的跳波束系统时隙分配方法,用于在波束调度过程中分配空间和时间资源。然而,该研究忽略了带宽和功率资源的灵活性。文献[17]提出了一种基于密度聚类的算法用于解决多波束的放置问题。文献[18]提出了一个集中式框架,用于优化波束放置和功率、带宽的分配。由于该框架将用户分组与波束调度拆分为两个过程,波束调度灵活性所带来的增益难以得到进一步的挖

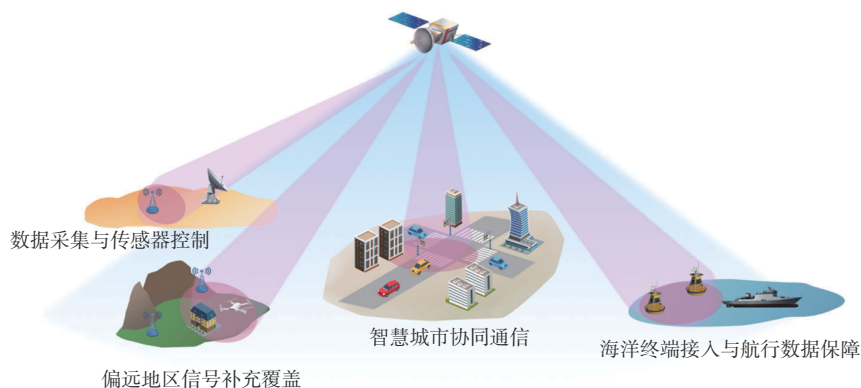


图1 卫星物联网应用场景

掘，并且该项研究仅针对功率最小化问题进行了求解，而忽略了对公平性和带宽资源利用率的优化。

在研究不利的大气条件对多波束卫星通信系统性能的影响方面，文献[19]研究了毫米波混合卫星-地面中继网络在雨衰减条件下的性能，提出了一种动态的多维雨衰减模型，考虑了雨衰减随时间变化的特性，并推导了新的中断概率表达式，为克服不利大气条件对卫星通信系统性能的影响提供了有效的分析方法。

在功率控制方面，迭代算法和两步二次变换法在解决能效最大化问题方面具有良好的表现^[20-21]。文献[22]证明了资源分配优化问题为非确定性多项式难 (NP-Hard, non-deterministic polynomial hard) 问题，从吞吐量最大化的角度考虑，提出了两阶段优化方案，并在第一阶段采用了元启发式技术。类似地，还有部分研究同样将资源分配问题分解为两阶段优化问题进行求解^[23-25]。

在抗干扰方面，通常使用动态波束关闭算法 (DBSO, dynamic beam shut off algorithm)^[26]，文献[27]针对低地球轨道多波束卫星星座网络中存在的波束间干扰问题展开了研究，提出了一种启发式动态波束关闭算法来实现快速收敛的次优解，以避免波束间干扰并节省机载功率。文献[28]提出了一种基于多领域资源的干扰管理方法，通过联合波束域和功率域资源调度有效地减少了共频干扰，优化了卫星-地面一体化网络的性能。然而，该方法未深入探讨如何动态地调整波束调度。

上述研究大多针对单一的维度展开和优化，对于波束调度和资源分配的联合优化研究则有所欠缺。事实上，波束调度和资源分配之间存在一定的耦合性，波束调度策略很大程度上会影响系统资源分配的可行性和性能上限。

值得注意的是，在最新的一些研究中，研究人员开始关注一些新的资源维度并展开相关研究，如波束小区的时隙分配^[29]。与此同时，越来越多的研究开始重视资源的联合优化，例如，文献[30]尝试通过优化多波束卫星的波束宽度、发射功率和子载波分配来兼顾数据传输的速率和波束对用户的覆盖率。遗憾的是，该研究设定的多个波束的中心位置均是固定的，只通过调整波束宽度来改善覆盖率，这使得该研究对于波束调度任务的探索非常有限。

同时，文献[31]的工作也关注了波束调度和资源分配之间的关系，并提出了一种联合优化算法。然而，该研究将波束与用户之间的服务关系简化为了波束与固定的若干小区之间的服务关系，在一定程度上模糊了用户位置的动态性，也损失了一部分波束调度的灵活性，使得波束只能在预先设计好的小区中进行跳变，而不是完全灵活的。同时，该研究将用户的业务归类至小区，即小区之间存在业务的不均衡性，这也是对用户业务动态变化的一种简化表述，在一定程度上简化了问题。

考虑现有研究仍然存在一些不充分之处，本文针对多波束卫星的波束调度和资源分配问题展开了更为细致的研究。相比于现有的一些研究，本文将在波束调度的灵活性方面展开更深入的探索，以进一步挖掘多波束系统的服务潜力。同时，更加全面地考虑用户位置分布和业务的动态性、非均匀性，针对用户级的需求展开资源分配的研究。

本文所研究的多波束卫星系统下的波束调度和资源分配联合优化问题面临着如下两方面的挑战。

- 1) 传统固定波束式的波束指向策略难以灵活适应用户终端节点的灵活分布和非均匀的流量需求。
- 2) 资源利用率和公平性之间的挑战。向热点地区倾斜系统的通信资源有助于提高资源的利用率，但可能因此忽略掉边缘终端和非热点地区的终端。系统需要在利用率和公平性方面做出一些平衡。

面对上述挑战，本文的贡献如下。

- 1) 系统地描述了多波束物联网卫星系统下多物联网终端的资源分配和卫星波束调度的问题模型，考虑系统的带宽和功率约束，通过引入服务价值度预定义函数来平衡系统对物联网终端业务量和服务等待时延这两个关键业务因素的考量，并建模求解最大化系统总服务价值的优化问题。
- 2) 设计柔性波束调度策略，通过灵活用户分组结合非固定式的用户组与波束映射关系，更好地适应非均匀的流量变化和灵活的物联网终端节点分布。同时，提出分离式群优化算法来求解系统中的波束指向坐标。
- 3) 提出基于服务价值度的两阶段灵活资源分配策略，分别解决了波束级的带宽和功率分配以及每个波束内的物联网终端级的带宽和功率分配。

仿真结果显示,与基准算法对比,本文所提算法能够保证更高的业务满足率和吞吐量,且服务等待时延低于基准算法。与此同时,本文所提算法在公平性和系统容量利用率方面也有着显著的优势。

1 系统场景分析与问题建模

1.1 网络场景分析

主要符号描述见表1。在本文中,考虑一个由多波束低地球轨道(MBLEO, multi-beam low earth orbit)卫星和多个地面终端(GUE, ground user equipment)组成的卫星通信系统,系统模型如图2所示。其中,MBLEO卫星配备了一对宽波束收发器和 W 对窄波束收发器,因此MBLEO卫星能够使用这些波束来为地面用户提供接入和数据传输服务。宽波束用于承载必要的信令,业务传输服务由窄波束提供。不失一般性地,假设窄波束的覆盖半径是一个固定的常数,且窄波束具有相同的覆盖半径。在该系统中,窄波束可用的总带宽被划分为 F 个子信道。记窄波束可用的总带宽为 B_{tot} ,地面终端个数为 N ,本文用 GUE_n 表示第 n 个 GUE。 (x_n, y_n, z_n) 为系统中 GUE_n 的三维坐标, (x_s, y_s, z_s) 为系统中 MBLEO 卫星节点的三维坐标。

1.2 信道分析

MBLEO 卫星到 GUE 的通信链路的信道特性通常是随时间变化的,为使问题便于考虑,本文将系统时隙化,并假设信道特性在每个时隙内保持不变。令 $h_{w,n}^t$ 表示时隙 t 时, GUE_n 和卫星波束 w 的通信链路的信道增益,其表达式为

$$h_{w,n}^t = G_w^T(\theta) \cdot G_n^R(\theta) \cdot L_{w,n} \quad (1)$$

其中, G_w^T 为卫星波束 w 的发射天线增益, G_n^R 为 GUE_n 的接收天线增益, θ 表示指向卫星星下点的角度。 $L_{w,n}$ 表示卫星波束 w 到 GUE_n 的通信链路的自由空间损耗,可表示为

$$L_{w,n} = \left(\frac{c}{4\pi d_{s,n}^t \zeta_f} \right)^2 \quad (2)$$

其中, c 表示光速, ζ_f 为子信道的载波频率, $d_{s,n}^t$ 是时隙 t 时,卫星与 GUE_n 的欧氏距离。本文基于下面的显示径向对称方程^[32]来描述天线增益

$$G_w^T(\theta) = G_w^T(0^\circ) \left[\frac{2J_1\left(\pi \frac{D_s}{\lambda} \sin \theta\right)}{\pi \frac{D_s}{\lambda} \sin \theta} \right]^2 \quad (3)$$

表 1 主要符号描述

符号	描述
W	窄波束收发器数量
F	子信道数量
B_{tot}	窄波束可用的总带宽
N	地面终端(GUE)数量
GUE_n	表示第 n 个 GUE
(x_n, y_n, z_n)	第 n 个 GUE 的三维坐标
(x_s, y_s, z_s)	卫星的三维坐标
$h_{w,n}^t$	时隙 t 时,第 n 个 GUE 与波束 w 的信道增益
G_w^T	卫星波束 w 的发射天线增益
G_n^R	第 n 个 GUE 的接收天线增益
θ	天线指向卫星星下点的角度
$L_{w,n}$	第 n 个 GUE 与波束 w 的自由空间损耗
ζ_f	子信道的载波频率
$d_{s,n}^t$	时隙 t 时,第 n 个 GUE 与卫星的欧氏距离
D_s	卫星天线的直径
D_n	第 n 个 GUE 的天线的直径
$\gamma_{w,n}^t$	时隙 t 时,第 n 个 GUE 与波束 w 的信道的信干噪比
$p_{w,n}^t$	时隙 t 时,第 n 个 GUE 在波束 w 下的功率
$b_{w,n}^t$	时隙 t 时,第 n 个 GUE 在波束 w 下的带宽
$I_{w,i}$	波束 i 对波束 w 的干扰信号功率
$\lambda_{w,i}$	波束 i 与波束 w 的频率重叠因子
R_n^t	时隙 t 时,第 n 个 GUE 传输的可达数据速率
M	GUE 组的数量
U	GUE 组的集合
S_w^t	时隙 t 时,波束 w 的调度状态
Γ	波束调度状态矩阵
m_n	第 n 个 GUE 所属的 GUE 组的组号(索引号)
$\sigma_{n,w}^t$	第 n 个 GUE 的服务状态变量
P	功率分配矩阵
B	信道带宽分配矩阵
$D_{n,i}^{\text{req}}$	第 n 个 GUE 的第 i 个业务包请求的业务量大小
$T_{n,i}^{\text{max}}$	第 n 个 GUE 的第 i 个业务包容忍的最大等待时延
$\alpha_{n,i}$	第 n 个 GUE 的第 i 个业务包是否得到服务的标识符
U_n	第 n 个 GUE 的服务价值度

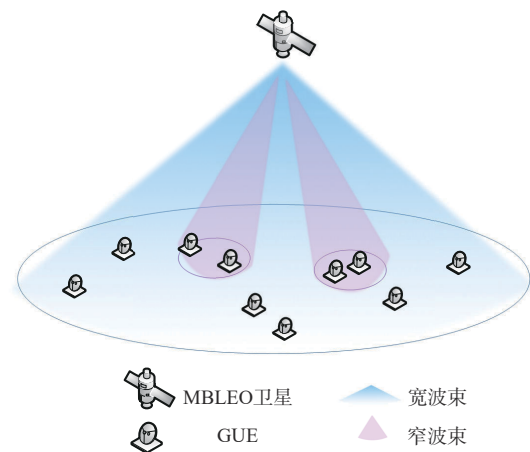


图 2 系统模型

$$G_n^R(\theta) = G_n^R(0^\circ) \left[\frac{2J_1\left(\pi \frac{D_n}{\lambda} \sin \theta\right)}{\pi \frac{D_n}{\lambda} \sin \theta} \right]^2 \quad (4)$$

其中, D_s 是卫星天线的直径, D_n 是 GUE $_n$ 的天线直径, J_1 是第一类一阶贝塞尔函数, $G_n^T(0^\circ)$ 和 $G_n^R(0^\circ)$ 分别对应 GUE $_n$ 和卫星天线增益的峰值。GUE $_n$ 的信噪比^[33]可表示为

$$\gamma_{w,n}^t = \frac{h_{w,n}^t \cdot p_{w,n}^t}{N_0 \cdot b_{w,n}^t + \sum_{i \neq w} I_{w,i}^t} \quad (5)$$

其中, N_0 为噪声功率谱密度, $p_{w,n}^t$ 和 $b_{w,n}^t$ 分别为时隙 t 被波束 w 服务的 GUE $_n$ 的功率和带宽。 $I_{w,i}^t$ 是波束 i 对波束 w 的干扰信号功率, 表示为

$$I_{w,i}^t = \lambda_{w,i} \cdot h_{w,i}^t(\theta) \cdot P_i \quad (6)$$

$h_{w,i}^t(\theta)$ 和波束 w 与波束 i 之间的夹角 θ 有关。 $\lambda_{w,i}$ 表示频率重叠因子, 由式(7)确定

$$\lambda_{w,i} = \frac{B_w \cap B_i}{B_w} \quad (7)$$

对于全频率重用, $\lambda_{w,i} = 1$ 。对于 GUE $_n$, 本文使用 R_n^t 表示其在时隙 t 时传输的可达数据速率, 具体表示为

$$R_n^t = b_{w,n}^t \text{lb}(1 + \gamma_{w,n}^t) \quad (8)$$

1.3 问题建模

本文考虑一个下行业务传输过程中的波束调度和资源分配问题。窄波束通常能够覆盖若干个 GUE, 不失一般性, 本文采用 GUE 组的概念来描述被同一波束 w 服务的 GUE 的集合。定义集合 $\mathcal{U} = \mathcal{U}_1 \cup \mathcal{U}_2 \cup \dots \cup \mathcal{U}_M$ 表示所有 GUE 组的集合, 其中, M 表示 GUE 组的数量。

GUE 的地理位置分布具有动态性和非均匀性, 使得 GUE 分组的数量通常远大于卫星所配备的窄波束收发器数量, $M \gg W$, 这意味着卫星有限的波束收发器无法在任意时隙都服务到所有 GUE 组。为了便于描述波束系统运行过程中的调度状态, 定义波束调度状态矩阵为

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} S_1^1 & S_1^2 & \dots & S_1^t \\ S_2^1 & S_2^2 & \dots & S_2^t \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ S_W^1 & S_W^2 & \dots & S_W^t \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, S_w^t 表示在时隙 t 时波束 w 的调度状态, 取值为 GUE 组的索引号, 即 $1 \leq S_w^t \leq M$ 。

波束调度状态矩阵 $\mathbf{\Gamma}$ 直观地描述了任意波束 w

在给定时隙 t 服务的 GUE 组, 而 GUE 组和 GUE 的关系又可由 GUE $_n$ 在集合 \mathcal{U} 中所属的子集合来确定。因此, 为了更精确地描述波束和 GUE $_n$ 之间的服务映射关系, 定义函数 $\mathcal{F}_n(m)$ 为

$$\mathcal{F}_n(m) = \begin{cases} 1, & \text{GUE}_n \in \mathcal{U}_m \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

定义 GUE 所属 GUE 组号 m_n 和 GUE 的服务状态变量 $\sigma_{n,w}^t$ 分别为

$$m_n = \arg \max \mathcal{F}_n(m) \quad (11)$$

$$\sigma_{w,t}^n = 1_{\{\mathbf{\Gamma}(w,t) = m_n\}} \quad (12)$$

式(11)可求得 GUE $_n$ 所属的 GUE 组索引号。式(12)表明, 当 $\mathbf{\Gamma}$ 中按照 w 行 t 列索引得到的元素值等于 GUE $_n$ 所属的 GUE 组 \mathcal{U}_{m_n} 索引号 m_n 时, GUE $_n$ 在时隙 t 被波束 w 服务。

本文假设一个 GUE 只能归属于一个 GUE 组, 因此存在如下约束:

$$\text{C1: } \sum_{m=1}^M \mathcal{F}_n(m) = 1 \quad (13)$$

除了波束调度外, 还需要考虑如何为 GUE 分配带宽和功率资源。记 \mathbf{P} 和 \mathbf{B} 分别为功率分配矩阵和信道带宽分配矩阵, 具体表示和计算在第 2.3 节详细介绍。

本文将 GUE 的业务包建模为一个三元组如下:

$$\text{Pack}_{n,i} = \langle D_{n,i}^{\text{req}}, T_{n,i}^{\text{max}}, T_{n,i}^t \rangle \quad (14)$$

其中, $\text{Pack}_{n,i}$ 表示 GUE $_n$ 的第 i 个业务包; $D_{n,i}^{\text{req}}$ 表示 GUE $_n$ 在该业务包中所请求的业务量, 即包的数据量大小; $T_{n,i}^{\text{max}}$ 表示该业务包所能容忍的最大服务等待时延; $T_{n,i}^t$ 表示在当前时隙 t 时, 该业务包所剩余的容忍时延。相比于传统的优先级标签, $T_{n,i}^{\text{max}}$ 能够提供更精确的业务时延敏感度描述。而 $T_{n,i}^t$ 则会随着业务包在队列中的等待而逐渐递减。本文假设, 若 $T_{n,i}^t$ 递减至 0 时仍未得到服务, 则该业务包应该被丢弃。通过比较 $T_{n,i}^t$ 和 $T_{n,i}^{\text{max}}$ 之间的差距, 能够进一步判断业务包对服务需求的紧迫度。

本文引入服务价值度作为预定义的度量, 用于评估每一个 GUE 被卫星服务所带来的增益。GUE $_n$ 的服务价值度 U_n 在文中被建模为 GUE $_n$ 请求的业务量和业务包服务需求紧迫度的乘积, 如下:

$$U_n = \sum_i \left(\frac{T_{n,i}^{\text{max}} - T_{n,i}^t + \varepsilon}{T_{n,i}^{\text{max}}} \cdot D_{n,i}^{\text{req}} \cdot \alpha_{n,i} \right) \quad (15)$$

其中, 第一项用于衡量业务包对服务需求的紧迫度, ε 作为调整量, 用于避免第一项为零, 一般取

一个较小的正数即可，如本文设置 $\varepsilon = 1$ ；后一项 $\alpha_{n,i}$ 作为服务有效性标识符，表示 GUE_n 的第 i 个请求的业务包是否成功得到卫星的服务。得到服务时， $\alpha_{n,i} = 1$ ，否则， $\alpha_{n,i} = 0$ 。

本文将系统的效用函数定义为所有 GUE_n 的服务价值度之和，如下：

$$U = \sum_{n=1}^N U_n \quad (16)$$

在约束条件下，以最大化系统效用函数为目标，本节将 MBLEO 卫星系统的波束调度和资源分配问题建模为一个有约束的优化问题，表示为式(17)。

$$\begin{aligned} & \max_{B, P, F} U \\ \text{s.t.} \quad & \text{C1: } \sum_{m=1}^M \mathcal{F}_n(m) = 1 \\ & \text{C2: } \sum_{f=1}^F \varphi_f^w \leq F, \forall t \\ & \text{C3: } \gamma_{w,n} > \gamma^*, \forall w, n \\ & \text{C4: } \sum_{\text{GUE}_n \in U_m} p_{w,n}^t \leq P_{\max}, \forall \Gamma(t, w) = m \\ & \text{C5: } \sum_{w=1}^W \sum_{\text{GUE}_n \in U_m} P_{w,n}^t \leq P_{\text{tot}}, \forall \Gamma(t, w) = m \end{aligned} \quad (17)$$

其中，约束条件 C2 表示在任意时隙，单个波束 w 所占用的子信道数不应超过子信道总数。C3 表示对于任意 GUE_n，保证其满足服务条件的最小信干噪比，其中， γ^* 表示满足服务条件的最小信干噪比。本文考虑单波束功率约束和卫星总可用功率的约束，约束条件如式(17)中 C4 和 C5 所示。

考虑该问题包含了波束调度和资源分配的联合优化，这两方面的耦合性，使得原问题难以方便地求解，因此，本文采用一种两阶段优化框架，将原优化问题拆分为面向 GUE 组的波束调度和资源分配问题以及面向 GUE 组内 GUE 节点的资源分配问题。

2 波束调度与资源分配策略

2.1 波束调度任务决策框架

本文将 MBLEO 卫星系统中的波束调度过程理解为一个决策行为，该过程涉及两个部分，分别是决策信息获取和决策动作执行。

两阶段波束调度决策算法框架如图 3 所示。决策信息获取阶段如图 3(a)所示，卫星首先需要获取决策信息，包含如下步骤。

1) 下行业务获取：对于已经通过宽波束接入系统并保持信令连接的 GUE，其下行业务可通过当前落地卫星（覆盖该 GUE 所在区域的卫星）自身产生，或通过相邻卫星的星间链路以及地面站与当前落地卫星的链路传输至当前落地卫星。

2) 生成业务分布图案：落地卫星获取其覆盖范围内各个 GUE 的下行业务包，解析业务量 $D_{n,i}^{\text{req}}$ 、最大服务等待时延容忍度 $T_{n,i}^{\text{max}}$ 和 GUE 坐标等关键参数后将业务包存入缓存队列。基于解析得到的关键参数，生成当前时隙的业务分布图案。

通过上述步骤，卫星能够获取当前网络中 GUE 的业务请求情况。波束调度优化算法执行阶段如图 3(b)所示，主要包含如下步骤。

1) 基于业务分布图案求解最优波束指向：在每一次求解最优波束指向的过程中，通过基于服务价值度 U_n 的计算，能够获取当前波束指向预期可能获得的累计服务价值度，并据此筛选出最符合调度目标的若干个波束指向坐标作为本次决策的结果。

2) 更新 GUE 分组方案 U^{t+1} ：与此同时，根据波束服务半径与 GUE 坐标 (x_n, y_n, z_n) 之间的关系，得到当前波束指向方案下所能服务的 GUE，并根据 GUE 与各波束指向坐标的距离最小化原则，生成下一时隙所使用的新的 GUE 分组方案 U^{t+1} 。

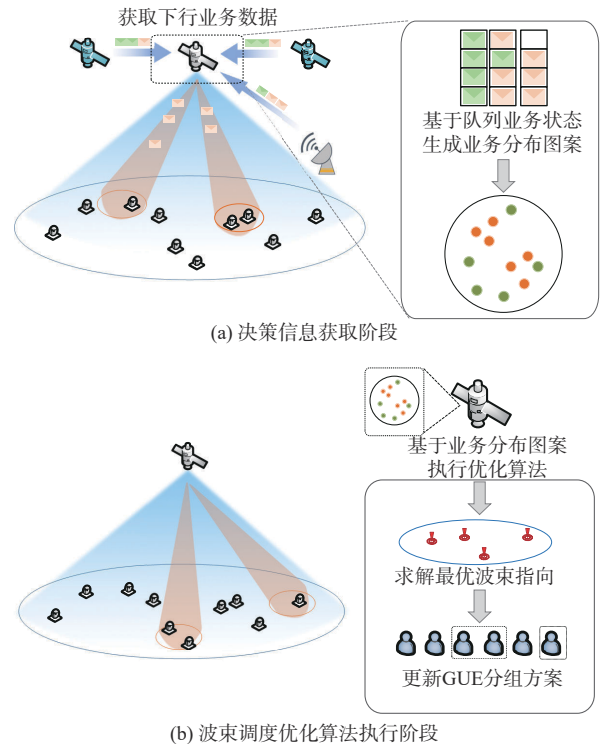


图 3 两阶段波束调度决策算法框架

2.2 分离式群优化波束调度算法

面向非均匀分布的用户的波束调度问题具有较高的复杂度，尤其是在不预先设计固定的波位小区，而是完全灵活的调度方案。在该问题中，卫星的宽波束覆盖范围就是所有窄波束调度的解空间，灵活波束调度的目标是在解空间中找出 W 个能够使系统总的效用函数值最大化的解，即窄波束的指向（本文以坐标形式表示）。考虑群优化算法在类似的搜索求解问题中表现出的良好性能^[34]，本文提出基于分离式群优化的波束调度算法（SSO-BSA, beam scheduling algorithm based on separated swarm optimization）。群优化的思想是指在集体层面的一种分散式的、去中心化的自组织活动。其核心思想是每个智慧个体通过独立探索与相互协作的机制形成更有效且强大的群体来解决复杂的问题。

传统的群优化方法是在解空间中寻找一个最优或近似优的解从而满足求解目标。考虑本文场景中需要对多个目标进行调度，直接使用传统的群优化算法，如粒子群优化，容易导致多个可行解的相似性过高。从实际结果来说，这可能直接导致多个波束指向集中在相近的区域，服务的是几乎相同的 GUE 群体。在这样的波束调度策略下，后续的资源分配过程将十分受限，容易出现资源过剩的情况。

因此，本文设计了 SSO-BSA。该算法是在烟花算法的基础上为了适应多波束调度问题的场景而演进出的一种求解算法。算法具体步骤如下。

1) 确定求解目标数 W ，即待优化的波束指向数量。

2) 初始化爆炸点：在解空间中确定 m 个初始爆炸点作为第一轮烟花的爆炸中心。为了提高算法收敛的速度，本文从 GUE 集合中随机选取 m 个 GUE 的坐标作为初始爆炸点。

3) 确定爆炸参数：在初始化爆炸点后，需要进一步确定爆炸参数，爆炸参数包括爆炸的半径、火花个数和火花生成方式。火花生成方式的本质是一种随机分布，本文采用高斯分布来生成火花。

4) 执行爆炸：完成步骤 2) 和步骤 3) 后，能够得到爆炸中心和有关参数。执行爆炸时，以爆炸中心为圆心，再根据火花生成方式在指定爆炸半径范围内生成指定数目的火花。

5) 评估爆炸结果：对每一个火花 i ，以该火花

所对应的坐标作为一个解，进行评估。评估过程以可行解为假设的波束指向，并计算该波束指向所能服务的覆盖范围内所有 GUE 的累计服务价值度 U^i 。完成对每一个火花的评估后，对评估结果进行记录。

6) 判断是否达到搜索停止条件：搜索停止条件通常有以下 3 种：达到预定的最大搜索次数 Q ；得到 1 个及以上的解满足期望阈值 E ；连续 j 次搜索得到的最优解，其评估结果之间的差距小于阈值 T 。上述条件可以复合使用。例如，当第 1 个条件满足时，停止搜索；当第 2 个条件或第 3 个条件其中一个满足时，提前停止搜索，以提高算法的效率。停止搜索时，以记录的最优结果作为最优解输出。值得注意的是，第 2 个条件的期望阈值 E 是一个经验值，本文仅使用第 1 个条件和第 3 个条件作为算法的停止条件。

7) 更新下一轮爆炸点：若步骤 6) 判断后未停止搜索，则需要更新下一轮的爆炸点。选取当前爆炸中评估结果最优的 m 个火花的坐标作为新的爆炸点，同时，为了让搜索尽可能不陷入局部最优，也会从表现不佳的火花中选取一部分作为下一轮的爆炸点。

8) 更新爆炸参数：对于评估结果较好的爆炸点，可以配置更小的爆炸半径和更少的爆炸火花个数，以减小计算次数。对于评估结果较差但依旧被选为下一轮爆炸点的火花，可以配置稍大一些的爆炸半径和相对较多的火花个数，尝试探索新的求解方向。

9) 循环执行爆炸搜索：重复执行步骤 4) 至步骤 8)，直至搜索停止，输出一个可行解。

10) 更新波束和 GUE 映射关系：以得到的可行解作为预期的波束指向坐标，并结合窄波束服务半径与 GUE 坐标 (x_n, y_n, z_n) 之间的关系，遍历 GUE 从而得到该波束指向所能服务的 GUE 组 U_m 。

11) 分离可行解：将 U_m 包含的 GUE 及其业务从业务分布图案中移除。

12) 重复步骤 2) 至步骤 11)，直至获得 W 个可行解，算法流程结束。

分离式群优化波束调度算法如算法 1 所示。

算法 1 分离式群优化波束调度算法

输入 业务分布图案，GUE 位置 (x_n, y_n, z_n) ，待优化指向的窄波束数量 W

输出 优化后的 W 个窄波束指向坐标, 下一时隙的 GUE 分组结果 U^{t+1} , 波束调度状态矩阵 Γ

初始化 最大搜索次数 Q , 阈值 T , 连续得到近似解次数 j , 初始爆炸参数, 历史最优服务价值度 U_h^{best} , 当前最优服务价值度 U_p^{best}

for $w = 1:W$ do

for $i = 1:Q$ do

执行爆炸搜索, 生成 K_i 个火花;

for $l = 1:K_i$ do

评估火花的服务价值度 U^i ;

end for

更新 U_p^{best} , U_h^{best} ;

if $|U_p^{\text{best}} - U_h^{\text{best}}| \leq T$ do

$j = j - 1$;

end if

if $j = 0$ do

break

end if

更新下一轮爆炸参数;

end for

保存一个可行解和对应的 GUE 组 U_w ;

更新业务分布图案, 从图案中移除 U_w ;

end for

整理 W 个波束对应服务的 GUE 组 U^{t+1} ;

输出

2.3 基于服务价值度的按需资源分配算法

如前文所述, 本文采用服务价值度作为定义的度量函数, 并引入最大服务等待时延 $T_{n,i}^{\text{max}}$ 代替传统的业务优先级标签, 从而进一步细化对业务时延敏感度的描述。

本文在两步策略的优化框架下提出基于服务价值度的按需资源分配算法 (ORAA-SVD, on-demand resource allocation algorithm based on service value degree), 步骤如下。

1) 波束级资源分配: 通过算法 1, 可以得到 W 个窄波束的指向坐标、下一时隙的 GUE 分组策略 U^{t+1} 和波束调度状态矩阵 Γ 。通过波束调度状态矩阵 Γ 能够得到波束与各 GUE 组的映射关系, 从而统计出每个波束所服务的 GUE 组的累计服务价值度。基于各波束的累计服务价值度 U^w , 可以得到各波束的服务价值度权重 α_w 为

$$\alpha_w = \frac{U^w}{\sum_{i=1}^W U^i} \quad (18)$$

波束级带宽和功率资源分配分别基于 α_w 进行计算, 如下:

$$B_w = \lfloor \alpha_w \cdot F \rfloor \cdot B_f \quad (19)$$

$$P_w = \begin{cases} P_{\text{max}}, & \alpha_w \cdot P_{\text{tot}} > P_{\text{max}} \\ \alpha_w \cdot P_{\text{tot}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

式(19)中, $B_f = B_{\text{tot}}/F$ 。该式确保了波束之间以子信道为单位进行带宽资源分配。式(20)确保了在满足式(17)中约束 C4 的前提下计算波束级功率。

2) 终端级资源分配: 基于步骤 1), 能够得到波束级的带宽分配结果 $\mathbf{B} = [B_1, B_2, \dots, B_W]$ 和功率资源分配结果 $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_W]$ 。每个波束独立进行波束所映射的 GUE 组内的终端级资源分配。基于式(15)计算各 GUE 的服务价值度, 并根据式(21)得到各 GUE 的服务价值度权重 β_n 。

$$\beta_n = \frac{U_n}{\sum_{\text{GUE}_i \in U_n} U_i} \quad (21)$$

根据式(22)能够得到 GUE 级的带宽和资源分配。

$$b_{w,n} = \lfloor \beta_n \cdot Z_w \rfloor \cdot b_w \quad (22)$$

$$p_{w,n} = \beta_n \cdot P_w \quad (23)$$

式(22)中, Z_w 表示波束 w 所承载的子载波数量, 为简化计算, 本文假设每个子载波的带宽资源 $b_w = B_w/Z_w$ 。

基于服务价值度的按需资源分配算法如算法 2 所示。

算法 2 基于服务价值度的按需资源分配算法

输入 下一时隙的 GUE 分组结果 U^{t+1} , 波束调度状态矩阵 Γ , 总带宽 B_{tot} , 总功率 P_{tot}

输出 波束级带宽分配矩阵 \mathbf{B} , 波束级功率分配矩阵 \mathbf{P} , GUE 级带宽分配矩阵 \mathbf{b} , GUE 级功率分配矩阵 \mathbf{p}

for $w = 1:W$ do

计算波束 w 所服务的 GUE 组的累计服务价值度 U^w ;

end for

计算所有波束累计的总服务价值度 U ;

for $w = 1:W$ do

根据式(18)计算 α_w ;

根据式(19)计算 B_w ;

根据式(20)计算 P_w ;

```

for  $n = 1:N$  do
  if  $GUE_n \in \mathcal{U}_{R(w,r+1)}$  do
    根据式(15)计算预期的  $U_n$ ;
    根据式(21)和  $U^w$  计算  $\beta_n$ ;
    根据式(22)计算  $b_{w,n}$ ;
  end if
end for
end for
输出

```

2.4 算法复杂性分析

考虑算法应具备良好的可行性和工程应用价值，因此，对所提算法进行时间复杂度分析。

对于提出的分离式群优化波束调度算法（算法1），烟花算法是主要的优化求解方法。烟花算法的复杂度主要与其迭代次数和每次迭代中对解空间的搜索复杂度有关。

具体来说，在每次迭代中，烟花算法需要对爆炸产生的每个火花进行服务价值度评估，并根据条件判断是否更新历史最优值或当前最优值。更新过程只涉及简单的计算，而评估过程相对复杂。针对每个火花，需要依次比对每个GUE与该火花对应的波束指向坐标的距离，以此判断GUE是否能够被波束覆盖，从而计算服务价值度。这意味着评估过程的时间复杂度与GUE的数量有关，因此，可表示为 $O(N)$ 。每次迭代的时间复杂度可以近似为 $O(K \cdot N)$ ，其中， K 表示火花的个数。进而，能够得到烟花算法整体的时间复杂度，表示为 $O(Q \cdot K \cdot N)$ ，其中， Q 是最大搜索次数。

对于算法1，波束指向优化的过程是根据波束遍历进行的，每次烟花算法的结果只保留一个最优值作为一个波束指向，因此遍历 W 个波束指向的复杂度为 $O(W \cdot Q \cdot K \cdot N)$ 。在烟花算法执行结束后，得到一个波束指向，并更新业务分布图案。更新的过程涉及将波束覆盖范围内的GUE及其业务逐一移除的操作。显然，该过程最坏情况下的复杂度不会超过移除所用GUE的复杂度。由于移除操作本身的计算简单，因此该过程的复杂度可近似与GUE数量线性相关，表示为 $O(N)$ 。

对于 W 个波束，更新业务分布图案的总复杂度表示为 $O(W \cdot N)$ ，由于该项相对于遍历求解 W 个波束指向的复杂度为次要项，将其在最终的时间复杂度表示中省略，因此，算法1最终的平均时间复杂

度可表示为

$$O_1 = O(Q \cdot K \cdot W \cdot N) \quad (24)$$

式(24)表明，算法1的时间复杂度与GUE数量 N 、窄波束数量 W 、爆炸产生的火花数量 K 和爆炸搜索的最大搜索次数 Q 有关。由于算法1的时间复杂度属于多项式时间复杂度，因此，具备实际应用和可行性。需要注意的是，算法1存在规模效应，当系统中GUE的数量显著增加时，需要合理地调整最大搜索次数 Q 和火花数量 K ，以避免算法的运行时间随着GUE数量的增加呈指数级增长。

对于提出的基于服务价值度的按需资源分配算法（算法2），在第一步的波束级资源分配过程中，需要分别遍历每个波束覆盖下的GUE以统计波束的总服务价值度 U 。一般地，在本文所考虑的场景中，由于GUE数量远大于窄波束数量，且GUE分布不均匀，波束无法覆盖到全部的GUE。因此，最坏情况下的时间复杂度不会超过遍历所有GUE进行服务价值度计算的复杂度，即 $O(N)$ 。

在用户级的资源分配过程中，同样需要遍历每个波束覆盖的GUE，并根据GUE的服务价值度在该波束覆盖的所有GUE（GUE组）中的占比来进行按需资源分配。考虑分配资源的操作本质上是简单的计算，因此，该部分的时间复杂度主要与遍历操作有关，同样可以近似为 $O(N)$ 。

考虑两步策略的优化框架下，波束级资源分配和GUE级资源分配是先后进行的，因此，算法2整体的时间复杂度为

$$O_2 = O(N) \quad (25)$$

式(25)表明，算法2的时间复杂度只与GUE数量 N 线性相关，这使得算法2即使在大规模场景中依然能保证较高的执行效率，具有较好的可行性。

3 仿真分析

本节通过软件仿真验证所提算法的性能，并将其与基准算法进行比较。

仿真采用的算法说明见表2。其中，标签为BW-POW-FS-SSO是本文所提的柔性波束调度联合带宽功率按需分配算法。为了进行基准测试，分别引入了3种基准算法。标签包含RS的算法均为刚性波束调度设计，通过预先定义波束小区的方式将GUE进行固定分组并通过轮询访问的方式进行波束调度。

表2 仿真采用的算法说明

算法	标签	功率	带宽	波束调度
刚性波束调度的功率灵活分配策略	POW-RS	灵活	固定	刚性调度
刚性波束调度的带宽灵活分配策略	BW-RS	固定	灵活	刚性调度
刚性波束调度的联合带宽和功率分配策略	BW-POW-RS	灵活	灵活	刚性调度
柔性波束调度联合带宽功率按需分配算法	BW-POW-FS-SSO	灵活	灵活	柔性调度

3.1 仿真设置

系统仿真参数见表3，其中，热点地区GUE比例表示在仿真场景中，属于热点地区的GUE数量占场景中总GUE数量的比例。热点地区/宽波束半径比值描述的是所生成的热点地区（仿真中默认为圆形区域）半径与卫星宽波束覆盖半径的比值，一般而言，该比值越小，热点地区的GUE越集中，反之则越分散。

GUE的业务数据包个数基于泊松模型产生，单业务包数据量在1 kbit至5 kbit之间，泊松模型的强度值 λ 作为系统的流量强度，用于表示每个时隙内，单个用户产生的平均业务包个数。

3.2 指标描述

为更精确地分析和比较所提算法与基准算法的性能，分别引入了业务包级和数据量级两个维度的指标。从数据量的维度来评估，本文引入业务满足率（BSR, business satisfaction rate），定义为

$$BSR = \frac{D_s}{D_{tot}} \quad (26)$$

其中， D_s 表示已得到服务的数据量（bit）， D_{tot} 表示系统中所有GUE产生的总数据量。通过BSR能够反映系统整体的业务服务程度。

同时，本文通过系统容量利用率 μ 来衡量各个算法对系统资源的使用情况，系统容量利用率定义为

$$\mu = \frac{R_{tot}}{C_{tot}} \quad (27)$$

其中， R_{tot} 和 C_{tot} 分别表示系统中所有GUE的实际吞吐量和系统提供的可用吞吐量。

此外，本文引入包服务成功率（PSSR, package service success rate）来描述算法在业务包维度的表现，定义为

$$PSSR = \frac{N_{pack}^s}{N_{pack}^{tot}} \quad (28)$$

其中， N_{pack}^s 表示成功被服务的业务包个数， N_{pack}^{tot} 表示系统总业务包个数。

本文使用Jain's公平性因子来评估算法的公平性，定义为

$$JainIndex = \frac{\left(\sum x_i\right)^2}{N \cdot \sum x_i^2} \quad (29)$$

其中， N 表示GUE数量， x_i 使用GUE级的业务满足率指标，其计算方式与系统级的BSR相似，用于衡量GUE自身被服务的数据量占自身产生的数据总量的比重。

3.3 性能分析

仿真过程中的波束调度情况可基于波束的覆盖状态图进行观察。本节仿真中，只有本文所提的算法是基于柔性波束调度的算法，柔性波束调度的波束覆盖状态如图4所示。

表3 系统仿真参数

参数	值	参数	值
卫星轨道高度	500 km	噪声功率谱密度	1.0×10^{-16} W/Hz
系统频带宽度	1 GHz	信干噪比门限	10 dB
子信道数量	100	载波频率	20 GHz
窄波束数量	6	卫星天线直径	2 m
单波束最大功率	10 W	GUE天线直径	0.45 m
窄/宽波束半径比	1/4	卫星天线峰值增益	52 dBi
地面终端(GUE)数量	200	GUE天线峰值增益	40 dBi
热点地区GUE比例	0.7	热点地区/宽波束半径比值	0.2
热点地区数量	4	单业务包数据量范围	1~5 kbit
服务等待时延容忍度下限	10 ms	服务等待时延容忍度上限	20 ms

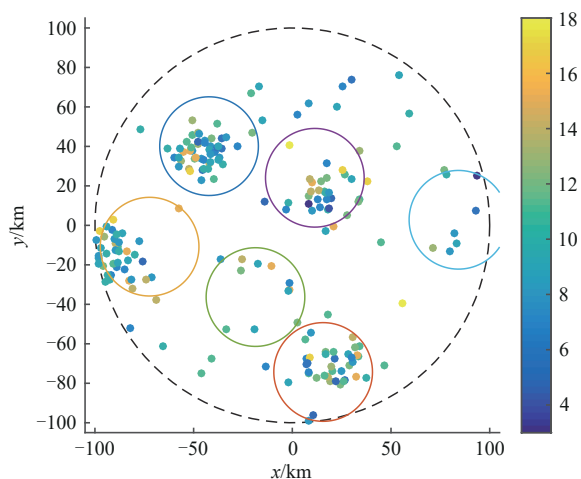


图4 柔性波束调度的波束覆盖状态

不同流量强度下的系统业务满足率如图5所示。在系统处于中低负载的情况下, 本文所提的BW-POW-FS-SSO算法和BW-RS、BW-POW-RS这两种基准算法都能取得不错的性能。随着流量强度的进一步提高, 系统逐渐进入饱和甚至超负载状态, 此时, 系统中请求的业务总量远大于系统所能提供的吞吐量, 因此, 所有算法的业务满足率均呈现下降趋势。值得注意的是, 本文所提算法在系统处于高流量强度状态下仍然能保证较高的业务满足率。在流量强度为6时, BW-POW-FS-SSO算法的性能相比于次优的BW-RS算法提高了7.8%。

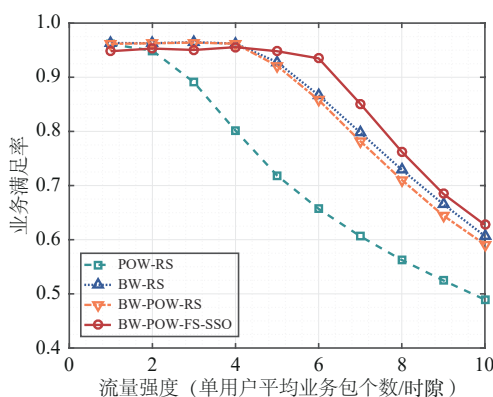


图5 不同流量强度下的系统业务满足率

不同流量强度下的系统吞吐量如图6所示。轻负载状态下, 各类算法的吞吐量性能几乎没有太大差异。随着流量强度的增大, 本文所提算法得益于柔性波束调度的灵活性并在资源分配过程中综合考虑了GUE的业务请求量和时延容忍度, 从而进一步提高了吞吐量性能。在BW-POW-FS-SSO算法收敛时(流量强度为8), 其吞吐量性能相比于次优的

BW-RS算法提升了7.6%。同时, 随着流量强度的提升, 可以看到, 本文所提算法有着更快的收敛速度, 说明其在适应系统流量变化方面具有更好的表现。

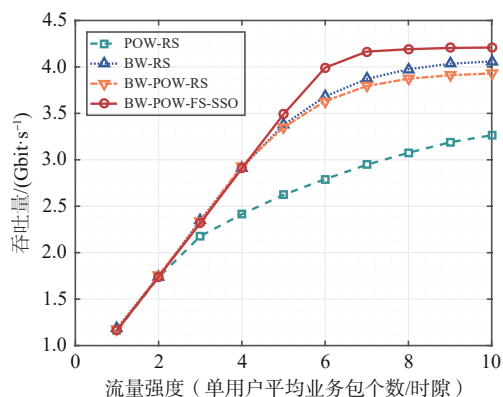


图6 不同流量强度下的系统吞吐量

不同流量强度下的业务包服务成功率如图7所示, 从图7可以看出, 本文所提算法具有较高的业务包服务成功率。随着流量强度的增加, 系统中出现了更多的业务包来不及得到服务, 使得各个算法的业务包服务成功率均出现下降趋势。

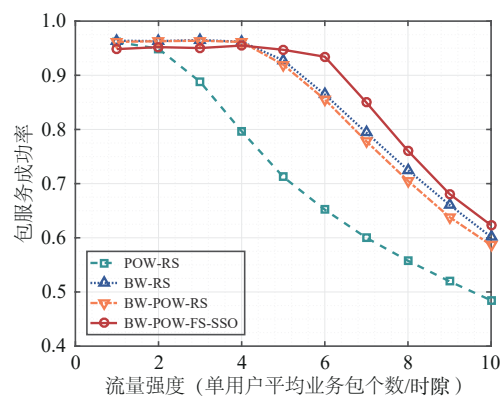


图7 不同流量强度下的业务包服务成功率

不同流量强度下的服务等待时延如图8所示。POW-RS算法仅对功率进行了优化, 因此在业务满足率和传输速率方面要略差于其他算法, 这导致POW-RS算法在系统流量强度提升时, 需要更多的时间来传输业务包, 进而显著地增加了业务包的服务等待时延。当系统处于较高流量强度时, POW-RS算法的服务能力将更难满足系统中庞大的业务, 这使得更多的业务包因为剩余服务等待时间 $T'_{n,i}$ 递减至0而被系统丢弃。在本文的仿真中, 丢弃的业务包不纳入服务等待时延的统计, 因而在高流量强度时, POW-RS算法的服务等待时延性能低于其他方法。

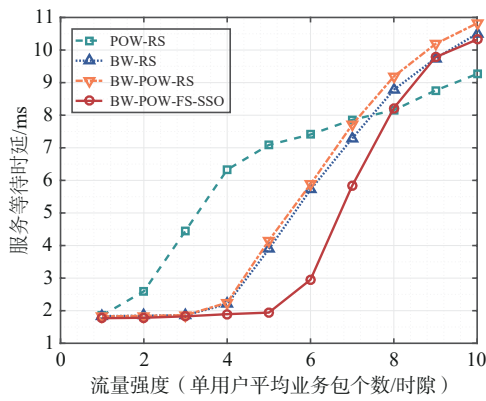


图8 不同流量强度下的服务等待时延

在图8中，本文所提的BW-POW-FS-SSO算法由于采用柔性波束调度，能够灵活地适应系统的流量分布，并且基于ORAA-SVD算法的资源分配策略能够对时延敏感的业务提供更多的资源，从而在系统处于中、低流量强度时，有着优越的服务等待时延性能表现。而随着系统流量强度的不断提高，除POW-RS算法，其他算法由于服务了更多的业务包，需要更多的调度机会，因此系统平均的服务等待时延显著增加。

不同流量强度下的公平性因子如图9所示。在低流量强度状态下，各个算法均有着较高的公平性。随着流量强度的提升，系统所提供的容量已无法满足所有GUE的业务，使得系统中始终存在部分GUE得不到服务或仅得到较少的资源，因此，各算法的公平性呈现下降趋势。在高流量强度下，本文所提算法相比于基准算法有着更好的公平性表现。

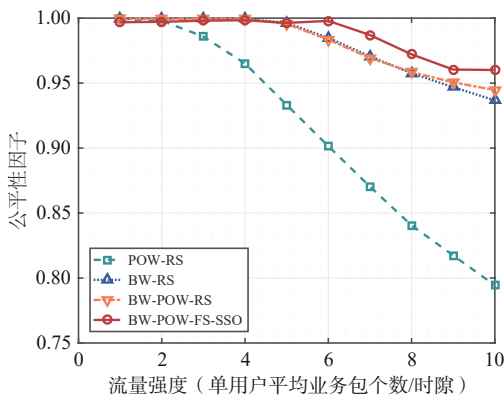


图9 不同流量强度下的公平性因子

不同流量强度下的系统容量利用率如图10所示。从仿真结果可知，随着流量强度的增加，本文所提算法对信道容量的利用率有着更为显著的提

升。在流量强度为6时，BW-POW-FS-SSO算法比次优的BW-POW-RS算法在系统容量利用率上提高了5%。

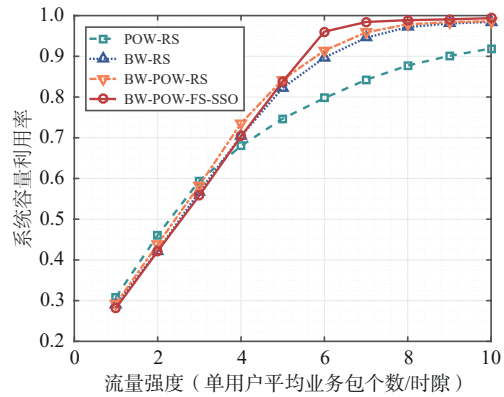


图10 不同流量强度下的系统容量利用率

4 结束语

考虑卫星物联网应用的快速兴起，以及多波束低轨卫星系统中波束调度和资源分配任务存在的挑战，本文介绍了一种基于灵活映射的柔性波束调度和资源分配策略。首先，介绍了目前常见的波束调度和资源分配策略，然后，给出了采用的问题求解范式。在灵活映射的基础上，设计了基于分离式群优化的波束调度算法，以提高波束调度的灵活性。同时，引入了时延容忍度的概念，通过联合考虑地面终端的业务请求量和业务服务的紧迫度，设计了基于服务价值度的按需资源分配算法，并结合基于分离式群优化的波束调度算法形成本文所提的基于柔性波束调度的灵活带宽与功率资源分配策略。

仿真结果表明，本文所提算法在业务满足率、吞吐量、服务等待时延、系统容量利用率和公平性方面相比于基准算法有着较好的表现。尤其当系统流量强度增大时，本文所提算法对于流量分布的变化有着更好的适应能力。在未来的工作中，将对资源分配问题做更深入的研究，进一步优化算法框架和细节。

参考文献：

[1] GUPTA A, JHA R K. A survey of 5G network: architecture and emerging technologies[J]. IEEE Access, 2015, 3: 1206-1232.
 [2] CHEN X H, TAN J J, KANG L T, et al. Frequency selective surface toward 6G communication systems: a contemporary survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024, 26(3): 1635-1675.

- [3] NGUYEN D C, DING M, PATHIRANA P N, et al. 6G Internet of things: a comprehensive survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(1): 359-383.
- [4] ZHU X M, JIANG C X. Integrated satellite-terrestrial networks toward 6G: architectures, applications, and challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(1): 437-461.
- [5] CHEN W S, LIN X Q, LEE J, et al. 5G-advanced toward 6G: past, present, and future[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2023, 41(6): 1592-1619.
- [6] WANG C X, YOU X H, GAO X Q, et al. On the road to 6G: visions, requirements, key technologies, and testbeds[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2023, 25(2): 905-974.
- [7] LIU Y, JIANG L, QI Q, et al. Online computation offloading for collaborative space/aerial-aided edge computing toward 6G system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(2): 2495-2505.
- [8] PEREZ-NEIRA A I, VAZQUEZ M A, BHAVANI SHANKAR M R, et al. Signal processing for high-throughput satellites: challenges in new interference-limited scenarios[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2019, 36(4): 112-131.
- [9] HONNAIAH P J, LAGUNAS E, CHATZINOTAS S, et al. Interference-aware demand-based user scheduling in precoded high throughput satellite systems[J]. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2022, 3: 120-137.
- [10] GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A, CAUS M, et al. Satellite-enabled LTE systems in LEO constellations[C]//*Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 876-881.
- [11] KOZHAYA S, KASSAS Z M. A first look at the OneWeb LEO constellation: beacons, beams, and positioning[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(5): 7528-7534.
- [12] KOKKONIEMI-TARKKANEN H, AHOLA K, SUOMALAINEN J, et al. Mission-critical connectivity over LEO satellites: performance measurements using OneWeb system[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2024, PP(99): 1-10.
- [13] AL HOMSSI B, AL-HOURANI A, WANG K, et al. Next generation mega satellite networks for access equality: opportunities, challenges, and performance[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2022, 60(4): 18-24.
- [14] 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.
- [15] ZHONG K Y, CHENG Y J, YANG H N, et al. LEO satellite multi-beam coverage area division and beamforming method[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(11): 2115-2119.
- [16] ZHANG L K, WANG N W, YAN H, et al. Down-link slot assignment in beam hopping communication system based on genetic[C]//*Proceedings of the 2023 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 670-675.
- [17] DIAO R M, ZHANG X, ZHANG L K, et al. A multi-beam placement optimization scheme in LEO beam hopping satellite systems[C]//*Proceedings of the 2023 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 658-663.
- [18] HA V N, LAGUNAS E, ABDU T S, et al. Large-scale beam placement and resource allocation design for MEO-constellation SATCOM[C]//*Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1240-1245.
- [19] LIANG X, JIAO J, FENG B W, et al. Performance analysis of millimeter-wave hybrid satellite-terrestrial relay networks over rain fading channel[C]//*Proceedings of the 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [20] QI C H, CHEN H J, DENG Y S, et al. Energy efficient multicast precoding for multiuser multibeam satellite communications[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(4): 567-570.
- [21] QI C H, YANG Y, DING R, et al. Multibeam satellite communications with energy efficiency optimization[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(4): 887-891.
- [22] ARAVANIS A I, BHAVANI SHANKAR M R, ARAPOGLOU P D, et al. Power allocation in multibeam satellite systems: a two-stage multi-objective optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(6): 3171-3182.
- [23] RAMÍREZ T, MOSQUERA C, ALAGHA N. Flexible user mapping for radio resource assignment in advanced satellite payloads[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2022, 68(3): 723-739.
- [24] JIA Z Y, XIONG W, HAO H X, et al. Joint load and capacity scheduling for flexible radio resource management of high-throughput satellites[J]. *arXiv preprint*, 2024, arXiv: 2407.08981.
- [25] CHEN L, WU L L, LAGUNAS E, et al. Joint power allocation and beam scheduling in beam-hopping satellites: a two-stage framework with a probabilistic perspective[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(10): 14685-14701.
- [26] 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.
- [27] LIU S J, LIN J K, XU L X, et al. A dynamic beam shut off algorithm for LEO multibeam satellite constellation network[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(10): 1730-1733.
- [28] DING X J, LEI Y, ZOU Y L, et al. Interference management by harnessing multi-domain resources in spectrum-sharing aided satellite-ground integrated networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(6): 8306-8321.
- [29] CHAN S. Optimizing time slot allocation in LEO satellite beam hopping for uneven traffic demands[C]//*Proceedings of the 2024 IEEE 29th Asia Pacific Conference on Communications (APCC)*.

Piscataway: IEEE Press, 2024: 235-240.

- [30] SHI J, MA J L, WEI Q, et al. DDQN based beamwidth and subcarrier allocation strategy for LEO satellite communication system with multi-beam capability[C]//Proceedings of the 2024 International Conference on Ubiquitous Communication (Ucom). Piscataway: IEEE Press, 2024: 383-388.
- [31] TIAN J, LUO J T, RAN Y Y, et al. Joint optimization of satellite beam hopping scheduling and time-frequency-space resource allocation under dynamic service demands[C]//Proceedings of the 2024 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2024: 242-247.
- [32] DURAND F R, ABRÃO T. Power allocation in multibeam satellites based on particle swarm optimization[J]. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2017, 78: 124-133.
- [33] DU X Q, HU X, WANG Y, et al. Dynamic resource allocation for beam hopping satellites communication system: an exploration[C]//Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (Trust-Com). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1296-1301.
- [34] GU Y, HAN C, CHEN Y H, et al. Large region targets observation scheduling by multiple satellites using resampling particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(2): 1800-1815.

[作者简介]



李福临(1998-), 男, 陕西师范大学物理学与信息技术学院硕士生, 主要研究方向为卫星网络、无线通信协议设计等。



王靖超(2002-), 男, 陕西师范大学物理学与信息技术学院硕士生, 主要研究方向为卫星网络、智能路由决策等。



董延杰(1989-), 男, 博士, 深圳北理莫斯科大学人工智能研究院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线资源管理、分布式机器学习等。



王威(1990-), 男, 博士, 南京航空航天大学电子信息工程学院研究员、博士生导师, 主要研究方向为下一代无线通信技术、低空物联网等。



马骁(1984-), 男, 博士, 陕西师范大学物理学与信息技术学院教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线通信、移动Ad Hoc网络、并行传输技术等。