



研究与开发

面向低轨卫星多维资源优化的用户分配技术

周家恩, 赵亚飞, 彭木根

(北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 北京 100876)

摘 要: 低轨卫星通信技术能够为地面用户提供广覆盖、大容量、高可靠的服务, 是未来网络的关键支撑技术之一。手机直连低轨卫星技术具有便携、低成本和用户规模大等优势, 具有广阔的市场和应用前景, 同时其对低轨卫星的服务资源也有了相应的需求。面向低轨卫星资源受限的场景, 提出了一种综合考虑通信、感知、计算和存储的资源模型, 并据此提出一种用户分配策略, 仿真结果表明, 该策略相比于其他3种方法, 能够达到更高的资源利用率, 服务更多手机用户, 也为手机直连卫星技术的发展提供了理论支撑。

关键词: 低轨卫星; 用户分配; 资源优化; 启发式算法

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024197

User allocation technology for multi-dimensional resource optimization of LEO satellite

ZHOU Jiaen, ZHAO Yafei, PENG Mugen

State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Low earth orbit (LEO) satellite communication technology can provide ground users with broad coverage, high capacity, and high reliability services, making it one of the key supporting technologies for future networks. Direct-to-mobile satellite communication technology offers advantages such as portability, low cost, and large user scalability, promising extensive commercial and application prospects. Simultaneously, it generates corresponding demand for service resources from LEO satellite. In scenarios where LEO satellite resources were constrained, a service model was proposed that comprehensively considers communication, sensing, computation, and storage. Based on this model, a user allocation method was proposed. Simulation results indicate that this strategy, compared to three other methods, achieves higher resource utilization rates, serves more mobile phone users, and provides theoretical support for the development of direct-to-mobile satellite communication technology.

Key words: LEO satellite, user allocation, resource optimization, heuristic algorithm

收稿日期: 2024-04-03; 修回日期: 2024-07-31

通信作者: 赵亚飞, zhaoyafei@bupt.edu.cn

基金项目: 北京邮电大学博士生创新基金资助项目 (No.CX2023152); 北京邮电大学研究生创新创业资助项目 (No.2024-YC-T001)

Foundation Items: The BUPT Ph.D. Students Innovation Foundation (No.CX2023152), The BUPT Innovation and Entrepreneurship Support Program for Graduate Students (No.2024-YC-T001)



0 引言

根据《6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书》，未来6G将推进天地一体化网络的构建，以达到网络全球覆盖，进一步实现通信领域“任何时间、任何地点、任何人”之间信息互通的目标^[1]。在天地一体化网络快速发展的背景下，与手机直连卫星相关标准的制定工作也在学术界和产业界的共同推动下逐步展开，手机直连卫星技术不仅能将卫星通信推广到个人用户，也是实现天地一体化通信的关键^[2]。

当前，华为、苹果、Lynk Global、SpaceX等国内外企业均已经或计划推出直连卫星通信的手机终端，然而，当前推出的也仅是语音或短消息等低带宽通信服务，随着手机直连卫星宽带业务需求不断增长，未来低轨卫星将有望通过技术升级支持手机直连的宽带互联网业务。根据当前的低轨星座建设目标，未来的低轨卫星将实现更为密集的覆盖^[3]，不同于地面基站通常根据地理区域进行基站部署的方式，低轨卫星则由于各主体单位的建设计划、轨道高度等不统一，同时单颗低轨卫星覆盖区域内的用户数量也将远大于地面基站，因此，如何有效地选择和关联用户与卫星，成为亟待研究的问题^[4-5]。

当前，手机直连卫星的方案有基于透明转发、部分可再生及基站完全上星等。产业界应用的多为透明转发，然而透明转发为卫星通信的初期过渡方案，其在隐私、安全、时延及服务质量等多方面均存在很大缺陷^[1]。传统的基于用户-卫星-地面站-云数据中心的服务体系由于传输距离远、跳数多会带来较高的通信时延^[6]，无法满足当前越来越高的实时性应用需求。本文主要针对基站完全上星方案进行分析，在此场景下，低轨卫星具备类似地面基站的通信能力，同时有着异构的感知、计算及存储能力，能够为用户提供边缘侧的实时服务，保障低时延应用的需求^[7-9]。

卫星上的通信、感知、计算、存储等资源是有限的^[10]，在进行手机用户分配时，如何根据资源容量选择将用户分配到合适的卫星成为一个值得研究的问题^[11-12]。针对边缘用户分配问题，以往的研究通常考虑覆盖和容量两个约束，并以服务更多用户为目标，考虑多维资源的容量限制，该问题可以被认为是一个背包问题，文献[13]证明该类问题为NP难问题。为了解决这一问题，本文设计了一种启发式的策略，综合考虑用户与卫星的资源容量大小和匹配度进行分配选择。

本文的主要贡献如下。

- 本文提出了一种联合考虑通信、感知、计算和存储资源的手机直连低轨卫星服务框架，从而建立更完善的用户服务模型。
- 根据手机直连低轨卫星的特征，本文提出了一种面向多维资源联合最佳适配的用户分配策略，并进行了仿真实验。
- 本文以多种常用算法作为性能对比，测试了所提出算法的优越性，为手机直连卫星的用户分配问题提供了具有较高价值的理论依据。

1 相关工作

文献[14]考虑了动态环境下的用户分配问题。文献[15]在考虑安全性的前提下进一步实现用户分配方案。文献[16]通过优化边缘服务器放置位置从而优化用户分配。文献[17]提出了一种基于Monge数组的最优动态容量分配方案。文献[18]提出了一种基于线性机器学习和线性变换的卫星用户分配方案，能够达到接近最优的性能。文献[13]采用聚类方法，为用户分组并进行资源分配。以上这些基于传统数据分析的方法都遭遇了复杂度过高或分配效果较差的问题。文献[19]将边缘用户分配问题建模为了可变大小向量装箱问题，并提出了一种基于字典目标规划，达到了比贪婪算法和随机分配方法更优的效果。文献[20]提出了

一种启发式算法，进一步提高了用户分配的效果。文献[19]和文献[20]的方法虽然降低了算法时间复杂度，达到了相对较好的分配效果，然而，算法效果依然有较大的提升空间。

文献[21]基于深度强化学习（deep reinforcement learning, DRL）算法提出了一种双序列注意力模型，利用注意力机制提高了用户选择合适服务器的概率。文献[22]针对卫星分配问题，采用了一种基于改进的双延迟深度确定性策略梯度的深度强化学习方法，通过动态配置通信资源有效提高了分配性能。文献[23]针对星地融合系统设计了一种基于长短期记忆（long short-term memory, LSTM）网络的用户分配方案，虽然作者提到能够用于文中特定系统以外的卫星系统，但其可迁移性未能得到证实。总之，基于深度学习的方案通常能够达到比其他算法更好的性能，但当服务器或卫星的规模发生变化时，模型的效果就会迅速变差，难以达到较高的泛化性。

不同于上述工作，本文提出了一种启发式的，同时考虑卫星资源容量与用户资源需求的算法，平衡了用户分配效果与算法复杂性之间的关系，可有效提高海量终端接入低轨卫星互联网、手机直连卫星等场景下的用户分配效率。

2 系统模型

本文建立了面向手机直连低轨卫星服务系统的数学模型，并将其建模为分配策略优化问题，相关变量的含义汇总见表1。

2.1 网络结构

低轨卫星网络的建设规模往往有数千颗卫星，且不同星座存在覆盖重叠，对手机用户（UE）而言，在同一时刻能够收到多颗卫星的有效服务覆盖，手机用户通过星地链路选择一颗卫星建立连接，卫星在一段时间内为用户提供持续的边缘服务。系统网络结构示意图如图1所示。

图1中，使用 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n, \dots, s_N\}$ 表示卫星集合， N 为星座内卫星数量，使用 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_K\}$ 表示用户集合， K 为用户数量。星上资源存量和用户需求资源量分别用 V 和 D 表示：

$$V = \{B^{\text{Sat}}, G^{\text{Sat}}, C^{\text{Sat}}, M^{\text{Sat}}\} \quad (1)$$

$$D = \{B^{\text{UE}}, G^{\text{UE}}, C^{\text{UE}}, M^{\text{UE}}\} \quad (2)$$

其中， B 、 G 、 C 和 M 分别为通信、感知、计算和存储资源量化映射后的容量。当用户与卫星的仰角在可通信范围内时，用户可以建立与卫星的通信链路：

表1 相关变量的含义汇总

变量	说明
$U = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_K\}$	手机用户集合
$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n, \dots, s_N\}$	区域内卫星集合
$V = \{B^{\text{Sat}}, G^{\text{Sat}}, C^{\text{Sat}}, M^{\text{Sat}}\}$	卫星的资源容量
$D = \{B^{\text{UE}}, G^{\text{UE}}, C^{\text{UE}}, M^{\text{UE}}\}$	用户需求资源量
$\overrightarrow{OSat_n}$	由地心指向卫星的向量
$\overrightarrow{OUE_n}$	由地心指向手机用户的向量
$u_k = \langle D_k, \overrightarrow{OUE_k}, \pi_n \rangle$	表示用户的向量，包含资源需求 D_k 、位置 $\overrightarrow{OUE_k}$ 、是否与卫星 n 建立服务 π_n
$s_n = \langle V_n, \overrightarrow{OSat_n} \rangle$	表示卫星的向量，包含资源容量及位置
$\delta_{n,k}$	通信链路能否建立的表征
$\eta_{n,k}$	服务链路能否建立的表征

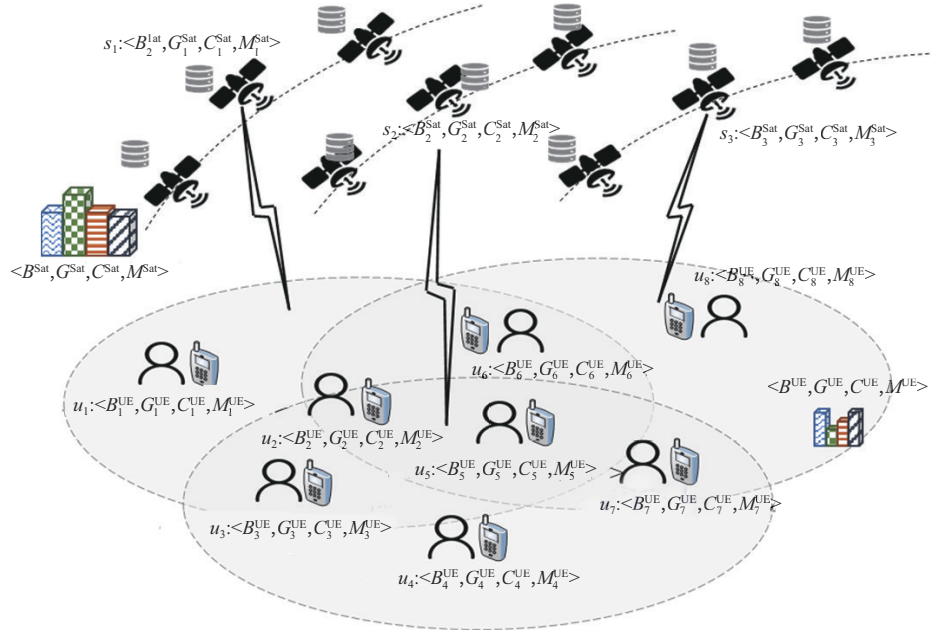


图1 系统网络结构示意图

$$\delta_{n,k} = \begin{cases} 1, & \alpha_{n,k} \leq \theta \\ 0, & \alpha_{n,k} > \theta \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\delta_{n,k}$ 表示第 n 颗卫星与第 k 个用户之间通信链路是否能够建立的变量, $\alpha_{n,k}$ 表示由卫星指向地心的向量与由卫星指向用户的向量之间的夹角:

$$\alpha_{n,k} = \arccos \langle \overrightarrow{OSat_n}, \overrightarrow{Sat_nUE_k} \rangle \quad (4)$$

其中, θ 表示卫星与用户间可通信的最大角度。当用户所处的位置能够接收到卫星覆盖时, 能够向卫星发起服务请求, 卫星在服务建立前通告剩余资源量, 只有当资源满足用户需求时, 服务才会成功建立, 否则, 服务请求将被拒绝。

2.2 资源模型

在资源模型中, 以星座中通信资源最大的卫星为参照, 将各个资源量映射到相同区间内, 从而构建卫星和用户的通信资源量映射模型, 以通信资源为例, 模型如下。

$$B_n^{\text{Sat}} = \lambda \frac{W_n^{\text{Sat}}}{W_{\text{max}}^{\text{Sat}}} = \lambda \frac{W_n^{\text{Sat}}}{\max \{W_1^{\text{Sat}}, W_1^{\text{Sat}}, \dots, W_N^{\text{Sat}}\}} \quad (5)$$

$$B_k^{\text{UE}} = \lambda \frac{W_k^{\text{UE}}}{W_{\text{max}}^{\text{Sat}}} = \lambda \frac{W_k^{\text{UE}}}{\max \{W_1^{\text{Sat}}, W_1^{\text{Sat}}, \dots, W_N^{\text{Sat}}\}} \quad (6)$$

其中, W 表示通信带宽, λ 为映射系数。此处使用通信带宽作为资源衡量标准是为了便于仿真及运算, 在实际系统中, 由于通信方式不同, 采用码字、时隙或信道等不同衡量标准进行映射。采用类似的方案, 分别定义感知、计算和存储资源, 并将资源映射到 $[0, \lambda]$ 内, 从而构建星上资源与用户资源需求的映射模型。

当用户在卫星的有效通信覆盖范围内且资源需求量小于卫星资源存量时, 用户与卫星之间能够建立有效的服务链路:

$$\eta_{n,k} = \begin{cases} 1, & D_k^{\text{UE}} < V_n^{\text{Sat}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\eta_{n,k}$ 表示第 n 颗卫星与第 k 个用户之间服务链路是否能够建立的变量, $D_k^{\text{UE}} < V_n^{\text{Sat}}$ 表示含义如下。

$$B^{\text{UE}} \leq B^{\text{Sat}} \text{ and } G^{\text{Sat}} \leq G^{\text{UE}} \text{ and } C^{\text{Sat}} \leq C^{\text{UE}} \text{ and } M^{\text{Sat}} \leq M^{\text{UE}} \quad (8)$$

2.3 优化目标

为了准确衡量策略的性能, 本文构建了针对资源利用率、用户服务率、平均单星用户数和负载均衡度 4 个指标的衡量标准。

(1) 资源利用率

资源利用率表示为 Ru ，是当前服务所占据的资源量与卫星上所有资源量的比值，表达式如下。

$$Ru = \text{avg} \left\{ \kappa \in D, v \in V \left| \frac{\sum_{k \in \{k | \pi_k \neq 0\}} \kappa_k^{\text{UE}}}{\sum_{n \in S} v_n^{\text{Sat}}} \right. \right\} \quad (9)$$

其中， κ 和 v 分别表示用户和卫星单类资源， π_k 表示第 k 个用户是否分配的变量， $\pi_k=1$ 表示用户已分配服务， $\pi_k=0$ 表示用户未分配服务。 Ru 越大，资源利用率越高，表示对星上资源的利用更加充分。

(2) 用户服务率

用户服务率表示为 Us ，是当前已分配服务的用户占总用户数的比值，表达式如下。

$$Us = \frac{\sum_{k \in [1, K]} \pi_k}{K} \quad (10)$$

当用户数量不断增加时，系统无法为全部用户提供服务，此时，用户服务率越高，表明所用分配策略效果越好。

(3) 平均单星用户数

平均单星用户服务数表示为 Cu ，是当前每颗卫星所服务手机用户数的平均值，表达式如下。

$$Cu = \text{avg} \left\{ n \in \left\{ \sum_{k \in [0, k]} \pi_{k,n} \neq 0 \mid n \right\} \left| \sum_{k \in [0, k]} \pi_{k,n} \right. \right\} \quad (11)$$

其中， $n \in \left\{ \sum_{k \in [0, k]} \pi_{k,n} \neq 0 \mid n \right\}$ 表示选取当前有服务存在的卫星， $\sum_{k \in [0, k]} \pi_{k,n}$ 为卫星服务的用户数。

系统的 Cu 越高，说明卫星网络的承载能力越强。

(4) 负载均衡度

负载均衡度表示为 Lb ，是当前每颗卫星各项资源占用比例的方差平均值，表达式如下。

$$Lb = \text{avg} \left\{ n \in S \left| \text{RMSE} \left\{ X \in V \left| \frac{X_n^{\text{Sat}}}{X_n^{\text{Sat}}} \right. \right\} \right. \right\} \quad (12)$$

其中， X_n^{Sat} 表示当前第 n 颗卫星上相应资源已被

占用的部分。系统的 Lb 越低，说明卫星网络的负载均衡性越好。

(5) 约束

本文所述分配策略优化问题主要存在覆盖和资源容量两个约束，服务的建立和用户分配需要在满足两个约束的条件下进行。

$$C1: \delta_{n,k} \neq 0 \quad (13)$$

$$C2: \eta_{n,k} \neq 0 \quad (14)$$

3 用户分配策略

由于分配问题是 NP 难问题，因此，在手机直连低轨卫星场景中寻找最优解的时间复杂度很高，为了满足手机用户的实时性需求、降低求解时间，本文提出了一种综合考虑容量和相似度的启发式算法，该算法能够在算法复杂度一致的情形下，得到优于当前先进启发式用户分配算法的解决方案。

3.1 分配策略

用户分配策略算法流程如图 2 所示，算法的输入量包括低轨卫星及手机用户的三维坐标、卫星初始资源容量以及手机用户资源需求，输出为卫星用户结果以及卫星资源状况。在算法的开始阶段，对集合 S 和集合 D 进行初始化，对集合 D 中用户进行排序，排序依据为用户各类资源需求的总和，随后，针对每个用户进行卫星分配。先根据通信链路 $\delta_{n,k}$ 的值找出与当前用户能够建立通信链路的卫星集合 S_1 ，再根据服务链路 $\eta_{n,k}$ 的值得到与当前用户能够建立有效服务的卫星集合 S_2 ，随后计算用户需求与卫星资源的匹配度 F ：

$$F_{n,k} = \frac{u_k \cdot s_n}{|u_k| \cdot |s_n|} + \frac{|s_n|}{\max \{m \in [0, N] \mid |s_m|\}} \quad (15)$$

其中， $\max \{m \in [0, N] \mid |s_m|\}$ 表示 S 中剩余最多的卫星资源总量。将用户分配到匹配度最大的卫星后，更新卫星资源量及用户分配记录，不断循环直至最后一个用户完成分配。

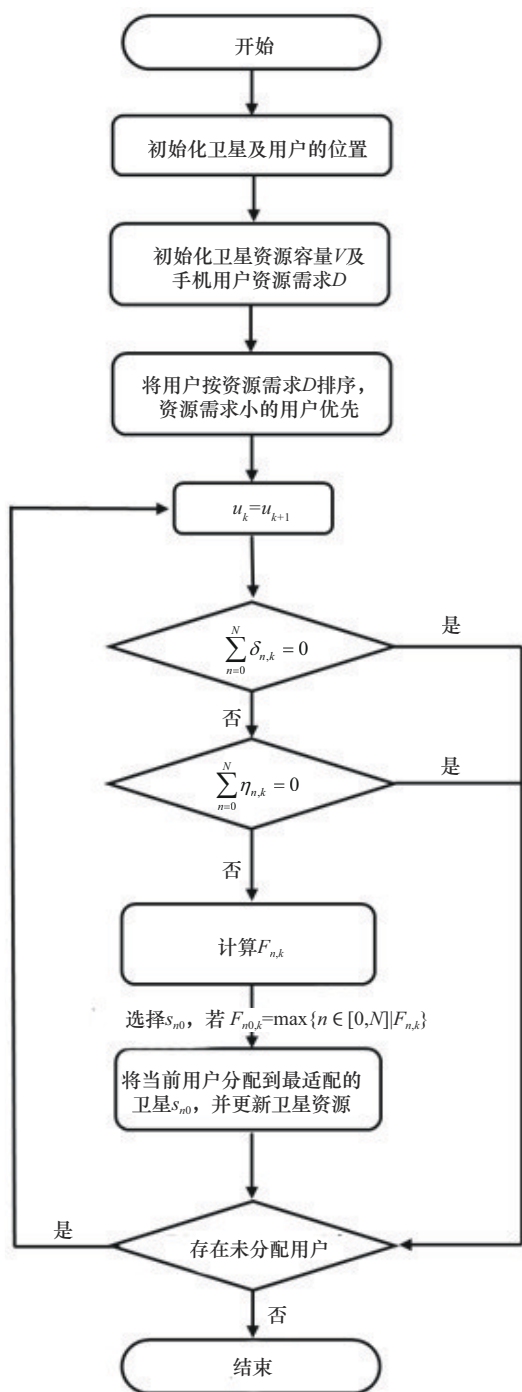


图2 用户分配策略算法流程

新算法在贪婪算法的基础上, 创新性地提出了一种资源匹配度指标 F , 该指标综合考虑了当前卫星可用资源容量的大小和用户资源需求与卫星的资源相似度, 从而解决了传统启发式算法仅考虑服务端资源容量特征而导致的资源浪费问

题, 提高了卫星的资源利用率和用户服务数。

3.2 时间复杂度

服务分配问题可以被视为一个多维向量的背包问题, 此类问题是 NP 难问题。本文所提算法以其高效性成为此类问题的优质解决方案。其时间复杂度分析如下, 算法运行时间包括两部分: 迭代 k 个用户进行排序, 时间复杂度为 $O(k)$; 对 n 颗卫星进行排序并选出最大容量的卫星, 以及求解每个用户的最匹配卫星, 时间复杂度为 $O(n \log n)$ 。因此, 该算法的总体时间复杂度为 $O(nk \log n)$ 。以上分析为最大时间复杂度, 在实际应用中, 每个用户的可选卫星数远小于卫星总量, 因此, 时间复杂度会更低。

3.3 对比算法

为了验证所提用户分配策略的有效性, 选取了 4 种算法作为比较, 4 种算法分别介绍如下。

- 随机 (random) 分配算法^[12]: 此方法会随机选择服务卫星, 不对用户或卫星进行排序。
- 贪婪 (greedy) 算法^[12]: 此方法会选择当前用户可建立服务的资源剩余最多的卫星, 不进行用户或卫星的任何排序。
- 邻近分配 (nearest) 算法: 此方法是实际系统中常用的方法, 与随机分配相似, 选择离用户最近的卫星作为服务卫星, 不对用户或卫星进行资源排序。
- MCF (most capacity first) 算法^[19]: 此方法基于贪婪算法, 针对用户资源需求和服务器资源分别排序, 优先选取资源需求最小的用户分配到资源容量最大的服务器, 算法时间复杂度为 $O(nk \log n)$ 。

4 实验结果与分析

为了验证所提方案的有效性, 设计了两组仿真实验来测试性能。实验中采用前文所述 4 种对

比算法作为参照,通过MATLAB软件进行仿真,实验环境设置星座构型为Walker型星座,轨道倾角 53° ,共3 600颗低轨卫星,36条轨道,每条轨道100颗星,选取地球表面约1/16的区域进行分析。以地球球心为原点 O ,北极方向为 z 轴,球心到春分点方向为 x 轴正方向,建立笛卡儿坐标系。为了避免仿真测试中部分用户资源需求过低而导致用户服务数过高、难以量化等问题,确保得出更加明确、清晰的结论,仿真中考虑用户资源需求均为满载需求,设置用户的平均资源需求约为单颗低轨卫星资源容量的1/10,在工程环境中,以通信容量为例,假设卫星的通信容量平均为10 Gbit/s,那么单用户的通信资源需求约为1 Gbit/s,在工程测试中,手机用户大约能够具备100 Mbit/s的通信速率。同时,为了模拟手机应用的业务资源差异和低轨卫星资源异构性,实验中设置了单用户资

源需求量在 $[0.2\sigma, 1.8\sigma]$ 内均匀分布,卫星各项资源量在 $[X-\mu, X+\mu]$ 内均匀分布,在用户数逐渐增加的实验中,设置 $X=35$,用户数在 $[1\ 000, 10\ 000]$ 范围内递增,在卫星容量变化的试验中,设置了 μ 在 $[3, 30]$ 内不断递增。实验数据集设置见表2。

表2 实验数据集设置

设置项	实验一	实验二
用户数	1 000, 2 000, ..., 10 000	5 000
用户资源需求 (σ)	3.5	3.5
地面区域面积/ km^2	3×10^7	3×10^7
卫星资源波动 (μ)	35	3, 6, ..., 30

实验采用控制变量法,分别在用户数不断增加的极限场景和卫星容量不断增加的场景下进行试验。本文所提分配算法与其他4种算法随用户数量和卫星容量增加的仿真对比曲线分别如图3和图4所示。图3(a)表明了用户数逐渐增加时

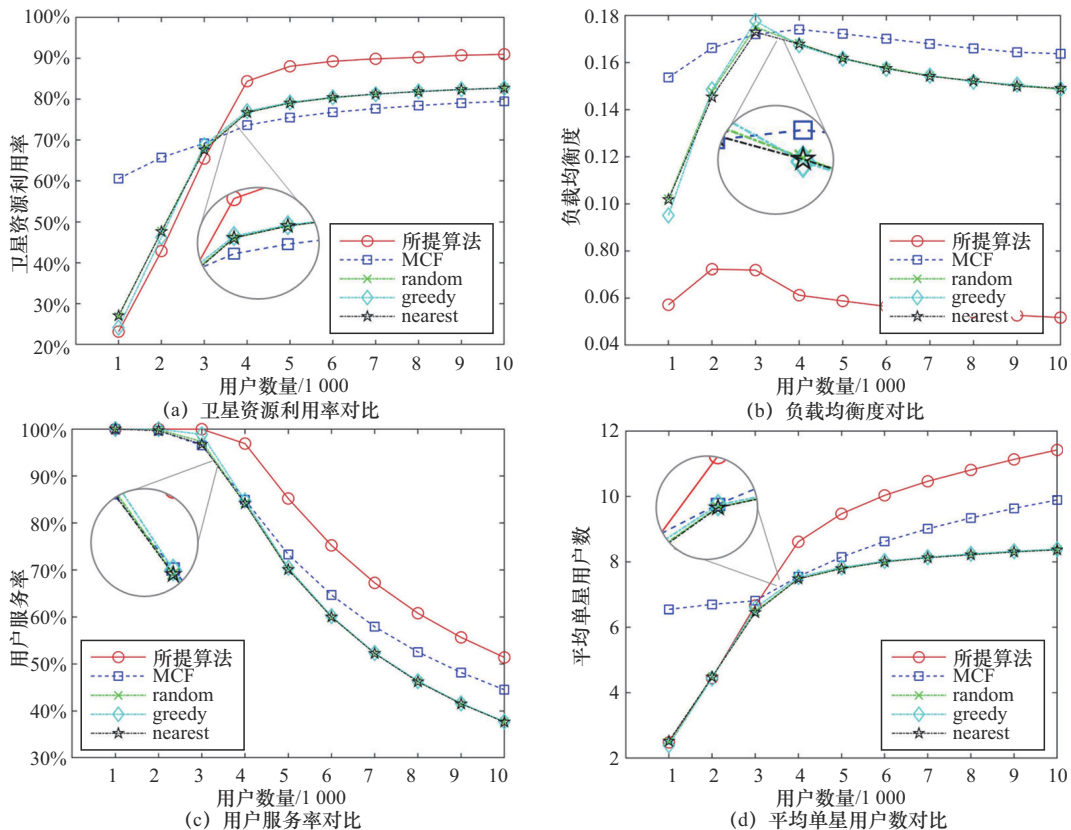


图3 本文所提分配方法与其他4种方法随用户数量增加的仿真对比曲线

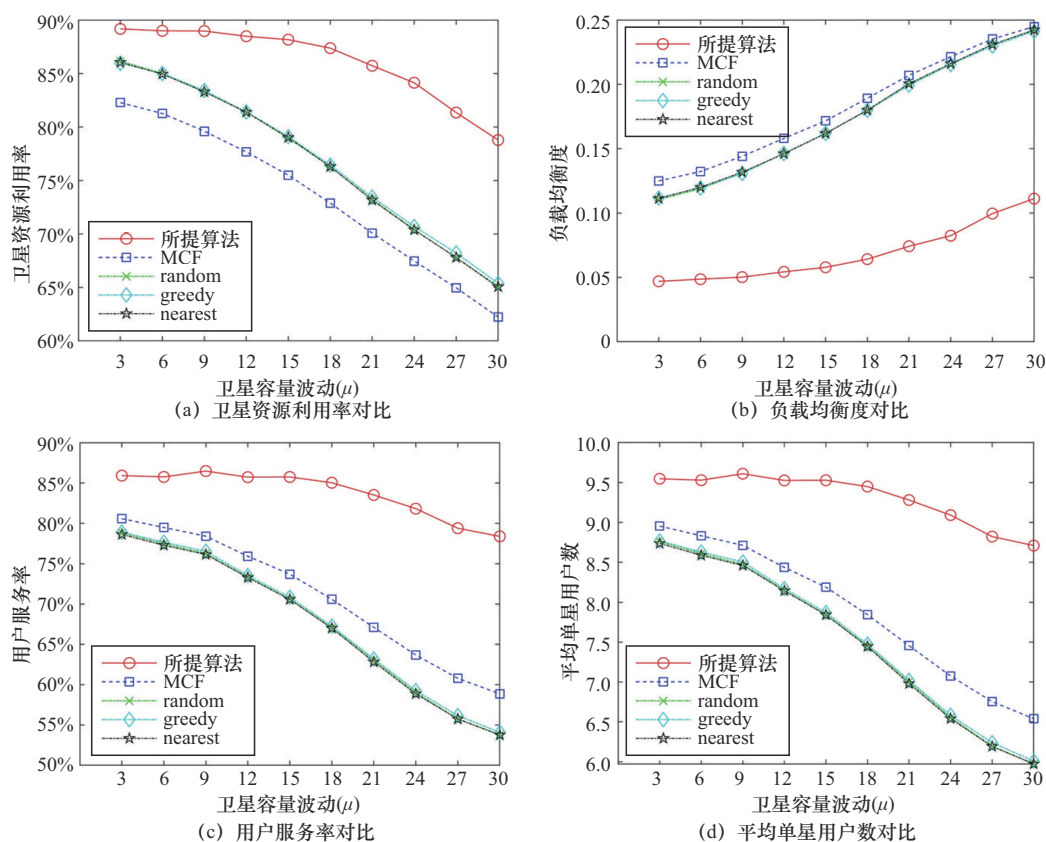


图4 本文所提分配方法与其他4种方法随卫星容量增加的仿真对比曲线

已开始服务的卫星平均资源利用率, 可以看到, 在开始阶段, 所提算法与MCF算法以外的3种算法利用率相似, 当用户逐渐增加时, 所提算法的资源利用率明显提高, 最终提升约10%。其中, MCF算法倾向于将用户优先分配到已开机服务器, 因此在初始阶段的资源利用率较高, 但当用户逐渐增加时, 呈现了较低的性能。图3(b)表明了所提算法在负载均衡度方面的优越性, 其中用户量在1 000~4 000时出现了先增后减的现象, 这是由于初始阶段用户相对较少, 资源利用不充分, 从而出现用户增多、资源方差增大的现象, 随着用户不断增多, 所提算法的负载均衡度不断下降并趋于稳定, 图3(c)和图3(d)表明了当用户不断增多时, 所提算法能够服务更多的用户, 具有更大的服务容量。

图4进一步表明了, 在卫星资源不断增加时, 所提算法在卫星资源利用率、用户服务率、平均

单星用户数、负载均衡度等方面均明显优于对比算法, 其中图4(a)中MCF算法的卫星资源利用率低于random、greedy和nearest 3种对比算法, 而图4(c)中显示其服务用户总数更高, 这是因为MCF算法更倾向于优先分配资源占用较少的用户, 可以通过图4(d)看出, 采用MCF算法的平均单星服务用户数要比其他3种对比算法高, 而本文所提方法又在4个评价标准下均显著优于MCF算法, 体现了所提用户分配技术的先进性和有效性。

5 结束语

低轨卫星互联网的建设为实现通信全球覆盖的愿景奠定了坚实基础, 手机直连低轨卫星技术则是将卫星通信送达个人用户的关键助力。卫星所具备的边缘计算能力, 能够为边缘用户提供更低时延的通信保障。然而, 卫星的高动态性和覆

盖面积广的特点也给手机用户在分配卫星资源时带来了NP难的背包问题,因此,本文构建了低轨卫星多维资源模型,并针对手机直连低轨卫星场景下的用户分配问题进行了分析,提出了一种基于启发式的,同时考虑容量和多维资源结构的分配策略,该策略为卫星用户分配问题提供了一种有效的解决方案,实现了在轨资源的高效利用,并提升了低轨卫星通信系统的性能。实验结果表明,相比于传统的随机分配算法、贪婪算法、邻近分配算法和MCF算法,本文提出的算法在卫星资源利用率、用户服务率和负载均衡度等方面的性能均得到了明显的提升,验证了该方法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 孙耀华, 彭木根. 面向手机直连的低轨卫星通信: 关键技术、发展现状与未来展望[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 25-36.
SUN Y H, PENG M G. Low earth orbit satellite communication supporting direct connection with mobile phones: key technologies, recent progress and future directions[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 25-36.
- [2] 孙耀华, 许宏涛, 彭木根. 手机直连低轨卫星通信: 架构、关键技术和未来展望[J]. 移动通信, 2024, 48(1): 103-110.
SUN Y H, XU H T, PENG M G. Direct-to-mobile low earth orbit satellite communication: architecture, key technologies, and future perspective[J]. Mobile Communications, 2024, 48(1): 103-110.
- [3] 赵亚飞, 周家恩, 王鑫洋, 等. 面向卫星通信的6G雾计算网络技术研究与展望[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(5): 834-841.
ZHAO Y F, ZHOU J E, WANG X Y, et al. Research and prospect of 6G fog computing network for satellite communication[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(5): 834-841.
- [4] XYU H, SUN Y H, ZHAO Y F, et al. Joint beam scheduling and beamforming design for cooperative positioning in multi-beam LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(4): 5276-5287.
- [5] 任智源, 侯向往, 郭凯, 等. 分布式卫星云雾网络及时延与能耗策略[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(8): 1474-1481.
REN Z Y, HOU X W, GUO K, et al. Distributed satellite cloud-fog network and strategy of latency and power consumption[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(8): 1474-1481.
- [6] ZHOU J, SUN Z, ZHANG R, et al. A cloud-edge collaboration CNN-based routing method for ISAC in LEO satellite networks [C]//Proceedings of the 2nd Workshop on Integrated Sensing and Communications for Metaverse (ISACom '23). Association for Computing Machinery, New York, 2023.
- [7] 李媛, 费泽松, 晁子云, 等. 面向空地一体化网络的数字孪生技术架构及应用[J]. 移动通信, 2024, 48(1): 95-102.
LI Y, FEI Z S, CHAO Z Y, et al. Architecture and application of digital twin technology oriented to air-space-ground integrated network[J]. Mobile Communications, 2024, 48(1): 95-102.
- [8] 林能波, 陈青霞, 郭俊滨, 等. 基于强化学习天地一体化网络无线资源管理研究[J]. 移动通信, 2023, 47(7): 85-91.
LIN N B, CHEN Q X, GUO J B, et al. Wireless resource management in space-ground integrated networks based on reinforcement learning[J]. Mobile Communications, 2023, 47(7): 85-91.
- [9] 赵亚飞, 闫冰, 孙耀华, 等. 低轨星座通导一体化: 现状、机遇和挑战[J]. 电信科学, 2023, 39(5): 90-100.
ZHAO Y F, YAN B, SUN Y H, et al. Communication and navigation integration for LEO constellations: status, opportunities, and challenges[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(5): 90-100.
- [10] MAI T L, YAO H P, LI F X, et al. Computing resource allocation in LEO satellites system: a stackelberg game approach[C]//Proceedings of the 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 919-924.
- [11] 彭明阳, 张晨, 张更新, 等. 低轨星座的跳波束资源调度策略[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023, 21(12): 1429-1439.
PENG M Y, ZHANG C, ZHANG G X, et al. Beam-hopping resource scheduling strategy of LEO constellation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023, 21(12): 1429-1439.
- [12] 刘子伟, 张校宁, 费泽松. 面向低轨卫星的长时多星跳波束功率分配技术[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4(4): 38-48.
LIU Z Y, ZHANG X N, FEI Z S. Power allocation technology of long time multi-star hopping beam for LEO satellite[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(4): 38-48.
- [13] LAI P, HE Q, ABDELRAZEK M, et al. Optimal edge user allocation in edge computing with variable sized vector Bin packing[C]//International Conference on Service-Oriented Computing. Cham: Springer, 2018: 230-245.
- [14] CUI G M, HE Q, XIA X Y, et al. OL-EUA: online user allocation for NOMA-based mobile edge computing[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2023, 22(4): 2295-2306.
- [15] LIU E S, ZHENG L P, HE Q, et al. Role-based user allocation



- driven by criticality in edge computing[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2023, 16(5): 3636-3650.
- [16] ZHU J H, ZHAO L, ZHOU J, et al. Service degradation-tolerated online user allocation in edge computing[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2024, PP(99): 1-14.
- [17] ROUMELIOTIS A J, KOUROGIORGAS C I, PANAGOPOULOSA D. Optimal dynamic capacity allocation for high throughput satellite communications systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(2): 596-599.
- [18] CHAN S, LEE H, KIM S, et al. Intelligent low complexity resource allocation method for integrated satellite-terrestrial systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(5): 1087-1091.
- [19] LI Y W, ZHU S B, DAI J M. Joint user grouping and resource allocation for LEO satellite multicast[J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(3): 4695-4702.
- [20] LAI P, HE Q, GRUNDY J, et al. Cost-effective app user allocation in an edge computing environment[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2022, 10(3): 1701-1713.
- [21] CHANG J X, WANG J, LI B, et al. Attention-based deep reinforcement learning for edge user allocation[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2024, 21(1): 590-604.
- [22] HAN X Y, LI Z W, XIE Z C. Two-step random access optimization for 5G-and-beyond LEO satellite communication system: a TD3-based MsgA channel allocation strategy[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(6): 1570-1574.

- [23] XIAO A L, CHEN Z M, WU S, et al. Collaborative long-short term bandwidth allocation for satellite-terrestrial networks[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(5): 1121-1125.

[作者简介]



周家恩 (2001-), 男, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室博士生, 主要研究方向为卫星通感算一体化技术。



赵亚飞 (1987-), 男, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室特聘副研究员、博士生导师, 主要研究方向为空地海信息通信和通感算融合。



彭木根 (1978-), 男, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室教授, 主要研究方向为空间信息通信、通感算一体化、雾无线接入网络等。