

# 基于系统容量最大化的多星跳波束资源分配

舒 晴, 张校宁, 费泽松

(北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081)

**摘 要:** 不同于中高轨卫星, 低轨卫星具有路径损耗小、传播时延低、部署灵活性大等特点, 在实时业务服务、全球物联网、应急通信等领域应用广泛。针对低轨卫星通信系统中地面用户业务需求分布差异大、资源利用率低的问题, 提出一种基于凸优化的多星跳波束资源分配算法以实现系统容量最大化。面向低轨卫星中的多星跳波束场景, 利用跳波束技术可以根据用户需求差异灵活分配系统资源的优势, 考虑星间干扰设计基于负载均衡的多星区域划分与星间服务优先级机制, 并提出一种基于凸优化的多星时间与功率资源分配算法。仿真结果表明, 与以往传统方法相比, 所提方案能够在不造成资源浪费的前提下有效降低同频干扰、实现按需分配系统容量。

**关键词:** 低轨卫星; 跳波束技术; 同频干扰; 资源分配

**中图分类号:** TP927

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-8930.2022039

## Resource Allocation of Multi-Satellite Beam Hopping Technology Based on System Capacity Maximization

SHU Qing, ZHANG Xiaoning, FEI Zesong

School of information and electronics, Beijing institute of technology, Beijing 100081, China

**Abstract:** Unlike medium and high earth orbit satellites, LEO satellites have the characteristics of small path loss, low propagation delay and high deployment flexibility. LEO satellites are widely used in real time services, global internet of things, emergency communication and other fields. In order to solved the problems of large differences in service demand distribution of terrestrial users and low resource utilization in LEO satellite communication systems, a resource allocation algorithm of LEO multi-satellite beam hopping technology based on convex optimization was proposed, which aimed to maximized the system capacity. For multi-satellite beam hopping scenarios in LEO satellite communication system, the beam-hopping technology could flexibly allocated system resources accorded to user needs. Considered the factor of co-channel interference, the service region division scheme based on load balancing and the inter-satellite resource allocation priority scheme was proposed. In order to improved system capacity and resource utilization, it jointly designed a time and power resource allocation algorithm based on convex optimization. The simulation results showed that the proposed scheme could effectively reduced co-channel interference and realized the on-demand allocation of system capacity without causing waste of resources.

**Keywords:** LEO satellite, beam-hopping technology, co-channel interference, resource allocation

## 0 引言

随着5G技术的发展, 多维异构网络的一体化进程逐渐加快, 其中空天地一体化网络(Space-Air-Ground Integrated Network, SAGIN)的概念应运而生, 旨在更紧密地互联天基、空基和地基网络, 更好地发挥异构网

络的优势, 从而实现泛在覆盖的愿景<sup>[1-2]</sup>。相较于地面移动通信系统, 卫星通信系统具有覆盖面积大、通信距离远等优点。由于卫星的覆盖面积较大, 且地面用户业务需求分布通常是不均匀的, 若继续采用传统的均匀资源分配方案会大大降低卫星通信系统资源利用率与系统性

收稿日期: 2022-06-30; 修回日期: 2022-11-07

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(No. 2020YFB1806000)

Foundation Item: National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFB1806000)

能,导致资源无法被完全利用。因此,如何灵活分配有限的星上资源、克服地面用户业务需求非均匀分布场景下的资源巨大浪费成为了亟待解决的难题。

跳波束(Beam Hopping, BH)技术可以较好地解决上述问题。跳波束技术中卫星通过控制星载多波束天线的空间指向、带宽、频点和发射功率,利用其时间与空间维度隔离的优势,调度子波束点亮时刻与服务子波束间距以降低同频干扰(Co-Channel Interference, CCI)。这一技术最早出现于NASA的ACTS项目中,学者们通过使用开关对天线馈源进行切换,实现了波束跳变<sup>[9]</sup>。自此之后,跳波束逐渐成为研究热点。其核心思想是将卫星总覆盖区域预先设置为多个小区,在同一时刻内仅对覆盖范围内的单个小区或者多个小区进行服务,通过对业务需求量大的小区分配更多的资源来提高资源利用率。

目前在跳波束技术方面的研究主要有以下几种。参考文献[4]研究了基于DVB-S2X协议的卫星中波束跳变的最优策略,提出一种基于双循环学习(Double-Loop Learning, DLL)的多行动选择方法,以保证用户公平性并提高系统容量。参考文献[5]提出一种组合学习优化(Learning and Optimization, L&O)方法和基于深度学习(Deep Learning, DL)的方法来解决跳波束照明图案设计问题,将机器学习的方法用在跳波束资源调度问题中。参考文献[6]针对卫星转发器队列中的数据包等待引起的长传输时延的问题,通过对点亮波束位置进行优化,降低用户排队时延。参考文献[7]提出了一种根据业务分布调整波束大小的波束资源管理算法,通过覆盖更多的波束位置,让更多的用户可以访问。参考文献[8-9]考虑点亮波束位置对干扰的影响,并提出基于簇的跳波束方案,簇被定义为一组同时被照亮的相邻光束,设定最小同时点亮波束间距以对抗同频干扰。参考文献[10]研究了多波束卫星系统中非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)和跳波束的潜在协同效应,建立了NOMA-BH共存卫星通信系统模型,提出的一种贪婪算法在计算复杂度和性能之间取得折中。参考文献[11-12]提出预编码与跳波束联合(Joint Precoding and BH, J-PBH)的方法,在跳波束的基础上,增加预编码来均衡波束间干扰。参考文献[13]设计了一种基于波束跳变的低轨卫星通信系统并提出一种贪婪算法解决问题,对时间、频率、功率联合分配,但算法中未能保证用户的公平性。

综上所述,目前针对低轨卫星中跳波束技术的研究有限,对于系统模型搭建、优化问题选择、优化方法评估研究仍存在研究空间,同时现有文献未能充分考虑卫星移动所带来的覆盖波束移动导致用户分布改变的问题。

## 1 多星跳波束系统模型

### 1.1 多星跳波束空间模型

多星跳波束系统模型如图1所示。系统中低轨卫星属于同一低轨卫星通信系统,每颗卫星覆盖小区总数为 $M$ 。卫星上配有两种天线:一种为固定天线,用于接收上行请求进而确定覆盖区域内的业务分布,固定天线的覆盖面积为 $S_{\text{tot}}$ ;第二种为可控多波束天线,用于下行业务传输,同一时刻可以产生最多 $N$ 个单波束,每个单波束天线的覆盖面积为 $S_{\text{cell}} = S_{\text{tot}} / M$ 。同一卫星同一时刻不同波束使用系统全频带,即每个单波束的带宽等于系统总带宽 $B_{\text{tot}}$ 。每颗卫星下行发射总功率为 $P_{\text{tot}}$ ,由最多 $N$ 个子波束非均匀使用。

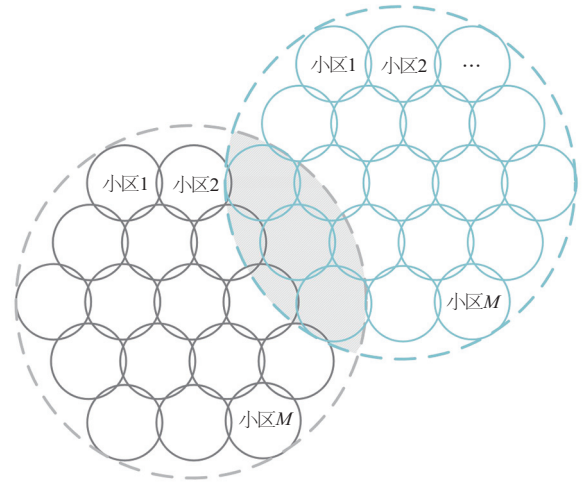


图1 多星跳波束系统模型

在时间上,认为在讨论的短时场景内,地面终端分布与卫星位置是固定的,并将讨论场景分成 $K$ 个时隙调度。地面用户分布在卫星覆盖区域内,定义 $D_i^t$ 为在第 $t$ 个时隙内第 $i$ 个小区的总业务需求。定义 $V$ 表示跳波束时间资源分配矩阵,行数为 $K$ ,列数为 $M$ ,表示在第 $t$ 个时隙内第 $i$ 个子波束是否被点亮; $V(t,i)=1$ 表示被服务, $V(t,i)=0$ 则相反。 $V_1(t,i)$ 表征第一颗卫星在第 $t$ 个时隙内第 $i$ 个小区是否被服务,是卫星1的时间资源分配矩阵; $V_2(t,i)$ 表征第二颗卫星在第 $t$ 个时隙内第 $i$ 个小区是否被服务,是卫星2的时间资源分配矩阵。定义 $P$ 表示跳波束功率资源分配矩阵。则 $P_1(t,i)$ 表征第一颗卫星在第 $t$ 个时隙内第 $i$ 个波束的资源分配矩阵,是卫星1的功率资源分配矩阵。 $P_2(t,i)$ 表征第二颗卫星在第 $t$ 个时隙内第 $i$ 个波束的资源分配矩阵,是卫星2的功率资源分配矩阵。定义卫星1、卫星2覆盖小区集合分别为 $\Theta_1$ 与 $\Theta_2$ , $\Omega$ 表征双星覆盖的重叠小区集合,则有 $\Omega = \Theta_1 \cap \Theta_2$ 。

## 1.2 低轨卫星波束间同频干扰分析

统一的天线辐射方向图为

$$G(\theta) = G_0 \left\{ \frac{J_1[u(\theta)]}{2u(\theta)} + 36 \frac{J_3[u(\theta)]}{u^3(\theta)} \right\}^2 \quad (1)$$

其中,  $\theta$  表示离轴角;  $G_0$  表示波束增益峰值, 且有

$$G_0 = \frac{\eta N^2 \pi^2}{\theta_{3dB}^2} \quad (2)$$

$$u(\theta) = \frac{2.07123 \sin \theta}{\sin \theta_{3dB}} \quad (3)$$

其中,  $\eta$  表示天线效率, 一般取值为0.7;  $N$  表示与天线辐射方向图有关的常数, 一般取值为65;  $\theta_{3dB}$  表示天线3 dB增益角度;  $J_1(\cdot)$  与  $J_3(\cdot)$  表示Bessel函数。根据天线辐射方向图, 可以绘制天线增益曲线, 如图2所示。

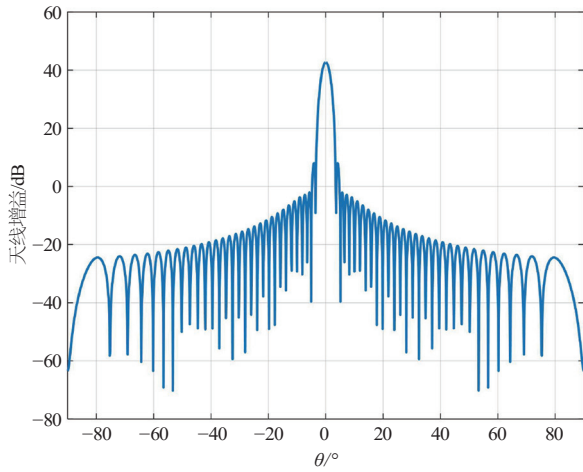


图2 天线增益曲线

由于低轨卫星跳波束系统为全频带复用, 同一时刻不同子波束间存在同频干扰。低轨卫星同频干扰如图3所示, 任意波束 $B$ 与波束 $C$ 在同一时刻被点亮, 且波束 $B$ 与波束 $C$ 的中心距离为 $d$ 。卫星到波束 $B$ 的中心与卫星到波束 $C$ 的中心所成几何角度表示为 $\theta$ 。在此场景下, 小区 $B$ 作为被干扰小区, 小区 $C$ 作为干扰小区。以下讨论小区 $C$ 对小区 $B$ 产生的同频干扰。

由三角函数公式可以计算得到

$$\theta = \arccos \left( \frac{AB^2 + AC^2 - d^2}{2AB \times AC} \right) \quad (4)$$

其中,  $AB$  表示卫星 $A$ 到小区 $B$ 中心的几何距离,  $AC$  表示卫星 $A$ 到小区 $C$ 中心的几何距离,  $BC$  表示小区 $B$ 中心到小区 $C$ 中心的几何距离, 且  $BC = d$ 。

位于波束 $B$ 内的用户信干噪比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) 表示为  $\gamma_B$ , 则有

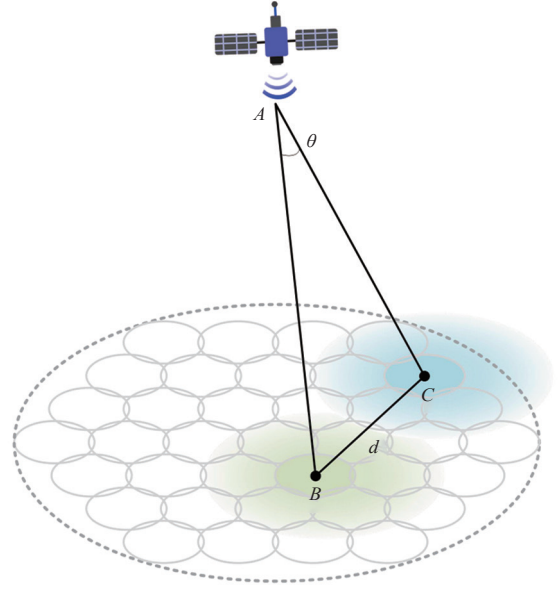


图3 低轨卫星同频干扰示意

$$\gamma_B = \frac{G_B P_B}{N_0 + G_C P_C} = \frac{1}{1 + \text{SNR} \times \frac{G_C P_C}{G_B P_B}} \text{SNR} \quad (5)$$

其中,  $N_0$  表示噪声功率;  $G_B$  表示波束 $B$ 用户信号的信道增益, 包含发射增益、自由路损与接收增益;  $G_C$  表示来自波束 $C$ 的干扰信号信道增益;  $\text{SNR}$  表示信噪比, 且  $\text{SNR} = G_B P_B / N_0$ 。为简化讨论, 给定地面用户的接收天线为全向天线且接收增益为1, 波束 $B$ 的发射功率 $P_B$ 与波束 $C$ 的发射功率 $P_C$ 相同, 即  $P_B = P_C = P$ , 用户位于波束 $B$ 的中心。则可以推导得到

$$G_B = G(0) L_{AB} = G_0 \frac{\lambda}{4\pi AB} \quad (6)$$

$$G_C = G(\theta) L_{AB} = G_0 \left\{ \frac{J_1[u(\theta)]}{2u(\theta)} + 36 \frac{J_3[u(\theta)]}{u^3(\theta)} \right\}^2 \frac{\lambda}{4\pi AB} \quad (7)$$

$$\gamma_B = \frac{1}{1 + \text{SNR} \times \frac{G_C P_C}{G_B P_B}} \text{SNR} = \frac{1}{1 + \text{SNR} \times \frac{1}{\left\{ \frac{J_1[u(\theta)]}{2u(\theta)} + 36 \frac{J_3[u(\theta)]}{u^3(\theta)} \right\}^2}} \text{SNR} \quad (8)$$

其中,  $\lambda$  表示载频波长。

考虑两种极限情况: 干扰小区 $C$ 的小区中心与卫星星下点重合, 即位于卫星覆盖范围的中心; 干扰小区 $C$ 的小区边缘与覆盖边缘相切, 即位于卫星覆盖范围的边缘。

第一种情况中, 干扰小区 $C$ 的小区中心与卫星星下点重合。此时, 规定波束 $C$ 的波束中心与卫星星下点重合, 可以得到几何关系式如下

$$AB = \sqrt{h^2 + d^2} \quad (9)$$

$$\theta_{\text{ssb}} = \arctan\left(\frac{d}{h}\right) \quad (10)$$

$$\theta_{\text{3dB}} = \arctan\left(\frac{r}{h}\right) \quad (11)$$

其中,  $h$ 表示卫星轨道高度,  $r$ 表示单地面波束小区半径,  $\theta_{\text{ssb}}$ 表示星下点场景时卫星到波束 $B$ 中心与卫星到波束 $C$ 的中心所成几何角度夹角,  $\theta_{\text{3dB}}$ 表示天线3 dB增益角度。

第二种情况中, 干扰小区 $C$ 的小区边缘与卫星覆盖边缘相切。此时, 规定波束 $C$ 对应的干扰小区边缘与卫星覆盖范围边缘相切, 可以得到几何关系式如下

$$AC = \sqrt{h^2 + (R-r)^2} \quad (12)$$

$$\theta_{\text{edge}} = \arccos\left(\frac{h^2 + (R-r-d)^2 + h^2 + (R-r)^2 - d^2}{2\sqrt{h^2 + (R-r-d)^2} \times \sqrt{h^2 + (R-r)^2}}\right) \quad (13)$$

其中,  $R$ 表示卫星覆盖范围半径,  $\theta_{\text{edge}}$ 表示覆盖边缘场景时卫星到波束 $B$ 的中心与卫星到波束 $C$ 的中心所成几何角度夹角。

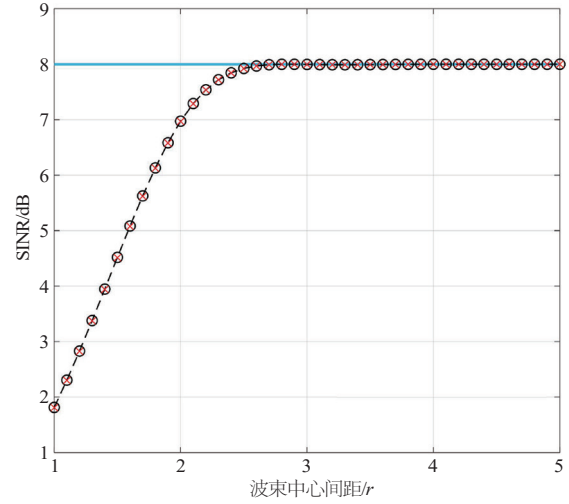
前文已经得到小区分布用户SINR表达式, 通过对两种极限情况的小区分布用户SINR进行分析, 可以得到以下结论: 在给定SNR的情况下, 固定系统配置的卫星用户SINR仅与小区中心间隔 $d$ 有关。

针对低轨卫星波束间同频干扰的仿真参数见表1, 卫星轨道高度、总覆盖半径等相关参数数值使用3GPP NTN TR 38.811中规定的Ka频段LEO卫星下行传输的参考参数<sup>[14]</sup>。

表1 低轨卫星波束间同频干扰仿真参数

| 仿真参数                             | 参数数值   |
|----------------------------------|--------|
| 轨道高度 $h$                         | 600 km |
| 总覆盖半径 $R$                        | 25 km  |
| 子波束半径 $r$                        | 5 km   |
| 载波频率 $f$                         | 20 GHz |
| 天线3 dB增益角度 $\theta_{\text{3dB}}$ | 0.48°  |
| 信噪比SNR                           | 8 dB   |

图4为低轨卫星波束间同频干扰仿真结果。由图4可以看到, 在所考虑的系统模型与参数下, 无论干扰小区处于卫星星下点还是处于卫星覆盖范围边缘等其他位置, 当干扰小区中心与被干扰小区中心间隔小于 $3r$  (3倍子波束半径) 时, 用户会受到干扰影响。当干扰小区中心与被干扰小区中心间隔大于 $3r$ 时, 被干扰小区用户的SINR与SNR相差可以忽略不计, 即此时的同频干扰可以忽略。由于低轨卫星轨道高度相较总覆盖半径与子波束半径数值较大, 基于三角函数计算得到的星下点场景与覆盖边缘场景夹角 $\theta_{\text{ssb}}$ 与 $\theta_{\text{edge}}$ 几乎相同, 导致两种场景下



图注: — SNR    ○ — SINR<sub>sub</sub>    × SINR<sub>edge</sub>

图4 同频干扰仿真结果

SINR曲线基本重合。

因此, 在所考虑的低轨卫星跳波束系统模型中, 同一时刻被点亮的子波束中心间隔应大于 $3r$ , 即地面相邻小区对应的子波束不能同时被点亮。结合系统配置, 规定在第 $t$ 个时隙内第 $i$ 个小区被服务时, 其相邻的小区编号集合为 $A$ , 则有

$$V(t, i) = 1, V(t, j) = 0, j \in A \quad (14)$$

## 2 多星跳波束资源分配算法设计

### 2.1 资源分配优化问题构建

根据香农公式, 可以得到第 $t$ 个时隙内第 $i$ 个小区的信道容量为

$$C_i^t = V(t, i) B_{\text{tot}} \log_2 \left( 1 + \frac{G_i P(t, i)}{N_0} \right) \quad (15)$$

其中,  $G_i$ 表示信道增益,  $N_0$ 表示噪声功率。推广至多星跳波束系统, 可以得到卫星1在第 $t$ 个时隙内第 $i$ 个小区的信道容量 $C_{1i}^t$ , 卫星2在第 $t$ 个时隙内第 $j$ 个小区的信道容量 $C_{2j}^t$ 分别为

$$C_{1i}^t = V_1(t, i) B_{\text{tot}} \log_2 \left( 1 + \frac{G_{i1} P_1(t, i)}{N_0} \right) \quad (16)$$

$$C_{2j}^t = V_2(t, j) B_{\text{tot}} \log_2 \left( 1 + \frac{G_{j2} P_2(t, j)}{N_0} \right) \quad (17)$$

其中,  $G_i$ 表示第 $i$ 个小区的信道增益,  $G_j$ 表示第 $j$ 个小区的信道增益。同时定义卫星1在第 $t$ 个时隙内第 $i$ 个小区的吞吐量 $TP_{1i}^t$ , 卫星2在第 $t$ 个时隙内第 $j$ 个小区的吞吐量 $TP_{2j}^t$ 为

$$TP_{li}' = \min\{C_{li}', D_{li}'\} \quad (18)$$

$$TP_{2j}' = \min\{C_{2j}', D_{2j}'\} \quad (19)$$

其中,  $D_{li}'$ 、 $D_{2j}'$  分别表示卫星1在第  $t$  个时隙内第  $i$  个小区的业务需求量和卫星2在第  $t$  个时隙内第  $j$  个小区的业务需求量。针对多星跳波束系统, 优化问题变成了最大化系统吞吐量问题, 表示为

$$\max_{V_i, P_i} \sum_{t=1}^K \left[ \left( \sum_{i \in \Theta_1} TP_{li}' \right) + \left( \sum_{j \in \Theta_2} TP_{2j}' \right) \right] \quad (20a)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^M V_i(t, i) \leq N, \quad \forall t \quad (20b)$$

$$\sum_{i=1}^N P_i(t, i) \leq P_{\text{tot}} \quad (20c)$$

$$P_i(t, i) \leq P_{\text{sb}} \quad (20d)$$

$$V_1(t, i) + V_2(t, i) < 2, \quad i \in \Omega \quad (20e)$$

其中, \* 可以为1或2, 分别表示卫星1与卫星2;  $\Omega$  表示卫星覆盖重叠部分小区集合。受限条件式(20b)表示同一时刻最多存在  $N$  个波束; 式(20c)表示同一时刻所有波束使用的功率总和不大于卫星最大发射功率; 式(20d)表示子波束分配的发射功率应小于最大单波束发射功率  $P_{\text{sb}}$ ; 式(20e)表示卫星覆盖重叠部分的小区不能同时被多星服务。

## 2.2 资源分配算法设计

考虑到上述多变量联合优化问题具有较高的复杂度, 对于多星求解提出了以下基本思路。首先基于负载均衡进行区域划分; 然后将多星资源分配优化问题简化为多颗单星的资源分配优化问题, 同时将资源分配问题分为时间资源分配与功率资源分配, 即求解每颗卫星的时间资源分配矩阵  $V_1(t, i)$  与  $V_2(t, j)$  和功率资源分配矩阵  $P_1(t, i)$  与  $P_2(t, j)$  两个步骤进行。

### (1) 基于负载均衡的多星区域划分

在多星架构下, 地面用户业务需求分布不均, 将会造成多星间负载不均衡。可以通过对重叠覆盖区域内的小区进行区域划分归属, 提高多星间负载均衡。当卫星1的独立覆盖区域业务需求总量大于卫星2时, 可以将双星重叠区域内更多的小区划分给卫星2, 反之亦然。

基于负载均衡的多星区域划分将最小化卫星业务需求总量差值作为优化目标, 确定卫星1、卫星2覆盖小区集合  $\Theta_1$  与  $\Theta_2$ , 即

$$\min_{\Theta_1, \Theta_2} \sum_{i \in \Theta_1} D_{li}' - \sum_{j \in \Theta_2} D_{2j}' \quad (21a)$$

$$\text{s.t. } |\Theta_1| + |\Theta_2| = 2M - |\Omega| \quad (21b)$$

由于能够被重新划分的小区仅限于多星重叠覆盖内的小区, 所以问题的解空间较小, 求解可以使用单向搜索算

法, 得到最优的基于负载均衡的区域划分结果  $\Theta_1$  与  $\Theta_2$ 。

### (2) 多星时间资源分配

跳波束技术的出现是为了解决覆盖区域内业务需求分布不均匀的问题, 本质是将更多的资源分配到业务需求较高的区域, 对于业务需求较低的区域分配较少资源。因此, 对于覆盖范围内总业务需求量较高的卫星, 在资源分配的过程中应被赋予更高的自由度; 对于覆盖范围内总业务需求量相对较低的卫星, 同时由于应尽量减少同频干扰的出现, 其资源分配的过程中将会受到一定限制。在此思想下, 针对多星跳波束系统的时间资源分配问题, 在求解过程中基于单颗卫星覆盖范围内总业务需求量引入星间服务优先级机制。

首先计算卫星1与卫星2各自时隙  $t$  内覆盖范围总业务需求量  $D_1(t)$  与  $D_2(t)$ , 并进行对比, 表达式如下

$$D_1(t) = \sum_{i \in \Theta_1} D_{li}' \quad (22)$$

$$D_2(t) = \sum_{j \in \Theta_2} D_{2j}' \quad (23)$$

为简化讨论, 可合理规定在此场景中卫星1在时隙  $t$  内覆盖范围总业务需求量  $D_1(t)$  大于卫星2在时隙  $t$  内覆盖范围总业务需求量  $D_2(t)$ , 因此赋予卫星1更高的资源分配优先级。针对卫星1的时间资源分配问题将近似等同于单星跳波束时间资源分配问题, 仅附加了负载均衡的区域划分限制。此时卫星1的时间资源分配优化问题表示为

$$\max_{V_1} \sum_{i \in \Theta_1} D_{li}' \quad (24a)$$

$$\text{s.t. } |\Theta_1| = N, \quad i \notin A_i, \quad \forall i \in \Theta_1 \quad (24b)$$

其中,  $\Theta_1$  表示卫星1被点亮的波束集合,  $A_i$  表示卫星1被点亮波束相邻小区的集合。

由于LEO卫星轨道高度较低, 覆盖面积较小, 因此相对于传统应用于GEO的跳波束系统, LEO卫星单星下覆盖的小区总数远小于GEO卫星单星下覆盖的小区总数; 并且在同时隙下最大子波束数量的限制, 卫星1全部可以被点亮的波束集合  $\Phi_{1, \text{tot}} = \{\Phi_1, \Phi_2, \dots\}$  可以预先计算得到。则卫星1和业务需求量最大化问题可以表示为

$$\max_{\Phi_1} \sum_{i \in \Phi_1} D_{li}' \quad (25a)$$

$$\text{s.t. } |\Phi_1^{\text{opt}}| = N \quad (25b)$$

$$\Phi_1^{\text{opt}} \in \Phi_{1, \text{tot}} \quad (25c)$$

以上问题可以看为一个非线性离散优化问题, 考虑仅存在一个自变量影响因素, 针对时间资源分配最优化的求解, 即基于单向搜索算法的时间资源分配。等同于确定卫星1在时隙  $t$  内, 所有覆盖小区业务需求量加和最大的小区编号合集, 同时应注意为避免同频干扰, 相邻

小区不能同时被点亮。通过采用单向搜索方法对  $\Phi_{1,\text{tot}}$  进行遍历并分别计算和业务需求量，取最大和业务需求量对应的被点亮的波束集合为最优解  $\Phi_1^{\text{opt}}$ ，并根据被点亮波束集合对  $V_1(t,i)$  进行赋值，得到时隙  $t$  内卫星1的最优时间分配结果  $V_1^{\text{opt}}$  为

$$V_1^{\text{opt}}(t,i) = \begin{cases} 1, & i \in \Phi_1^{\text{opt}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (26)$$

卫星1时间资源分配结束后，开始对卫星2进行时间资源分配。与卫星1的时间资源分配不同之处在于，由于多星覆盖存在重叠区域，为防止点亮卫星2波束对卫星1的服务用户产生同频干扰，卫星2的时间资源分配问题将附加额外限制，即卫星2所服务的小区不能与卫星1服务的小区相同或者相邻。综上所述，卫星2的时间资源分配优化问题表示为

$$\max_{V_2} \sum_{j \in \Phi_2} D_{2j}^t \quad (27a)$$

$$\text{s.t. } |\Phi_2| = N \quad (27b)$$

$$\begin{aligned} & V_1(t,i) + V_2(t,i) < 2, \quad i \in \Omega \\ & j \notin (A_1 \cup A_2), \quad \forall j \in \Phi_2 \end{aligned} \quad (27c)$$

其中， $\Phi_2$  表示卫星2被点亮的波束集合； $A_1$  与  $A_2$  分别表示卫星1与卫星2被点亮波束相邻小区的集合。

以上问题仍然是一个非线性离散优化问题，对于跳波束低优先级的卫星时间资源分配问题求解可以采用单向搜索方法，即对  $\Phi_{2,\text{tot}}$  进行遍历并分别计算和业务需求量，取最大和业务需求量对应的被点亮的波束集合为最优解  $\Phi_2^{\text{opt}}$ ，并根据被点亮波束集合对  $V_2(t,j)$  进行赋值。

### (3) 多星功率资源分配

由于在时间资源分配的过程中，已经将多颗卫星间的干扰完全考虑并消除，因此针对多星功率的资源分配问题可以看成多个独立的单星功率资源分配问题。

由于基于单向搜索算法的时间资源分配中有可能存在时隙  $t$  所使用的子波束数量  $N_t$  小于  $N$ ，若将功率资源固定平均分配则会存在剩余功率  $P_{\text{un}}$ ，如式(28)所示。同时可能存在某小区内用户业务量需求较低，功率平均分配导致出现供过于求的情况，造成资源浪费。

$$P_{\text{un}}(t) = \left(1 - \frac{N_t}{N}\right) P_{\text{tot}} \quad (28)$$

功率资源分配矩阵的确定需基于时间资源分配结果对功率资源进行分配，同时需注意子波束分配的发射功率应小于最大单波束发射功率  $P_{\text{sb}}$ ，所以进一步优化变量仅需考虑功率资源分配。得到新的功率分配优化问题如下

$$\max_P \sum_{i \in \Phi} \hat{C}_i^t \quad (29a)$$

$$\text{s.t. } \hat{C}_i^t = B_{\text{tot}} \log_2 \left(1 + \frac{G_i P(t,i)}{N_0}\right) \quad (29b)$$

$$\sum_{i \in \Phi} P(t,i) \leq P_{\text{tot}} \quad (29c)$$

$$P(t,i) \leq P_{\text{sb}} \quad (29d)$$

$$\hat{C}_i^t \leq D_i^t \quad (29e)$$

其中， $\Phi$  表示被点亮的波束集合。

暂不考虑子波束最大功率受限与供求关系受限，建立拉格朗日方程得到

$$\mathcal{L}(\lambda, \mathbf{P}) = \sum_{i \in \Phi} B_{\text{tot}} \log_2 \left(1 + \frac{G_i P(t,i)}{N_0}\right) + \lambda \left(P_{\text{tot}} - \sum_{i \in \Phi} P(t,i)\right) \quad (30)$$

其中， $\lambda$  表示拉格朗日算子。将式(30)对  $P(t,i)$  求偏导得到

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\lambda, \mathbf{P}(t,i))}{\partial P(t,i)} = B_{\text{tot}} \frac{G_i / N_0}{\ln 2 (1 + P(t,i) G_i / N_0)} - \lambda \quad (31)$$

令偏导等于0，得到最优化功率分配矩阵  $\mathbf{P}^{\text{opt}}$  满足

$$P^{\text{opt}}(t,i) = \frac{B_{\text{tot}}}{\lambda \ln 2} - \frac{N_0}{G_i} \quad (32)$$

$$P_{\text{tot}} = \sum_{i \in \Phi} P(t,i) \quad (33)$$

计算拉格朗日算子得到

$$\lambda = \frac{N_t B_{\text{tot}}}{\ln 2 \left(P_{\text{tot}} + \sum_{i \in \Phi} \frac{N_0}{G_i}\right)} \quad (34)$$

将结果代入式(32)得到

$$P^{\text{opt}}(t,i) = \frac{1}{N_t} \left(P_{\text{tot}} + \sum_{i \in \Phi} \frac{N_0}{G_i}\right) - \frac{N_0}{G_i} \quad (35)$$

其中， $G_i$  表示信道增益且与时隙  $t$  无关，同时规定被服务用户位于其所在小区的几何中心，并且卫星的相应波束对准所服务小区的几何中心，可以得到  $G_i$  的表达式为

$$G_i = G(0) L_i = G_0 \frac{\lambda}{4\pi d_i} \quad (36)$$

其中， $L_i$  表示卫星到小区  $i$  的自由空间路径损耗。

在得到功率资源分配矩阵的最优解后，继续考虑子波束最大功率受限与供求关系受限，并按照  $\hat{C}_i^t = D_i^t$  推导出当需求较低时， $\mathbf{P}(t,i)$  的表达式为

$$P(t,i) = \left(2^{\left(\frac{D_i^t}{B_{\text{tot}}}\right)} - 1\right) \frac{N_0}{G_i} \quad (37)$$

若功率分配后得到的  $\mathbf{P}^{\text{opt}}(t,i)$  不满足子波束最大功率受限，则将该波束功率定为最大单载波功率；若小区的信道容量大于小区内业务总量，则根据业务总量重新分配功率。针对余下的单星功率  $P_{\text{un}}$ ，进行再分配，在满足子波束最大功率受限的前提下，将剩余功率分配至仍未满足业务需求的波束中，按照总业务需求  $D_i^t$  与小区信道容量  $\hat{C}_i^t$  的差值  $Dv_i^t$ ，从高到低顺位分配。将以上方法进一步总结为功率资源分配算法如下。

算法1: 功率资源分配

输入: 时隙 $t$ 内被点亮波束集合 $\Phi$ , 所使用的子波束数量 $N_t$ , 第 $t$ 个时隙内第 $i$ 个小区的信道增益 $G_i$ , 业务需求 $D_i^t$ , 系统带宽 $B_{\text{tot}}$ , 最大单波束发射功率 $P_{\text{sb}}$ 。

输出: 功率资源分配矩阵 $\mathbf{P}$ 。

开始:

- 1) Initialize  $P=0$ , counter++;
- 2) for  $i=1$  to  $N_t$  do
- 3) Calculate  $\mathbf{P}^{\text{opt}}(t,i)$  by (35)
- 4) if  $\mathbf{P}^{\text{opt}}(t,i) > \mathbf{P}_{\text{sb}}$  then  $\mathbf{P}^{\text{opt}}(t,i) = \mathbf{P}_{\text{sb}}$
- 5) end if
- 6) Calculate by (15)  $\hat{C}_i^t$
- 7) if  $\hat{C}_i^t > D_i^t$  then Calculate  $\mathbf{P}(t,i)$  by (37)
- 8) end if
- 9) end for
- 10) for all cell  $i \in \Phi$  do
- 11) Calculate  $\mathbf{P}_{\text{un}}(t)$   $\mathbf{P}_{\text{un}}(t)$  by (28)
- 12) while  $\mathbf{P}_{\text{un}}(t) > 0$  or counter  $< N_t$  do
- 13) Calculate  $Dv_i^t$  by  $D_i^t - \hat{C}_i^t$
- 14)  $i = \arg \max Dv_i^t$
- 15) if  $\mathbf{P}_{\text{un}}(t) > \min \left\{ \left[ P_{\text{sb}} - \mathbf{P}(t,i) \right], \left[ \left( 2^{\frac{D_i^t}{B_{\text{tot}}}} - 1 \right) \frac{N_0}{G_i} - \mathbf{P}(t,i) \right] \right\}$   
then
- 16)  $\hat{\mathbf{P}}(t,i) = \min \left\{ P_{\text{sb}}, \left( 2^{\left( \frac{D_i^t}{B_{\text{tot}}} \right)} - 1 \right) \frac{N_0}{G_i} \right\}$ ,  
 $\mathbf{P}_{\text{un}}(t) = \mathbf{P}_{\text{un}}(t) - (\hat{\mathbf{P}}(t,i) - \mathbf{P}(t,i))$
- 17) else  $\hat{\mathbf{P}}(t,i) = \mathbf{P}(t,i) + \mathbf{P}_{\text{un}}(t)$
- 18) end if
- 19) counter++
- 20) end while
- 21) End

返回:  $\mathbf{P}$

多星功率资源分配过程完全独立, 因此, 分别对LEO卫星1和LEO卫星2使用功率资源分配算法, 可以得到功率资源分配的最优解 $\mathbf{P}_1^{\text{opt}}(t,i)$ 与 $\mathbf{P}_2^{\text{opt}}(t,j)$ 为

$$\mathbf{P}_1^{\text{opt}}(t,i) = \frac{1}{N_{1,t}} \left( P_{\text{tot}} + \sum_{i \in \Theta_1} \frac{N_0}{G_{1,i}} \right) - \frac{N_0}{G_{1,i}} \quad (38)$$

$$\mathbf{P}_2^{\text{opt}}(t,j) = \frac{1}{N_{2,t}} \left( P_{\text{tot}} + \sum_{j \in \Theta_2} \frac{N_0}{G_{2,j}} \right) - \frac{N_0}{G_{2,j}} \quad (39)$$

继续使用算法1求解, 最终得到功率分配结果 $\mathbf{P}_1(t,i)$

与 $\mathbf{P}_2(t,j)$ 。

通过分析以上功率资源分配过程, 可以得到算法1的复杂度为

$$O \left( N_t^2 + \log_2 \left( 1 + \frac{G_i \mathbf{P}(t,i)}{N_0} \right) N_t + 2^{\frac{D_i^t}{B_{\text{tot}}}} N_t + 10 N_t \right) \quad (40)$$

即算法1的复杂度随着所使用的子波束数量 $N_t$ 的增大而增大。

### 3 仿真分析

低轨卫星短时双星跳波束场景下的仿真参数见表2, 低轨卫星参数数值使用3GPP NTN TR38.811中规定的Ka频段LEO卫星下行传输的参考参数<sup>[14]</sup>。

表2 多星跳波束系统仿真参数

| 仿真参数                     | 参数数值           |
|--------------------------|----------------|
| 轨道高度 $h$                 | 600 km         |
| 总覆盖半径 $R$                | 25 km          |
| 子波束半径 $r$                | 5 km           |
| 单星覆盖总小区数 $M$             | 19个            |
| 单星最大跳波束总数 $N$            | 4个             |
| 双星覆盖重叠小区数 $n$            | 3个             |
| 载波频率 $f$                 | 20 GHz         |
| 单星系统带宽 $B_{\text{tot}}$  | 400 MHz        |
| 单星总发射功率 $P_{\text{tot}}$ | 100 W          |
| 最大单波束功率 $P_{\text{sb}}$  | 30 W           |
| 时隙数 $K$                  | 100个           |
| 地面业务需求总量 $D$             | 2/2.5/3 Gbit/s |

首先针对多星跳波束系统下基于负载均衡的区域划分机制进行性能仿真, 如图5所示。可以看到在相同的业务分布、时隙数与卫星配置下, 开启负载均衡分配机制后的系统在一定业务需求总量范围内有着更好的系统容量性能。可以看到当卫星覆盖区域内业务需求总量较低时, 每颗卫星的需求都可以完全满足, 所以此时是否开启负载均衡分配机制并不影响系统总容量。随着业务需求总量逐渐升高, 由于卫星覆盖范围内分布不均, 关闭负载均衡分配机制将会造成当一颗卫星完全满足该星覆盖范围内所有业务需求并停止资源分配时, 另一颗卫星内仍存在部分业务需求无法满足的问题, 这将会造成两种模式下的系统总容量差值。随着业务需求总量继续增加, 卫星在整个场景中都将以满负载状态工作, 此时是否进行负载均衡分配不会影响卫星系统总容量。

下面对时间资源分配算法与功率资源分配算法进行性能对比, 如图6与图7所示。其中, 图6对比的时间资源

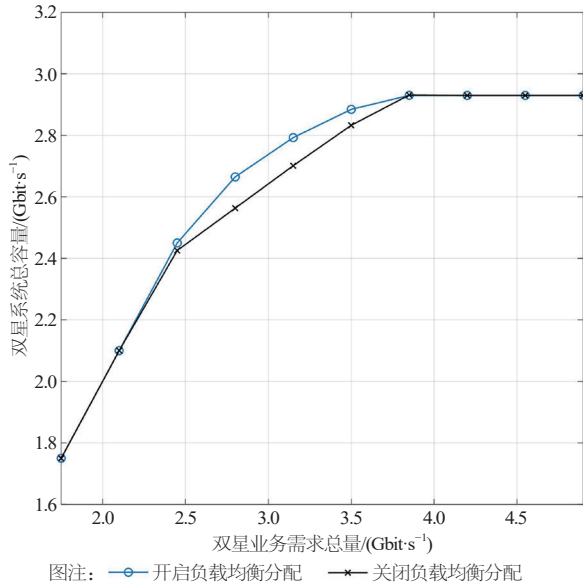


图5 基于负载均衡的双星区域划分机制系统性能

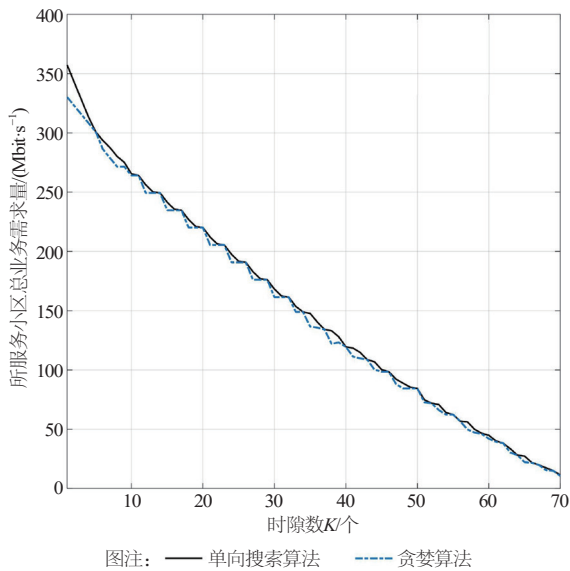


图6 时间资源分配算法对比

分配算法, 分别对应基于单向搜索算法的时间资源分配与基于贪婪算法的时间资源分配。可以发现随着时隙数的增加, 系统整体的业务量需求持续下降, 并且同一时隙内单向搜索算法得到的服务小区需求量总和要高于贪婪算法得到的服务小区需求量总和。这是因为单向搜索算法得到的解为全局最优解, 而贪婪算法得到的解由于存在相邻小区不能同时被服务的限制, 导致其不是最优。

图7显示了本文提出的功率分配算法与传统功率均分算法的能耗差异对比。在相同的地面业务需求总量与分布下, 时隙数决定了LEO卫星跳波束系统的系统吞吐量。当

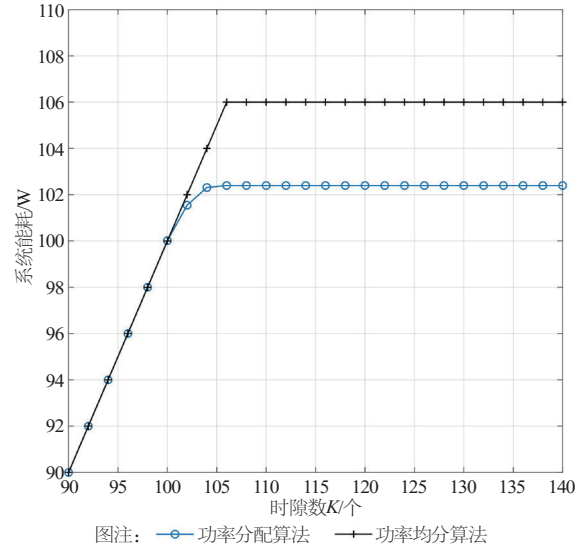


图7 功率资源分配算法对比

时隙数较低时, 即使系统处于满负载状态下也不能完全满足需求, 即子波束数量等于最大子波束数量, 子波束总功率等于最大单星总功率。此时所提出的功率分配算法与传统功率均分算法能耗相同。随着时隙数逐渐增加, 系统满足地面需求总量时, 所提出的功率分配算法优势则逐渐体现了出来。由于本文提出的功率分配算法不可能出现资源浪费, 并且对初始功率分配后的剩余功率资源进行了再分配, 因此相对于传统功率均分算法, 本文所提出算法有着更低的能耗, 但是该部分能耗差值不会随时隙数的继续增加而增大。这是由于当时隙数过大之后, 地面业务需求总量已经可以完全被满足, 不论是所提出的功率分配算法, 还是功率均分算法都会停止小区覆盖。

图8与图9分别给出了本文所提出的多星跳波束系统容量分配与各小区初始业务需求量的对比。由于单星总覆盖小区数为19个, 并且多星重叠区域的小区数为3个, 因此多星总覆盖下实际总小区数为35个。可以看到当初始总业务需求量相对较小时, 所提出的多星跳波束系统可以在不造成资源浪费的前提下完全提供所需服务。

图10与图11分别给出了在3 Gbit/s初始总业务需求下卫星系统总容量分配和单星各自的容量分配结果。可以看到, 多星跳波束系统此时已经无法完全满足地面业务需求。此时的业务需求量分布为: LEO卫星1独立覆盖小区2 Gbit/s的业务需求量, LEO卫星2独立覆盖小区1.5 Gbit/s的业务需求量, LEO卫星1与LEO卫星2覆盖重叠区域小区0.5 Gbit/s的业务需求量, 三部分共同构成了3 Gbit/s的初始总业务需求量。由于存在负载均衡的多星区域划分机制, 因此此时处于多星重叠区域的小区应完全

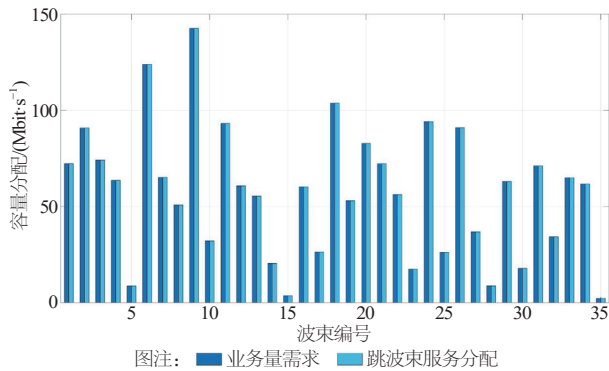


图8 2 Gbit/s初始总业务需求量下的容量分配

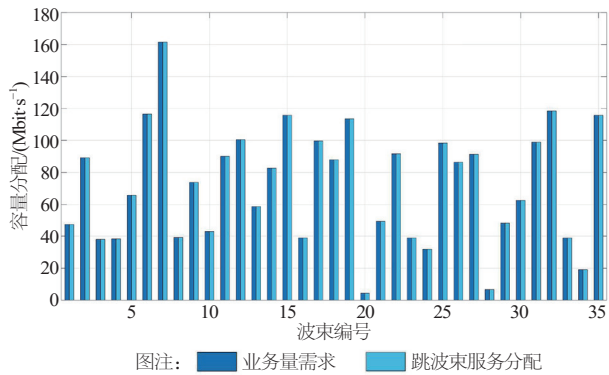


图9 2.5 Gbit/s初始总业务需求量下的容量分配

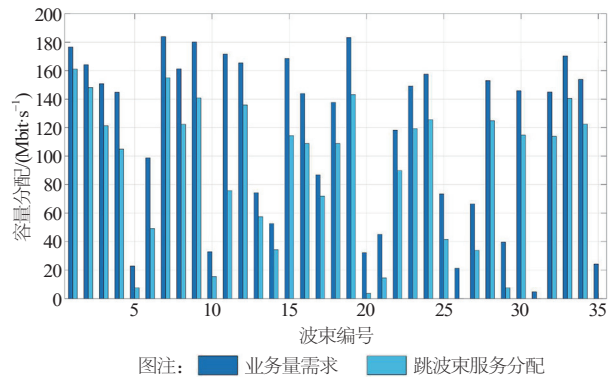


图10 3 Gbit/s初始总业务需求量下的卫星系统总容量分配

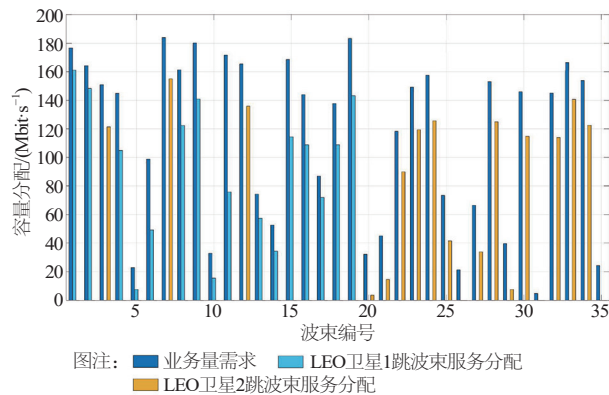


图11 3 Gbit/s初始总业务需求量下的单星各自的容量分配

由独立覆盖区域业务需求量较低的LEO卫星2所服务。图11的单星各自容量分配结果展示了这个结论,其中,小区编号为3、7、12的小区为多星覆盖重叠区域的小区。针对这3个小区LEO卫星1并未分配任何容量,完全由LEO卫星2提供容量分配。

## 4 结束语

未来面向低轨卫星跳波束系统研究可以考虑在信令传输中应用多波束天线,并结合低轨卫星相控阵天线实现不同频跳波束调度,进而分析波束间干扰和影响。

## 参考文献:

- [1] LI B, FEI Z S, ZHOU C Q, et al. Physical-layer security in space information networks: a survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(1): 33-52.
- [2] FANG X R, FENG W, WEI T, et al. 5G embraces satellites for 6G ubiquitous IoT: basic models for integrated satellite terrestrial networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(18): 14399-14417.
- [3] WANG Y, CHEN Y, QIAO Y F, et al. Cooperative beam hopping for accurate positioning in ultra-dense LEO satellite networks[C]// Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [4] 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, 2018, 9: 57578-57588.
- [5] LEI L, LAGUNAS E, YUAN Y X, et al. Deep learning for beam hopping in multibeam satellite systems[C]//Proceedings of 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [6] ZHANG T, ZHANG L X, SHI D Y. Resource allocation in beam hopping communication system[C]//Proceedings of 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [7] WANG Y X, BIAN D M, HU J, et al. A flexible resource allocation algorithm in full bandwidth beam hopping satellite systems[C]// Proceedings of 2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 920-927.
- [8] WANG L, ZHANG C, QU D X, et al. Resource allocation for beam-hopping user downlinks in multi-beam satellite system[C]//Proceedings of 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 925-929.
- [9] WANG A Y, LEI L, LAGUNAS E, et al. Joint beam-hopping scheduling and power allocation in NOMA-assisted satellite

- systems[C]//Proceedings of 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [10] JOROUGH V, LAGUNAS E, ANDRENACCI S, et al. Deploying joint beam hopping and precoding in multibeam satellite networks with time variant traffic[C]//Proceedings of 2018 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1081-1085.
- [11] KIBRIA M G, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Precoded cluster hopping in multi-beam high throughput satellite systems[C]//Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [12] 王亚昕, 边东明, 胡婧, 等. 降雨影响下的非均匀时隙跳波束资源动态分配方法[J]. 数字通信世界, 2019(10): 10-12.
- WANG Y X, BIAN D M, HU J, et al. Dynamic allocation method of non-uniform time slot hopping beam resources under the influence of rainfall[J]. Digital Communication World, 2019(10): 10-12.
- [13] 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, 2018, 9: 56468-56478.
- [14] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks: TR 38.811 V15.4.0[S]. 2020.
- [15] 赵凌开. 低轨卫星网络基于跳波束的资源分配算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- ZHAO L K. Resource allocation algorithm based on beam hopping for LEO satellite system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [16] 刘婉莹, 夏师懿, 姜泉江, 等. 低轨卫星网络基于跳波束的资源调度算法[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(6): 805-813.
- LIU W Y, XIA S Y, JIANG Q J, et al. Resource scheduling algorithm based on beam hopping in LEO satellite network[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(6): 805-813.
- [17] 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.
- [18] 魏文秋. GEO/LEO双层卫星通信网络同频干扰避免技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- WEI W Q. Research on co-channel interference avoidance technologies in GEO/LEO double-layer satellite communication networks[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [19] 唐璟宇, 李广侠, 边东明, 等. 卫星跳波束资源分配综述[J]. 移动通信, 2019, 43(5): 21-26.
- TANG J Y, LI G X, BIAN D M, et al. Review on resource allocation for beam-hopping satellite[J]. Mobile Communications, 2019, 43(5): 21-26.
- [20] 丁祥, 续欣, 董德伟, 等. 一种LEO卫星通信分簇波束调配方法[J]. 通信技术, 2021, 54(8): 1896-1902.
- DING X, XU X, DONG D W, et al. A clustering beam allocation method in LEO satellite communication systems[J]. Communications Technology, 2021, 54(8): 1896-1902.
- [21] HU X, WANG L B, WANG Y, et al. Dynamic beam hopping for DVB-S2X GEO satellite: a DRL-powered GA approach[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(4): 808-812.
- [22] ACOSTA R J, LARKO J, NARVAEZ A, et al. Advanced Communication Technology Satellite (ACTS) multibeam antenna analysis and experiment[C]//Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1992 Digest. Piscataway: IEEE Press, 1992: 1356-1358.
- [23] LI Y T, LUO Z Q, ZHOU W Y, et al. Benefits analysis of beam hopping in satellite mobile system with unevenly distributed traffic[J]. China Communications, 2021, 18(9): 11-23.
- [24] MOLEV-SHTEIMAN A, QI X F. Beam-Time Hopping modulation for automotive imaging radars interference mitigation[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems. Piscataway: IEEE Press, 2021: 79-83.
- [25] HU H L, LUO J J, CHEN H H. Radio resource management for cooperative wireless communication systems with organized beam-hopping techniques[J]. IEEE Wireless Communications, 2008, 15(2): 100-109.
- [26] SUN S H, HOU L M, MIAO D S. Beam switching solutions for beam-hopping based LEO system[C]//Proceedings of 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.

## 作者简介



**舒晴** (1997-), 女, 北京理工大学硕士生, 主要研究方向为低轨卫星通信。



**张校宁** (1997-), 男, 北京理工大学硕士生, 主要研究方向为低轨卫星通信。



**费泽松** (1977-), 男, 博士, 北京理工大学信息与电子学院教授、博士生导师, 主要研究方向为信道编码、5G/6G移动通信关键技术、雷达通信一体化、低轨卫星接入与组网、MIMO等。