面向低轨卫星的长时多星跳波束功率分配技术

刘子祎[1]，张校宁[1,2]，费泽松[1]
（1. 北京理工大学信息与电子学院，北京 100081；
2. 长光卫星技术股份有限公司，吉林 长春 130102）

摘　要：低轨卫星由于具有低成本、低时延和较小的路径损耗等特点而具有较优越的发展前景，在物联网、B5G 等领域应用广泛。针对 LEO 卫星与其覆盖区域处于移动状态的问题，提出一种基于凸优化的长时多星跳波束功率分配算法以实现系统容量最大化。重点关注一段时间内的多星跳波束场景，根据长时同轨多星跳波束场景与长时异轨多星跳波束场景分别建立了系统模型。考虑星间干扰、负载均衡和星间资源分配优先级等因素的影响，以加权目标函数作为优化目标，对两种长时多星跳波束场景进行资源分配算法设计，提出基于凸优化的长时跳波束资源分配算法。仿真结果表明，与传统方案相比，所提方案可以提高系统的资源利用率。

关键词：低轨卫星；跳波束技术；功率分配
中图分类号：TP393
文献标识码：A
doi: 10.11959/j.issn.2096−8930.2023041

Power Allocation Technology of Long Time Multi-Star Hopping Beam for LEO Satellite

LIU Ziyi[1], ZHANG Xiaoning[1,2], FEI Zesong[1]
1. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
2. Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130102, China

Abstract: LEO satellites have superior development prospects due to their low cost, low latency and small path loss, and are widely used in IoT, B5G and other fields. For the LEO satellite and its coverage area will be in a moving state, a convex optimization-based long-time multi-star beam hopping power allocation algorithm was proposed to maximize the system capacity. Focused on the multi-star hopping beam scenario over a period of time, a system model was developed based on the long-time co-orbital multi-star hopping beam scenario and the long-time heterodyne multi-star hopping beam scenario respectively. The resource allocation algorithm was designed for the two long-time multi-star hopping beams with the weighted objective function as the optimization objective, considered the influence factors of inter-star interference, load balancing and inter-star resource allocation priority, a long-time skipping beam resource allocation algorithm based on convex optimization was proposed. The simulation results showed that the proposed scheme could improve the resource utilization of the system compared with the conventional schemes.

Keywords: LEO satellites, beam hopping technology, power allocation

0　引言

近年来，移动通信、云计算、物联网等产业的迅速发展对未来互联网提出了新的挑战，也推动了其相应技术的发展。其中，卫星互联网作为代表性技术之一，使未来的互联网在高带宽、高可靠性、低时延、高安全性和万物互联等方面的实现成为可能。不同于地面基站，低轨卫星通信系统具有覆盖面积大这一优势[1]。但同时，大覆盖面积下地面业务需求的分布往往不均匀，因此考虑引入跳波束技术，从而更加灵活地分配有限的星上资源，解决非均匀业务分布造成的巨大资源浪费问题。跳波束技术的主要原理是将卫星覆盖区域分为多个小区，在每个时隙内根据资源需求对其中的单个或多个小区服务，同时也可进行相应小区间切换从而提高资源利用率[2]。

收稿日期：2023−07−01；**修回日期：**2023−11−10
通信作者：刘子祎，Lzy2001813@163.com
基金项目：科技部重点研发计划资助项目（No.2020YFB1806900）；北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金项目（No.L232002）
Foundation Items: Key Research and Development Projects of the Ministry of Science and Technology (No.2020YFB1806900), Beijing Natural Science Foundation (No.L232002)

在卫星跳波束技术方面，目前有很多研究主要针对其灵活性进行分析。欧洲航天局在 2004 年为多波束卫星系统推广了波束跳变技术项目[3]，休斯公司已经开发出了使用跳变点波束的 Spaceway-3 卫星系统[4]。参考文献[5]研究了波束跳变系统的灵活性，结果表明，与非波束跳变系统相比，波束跳变系统的容量能力有所提高。参考文献[6]提出了一种通用的逐时段决策方案用于时隙分配，以优化时延性能。对于短时低轨卫星场景，即对于 LEO 卫星通信系统中单个时间分片场景，LEO 卫星与其覆盖区域固定，目前已有研究建立了全频带复用系统模型并分析了低轨卫星波束跳变系统下的同频干扰。以最大系统容量作为优化目标，将通信资源分为时间与功率两个部分，提出了一种基于系统容量最大化的多星波束跳变资源分配方法[7]。参考文献[8]针对动态长时卫星，即 LEO 卫星通信系统中的连续时间分片系统，LEO 卫星与其覆盖区域将随时间分片的增加而移动，提出了一种自适应波束功率分配算法，但仅聚焦单星系统。对于低轨卫星跳波束资源分配算法，参考文献[9]研究了其在不同约束条件下的功率分配，但并未针对不同的卫星类型提出相应解决方案。

然而，现有的关于跳波束技术的研究大多针对 GEO 卫星通信系统或 LEO 短时系统进行分析。在 LEO 短时系统中，通常关注在 LEO 卫星通信系统中单个时间分片内，不考虑低轨卫星的移动性，即认为在所讨论的时间分片内地面业务需求量与分布不变，LEO 卫星覆盖区域不变。考虑到 LEO 卫星的移动性特点，在实际的低轨卫星跳波束系统中 LEO 卫星与其覆盖区域将处于移动状态，因此，需要将 LEO 卫星短时跳波束资源分配问题扩展到长时问题进行研究。目前，关于低轨卫星场景下的长时跳波束技术的参考文献有限，且现有的参考文献未能充分考虑长时卫星系统下由于覆盖波束移动带来的用户分布改变的问题。因此，本文针对实际的低轨卫星跳波束系统中 LEO 卫星与其覆盖区域处于移动状态的问题，开展面向不均匀业务分布的跳波束技术研究。

1　长时低轨卫星跳波束系统模型

长时同轨多星跳波束系统模型如图 1 所示，系统中的多颗 LEO 卫星属于同一 LEO 卫星通信系统，所以其卫星配置相同，即每颗 LEO 卫星覆盖区域中小区总数为 M，同一时刻最大子波束数为 $N_{\max}$。单星同一时刻不同子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_{tot}。卫星下行最大发射总功率为 P_{tot}，由时隙 t 内使用的 N_t 个子波束非均匀使用。将卫星运动覆盖范围经过的区域提前进行小区规划，在长时场景下需要考虑多个时间分片，规定一个时间分片长度为 LEO 卫星径向经过一个小区的时间。如图 1 所示，卫星经过一个时间分片之后所覆盖区域将会扫过一定数量的小区，并有新的小区进入覆盖范围。

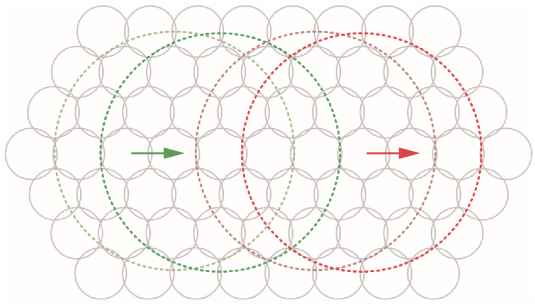


图 1　长时同轨多星跳波束系统模型

规定 LEO 卫星轨道高度为 h，小区半径为 r，则时间分片长度 T_{seg} 与单个时间分片内的时隙数 K 表示为

$$T_{\text{seg}} = \frac{2r}{\sqrt{\dfrac{\text{GM}}{R+h}}} \tag{1}$$

$$K = \left\lfloor \frac{T_{\text{seg}}}{T_{\text{slot}}} \right\rfloor \tag{2}$$

其中，GM 表示地心引力常数，R 表示地球半径，T_{slot} 表示时隙长度。

规定时间分片 T_N 下的 LEO 卫星覆盖小区合集为 Γ_N，且 $|\Gamma_N| = M$，即卫星覆盖范围内的小区总数。由系统模型得知，当时间分片由 T_N 变为 T_{N+1} 后，Γ_N 将会有 m 个小区脱离卫星覆盖区域，同时也会有 m 个小区进入卫星覆盖区域。规定这个过程中脱离覆盖区域的用户合集为 L_N，进入覆盖区域的用户合集为 E_N，则可以得到

$$\Gamma_{N+1} = (\Gamma_N / L_N) \cup E_N \tag{3}$$

定义 $\boldsymbol{V}_N^1$ 表示时间分片 T_N 下的 LEO 卫星 1 的跳波束时间资源分配矩阵，$\boldsymbol{P}_N^1$ 表示 LEO 卫星 1 在时间分片 T_N 下的 LEO 卫星 1 的跳波束功率资源分配矩阵。$\boldsymbol{V}_N^2$ 表示时间分片 T_N 下的 LEO 卫星 2 的跳波束时间资源分配矩阵，$\boldsymbol{P}_N^2$ 表示 LEO 卫星 1 在时间分片 T_N 下的 LEO 卫星 2 的跳波束功率资源分配矩阵。卫星 1、卫星 2 覆盖区域总小区集合分别为 Θ_1 和 Θ_2，Ω_N 表征时间分片 T_N 下多星覆盖区域的重叠小区集合，$\Omega_N = \Theta_1 \cap \Theta_2$。

由于 LEO 卫星一直在其轨道上工作，所以根据多星是否在同一轨道上工作将长时多星跳波束场景分为同轨多星与异轨多星。

对于同轨多星场景，多星具有相同的运动速度与运动方向，多星覆盖区域的相对位置不随时间改变，如图 1 所示。为方便讨论，规定图中左侧绿色部分表示 LEO 卫星 1，图中右侧红色部分表示 LEO 卫星 2，LEO 卫星 1 和 LEO 卫星 2 与其相应的覆盖区域以同速向右侧运动。

对于异轨多星场景，多星具有相同的移动速度与不同的运动方向，多星覆盖区域将随时间推移产生相对运动。为直观地展示长时异轨多星跳波束场景下的系统模型，以 $M=19$ 个的多星为例，并考虑一种极端场景，即异轨多星覆盖区域将完全重叠的情况，如图 2 所示。可以看到 LEO 卫星 1 与 LEO 卫星 2 为异轨卫星，并在时间分片 T_1 内产生了覆盖区域的重叠，在时间分片 T_3 内覆盖区域完全重叠，在时间分片 T_5 之后两星逐渐分开至无重叠。规定多星存在覆盖区域的时间分片个数为 L 个，即当 $M=19$ 个时，$L=5$ 个。

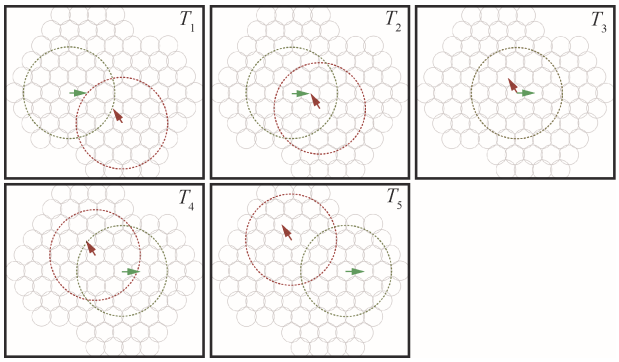


图 2　长时异轨多星跳波束系统模型

2　长时低轨卫星跳波束资源分配算法

本文只考虑长时多星跳波束资源分配算法。对于长时多星跳波束系统，同轨多星与异轨多星场景的主要差别为以下 3 点。

第一，参考长时单星跳波束的资源分配算法，对于同轨多星场景下仍需要按照初始资源分配与动态资源分配两方面进行讨论。异轨多星场景则无须讨论初始资源分配，因为该场景发生于卫星运动过程中，所以仅需考虑动态的资源分配。

第二，同轨多星场景下的总时间分片数不受限制，而异轨多星场景下总时间分片数有限。多星覆盖区域存在相对移动，从产生重叠区域到重叠区域消失，整个过程的持续时间有限。同时，若多星覆盖不存在重叠区域，则问题将退化为两个独立的长时单星问题，无须继续讨论。

第三，同轨多星场景下的覆盖区域重叠部分不随时间而改变，即 $\Omega_N=\Omega$，同时覆盖小区权重系数分配也相对不变。异轨多星场景重叠区域 Ω_N 在不断变化，与时间分片 T_N 有关，多星各自覆盖小区权重系数分配应按照多星位置关系进行调整。

综上，长时异轨多星场景的资源分配算法与同轨多星场景的动态资源分配算法相比，区别仅在于有限的总时间分片数、权重系数分配与重叠区域的更新，无本质差异。为减少赘述，针对两种场景下的资源分配算法讨论可以进行整合。

根据香农公式，可以得到 LEO 卫星 1 与 LEO 卫星 2 在时间分片 T_N 下时隙 t 内小区 i 的信道容量 $C_{t,i}^{1,N}$ $C_{t,i}^{2,N}$ 为

$$C_{t,i}^{1,N}=\boldsymbol{V}_N^1(t,i)B_{\text{tot}}\log_2\left(1+\frac{G_i^{1,N}\boldsymbol{P}_N^1(t,i)}{N_0}\right) \tag{4}$$

$$C_{t,i}^{2,N}=\boldsymbol{V}_N^2(t,i)B_{\text{tot}}\log_2\left(1+\frac{G_i^{2,N}\boldsymbol{P}_N^2(t,i)}{N_0}\right) \tag{5}$$

S 个时间分片下以加权公平目标函数作为长时多星跳波束系统的优化目标，得到优化问题为

$$\begin{aligned}
&\min_{\boldsymbol{V}_N^*,\boldsymbol{P}_N^*}\prod_{N=1}^{S}\left[\prod_{(t,i)}^{(K,M)}\left(\frac{D_{t,i}^{1,N}}{C_{t,i}^{1,N}}\right)^{\omega_{t,i}^{1,N}}\times\prod_{(t,j)}^{(K,M)}\left(\frac{D_{t,j}^{2,N}}{C_{t,j}^{2,N}}\right)^{\omega_{t,j}^{2,N}}\right]\\
&\text{s.t.}\sum_{i=1}^{M}\boldsymbol{V}_N^*(t,i)=N_t\leqslant N_{\max},\forall t,\forall N\\
&\quad\sum_{i=1}^{K}\boldsymbol{P}_N^*(t,i)\leqslant P_{\text{tot}}\\
&\quad\boldsymbol{P}_N^*(t,i)\leqslant P_{\text{sb}}\\
&\quad C_{t,i}^{*,N}\leqslant D_{t,i}^{*,N}
\end{aligned} \tag{6}$$

其中，$*$ 可以为 1 或 2，分别表示 LEO 卫星 1 与 LEO 卫星 2；$D_{t,i}^{*,N}$ 表示单星在时间分片 T_N 下时隙 t 内小区 i 的业务需求量；$\omega_{t,i}^{1,N}$ 表示单星在时间分片 T_N 下时隙 t 内小区 i 的权重系数，数值越大优先级越高。

考虑到每个时间分片内覆盖区域、业务分布、业务需求量不变，所以 S 个时间分片下的整体优化问题可以细分为多个单时间分片内部分优化问题。由于时间分片 T_{N+1} 的资源分配方案将受到时间分片 T_N 资源分配结果的影响，可以合理地将整个长时过程划分为初始资源分配与动态资源分配两部分，其中初始资源分配方案针对第一个时间分片 T_1 进行，动态资源分配方案针对后续时间分片 $\{T_2,\cdots,T_N,\cdots,T_S\}$ 进行。

2.1　初始资源分配

2.1.1　初始权重系数分配

由于系统处于初始资源分配状态，多星覆盖范围内的所有小区服务优先级不应存在差异，即初始资源分配下所

有小区权重系数都应一致，规定

$$\omega_{t,i}^{1,1}=\omega_{t,i}^{2,1}=1,\ \ \forall i,\forall t \tag{7}$$

即初始资源是基于最大化公平目标函数分配的。

2.1.2　初始时间资源分配

多星之间的覆盖区域存在重叠部分，同时每颗 LEO 卫星的每个子波束使用全部系统带宽，导致星间存在共道干扰（Co-Channel Interference，CCI），为克服干扰，已经规定相邻小区不可以同时被服务。相比于长时单星跳波束初始时间资源分配问题，在多星架构下卫星的资源分配仍存在负载均衡与星间优先级问题。应首先对 LEO 卫星 1 与 LEO 卫星 2 重叠部分小区进行服务划分，使多星的业务需求量差值尽可能小并得到相应的覆盖小区集合 $\boldsymbol{\Theta}_1$ 和 $\boldsymbol{\Theta}_2$，然后针对覆盖区域内业务需求量高的卫星进行时间资源分配，最后对覆盖区域内业务需求量较低的卫星进行时间资源分配。为简化讨论，可合理规定在此场景中 LEO 卫星 1 时隙 t 中覆盖范围内总业务需求量更大，具有更高的资源分配优先级。

可见，针对 LEO 卫星 1 的时间资源分配问题等同于长时单星跳波束时间资源分配问题，即基于公平目标函数进行初始时间资源分配，具体过程如下。

由于权重系数均为 1，加权目标函数退化为公平目标函数，得到时间分片 T_1 下时隙 t 内公平目标函数，表示为

$$\begin{aligned}&\min_{\boldsymbol{V}_1}\prod_{i=1}^{M}\frac{D_{t,i}^{1,1}}{C_{t,i}^{1,1}}\\&\text{s.t. }C_{t,i}^{1,1}=\boldsymbol{V}_1(t,i)B_{\text{tot}}\log_2\left(1+\frac{G_i^{1,1}\boldsymbol{P}_1(t,i)}{N_0}\right)\\&\quad\sum_{i=1}^{M}\boldsymbol{V}_1(t,i)\leqslant N_{\max}\\&\quad i\notin\boldsymbol{\Lambda},\forall i\in\boldsymbol{\Phi}\end{aligned} \tag{8}$$

其中，$\boldsymbol{\Phi}$ 表示被点亮的波束集合，$\boldsymbol{\Lambda}$ 表示被服务小区的相邻小区集合。在时间资源分配的过程中，认为使用平均功率分配，即

$$\boldsymbol{P}_1(t,i)=\frac{P_{\text{tot}}}{N_{\max}} \tag{9}$$

将公平目标函数进行对数运算，得到优化问题为

$$\begin{aligned}&\min_{\boldsymbol{V}_1}\sum_{i=1}^{M}\ln\left(\frac{D_{t,i}^{1,1}}{C_{t,i}^{1,1}}\right)\\&\text{s.t. }\sum_{i=1}^{M}\boldsymbol{V}_1(t,i)\leqslant N_{\max}\\&\quad i\notin\boldsymbol{\Lambda},\forall i\in\boldsymbol{\Phi}\end{aligned} \tag{10}$$

暂不考虑 CCI 对于时间资源分配的影响，建立拉格朗日方程得到

$$\begin{aligned}\mathcal{L}(\lambda,\boldsymbol{V}_1)=&\sum_{i=1}^{M}\ln\left(\frac{D_{t,i}^{1,1}}{B_{\text{tot}}\log_2\left(1+\dfrac{G_i^{1,1}P_{\text{tot}}}{N_0N_{\max}}\right)\boldsymbol{V}_1(t,i)}\right)\\&+\lambda\left(N_{\max}-\sum_{i=1}^{M}\boldsymbol{V}_1(t,i)\right)\end{aligned} \tag{11}$$

其中，λ 表示拉格朗日算子。对 $\boldsymbol{V}_1(t,i)$ 求偏导得到

$$\frac{\partial\mathcal{L}(\lambda,\boldsymbol{V}_1(t,i))}{\partial\boldsymbol{V}_1(t,i)}=\frac{-D_{t,i}^{1,1}}{B_{\text{tot}}\log_2\left(1+\dfrac{G_i^{1,1}P_{\text{tot}}}{N_0N_{\max}}\right)\boldsymbol{V}_1(t,i)}-\lambda \tag{12}$$

令偏导等于 0，得到最优化时间分配矩阵 $\boldsymbol{V}_1^{\text{opt}}(t,i)$ 满足

$$\boldsymbol{V}_1^{\text{opt}}(t,i)=\frac{-D_{t,i}^{1,1}}{\lambda B_{\text{tot}}\log_2\left(1+\dfrac{G_i^{1,1}P_{\text{tot}}}{N_0N_{\max}}\right)} \tag{13}$$

令 $N_{\max}=\sum_{i=1}^{M}\boldsymbol{V}_1(t,i)$，计算拉格朗日算子

$$\lambda=\frac{-\sum_{i=1}^{M}D_{t,i}^{1,1}}{\sum_{i=1}^{M}\boldsymbol{V}_1(t,i)B_{\text{tot}}\log_2\left(1+\dfrac{G_i^{1,1}P_{\text{tot}}}{N_0N_{\max}}\right)} \tag{14}$$

由于 LEO 卫星轨道高度较高，在仅考虑自由空间路径损耗的情况下，不同小区的信道增益 G_i^1 近似相等，即在平均功率分配方案下，不同小区的容量近似相等。进一步化简拉格朗日算子表达式，得到

$$\lambda=\frac{-\sum_{i=1}^{M}D_{t,i}^{1,1}}{N_{\max}B_{\text{tot}}\log_2\left(1+\dfrac{G_i^{1,1}P_{\text{tot}}}{N_0N_{\max}}\right)} \tag{15}$$

将式(15)代入式(13)中，得到以公平性目标函数为优化目标的最优化时间分配矩阵 $\boldsymbol{V}_1^{\text{opt}}(t,i)$ 为

$$\boldsymbol{V}_1^{\text{opt}}(t,i)=\frac{D_{t,i}^{1,1}}{\sum_{i=1}^{M}D_{t,i}^{1,1}}N_{\max} \tag{16}$$

得到的最优化初始时间分配矩阵 $\boldsymbol{V}_1^{1\text{opt}}(t,i)$ 为

$$\boldsymbol{V}_1^{1\text{opt}}(t,i)=\frac{D_{t,i}^{1,1}}{\sum_{i=1}^{M}D_{t,i}^{1,1}}N_{\max} \tag{17}$$

继续对 $\boldsymbol{V}_1^1(t,i)$ 取值范围与 CCI 干扰限制加以考虑，得到

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{V}_1^1(t,i)=\begin{cases}1, & \boldsymbol{V}_1^{1\text{opt}}(t,i)\geqslant\eta_1\\0, & \text{其他}\end{cases}\\&\text{s.t. } 0\leqslant\left|\boldsymbol{V}_1^1(t,i)\right|\leqslant N_{\max}\\&\quad i\notin\Lambda_1,\forall i\in\Phi_1\end{aligned}\tag{18}$$

其中，η_1 表示 LEO 卫星 1 确定服务小区阈值，Λ_1 表示 LEO 卫星 1 的被服务小区相邻小区集合，Φ_1 表示 LEO 卫星 1 服务的小区集合。对于时间分配矩阵 $\boldsymbol{V}_1^1(t,i)$ 的求解可以使用单向搜索算法。

LEO 卫星 1 时间资源分配结束后，对 LEO 卫星 2 进行时间资源分配。为防止 LEO 卫星 2 对 LEO 卫星 1 的服务用户产生 CCI，LEO 卫星 2 的时间资源分配问题将附加格外的限制，即 LEO 卫星 2 所服务的小区不能与 LEO 卫星 1 服务的小区相同或者相邻。综上所述，LEO 卫星 2 的时间资源分配优化矩阵表示为

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{V}_1^2(t,j)=\begin{cases}1, & \boldsymbol{V}_1^{2\text{opt}}(t,j)\geqslant\eta_2\\0, & \text{其他}\end{cases}\\&\text{s.t. } \boldsymbol{V}_1^{2\text{opt}}(t,j)=\frac{D_{t,j}^{2,1}}{\sum_{j=1}^{M}D_{t,j}^{2,1}}N_{\max}\\&\quad 0\leqslant\left|\boldsymbol{V}_1^2(t,j)\right|\leqslant N_{\max}\\&\quad \boldsymbol{V}_1^1(t,i)+\boldsymbol{V}_1^2(t,i)<2,i\in\Omega_N\\&\quad j\notin\left(\Lambda_1\cup\Lambda_2\right),\forall j\in\Phi_2\end{aligned}\tag{19}$$

其中，η_2 表示 LEO 卫星 2 确定服务小区阈值，Λ_2 表示 LEO 卫星 2 的被服务小区相邻小区集合，Φ_2 表示 LEO 卫星 2 服务的小区集合。对于时间分配矩阵 $\boldsymbol{V}_1^2(t,i)$ 的求解可以使用单向搜索算法。

2.1.3 初始功率资源分配

由于在初始时间资源分配的过程中，已经将 LEO 卫星间的干扰考虑在内并消除，因此多星初始功率资源分配可以看成多个独立的单星初始功率资源分配问题。对于单星初始功率资源分配，采用最大系统容量为优化目标，其优化问题表示为

$$\begin{aligned}&\max_{\boldsymbol{P}_1}\sum_{i\in\Phi}C_{t,i}^1\\&\text{s.t. } C_{t,i}^1=B_{\text{tot}}\log_2\left(1+\frac{G_i^1\boldsymbol{P}_1(t,i)}{N_0}\right)\\&\quad\sum_{i\in\Phi}\boldsymbol{P}_1(t,i)\leqslant P_{\text{tot}}\\&\quad\boldsymbol{P}_1(t,i)\leqslant P_{\text{sb}}\\&\quad C_{t,i}^1\leqslant D_{t,i}^1\end{aligned}\tag{20}$$

其中，Φ 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

$$\begin{aligned}\mathcal{L}(\lambda,\boldsymbol{P})=&\sum_{i\in\Phi}B_{\text{tot}}\log_2\left(1+\frac{G_i\boldsymbol{P}(t,i)}{N_0}\right)\\&+\lambda\left(P_{\text{tot}}-\sum_{i\in\Phi}\boldsymbol{P}(t,i)\right)\end{aligned}\tag{21}$$

其中，λ 表示拉格朗日算子。对 $\boldsymbol{P}(t,i)$ 求偏导得到

$$\frac{\partial\mathcal{L}(\lambda,\boldsymbol{P}(t,i))}{\partial\boldsymbol{P}(t,i)}=B_{\text{tot}}\cdot\frac{(G_i/N_0)}{\ln 2\left(1+\boldsymbol{P}(t,i)G_i/N_0\right)}-\lambda\tag{22}$$

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

$$\boldsymbol{P}^{\text{opt}}(t,i)=\frac{B_{\text{tot}}}{\lambda\ln 2}-\frac{N_0}{G_i}\tag{23}$$

$$P_{\text{tot}}=\sum_{i\in\Phi}\boldsymbol{P}^{\text{opt}}(t,i)\tag{24}$$

计算拉格朗日算子为

$$\lambda=\frac{N_tB_{\text{tot}}}{\ln 2\left(P_{\text{tot}}+\sum_{i\in\Phi}\frac{N_0}{G_i}\right)}\tag{25}$$

将结果代入式(23)得到

$$\boldsymbol{P}^{\text{opt}}(t,i)=\frac{1}{N_t}\left(P_{\text{tot}}+\sum_{i\in\Phi}\frac{N_0}{G_i}\right)-\frac{N_0}{G_i}\tag{26}$$

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中心，并且卫星的相应波束对准所服务小区的中心，可以得到 G_i 的表达式为

$$G_i=G(0)L_i=G_0\frac{\lambda}{4\pi d_i}\tag{27}$$

其中，L_i 表示 LEO 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 $\hat{C}_i^t=D_i^t$ 推导需求较低时 $\boldsymbol{P}(t,i)$ 的表达式为

$$\boldsymbol{P}(t,i)=\frac{1}{N_t}\left(P_{\text{tot}}+\sum_{i\in\Phi}\frac{N_0}{G_i^1}\right)-\frac{N_0}{G_i^1}\tag{28}$$

若功率分配后得到的 $\boldsymbol{P}^{\text{opt}}(t,i)$ 不满足子波束最大功率受限，则将该波束功率设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 $\boldsymbol{P}_{\text{un}}(t)$ 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 从高至低顺位分配。进一步总结为功率资源分配算法，如下所示。

算法 1：功率资源分配

输入：时隙 t 内被点亮波束合集 $\boldsymbol{\Phi}$，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_{tot}，最大单波束发射功率 P_{sb}。

输出：功率资源分配矩阵 $\boldsymbol{P}$。

Begin:

Initialize P=0, counter=0;

for i=1 to N_t do

Calculate $\boldsymbol{P}^{\text{opt}}(t,i)$ by 式(31)

if $\boldsymbol{P}^{\text{opt}}(t,i) > P_{\text{sb}}$ then $\boldsymbol{P}^{\text{opt}}(t,i) = P_{\text{sb}}$

end if

Calculate $\hat{C}_i^t$ by 式(18)

if $\hat{C}_i^t > D_i^t$ then Calculate $\boldsymbol{P}(t,i)$ $\boldsymbol{P}^{\text{opt}}$, i by 式(33)

end if

end for

for all cell $i \in \boldsymbol{\Phi}$ do

Calculate $\boldsymbol{P}_{\text{un}}(t)$ by (24)

while $\boldsymbol{P}_{\text{un}}(t) > 0$ or counter<N_t do

Calculate Dv_i^t by $D_i^t - \hat{C}_i^t$

$i = \arg\max Dv_i^t$

if

$$\boldsymbol{P}_{\text{un}}(t) > \min\left\{\left[P_{\text{sb}} - \boldsymbol{P}(t,i)\right], \left[\left(2^{\frac{D_i^t}{B_{\text{tot}}}} - 1\right)\frac{N_0}{G_{\text{i}}} - \boldsymbol{P}(t,i)\right]\right\} \text{ then}$$

$$\hat{\boldsymbol{P}}(t,i) = \min\left\{P_{\text{sb}}, \left(2^{\left(\frac{D_i^t}{B_{\text{tot}}}\right)} - 1\right)\frac{N_0}{G_i}\right\}, \quad \boldsymbol{P}_{\text{un}}(t) = \boldsymbol{P}_{\text{un}}(t) - (\hat{\boldsymbol{P}}(t,i) - \boldsymbol{P}(t,i))$$

else $\hat{\boldsymbol{P}}(t,i) = \boldsymbol{P}(t,i) + \boldsymbol{P}_{\text{un}}(t)$

end if

counter++

end while

End

Return: $\boldsymbol{P}$

进而将多星初始功率资源分配的最优解表示为

$$\boldsymbol{P}_1^{1\text{opt}}(t,i) = \frac{1}{N_t}\left(P_{\text{tot}} + \sum_{i\in\Phi_1}\frac{N_0}{G_i^1}\right) - \frac{N_0}{G_i^1} \tag{29}$$

$$\boldsymbol{P}_1^{2\text{opt}}(t,j) = \frac{1}{N_t}\left(P_{\text{tot}} + \sum_{j\in\Phi_2}\frac{N_0}{G_j^2}\right) - \frac{N_0}{G_j^2} \tag{30}$$

由于多星功率资源分配过程完全独立，可以使用算法 1 进行求解。

2.2　动态资源分配

2.2.1　权重系数更新

结合已有的长时单星跳波束场景下的权重系数分配研究，考虑在多星场景下权重系数设定仅划分为 $\{\omega_1, \omega_2\}$，其中 $\omega_1 > \omega_2$，并为下一个时间分片将离开多星覆盖范围的小区赋予高权重系数。

当 LEO 卫星 1 与 LEO 卫星 2 处于同一轨道，其覆盖区域相对位置不变，在多星场景下的权重系数设定应重点考虑 LEO 卫星 1 中的小区。如图 3 所示，以 M = 19 个的同轨多星场景为例，图中红色小区为将离开 LEO 卫星 1 覆盖区域的小区，该部分小区的权重系数为 ω_1，其余被覆盖区域小区的权重系数为 ω_2。

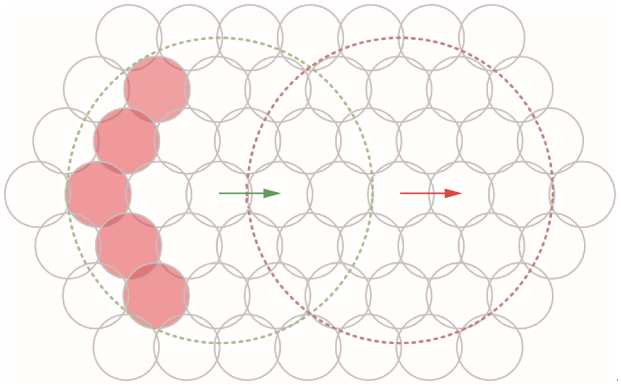


图 3　长时同轨多星场景小区权重系数更新

当 LEO 卫星 1 与 LEO 卫星 2 处于不同轨道，其覆盖区域相对位置随时间改变。如图 4 所示，以 M = 19 个的异轨多星场景为例，可以看到覆盖重叠全过程内，权重系数的分配在每个时间分片内是不同的。在时间分片 T_1 内，图中绿色小区表示 LEO 卫星 1 的高优先级小区，红色小区表示 LEO 卫星 2 的高优先级小区；在时间分片 T_3 内，黄色小区表示同时为多星的高优先级小区。针对异轨多星跳波束的权重系数更新，需考虑各自卫星的星历信息，并在每个时间分片内进行更新。

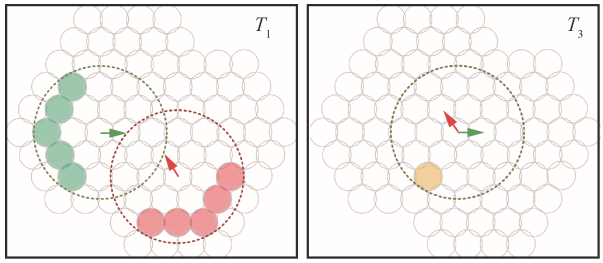


图 4　长时异轨多星场景小区权重系数更新

2.2.2 动态时间资源分配

在动态时间资源分配的过程中，仍需进行基于负载均衡的区域划分并引入星间服务优先级。首先对 LEO 卫星 1 与 LEO 卫星 2 重叠部分小区进行服务划分，使多星的业务需求量差值尽可能小并得到相应的覆盖小区集合 $\boldsymbol{\Theta}_1$ 和 $\boldsymbol{\Theta}_2$，然后计算 LEO 卫星 1 与 LEO 卫星 2 在时间分片 T_N 下时隙 t 中覆盖范围内总业务需求量并进行对比。规定在此场景中，LEO 卫星 1 时隙 t 中覆盖范围内总业务需求量更大，具有更高的资源分配优先级。针对 LEO 卫星 1 的动态时间资源分配问题也等同于长时单星跳波束时间资源分配问题，即基于加权目标函数的动态时间资源分配，其具体过程如下。

在时间分片 T_N 下第 t 个时隙中加权目标函数优化问题表示为

$$\begin{aligned}&\min_{\boldsymbol{V}_N^1,\boldsymbol{P}_N^1}\prod_{i=1}^{M}\left(\frac{D_{t,i}^{1,N}}{C_{t,i}^{1,N}}\right)^{\omega_{t,i}^{1,N}}\\&\text{s.t. } C_{t,i}^{1,N}=\boldsymbol{V}_N^1(t,i)B_{\text{tot}}\log_2\left(1+\frac{G_i^{1,N}\boldsymbol{P}_N^1(t,i)}{N_0}\right)\\&\quad\sum_{i=1}^{M}\boldsymbol{V}_N^1(t,i)\leqslant N_{\max}\\&\quad i\notin\boldsymbol{\Lambda},\quad\forall i\in\boldsymbol{\Phi}\end{aligned}\tag{31}$$

在时间资源分配的过程中使用平均功率分配，即

$$\boldsymbol{P}_{1,N}(t,i)=\frac{P_{\text{tot}}}{N_{\max}}\tag{32}$$

将加权公平目标函数式(32)进行对数运算，得到优化问题为

$$\begin{aligned}&\min_{\boldsymbol{V}_N^1,\boldsymbol{P}_N^1}\sum_{i=1}^{M}\omega_{t,i}^{1,N}\ln\left(\frac{D_{t,i}^{1,N}}{C_{t,i}^{1,N}}\right)\\&\text{s.t. }\boldsymbol{V}_N^1(t,i)\leqslant N_{\max}\\&\quad i\notin\boldsymbol{\Lambda},\quad\forall i\in\boldsymbol{\Phi}\end{aligned}\tag{33}$$

暂不考虑 CCI 对于时间资源分配的影响，建立拉格朗日方程得到

$$\begin{aligned}\mathcal{L}\left(\lambda,\boldsymbol{V}_N^1\right)=&\sum_{i=1}^{M}\omega_{t,i}^{1,N}\ln\left(\frac{D_{t,i}^{1,N}}{B_{\text{tot}}\log_2\left(1+\dfrac{G_i^{1,N}P_{\text{tot}}}{N_0N_{\max}}\right)\boldsymbol{V}_N^1(t,i)}\right)\\&+\lambda\left(N_{\max}-\sum_{i=1}^{M}\boldsymbol{V}_N^1(t,i)\right)\end{aligned}\tag{34}$$

其中，λ 表示拉格朗日算子。对 $\boldsymbol{V}_N(t,i)$ 求偏导得到

$$\frac{\partial\mathcal{L}\left(\lambda,\boldsymbol{V}_N(t,i)\right)}{\partial\boldsymbol{V}_N(t,i)}=\frac{-\omega_{t,i}^{1,N}D_{t,i}^{1,N}}{B_{\text{tot}}\log_2\left(1+\dfrac{G_i^1P_{\text{tot}}}{N_0N_{\max}}\right)\boldsymbol{V}_N(t,i)}-\lambda\tag{35}$$

令偏导等于 0，得到最优化时间分配矩阵 $\boldsymbol{V}_N^{\text{opt}}(t,i)$ 满足

$$\boldsymbol{V}_N^{\text{opt}}(t,i)=\frac{-\omega_{t,i}^{1,N}D_{t,i}^{1,N}}{\lambda B_{\text{tot}}\log_2\left(1+\dfrac{G_i^{1,N}P_{\text{tot}}}{N_0N_{\max}}\right)}\tag{36}$$

令 $N_{\max}=\sum_{i=1}^{M}\boldsymbol{V}_N(t,i)$，计算拉格朗日算子

$$\lambda=\frac{-\sum_{i=1}^{M}\omega_{t,i}^{1,N}D_{t,i}^{1,N}}{\sum_{i=1}^{M}\boldsymbol{V}_N(t,i)B_{\text{tot}}\log_2\left(1+\dfrac{G_i^{1,\text{N}}P_{\text{tot}}}{N_0N_{\max}}\right)}\tag{37}$$

认为所有被服务用户都在所在小区中心位置，并且由于 LEO 卫星轨道高度较高，在仅考虑自由空间路径损耗的情况下，不同小区的信道增益 G_i^N 近似相等，则在平均功率分配方案下，不同小区的容量近似相等。进一步化简拉格朗日算子表达式为

$$\lambda=\frac{-\sum_{i=1}^{M}\omega_{t,i}^{1,N}D_{t,i}^{1,N}}{N_{\max}B_{\text{tot}}\log_2\left(1+\dfrac{G_i^{1,N}P_{\text{tot}}}{N_0N_{\max}}\right)}\tag{38}$$

将式(38)代入式(36)中，得到最优化时间分配矩阵 $\boldsymbol{V}_N^{\text{opt}}(t,i)$ 为

$$\boldsymbol{V}_N^{\text{opt}}(t,i)=\frac{\omega_{t,i}^{1,N}D_{t,i}^{1,N}}{\sum_{i=1}^{M}\omega_{t,i}^{1,N}D_{t,i}^{1,N}}N_{\max}\tag{39}$$

将 $\boldsymbol{V}_N(t,i)$ 取值范围与 CCI 干扰限制加以考虑，对 $\boldsymbol{V}_N^{\text{opt}}(t,i)$ 继续推导得到

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{V}_N^1(t,i)=\begin{cases}1,\boldsymbol{V}_N^{1\,\text{opt}}(t,i)\geqslant\eta\\0,\quad\text{其他}\end{cases}\\&\text{s.t. }0\leqslant\left|\boldsymbol{V}_N^1(t,i)\right|\leqslant N_{\max}\\&\quad i\notin\boldsymbol{\Lambda},\ \forall i\in\boldsymbol{\Phi}\end{aligned}\tag{40}$$

即经推导后得到时间分片 T_N 下 LEO 卫星 1 的动态时间资源分配矩阵 $\boldsymbol{V}_N^1(t,i)$ 为

$$\boldsymbol{V}_N^1(t,i)=\begin{cases}1, & \boldsymbol{V}_N^{1\,\mathrm{opt}}(t,i)\geqslant\eta_1\\ 0, & \text{其他}\end{cases}$$

$$\text{s.t. } \boldsymbol{V}_N^{1\,\mathrm{opt}}(t,i)=\frac{\omega_{t,i}^{1,N}D_{t,i}^{1,N}}{\sum_{i=1}^{M}\omega_{t,i}^{1,N}D_{t,i}^{1,N}}N_{\max} \tag{41}$$

$$0\leqslant\left|\boldsymbol{V}_N^1(t,i)\right|\leqslant N_{\max}$$

$$i\notin\Lambda_1,\quad\forall i\in\Phi_1$$

LEO 卫星 1 时间资源分配结束后，对 LEO 卫星 2 进行时间资源分配。为防止 LEO 卫星 2 对 LEO 卫星 1 的服务用户产生 CCI，LEO 卫星 2 的时间资源分配问题将附加格外的限制，即 LEO 卫星 2 所服务的小区不能与 LEO 卫星 1 服务的小区相同或者相邻。综上所述，LEO 卫星 2 的时间资源分配优化矩阵表示为

$$\boldsymbol{V}_N^2(t,j)=\begin{cases}1, & \boldsymbol{V}_N^{2\mathrm{opt}}(t,j)\geqslant\eta_2\\ 0, & \text{其他}\end{cases}$$

$$\text{s.t. } \boldsymbol{V}_N^{2\mathrm{opt}}(t,j)=\frac{\omega_{t,j}^{2,N}D_{t,j}^{2,N}}{\sum_{j=1}^{M}\omega_{t,j}^{2,N}D_{t,j}^{2,N}}N_{\max}$$

$$0\leqslant\left|\boldsymbol{V}_N^2(t,j)\right|\leqslant N_{\max} \tag{42}$$

$$\boldsymbol{V}_N^1(t,i)+\boldsymbol{V}_N^2(t,i)<2,\quad i\in\Omega_N$$

$$j\notin\left(\Lambda_1\cup\Lambda_2\right),\quad\forall j\in\Phi_2$$

式(41)与式(42)求解使用单向搜索算法，通过寻找最优服务小区集合，完成对时间资源分配矩阵的赋值。

2.2.3　动态功率资源分配

由于在动态时间资源分配的过程中，已经将 LEO 卫星间的干扰完全考虑并消除，所以多星动态功率资源分配可以看成多个独立的单星动态功率资源分配问题，即多星动态功率资源分配的最优解为

$$\boldsymbol{P}_N^{1\,\mathrm{opt}}(t,i)=\frac{1}{N_t}\left(P_{\mathrm{tot}}+\sum_{i\in\Phi_1}\frac{N_0}{G_i^1}\right)-\frac{N_0}{G_i^1} \tag{43}$$

$$\boldsymbol{P}_N^{2\mathrm{opt}}(t,j)=\frac{1}{N_t}\left(P_{\mathrm{tot}}+\sum_{j\in\Phi_2}\frac{N_0}{G_j^2}\right)-\frac{N_0}{G_j^2} \tag{44}$$

多星动态功率资源分配过程完全独立，可以使用算法 1 进行求解。

3　仿真分析

3.1　仿真参数

LEO 卫星长时多星跳波束场景下的仿真参数见表 1。

表 1　长时多星跳波束场景下的仿真参数

仿真参数	数值
轨道高度 h /km	600
子波束半径 r /km	5
单星覆盖总小区数 M /个	19
单星最大跳波束总数 $N_{\max}$ /个	4
多星覆盖重叠小区数 n /个	（同轨）4
	（异轨）3/10/19
载波频率 f /GHz	20
单星系统带宽 B_{tot} /MHz	400
单星总发射功率 P_{tot} /W	100
最大单波束功率 P_{sb} /W	30
时隙长度 T_{slot} /ms	10
时间分片总数/个	（同轨）10
	（异轨）5
初始业务需求总量 D /（Gbit·s^{-1}）	4
业务需求增量 D_{seg} /（Gbit·s^{-1}）	1.7
权重系数 $\{\omega_1,\omega_2,\omega_3,\omega_4,\omega_5\}$	[5 1 1 1 1]

3.2　仿真分析

3.2.1　长时同轨多星跳波束场景

首先针对长时同轨多星场景下负载均衡机制的性能进行仿真，如图 5 所示。可以看到，实线对应的是开启负载均衡的多星区域划分机制，LEO 卫星 1 与 LEO 卫星 2 均保持在 0.8 左右的平均卫星吞吐率。而虚线则对应关闭负载均衡的平均卫星吞吐率，其中 LEO 卫星 2 始终处于满负载状态，吞吐率保持为 1.0，同时 LEO 卫星 1 的平均卫星吞吐率处于 0.75 左右。这是由于在长时同轨多星的场景中，每个时间分片内 LEO 卫星 2 覆盖区域内都会进入新的未服务小区，而脱离 LEO 卫星 2 覆盖范围的小区将继续由 LEO 卫星 1 提供服务。相对而言，LEO 卫星 2 覆盖范围内的业务需求总量始终高于 LEO 卫星 1，造成多星之间存在较大的吞吐率差值。开启负载均衡后，多星架构通过对覆盖区域的小区进行服务分配，变相均衡了多星覆盖范围内的业务需求量差值，使多星的资源利用率相近。尤其在高业务需求总量的场景下，开启负载均衡的多星服务划分机制能够提高总体资源利用率。

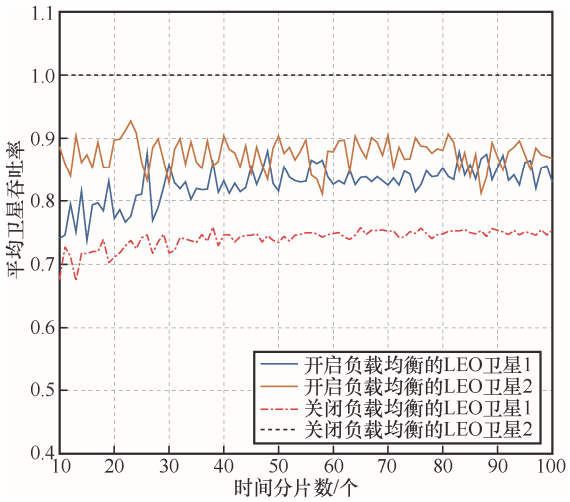


图 5　长时同轨多星场景负载均衡机制性能

3.2.2　长时异轨多星跳波束场景

针对长时异轨多星跳波束场景的仿真，认为 LEO 卫星 1 与 LEO 卫星 2 独立覆盖小区总数为 19 个，均处于运动过程中。并且时间分片 T_1 与 T_5 重叠区域小区数为 3 个，时间分片 T_2 与 T_4 重叠区域小区数为 10 个，时间分片 T_3 多星覆盖区域全重叠。图 6 与图 7 中给出了异轨多星在重叠小区数为 3 个时的系统容量分配与单星容量分配对比。当重叠小区数为 3 个时，多星实际覆盖总小区数为 35 个。由于该时间分片内 LEO 卫星 2 的覆盖区域内业务需求量更高，因此可以看到在基于负载均衡的重叠区域划分后，LEO 卫星 2 仅对其独立覆盖的区域提供服务，LEO 卫星 1 单独负责对重叠区域进行服务。

图 8 给出了长时异轨多星场景重叠过程中的卫星吞吐

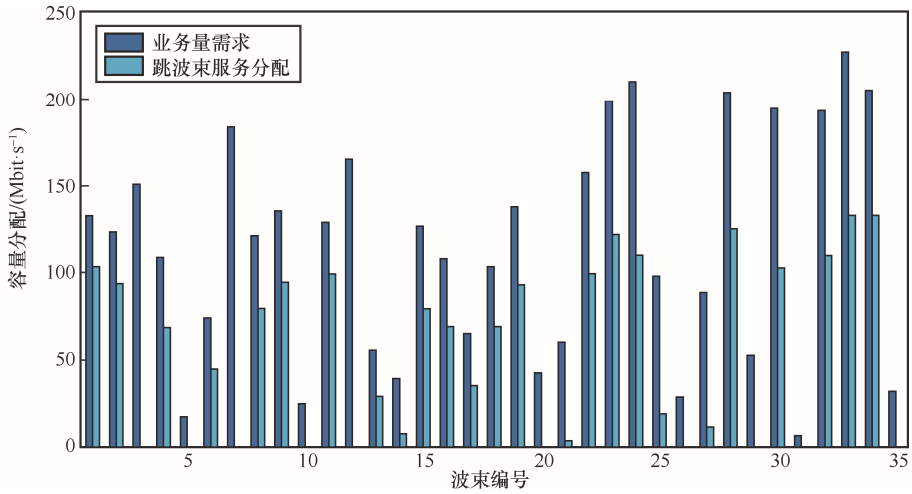


图 6　长时异轨多星场景重叠小区数为 3 个的系统容量分配

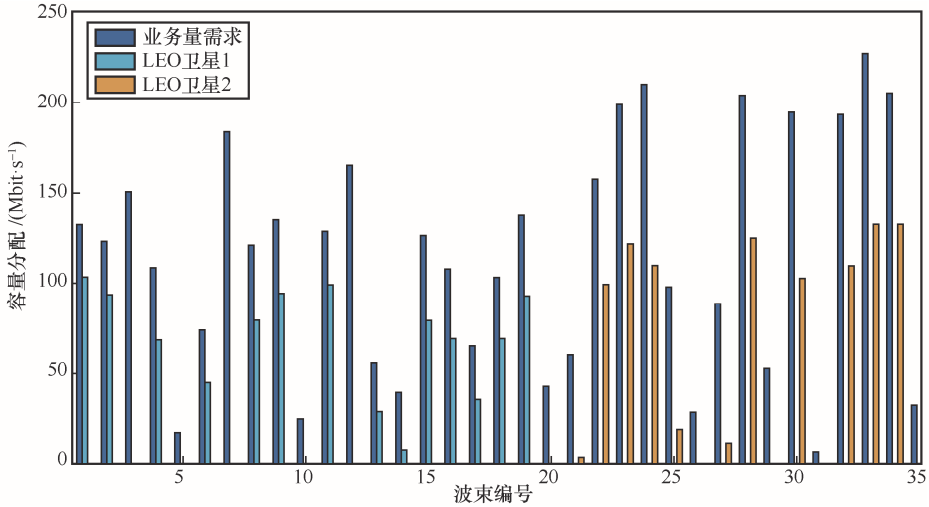


图 7　长时异轨多星场景重叠小区数为 3 个的单星容量分配

率。观察发现卫星的吞吐率随着多星覆盖重叠区域的增加而下降，其中，全重叠场景卫星吞吐率达到最低。在全重叠情况下，即时间分片 T_3 内，即使在业务需求总量大于多星理论最大系统容量和的情况下，多星也不能处于满负载状态。这是覆盖区域总数与 CCI 的限制，导致同一时隙内最多只能存在 7 个子波束同时服务，因此该时间分片内卫星的吞吐率下降最为严重。同时，由于负载均衡机制的存在，在非全重叠场景下，多星之间的吞吐率差值几乎为零。

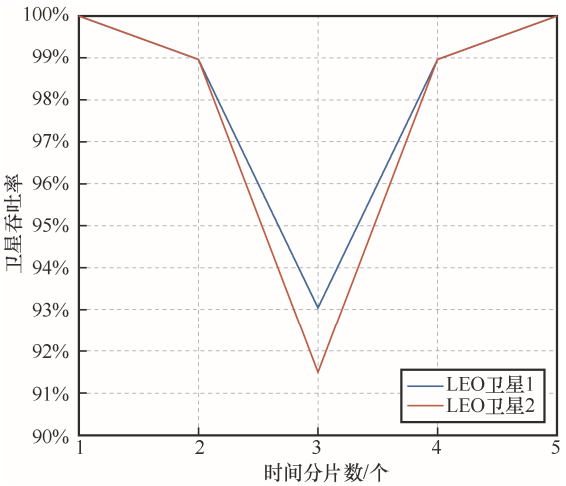


图 8　长时异轨多星场景重叠过程的卫星吞吐率

4　结束语

本文关注长时低轨卫星跳波束资源分配研究，在考虑星间干扰、负载均衡和星间资源分配优先级影响因素的情况下，以加权目标函数作为优化目标，对长时多星跳波束进行了资源分配算法设计。低轨卫星长时跳波束技术仍存在一定的研究空间：在分片计算方面，可以考虑新的时间分片计算准则；在动态过程中，可以增加覆盖范围内地面小区业务需求增量；对于小区权重系数的设置，也可以进一步进行研究以确定更优权重系数值。

参考文献：

[1] LI S P. A share service protection method for deterministic network in space-air-ground integrated network[C]//Proceedings of 2022 IEEE 4th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT). Piscataway: IEEE Press, 2022: 89-93.

[2] 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 2010 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop. Piscataway: IEEE Press, 2010: 248-255.

[3] JOLY F, KLUTH M. “Target 2 system architectural and design trageoffs,” in ESA DDSO Study[Z]. 2005.

[4] WHITEFIELD D, GOPAL R, ARNOLD S. Spaceway now and in the future: on-board IP packet switching satellte communication network[C]//Proceedings of MILCOM 2006 - 2006 IEEE Military Communications conference. Piscataway: IEEE Press, 2007: 1-7.

[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 2010 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop. Piscataway: IEEE Press, 2010: 248-255.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 李童, 姚如贵, 樊晔, 等. 动态跳波束策略中的自适应波束功率分配算法[J]. 空间电子技术, 2022, 19(5):42-47.
LI T, YAO R G, FAN Y, et al. Adaptive beam power allocation algorithm in dynamic beam hopping strategy[J]. Space Electronic Technology, 2022, 19(5):42-47.

[9] 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. Research on resource allocation algorithm based on beam hopping in LEO satellite network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

[10] MOKHTAR A, AZIZOGLU M. On the downlink throughput of a broadband LEO satellite network with hopping beams[J]. IEEE Communications Letters, 2000, 4(12): 390-393.

[11] 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 (VTC2021-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.

[12] FONSECA N J G, SOMBRIN J. Multi-beam reflector antenna

system combining beam hopping and size reduction of effectively used spots[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(2): 88-99.

[13] HU H L, ZHU J K. Performance evaluation of beam hopping communications scheme[C]//14th IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003. PIMRC. Piscataway: IEEE Press, 2004: 2470-2474.

[14] 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.

[15] TIAN F, HUANG L L, LIANG G, et al. An efficient resource allocation mechanism for beam-hopping based LEO satellite communication system[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.

[16] TANG J, BIAN D, LI G, et al. Resource Allocation for LEO Beam-hopping Satellites in A Spectrum Sharing Scenario[J]. IEEE Access, 2021, (9): 56468-56478.

[17] HU H, LUO 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.

[18] 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.

[19] KYRGIAZOS A, EVANS B, THOMPSON P. Smart gateways designs with time switched feeders and beam hopping user links[C]// Proceedings of 2016 8th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 14th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.

[20] ZHANG M T, WU C B, JIAO Y C, et al. Multi-beam reflector antenna architecture for beam-hopping and size reduction system[C]//Proceedings of 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-3.

[21] ROHDE C, WANSCH R, MOCKER G, et al. Beam-hopping over-the-air tests using DVB-S2X super-framing[C]//Proceedings of 36th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2018). London: IET, 2019: 1-7.

[22] 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.

[23] 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.

[24] 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.

[25] 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 (COMCAS). Piscataway: IEEE Press, 2021: 79-83.

[26] MEI W D, ZHANG R. Multi-beam multi-hop routing for intelligent reflecting surfaces aided massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(3): 1897-1912.

[27] 3GPP. Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks: TR 38.811 V15.4.0[S]. 2020.

[作者简介]



刘子祎（2001–），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，硕士，现就职于长光卫星技术服务有限公司，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。