



基于干扰感知的多星协同跳波束资源分配

胡金龙^{1,2,3}, 刘继红^{1,2,3}, 周一青^{1,2,3}, 曹欢^{1,2,3}, 刘子凡^{1,2,3}, 赵佳伟^{1,2,3}, 原进宏⁴

(1. 处理器芯片全国重点实验室, 中国科学院计算技术研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 移动计算与新型终端北京市重点实验室, 北京 100190;

4. 新南威尔士大学电气工程与通信学院, 新南威尔士州 悉尼 NSW2052)

摘要: 跳波束 (beam hopping, BH) 技术是解决低地球轨道 (low earth orbit, LEO) 卫星波束数量受限、增强系统覆盖能力的有效手段之一。现有研究通常考虑单颗 LEO 卫星的跳波束资源分配, 然而实际的 LEO 系统是由多个轨道上的多颗卫星协同进行覆盖, 现有研究忽略了卫星间的波束干扰, 容易导致系统吞吐量降低、服务质量下降。针对上述问题, 本文以最大化波位服务满意度 (beam service satisfaction, BSS) 为目标, 提出了一种基于干扰感知的 LEO 多星协同跳波束资源分配模型 (interference aware cooperative resource allocation for LEO with beam hopping, IARA-BH), 并提出了一种基于模拟退火的求解算法来得到多星协同跳波束资源分配方案 (multi satellite interference coordination based on simulated annealing algorithm, MSIC-SAA)。仿真实验表明, 相较于单星跳波束资源分配算法, MSIC-SAA 算法的 BSS 提升了 47.24%, 平均信号干扰噪声比 (signal to interference noise ratio, SINR) 提升了 27.40%, 同时系统吞吐量提升了 22.92%。

关键词: LEO 卫星; 多星协同; 跳波束; 干扰感知

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023161

Multi-satellite cooperative beam hopping resource allocation based on interference perception

HU Jinlong^{1,2,3}, LIU Jihong^{1,2,3}, ZHOU Yiqing^{1,2,3}, CAO Huan^{1,2,3},

LIU Zifan^{1,2,3}, ZHAO Jiawei^{1,2,3}, YUAN Jinhong⁴

1. State Key Lab of Processors, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Beijing 100190, China

4. School of Electrical Engineering and Telecommunications, University of New South Wales, Sydney NSW2052, Australia

Abstract: Beam hopping (BH) technology is one of effective ways to solve limitation of beam resources and enhance the system coverage ability of low earth orbit (LEO) satellite systems. Existing research typically considers beam hopping resource allocation for a single LEO satellite, however, the actual LEO system is covered by multiple satel-

收稿日期: 2023-05-05; 修回日期: 2023-08-09

通信作者: 周一青, zhouyiqing@ict.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2020YFB1808004)

Foundation Item: The National Key Research and Development Project of China (No.2020YFB1808004)



lites in multiple orbits, and existing research ignores beam interference between satellites, which can easily lead to a decrease in system throughput and service quality. To address these issues, this paper designs an interference aware cooperative resource allocation for LEO with beam hopping (IARA-BH), aiming to maximize the beam service satisfaction (BSS). A BH resource allocation scheme by multi satellite interference coordination based on simulated annealing algorithm (MSIC-SAA) is proposed to solve the optimization problem. Simulation experiments show that compared to beam hopping resource allocation schemes that only consider a single satellite, the BSS of the MSIC-SAA algorithm has been improved by 47.24%, the average signal to interference noise ratio (SINR) has been improved by 27.40%, and the system throughput has been improved by 22.92%.

Key words: LEO, beam hopping, multi-satellite cooperation, interference perception

0 引言

近年来,随着移动通信技术的飞速发展,通信网络的建设由 5G 地面网络向 6G 空天地一体网络快速演进。卫星通信网络以其广覆盖、大带宽的优势可作为地面通信系统的延伸,为传统地面移动通信难以覆盖或完全覆盖不到的区域,如海面、沙漠、空中等提供无线接入服务。卫星通信网络在未来 6G 全域通信网络中将扮演不可或缺的角色^[1-3]。

卫星通信网络按轨道类型划分,可分为地球同步轨道 (geostationary earth orbit, GEO) 卫星、中地球轨道 (medium earth orbit, MEO) 卫星和低地球轨道 (low earth orbit, LEO) 卫星。其中, GEO 卫星和 MEO 卫星具有平台承载能力强、覆盖范围广的优点,典型代表如美国的 ViaSat GEO 卫星、我国的天通 GEO 卫星以及美国的 O3b MEO 卫星等。ViaSat-2 卫星有数百个波束,更先进的 ViaSat-3 可达上千个波束^[4],仅 3 颗卫星即可近乎覆盖全球 (除南北极);而目前最先进的 Starlink LEO 星座单星包含 4 个相控阵天线,每个天线可生成 16 个点波束,共计 64 个波束,包含 48 个发波束,16 个收波束^[5]。因此,仅靠 LEO 单星的覆盖能力,难以完成对卫星可视区域内的无缝覆盖,Starlink 计划构建由 4.2 万颗低轨卫星组成的星座为全球区域提供高速互联网接入服务^[6]。同时,为增强 LEO 卫星系统的覆盖能力,领域内有学者提出在 LEO 卫星系统中采用跳波束 (beam hopping, BH) 技术^[7]。BH 技术早期用于 GEO 卫星^[8],

相对于传统静态的 GEO 卫星多波束覆盖方案,BH 技术是一种动态的时分复用技术,它可以持续监测用户需求,按需在时间和空间上灵活分配波束资源,例如采用单载波时分复用的方式使用同一个波束为不同波位 (将地面目标覆盖区域划分为若干个一定大小的单元,每个单元将会被一个波束服务,将这些单元定义为波位) 提供服务。

在实际系统中,目前已有基于跳波束技术的相关标准,如 DVB-S2X 标准^[9]。在学术领域,关于利用 BH 技术提升 GEO 卫星系统服务效率方面已有大量的研究,包括利用 BH 技术提升系统的吞吐量^[10]、提升公平性^[11]、降低时延^[12]等。与静态多波束卫星系统相比,采用 BH 技术的卫星在资源分配上具有更高的灵活性,可以达到更高的能效。然而, GEO 卫星服务区域相对固定,波束资源相对丰富,已有研究主要考虑单星跳波束技术,通过跳波束技术提升波束资源的利用率。此外,由于单颗 GEO 卫星的覆盖广,卫星之间距离远,现有研究未考虑卫星间的波束干扰问题。相比而言,在 LEO 卫星系统中,低轨卫星具有高速运动的特点,围绕地球运动速度可达约 7.2km/s,相比于 GEO 卫星相对稳定的区域覆盖环境,波束管理的难度更大。另外, LEO 单颗卫星的覆盖区域相对较小,通常需要多颗卫星协同覆盖一个区域,需要对多星的跳波束图案 (beam hopping map, BHM) 进行动态规划,来满足干扰控制的需求。因此,面向 GEO 卫星系统提出的单星 BH 技术无法直接应用于 LEO 卫星系统。

在 LEO 卫星系统中, 已有学者研究了 BH 技术。考虑单颗 LEO 卫星, 根据卫星的运动特性, 文献[7]将覆盖区域建模为一个矩形块, 并进一步划分为大小相等的矩形波束, 分析了 BH 设计的性能, 验证了 BH 在 LEO 卫星通信系统中的可行性。此外, 文献[13]考虑单颗多波束卫星服务多用户的通信模型, 使用信号平均衰减和自由空间传播模型定义信道向量, 并分别求解以最小化波位数量和最小化所需时隙为优化目标的波位聚合问题和跳波束方案, 为非固定波位的低轨卫星通信模型提供了设计思路。文献[14]设计了一个基于 BH 技术的 LEO 卫星系统, 根据实际流量需求分布, 利用贪婪算法将资源优先分配给需求高的终端节点, 灵活分配星载带宽和频率资源, 以提高系统吞吐量和星载资源利用率。文献[15]提出了多星协同的跳波束资源分配算法, 分为离线和在线两种场景, 以最大化吞吐量为目标进行波束资源分配。

综上所述, 已有研究考虑通过基于跳波束技术的无线资源分配来提升 LEO 卫星系统的性能。但是上述研究通常考虑了单颗 LEO 卫星的跳波束资源分配, 即一颗卫星服务一个地面区域的波束资源分配方案。但在实际系统中, LEO 卫星由于轨道高度低, 单星覆盖面积有限, 通常是由多颗卫星完成对特定区域的覆盖, 其他卫星波束的旁瓣电磁波信号可能对当前服务卫星波束的主瓣信号产生干扰, 现有方案仅考虑单颗卫星的 BH 资源分配而不考虑其他卫星的 BH 资源分配, 会导致网络干扰分布水平升高、系统服务质量下降。已有研究针对多星协同的跳波束资源分配方案, 以最大化吞吐量为目标, 会出现传输需求与实际资源分配不匹配的情况, 造成资源浪费和部分波位服务满意度低的情况。针对上述问题, 本文提出一种基于干扰感知的 LEO 多星协同跳波束资源分配 (interference aware cooperative resource allocation for LEO with beam hopping, IARA-BH) 模型, 首先分析 LEO 多星协同覆盖场景下地面用

户终端来自服务卫星和其他卫星的干扰情况, 在此基础上, 通过优化多颗卫星间的协同跳波束资源分配, 降低卫星间的波束干扰, 提升波位服务满意度和吞吐量。

本文的创新点主要体现在:

- 考虑实际 LEO 系统多星协同覆盖, 分析不同卫星、不同波束之间的干扰, 建立多星协同覆盖场景下的干扰计算模型, 在此基础上, 以提升波位服务满意度 (beam service satisfaction, BSS) 为目标, 建立了基于干扰感知的 LEO 多星协同跳波束资源分配问题分析模型 IARA-BH。
- 由于 IARA-BH 的优化问题模型是一个复杂度随天线数量增加呈指数级上升的 NP 困难 (NP-hard) 问题, 本文提出一种启发式的、基于模拟退火的多星干扰协同算法 (multi satellite interference coordination based on simulated annealing algorithm, MSIC-SAA), 求解复杂优化问题。
- 仿真实验表明, 相比较仅考虑单星的 LEO 跳波束资源分配算法, 本文提出的 MSIC-SAA 算法 BSS 提升了 47.24%, 平均 SINR 提升了 27.40%, 同时系统吞吐量提升了 22.92%。

1 系统模型

多星协同覆盖场景下的 LEO 卫星通信系统网络架构如图 1 所示, 定义目标覆盖区域为 S_{LEO} 颗卫星协同覆盖的范围, 进一步将目标覆盖区域均匀划分为多个单元, 即波位, 每个波位同一时刻只能被一颗 LEO 卫星的一个波束所服务。假设目标覆盖区域一共有 N_b 个波位, 其中在特定调度周期内卫星 s 服务 n_s 个波位, $s \in \{1, 2, \dots, S_{\text{LEO}}\}$, 记特定调度周期所有卫星服务的波位数总和为 N_b^S ,

$$N_b^S = \sum_{s=1}^{S_{\text{LEO}}} n_s。$$

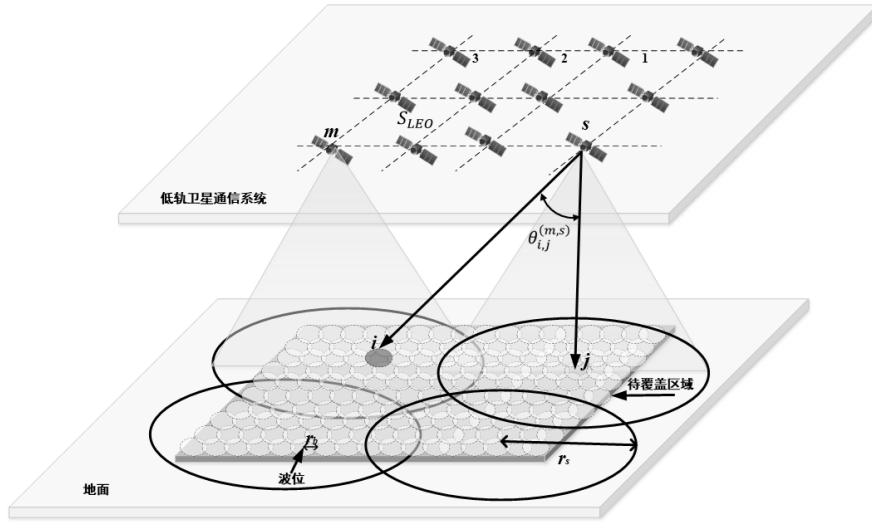


图1 多星协同跳波束

每颗LEO卫星都配备相控阵天线用于产生多个波束,可以在一段时间内将一个波束聚焦在一个波位上。每颗卫星有 K 个波束可以调度,波束编号为 $k=1,2,3,\dots,K$ 。假设LEO卫星的覆盖区域为一个半径为 r_s 的圆,而一个波束的覆盖范围为一个半径为 r_b 的圆。LEO卫星在一个较短的时间段内,覆盖区域近似认为是固定的。

假设地面用户终端的位置随机,且传输需求服从高斯分布。考虑多颗LEO卫星的波束间干扰,以最大化波位服务满意度为目标,研究 S_{LEO} 颗卫星协同跳波束资源分配问题是本文的重点。

令 $b_{s,j}$ 代表卫星 s 所服务的第 j 个波位, $P_{i,j}^{(m,s)}$ 代表处于波位 $b_{s,j}$ 的地面用户终端接收到来自卫星 m 服务波位 $b_{m,i}$ 的波束的信号功率。该终端不只接收到来自卫星 s 对波位 $b_{s,j}$ 的服务波束主瓣的有用信号 $P_{i,j}^{(s,s)}$,还会接收来自卫星 s 服务其他波位 $b_{s,i}$ 的波束旁瓣干扰信号 $P_{i,j}^{(s,s)}$, $i,j \in \{1,2,3,\dots,n_s\}$, $i \neq j$,同一时刻卫星 m 服务其波位的波束旁瓣干扰信号 $P_{i,j}^{(m,s)}$, $s,m \in \{1,2,3,\dots,S_{LEO}\}$, $m \neq s$, $i \in \{1,2,3,\dots,n_m\}$ 。

首先考虑不同卫星的干扰情况 $P_{i,j}^{(m,s)}$,同一颗卫星的干扰情况是其特例。 $P_{i,j}^{(m,s)}$ 计算表达式为^[16]:

$$P_{i,j}^{(m,s)} = \text{EIRP} + G_{\text{t_norm}}(\theta_{i,j}^{(m,s)}) - \text{FSL}_j^{(m,s)} + G_r \quad (1)$$

$i \in \{1,2,\dots,n_m\}, j \in \{1,2,\dots,n_s\}, s,m \in \{1,2,\dots,S_{LEO}\}$

其中, EIRP 为卫星服务波束发射端的等效全向辐射功率; G_r 是地面用户终端的接收天线增益; $\theta_{i,j}^{(m,s)}$ 如图1所示,是两个波位点 $b_{m,i}$ 、 $b_{s,j}$ 与卫星 m 分别连线后,两条线间的夹角,代表卫星 m 服务波位 $b_{m,i}$ 的波束在波位 $b_{s,j}$ 处的夹角; $G_{\text{t_norm}}(\theta_{i,j}^{(m,s)})$ 为卫星 m 服务波位 $b_{m,i}$ 的波束天线在卫星 s 波位 $b_{s,j}$ 的夹角 $\theta_{i,j}^{(m,s)}$ 处的发射天线归一化增益,表达式如下:

$$G_{\text{t_norm}}(\theta_{i,j}^{(m,s)}) = \begin{cases} 1, & \theta_{i,j}^{(m,s)} = 0 \\ 4 \left| \frac{J_1(ka \sin \theta_{i,j}^{(m,s)})}{ka \sin \theta_{i,j}^{(m,s)}} \right|^2, & \theta_{i,j}^{(m,s)} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $J_1(x)$ 是一阶贝塞尔函数, a 是天线半径,单位为m, $k=2\pi f/c$ 是波数, c 是真空中光速,单位为m/s。

$\text{FSL}_j^{(m,s)}$ 是卫星 m 到卫星 s 服务的波位 $b_{s,j}$ 的自由空间损耗^[17]:

$$\text{FSL}_j^{(m,s)} = 32.4 + 20 \lg f + 20 \lg d_j^{(m,s)} \quad (3)$$

其中, f 是工作频率,单位为MHz, $d_j^{(m,s)}$ 代表卫星 m 到卫星 s 服务的波位 $b_{s,j}$ 的距离,单位为km。

求解同一颗卫星不同服务波束间的干扰情况时,将式(1)中的 m 设置为 s 即可。此时式(1)中的 $P_{i,j}^{(m,s)}$ 为 $P_{i,j}^{(s,s)}$,即卫星 s 服务波位 $b_{s,j}$ 时的波

束旁瓣信号对波位 $b_{s,j}$ 产生的辐射干扰, 其中 $\theta_{i,j}^{(s,s)}$ 是卫星 s 的波位 $b_{s,i}$ 与卫星 s 的波位 $b_{s,j}$ 分别与卫星 s 连线后, 两条线间的夹角。FSL $_{j,j}^{(s,s)}$ 代表卫星 s 到其所覆盖的波位 $b_{s,j}$ 的自由空间损耗。

接下来根据接收功率, 建立干扰模型。定义统一的坐标系为 J2000, 假设卫星 m 的三维坐标为 (x_m, y_m, z_m) , x_m 、 y_m 、 z_m 代表在 J2000 坐标系下的 x 轴、 y 轴、 z 轴的坐标。卫星 m 波位 $b_{m,i}$ 坐标为 (Ex_i^m, Ey_i^m, Ez_i^m) , $i \in \{1, 2, 3, \dots, n_m\}$, $m \in \{1, 2, 3, \dots, S_{\text{LEO}}\}$, Ex_i^m 、 Ey_i^m 、 Ez_i^m 代表在 J2000 坐标系下的 x 轴、 y 轴、 z 轴的坐标。卫星 s 的波位 $b_{s,j}$ 的坐标为 (Ex_j^s, Ey_j^s, Ez_j^s) , 其中 $j \in \{1, 2, 3, \dots, n_s\}$ 。假设在某时刻, 卫星 m 的波位 $b_{m,i}$ 和卫星 s 的波位 $b_{s,j}$ 均被分配了波束。那么 $b_{m,i}$ 波位的服务波束在波位 $b_{s,j}$ 处的夹角 $\theta_{i,j}^{(m,s)}$ 可以根据波位 $b_{m,i}$ 、波位 $b_{s,j}$ 及服务波位 $b_{m,i}$ 的卫星 m 的坐标计算:

$$\begin{aligned} \theta_{i,j}^{(m,s)} = \cos^{-1} & \left(\left((Ex_i^m - x_m)(Ex_j^s - x_m) + \right. \right. \\ & (Ey_i^m - y_m)(Ey_j^s - y_m) + \\ & \left. \left. (Ez_i^m - z_m)(Ez_j^s - z_m) \right) / d_i^{(m,m)} d_j^{(m,s)} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

已知 $\theta_{i,j}^{(m,s)}$, 可以通过式 (2) 计算出 $G_{\text{t_norm}}(\theta_{i,j}^{(m,s)})$ 。进一步地, 波位 $b_{s,j}$ 与卫星 m 的距离 $d_j^{(m,s)}$ 可以由式 (5) 计算:

$$d_j^{(m,s)} = \sqrt{(Ex_j^s - x_m)^2 + (Ey_j^s - y_m)^2 + (Ez_j^s - z_m)^2} \quad (5)$$

根据 $d_j^{(m,s)}$ 和工作频率 f , 可由式 (3) 计算出 FSL $_{j,j}^{(m,s)}$ 。已知 FSL $_{j,j}^{(m,s)}$ 和 $G_{\text{t_norm}}(\theta_{i,j}^{(m,s)})$, 给定 EIRP、 G_r , 可以利用式 (1) 计算 $P_{i,j}^{(m,s)}$ 。

当计算同一颗卫星不同波束间的干扰时, 需要求出 $\theta_{i,j}^{(s,s)}$, 可将式 (4) 中卫星 m 的坐标换成卫星 s 的坐标 (x_s, y_s, z_s) , 波位 $b_{m,i}$ 的坐标换成 $b_{s,i}$ 的坐标。式 (3) 中的 FSL $_{j,j}^{(s,s)}$ 中的参数 $d_j^{(s,s)}$ 的计算可参照式 (5), 将其中的卫星坐标改为卫星 s 的坐标 (x_s, y_s, z_s) 即可。

为了计算卫星 s 在波位 $b_{s,j}$ 处的干扰, 还需进

一步确定当前调度周期系统中被 S_{LEO} 颗卫星服务的所有波位的位置。根据 LEO 卫星通信协议标准^[14], 采用时分复用技术将 T_{tot} 时间段划为多个调度周期, 调度周期的编号为 $t = \{1, 2, 3, \dots, T_{\text{slot}}\}$ 。在每个调度周期 t , 每颗卫星有 K 个波束可以调度。令 $\Omega_{j,t}^{(s)}$ 代表在第 t 调度周期内卫星 s 的波位 $b_{s,j}$ 是否被分配波束, 如果被分配波束, $\Omega_{j,t}^{(s)} = 1$, 否则 $\Omega_{j,t}^{(s)} = 0$ 。令 $I_{j,t}^{(s,s)}$ 代表在第 t 调度周期内卫星 s 在波位 $b_{s,j}$ 受到的来自卫星 s 其他波束的干扰, 其表达式为:

$$\begin{aligned} I_{j,t}^{(s,s)} &= \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n_s} P_{i,j}^{(s,s)} \Omega_{i,t}^{(s)} \Omega_{j,t}^{(s)}, \\ s &\in \{1, 2, \dots, S_{\text{LEO}}\}, t \in \{1, 2, \dots, T_{\text{slot}}\} \end{aligned} \quad (6)$$

可见, 干扰值 $I_{j,t}^{(s,s)}$ 与卫星 s 的跳波束资源在时域上的分配策略相关, 即与式 (6) 中 $\Omega_{j,t}^{(s)}$ 、 $\Omega_{i,t}^{(s)}$ 取 0 或者 1 相关。

类似地, 令 $I_{j,t}^{(s,\text{other})}$ 代表在第 t 个调度周期内卫星 s 在波位 $b_{s,j}$ 受到的来自所有其他卫星服务波束的干扰, 其表达式为:

$$I_{j,t}^{(s,\text{other})} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq s}}^{S_{\text{LEO}}} P_{i,j}^{(m,s)} \Omega_{i,t}^{(m)} \Omega_{j,t}^{(s)}, s = 1, 2, 3, \dots, S_{\text{LEO}} \quad (7)$$

干扰功率与其他卫星的 BHM 相关, 即与 $\Omega_{i,t}^{(m)}$ 及 $\Omega_{j,t}^{(s)}$ 的取值相关。波位 $b_{s,j}$ 所受的总的干扰为:

$$\begin{aligned} I_{j,t}^{(s,\text{Tot})} &= I_{j,t}^{(s,s)} + I_{j,t}^{(s,\text{other})}, \\ s &\in \{1, 2, \dots, S_{\text{LEO}}\}, t \in \{1, 2, \dots, T_{\text{slot}}\} \end{aligned} \quad (8)$$

基于此可计算波位 $b_{s,j}$ 的 SIR 为:

$$S_{j,t}^{(s)} = \frac{P_{j,j}^{(s,s)} \Omega_{j,t}^{(s)}}{I_{j,t}^{(s,\text{Tot})}} \quad (9)$$

进一步可计算波位 $b_{s,j}$ 的 SINR 为:

$$\text{SINR}_{j,t}^{(s)} = \frac{P_{j,j}^{(s,s)} \Omega_{j,t}^{(s)}}{I_{j,t}^{(s,\text{Tot})} + \sigma^2} \quad (10)$$

其中, σ^2 为噪声功率。给定系统带宽 W , 根据香农公式可计算出波束 $b_{s,j}$ 的传输容量为:

$$C_{j,t}^{(s)} = W \cdot \log_2(1 + \text{SINR}_{j,t}^{(s)}) \quad (11)$$



2 基于干扰感知的 LEO 多星协同跳波束资源分配优化问题建模

假设卫星 s 的波位 $b_{s,j}$ 在时间段 T_{tot} 的传输需求为 $Q_{j,T_{tot}}^{(s)}, j \in \{1, 2, \dots, n_s\}$, 根据跳波束资源分配方案, 设 t 个调度周期内波位 $b_{s,j}$ 被服务的总吞吐量为:

$$Th_{j,t}^{(s)} = C_{j,t}^{(s)} + Th_{j,t-1}^{(s)}, \quad t \in \{1, 2, \dots, T_{slot}\}, j \in \{1, 2, \dots, n_s\}, s \in \{1, 2, \dots, S_{LEO}\} \quad (12)$$

式中, $Th_{j,t}^{(s)}$ 表示 t 个调度周期内波位 $b_{s,j}$ 被服务的总吞吐量, $C_{j,t}^{(s)}$ 表示第 t 个调度周期波位 $b_{s,j}$ 的信道容量。

为评价跳波束资源分配效能, 本文参考文献[18]提出了波位服务满意度 BSS 的概念, BSS 是波位传输需求和波位实际分配资源匹配程度的评价函数, 对于 LEO 卫星系统, BSS 旨在达到以下三个目标:

(a) BSS 可以衡量所有波位传输需求和实际分配资源的匹配程度;

(b) 在 BSS 评价标准下, 资源优先分配给“饥饿”程度较高的波位;

(c) BSS 取值在 $[0, 1]$ 之间, $BSS=1$ 代表 $Th_{j,t}^{(s)} = Q_{j,T_{tot}}^{(s)}, t \leq T_{slot}, \forall j \in \{1, 2, \dots, n_s\}, \forall s \in \{1, 2, \dots, S_{LEO}\}$, 即第 t 个调度周期结束时所有波位的传输吞吐量和波位传输需求都完全匹配。

为达到目标 (a), 定义 $c_{j,t}^s$ 表示波位 $b_{s,j}$ 在第 t 个调度周期结束时的传输需求不满足度, 该指标综合考虑了剩余传输需求、波位累计吞吐量与总传输需求比值对波位服务质量的影响, 其计算公式如下:

$$c_{j,t}^s = \frac{Th_{j,t}^{(s)}}{Q_{j,T_{tot}}^{(s)}} + j(Th_{j,t}^{(s)} - Q_{j,T_{tot}}^{(s)}) \quad (13)$$

式中虚数 $j = \sqrt{-1}$ 。

为达到目标 (b), 波束优先服务“饥饿”程度较高的波位, 提高 $c_{j,t}^s$ 的实数域所占权重, 对于

$Th_{j,t}^{(s)} < Q_{j,T_{tot}}^{(s)}$ 的波位, 进行 $c_{j,t}^s$ 的实数域转换:

$$\text{Re}\{c_{j,t}^s\} = 1 - \frac{1}{\text{Re}\{c_{j,t}^s\}} \quad (14)$$

为达到目标 (c), 对 $c_{j,t}^s$ 做归一化处理, 公式如下:

$$|c_{j,t}^s| = 1 - e^{-|c_{j,t}^s|} \quad (15)$$

对所有波位的服务满意度情况做均值处理, 得到 BSS 的计算公式如下:

$$BSS_t = 1 - \frac{1}{N_b} \sum_{s=1}^{S_{LEO}} \sum_{j=1}^{n_s} |c_{j,t}^s|^3 \quad (16)$$

在以上模型建立和指标定义基础上, 以最大化 LEO 卫星系统波位服务满意度为目标, 结合跳波束技术设计多星协同覆盖场景下的波束资源分配方案, 可以描述为以下优化问题:

$$\max BSS_t \quad (17)$$

$$\sum_{s=1}^{S_{LEO}} \Omega_{b,t}^{(s)} \leq 1, \forall b \in \{1, 2, \dots, N_b\} \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^{n_s} \Omega_{j,t}^{(s)} \leq K \quad (19)$$

$$j \in \{1, 2, \dots, n_s\}, s \in \{1, 2, \dots, S_{LEO}\} \quad (20)$$

上述优化问题随着低轨卫星数量和所配置波束数量的增加, 计算复杂度呈指数级上升, 该优化问题是一个 NP-hard 问题, 需要研究启发式算法求取多星协同跳波束资源分配方案。

3 基于模拟退火的多星干扰协同跳波束资源分配求解算法

为了解决上述优化问题。本文提出了一种启发式算法 MSIC-SAA, 以模拟退火的方式对该问题进行求解。开始求解优化问题前, 首先将目标覆盖区域内的每个服务卫星进行编号, 为每个波位选取距离最近的卫星作为服务卫星, 同时生成每颗卫星的服务波位集合。在产生第一个调度周期的跳波束方案时, 首先遍历所有卫星, 为每颗卫星随机选取和波束数量相等的波位, 生成当前调度周期的初始跳波束方案 $\Omega_{init,1}^{S_{tot}}$, 并将其作为当

前跳波束方案 $\Omega_{now,1}^{S_{tot}}$ ；之后对当前跳波束资源分配方案进行随机修改，产生新的跳波束方案 $\Omega_{new,1}^{S_{tot}}$ ；以波位服务满意度为评价函数，计算采用新的跳波束方案 $\Omega_{new,1}^{S_{tot}}$ 之后的系统能量，系统能量计算方法为：根据式（12）计算采用新跳波束方案后的各波位吞吐量 $Th_i^{(S_{tot})}$ ，并计算系统 t 个调度周期内的总吞吐量 $Th_{tot,t}$ ，根据各波位吞吐量 $Th_i^{(S_{tot})}$ 和各波位传输需求 $Th_i^{(S_{tot})}$ 计算 BSS_t ，对 BSS_t 乘系数 c_1 再加上 $Th_{tot,t}$ 乘系数 c_2 作为系统能量。系统能量越低说明解 $\Omega_{new,1}^{S_{tot}}$ 越接近最优解；计算新跳波束方案 $\Omega_{new,1}^{S_{tot}}$ 和当前跳波束方案 $\Omega_{now,1}^{S_{tot}}$ 的能量差，以 Metropolis 准则判断是否接受新解为当前解；持续随机修改当前跳波束方案、计算系统能量，并在上述过程中逐渐降低温度，以找出优于当前跳波束方案的新跳波束方案，直至温度降低至阈值，将最终跳波束方案 $\Omega_{now,1}^{S_{tot}}$ 作为 IARA-BH 问题当前调度周期的解。

完成一个调度周期的跳波束方案之后，根据跳波束方案对所有波位的传输需求进行更新，然后重复以上求解过程，进行后续调度周期的跳波束方案 $\Omega_t^{(S_{tot})}$ 计算。上述过程可以通过基于模拟退火的多星干扰协调算法（算法 1）及基于模拟退火的跳波束方案能量计算方法（算法 2）来实现。

算法 1 基于模拟退火的多星干扰协调算法

输入 卫星发射机天线参数，地面终端接收机天线参数，系统带宽 W ，工作频率，所有波位位置 (Ex_i, Ey_i, Ez_i) 及所有波位传输需求 $Q_{j,T_{tot}}^{(s)}$ 集合，所有卫星位置集合 $(x_s, y_s, z_s), s \in \{1, 2, \dots, S_{LEO}\}$

输出 每一调度周期的所有卫星波位选择方案 $\Omega_{tot}^{(S_{tot})}, s \in \{1, 2, \dots, S_{LEO}\}, T_{tot} = \{1, 2, \dots, T_{slot}\}$

初始化 将卫星编号为 $\{1, 2, 3, \dots, S_{LEO}\}$ ，

for $t = 1$ to T_{slot} do

for $s = 1$ to S_{LEO} do

$\Omega_{t,init}^{(s)} = \text{get_random}(K, n_s)$ //从卫星 s 的

波位中随机选取 K 个波位作为其初始

波束分配方案

$\Omega_{t,init}^{(S_{tot})} \leftarrow \Omega_{t,init}^{(s)}$ //将其加入初始所有卫星的波束分配方案

end

$\Omega_{t,now}^{(S_{tot})} = \Omega_{t,init}^{(S_{tot})}$ //将当前所有卫星波位选择方案赋值

$E_{now} = \text{cal_energy}(\Omega_{t,init}^{(S_{tot})})$ //调用算法 2 计算能量 E_{now}

$T=1$ //设定系统初始温度

while $T > 10^{-7}$ do

$s, j = \text{get_random}(1, \Omega_{t,now}^{(S_{tot})})$ //在 $\Omega_{t,now}^{(S_{tot})}$ 中

随机选出一颗卫星 s 的一个波位 j

$\Omega_{t,now}^{(S_{tot})} = \Omega_{t,now}^{(S_{tot})} \rightarrow \Omega_{j,t}^{(s)}$ //将波位 j 从解中去除

$i = \text{get_random}(1, \Omega_{t,tot}^{(S_{tot})} - \Omega_{t,now}^{(S_{tot})})$ //从未选中的波位中随机选取波位 i

$\Omega_{j,t}^{(s)} = 0, \Omega_{i,t}^{(s)} = 1$ //用波位 i 替代波位 j

$\Omega_{t,new}^{(S_{tot})} = \Omega_{t,now}^{(S_{tot})} \leftarrow \Omega_{i,t}^{(s)}$ //生成新的波位选择方案

$E_{new} = \text{cal_energy}(\Omega_{t,new}^{(S_{tot})})$ //调用算法 2 计算能量 E_{new}

if $E_{new} < E_{now}$ do

$\Omega_{t,now}^{(S_{tot})} = \Omega_{t,new}^{(S_{tot})}, E_{now} = E_{new}$ //替换当前解

else if $p > e^{\frac{E_{new} - E_{now}}{T}}$ //根据 Metropolis 准则判定接受新解

$\Omega_{t,now}^{(S_{tot})} = \Omega_{t,new}^{(S_{tot})}, E_{now} = E_{new}$

end

$T = T * 0.97$ //降低系统当前温度

end

根据当前波位选择方案 $\Omega_{t,now}^{(S_{tot})}$ 计算选中波位的有用功率和干扰功率，依据式（10）、式（11）、式（12）计算信道容量和波位吞吐量，更新波位剩余传输需求 $Q_{j,need}^{(s,t)} = Q_{j,need}^{(s,t-1)} - C_{j,t}^{(s)} * h$ ，式中 h 为调度周期时长

end



输出每一调度周期的所有卫星跳波束资源分配方案 $\Omega_{t_{tot}}^{(S_{tot})}$

算法2 基于模拟退火的跳波束方案能量计算

输入 t 时刻卫星波位选择方案 $\Omega_t^{(S_{tot})}$, 波位服务需求 $Q_t^{(S_{tot})}$

输出 采用该方案后的系统能量 E

for $s=1$ to S_{LEO} do

for $i=1$ to n_s and $\Omega_{i,t}^{(s)}=1$ do

$P_{i,i}^{(s,s)} = \text{cal_rx_power}(s, b_{s,i}, b_{s,i})$ //由式 (1)

计算波位 $b_{s,i}$ 的功率

for $j=1$ to n_s and $\Omega_{j,t}^{(s)}=1$ do

$I_{i,j}^{(s,s)} = \text{cal_rx_power}(s, b_{s,i}, b_{s,j}), j \neq i$ //计

算波位 $b_{s,i}$ 对波位 $b_{s,j}$ 干扰

end

for $m=1$ to S_{LEO} and $m \neq s$ do

for $j=1$ to n_m and $\Omega_{j,t}^{(m)}=1$ do

$I_{i,j}^{(s,m)} = \text{cal_rx_power}(s, b_{s,i}, b_{m,j})$ //计算

波位 $b_{s,i}$ 对波位 $b_{m,j}$ 干扰

end

end

end

end

for $s=1$ to S_{LEO} do

for $i=1$ to n_s and $\Omega_{i,t}^{(s)}=1$ do

$I_{i,t}^{(s,tot)} = I_{i,t}^{(s,s)} + I_{i,t}^{(s,other)}$ //计算总干扰

$SINR_{i,t}^{(s)} = \text{cal_sinr}(P_{i,i}^{(s,s)}, I_{i,t}^{(s,tot)})$ //根据式

(10) 计算 SINR

$C_{i,t}^{(s)} = \text{cal_capacity}(SINR_{i,t}^{(s)}, BW)$ //根据式

(11) 计算信道容量

$Th_{i,t}^{(s)} = \text{cal_throughout}(C_{i,t}^{(s)}, Th_{i,t-1}^{(s)})$ //根据

信道容量和剩余数据传输需求计算吞吐量

end

end

$Th_{tot,t} = \sum_{s=1}^{S_{LEO}} \sum_{i=1}^{n_s} (Th_{i,t}^{(s)} - Th_{i,t-1}^{(s)})$ //计算 t 调度

周期内系统总吞吐量

$bss_t = \text{cal_bss}(Th_t^{(S_{tot})}, Q_t^{(S_{tot})})$ //计算 t 调度周期的 BSS 值

$E = c_1 * bss_t + c_2 * Th_{tot,t}$ //计算能量, c_1 和 c_2 为设定参数

return E

4 仿真分析

为验证 MSIC-SAA 算法性能,本文采用 3GPP TR38.821 标准^[4]中的系统级仿真参数配置和典型 Walker Delta 星座构型进行仿真,选取轨道高度为 550 km 的单层轨道面,轨道数量为 72 个,每个轨道的卫星数量为 22 颗,卫星的覆盖半径为 573.5 km^[19],每颗卫星配备 48 个波束。单个波束的覆盖半径为 19.208 km。卫星天线数据参考 3GPP TR38.811 标准^[20]和 3GPP TR38.821 标准^[4]给出的卫星通信系统仿真参数进行设置,各项系统仿真参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数

参数	数值
系统总带宽	100 MHz
工作频率	20 GHz
卫星轨道高度	550 km
等效全向辐射功率	4 dBW/MHz
卫星发射天线增益图	Section 6.4.1 in 3GPP TR38.811
地面天线接收增益	39.7 dBi
半波束角	2°
点波束半径	19.2 km
卫星发射天线最大增益	38.5 dBi
卫星个数	4
区域总半径	573.5 km
波位个数	1938
单颗卫星的波束个数	48
调度周期时长	60 ms
调度周期数	501

其中,卫星天线参数参考 3GPP TR38.821 中 600 km 轨道高度 LEO 卫星的 Ka 频段参数,地面用户终端接收天线参考了 Ka 频段 VSAT 站的天线参数。首先,根据式 (2) 可以计算得到 LEO

卫星天线在不同辐射角度的增益, 卫星波束辐射增益如图 2 所示。可以看出, 当波束间夹角为 0° 时, 卫星天线辐射增益最大, 随着波束间的夹角逐渐增大, 卫星的天线辐射增益以指数级减少。可见当地面两个点距离较近时, 相互之间的干扰会比较大。已知卫星天线辐射增益后, 可以计算出不同波位受到的其他波位服务波束的干扰。

多星协同覆盖目标区域如图 3 所示, 目标区域为北纬 25° 至北纬 35° 、东经 100° 至东经 115° 的矩形区域。选取目标区域上空可视范围的 4 颗 LEO 卫星作为服务卫星, 即由这 4 颗 LEO 卫星协同覆盖这个区域。为了实现全覆盖, 不同卫星的覆盖区域存在重叠。图 3 中每个大圆代表一颗卫星的覆盖区域, 半径为 573.5 km , 在每颗卫星的覆盖区域内分布着多个波位, 波位的半径为 19.2 km 。

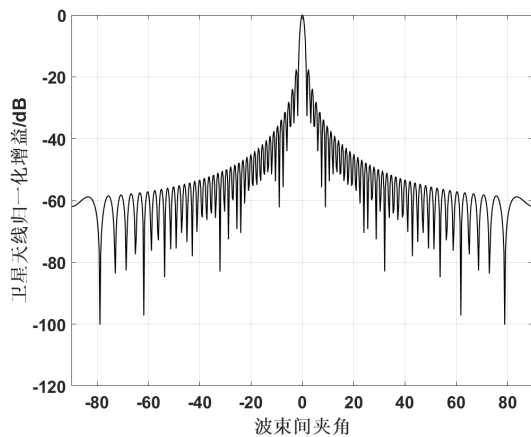


图 2 卫星天线辐射增益图

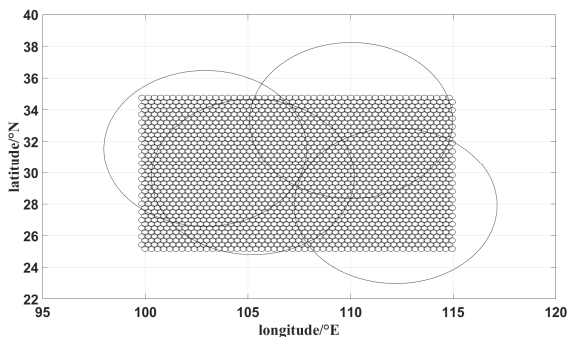


图 3 多星协同覆盖目标区域

图 3 中 x 轴为经度, y 轴为纬度, 小圆代表服务区域内划分的波位, 共有 1938 个波位, 每个波位只可由一颗卫星的一个波束进行服务, 卫星重叠覆盖范围内的波位选取距离其最近的卫星接入。给定仿真时间段内每个波位中用户对数据传输需求范围为 $0 \sim 5000 \text{ Mbit}$, 服从高斯分布。不同波位处用户的传输需求如图 4 所示。

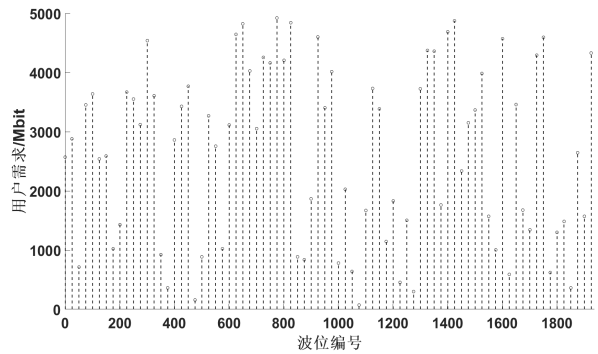


图 4 不同波位点处用户的传输需求

如图 4 所示, 每个波位点上随机分布着不同数量的用户申请通信服务, 因此形成了波位上的不同速率的用户需求, 根据不同波位的用户需求, 求解优化问题 (17) 可以得到 $\Omega_{j,t}^{(m)}$ 和 $\Omega_{j,t}^{(s)}$, 已知 $\Omega_{j,t}^{(m)}$ 和 $\Omega_{j,t}^{(s)}$ 情况下可以根据式 (9) 和式 (10) 计算得到波位的 SIR 和 SINR。

下面对本文所提算法与 POLL (轮询) 算法、单星跳波束资源分配 (non consider interference, NCI) 算法^[14]的实施效果进行对比。

3 种算法的波位服务满意度 BSS 对比如图 5 所示。MSIC-SAA 算法的 BSS 明显优于其他两种算法。其中 POLL 算法的 BSS 为 0.4544, NCI 算法的 BSS 为 0.4640, MSIC-SAA 算法在考虑多星协同波束间干扰的基础上以最大化 BSS 为目标, 在相同配置下 BSS 可以达到 0.6832, 较 POLL 算法提升 50.35%, 较 NCI 算法提升 47.24%。

3 种算法的 SINR CDF 曲线如图 6 所示。MSIC-SAA 算法在跳波束过程中, 选取波位时考虑了多颗卫星之间的波束干扰, 因此 SINR 相较另外两



种方案有较大提升。图 6 中 POLL 方案的平均 SINR 为 10.154 dB, NCI 算法的平均 SINR 为 11.466 dB, MSIC-SAA 算法的平均 SINR 为 14.608 dB, 相比 POLL 算法提高了 43.86%, 相比 NCI 算法提高了 27.40%。

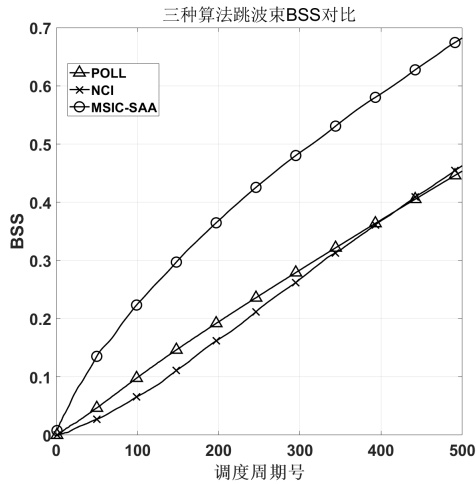


图 5 3 种算法的 BSS 对比曲线

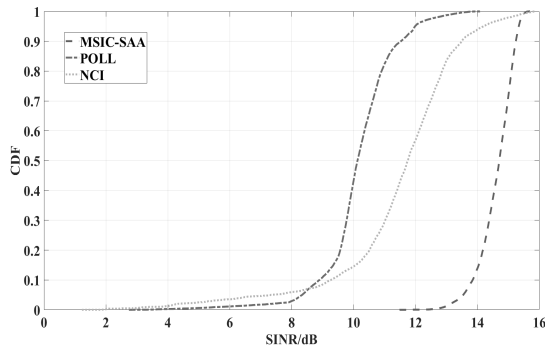


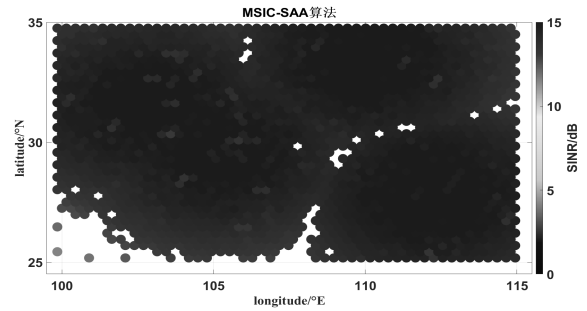
图 6 3 种算法的 SINR CDF 曲线

3 种算法的波位平均 SINR 分布如图 7 所示, 图 7 中 x 轴为东经经度, y 轴为北纬纬度。

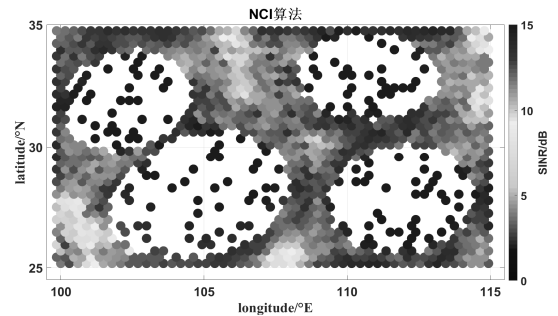
由图 7 可以看出, 在调度周期内, POLL 算法可为所有的波位提供服务, 而由于系统总传输需求超过了系统总吞吐量, NCI 算法为 60.73% 的波位提供了服务, MSIC-SAA 算法为 94.99% 的波位提供了服务, 但可以提供更优的信号质量。

仿真计算系统总吞吐量对比如图 8 所示。

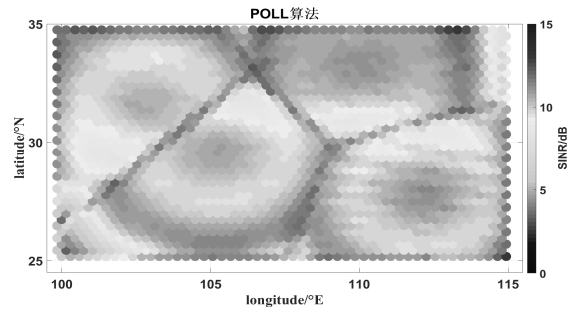
在用户需求较大的情况下, 不同资源分配方案所能达到的系统吞吐量不同, 在该仿真场景中, 仿真时间内系统总传输需求量为 4907.800 Gbit, MSIC-SAA 算法可提供比 NCI 和 POLL 算法更高的系统吞吐量, MSIC-SAA 算法的系统总吞吐量为 2828.002 Gbit, NCI 算法的系统总吞吐量为 2300.610 Gbit, POLL 算法的系统总吞吐量为 1800.847 Gbit, 本文所提跳波束资源分配算法, 由于考虑了多星之间的干扰问题, 基于干扰感知选择波位, 系统吞吐量较 POLL 算法提升了 57.04%, 较 NCI 算法提升了 22.92%。



(a) MSIC-SAA 算法



(b) NCI 算法



(c) POLL 算法

图 7 3 种算法的波位平均 SINR 分布图

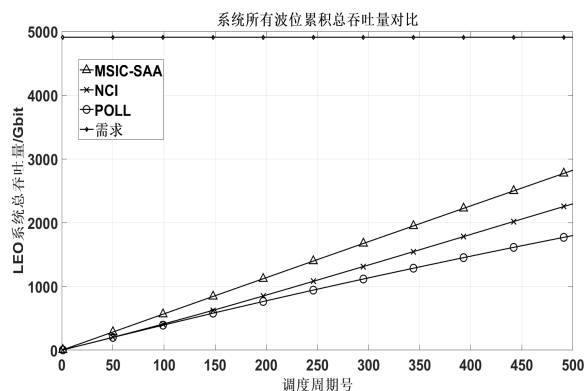


图 8 3 种算法的系统吞吐量对比

5 结束语

LEO 卫星具有体积小、星载资源受限等特点。跳波束技术是 LEO 卫星提升系统覆盖能力的有效解决方案之一。现有研究通常考虑了单颗卫星跳波束资源分配方案,而忽视了多颗卫星的相互干扰问题,干扰增加会导致系统信干比降低、服务能力下降。针对上述问题,本文建立了基于干扰感知的 LEO 多星协同跳波束资源分配问题分析模型,在该模型基础上提出基于模拟退火的多星干扰协同跳波束资源分配算法。所提算法可以有效改善网络的干扰分布水平,提升系统波位服务满意度和吞吐量。

参考文献:

- [1] LIN D P, PENG T, LIU C P. Prospect of 6G vision requirements, network architecture and key technology[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2021, 47(1): 82-89.
- [2] LATVA-AHO M, LEPPÄNEN K. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence[R]. 2019
- [3] CHEN S Z, LIANG Y C, SUN S H, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(2): 218-228.
- [4] 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.
- [5] SERGEI P. The Bandwidth Of The StarLink Constellation...and the assessment of its potential subscriber base in the USA[J]. 2021.
- [6] OSORO O B, OUGHTON E J. A techno-economic framework

for satellite networks applied to low earth orbit constellations: assessing starlink, OneWeb and kuiper[J]. IEEE Access, 2021, 9: 141611-141625.

- [7] LI Y P, FAN Y L, LIU S J, et al. Overview of beam hopping algorithms in large scale LEO satellite constellation[C]// Proceedings of the 2021 IEEE 20th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1345-1351.
- [8] LIU, W, TIAN F, JIANG Z, et al. Beam-hopping based resource allocation algorithm in LEO satellite network. in Space Information Networks[C]//Third International Conference, SINC 2018, Changchun, China, August 9-10, 2018.
- [9] BEN ALI BACHIR A F, ZHOUR M, AHMED M. Modeling and Design of a DVB-S2X system[C]//Proceedings of the 2019 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [10] 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.
- [11] LEI J, VÁZQUEZ-CASTRO M Á. Multibeam satellite frequency/time duality study and capacity optimization[J]. Journal of Communications and Networks, 2011, 13(5): 472-480.
- [12] 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.
- [13] LYU L Y, QI C H. Beam position and beam hopping design for LEO satellite communications[J]. China Communications, 2023, 20(7): 29-42.
- [14] 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 the 2019 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [15] WANG Y J, ZENG M, FEI Z S. Efficient resource allocation for beam-hopping-based multi-satellite communication systems[J]. Electronics, 2023, 12(11): 2441.
- [16] HU J L, CAO M H, ZHOU Y Q, et al. Efficient seamless coverage of high throughput satellites with irregular coverage shapes[C]//Proceedings of the GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2022: 3935-3940.
- [17] EVANS J V. The proposed non-geostationary Ku-band satellite systems[J]. Space Commun, 2000, 16: 1-13.
- [18] COCCO G, DE COLA T, ANGELONE M, et al. Radio resource management optimization of flexible satellite payloads for DVB-S2 systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2018,



64(2): 266-280.

[19] ITU-R. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. International Telecommunication Union-Recommendation[S]. 2005.

[20] 3GPP. Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks. TR 38.811 R15[S]. 2018.

[作者简介]



胡金龙（1982- ），男，中国科学院计算技术研究所博士生，主要研究方向为卫星通信网络、无线自组织网络无线资源管理技术及信号处理技术。



曹欢（1988- ），男，中国科学院计算技术研究所工程师，主要研究方向为卫星通信系统资源管控。



刘子凡（1996- ），男，中国科学院计算技术研究所助理工程师，主要研究方向为卫星组网。



刘继红（1986- ），女，中国科学院计算技术研究所博士生，主要研究方向为无线资源分配、车联网、LEO 卫星通信。



赵佳伟（1999- ），男，中国科学院计算技术研究所硕士生，主要研究方向为卫星通信。



周一青（1975- ），女，中国科学院计算技术研究所研究员、无线中心副主任，主要研究方向为计算与通信融合、异构网络和干扰管理。



原进宏（1969- ），男，新南威尔士大学电气工程与通信学院教授及通信学科负责人，主要研究方向为差错控制编码、无线通信理论及信息论。