

大规模低轨卫星网络中基于物理小区标识规划的接入干扰规避

杨 飞, 张 兴, 王文博

(北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 低轨卫星通信网络因其覆盖范围广、时延低、部署灵活等优势, 成为天地一体化信息系统的重要组成部分。然而, 大规模低轨卫星星座在进行随机接入的下行同步过程中, 同频波束间的物理小区标识 (physical cell identity, PCI) 模3、模4、模30冲突, 会引发严重的接入干扰, 导致后续随机接入失败。为此, 提出一种两阶段启发式PCI-同步信号块 (Synchronization signal block, SSB) 的联合规划算法。仿真结果表明, 所提算法相较基线方案接入干扰显著降低, 大规模低轨卫星网络下的干扰抑制能力有效提高。

关键词: 物理小区标识; SSB; LEO卫星网络; 启发式算法

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2026001

Physical cell identity planning for access interference avoidance in large-scale LEO satellite networks

Yang Fei, Zhang Xing, Wang Wenbo

School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: LEO satellite communication networks, featuring wide coverage, low latency, and flexible deployment, have become an important part of integrated space-terrestrial communication system. However, during the downlink synchronization process for random access in large-scale LEO constellations, PCI modulo-3, modulo-4, and modulo-30 collisions among co-frequency beams may cause severe access interference and lead to subsequent random access failure. To address this issue, a two-stage heuristic PCI-SSB joint planning algorithm is proposed. Simulation results show that the proposed algorithm significantly reduces access interference over the base-line scheme and improves interference suppression capabilities in large-scale LEO satellite networks.

Key words: physical cell identity, SSB, LEO satellite network, heuristic algorithm

0 引言

低轨卫星通信网络具有轨道高度低、运行速度快和覆盖范围广等特点^[1], 导致系统在时空上产生大尺度偏移, 影响用户接入。为解决这一问题, 通常采用跳波束技术^[2]在时间和空间上有效调度不均匀的业务需求^[2-3]。

同步过程作为卫星与用户建立通信链路的第一步, 是随机接入过程中至关重要的环节。在地面网络中, 物理小区标识 (physical cell identity, PCI) 通常用于标识地面小区。用户设备首先解码同步信号块 (synchronization signal block, SSB), 其中包含主同步信号 (primary synchronization signal, PSS)、辅同步信号 (secondary syn-

chronization signal, SSS)、物理广播信道 (physical broadcast channel, PBCH) 以及主信息块 (master information block, MIB)。不同于地面网络, 卫星通过波束下发SSB进行下行同步, SSB中携带卫星星历和波束信息。而PCI作为卫星波束的标识符^[4], 用户通过解码SSB中的PSS和SSS计算PCI, 根据PCI值选择适当的波束以进行后续的随机接入, 其计算方式如式(1)所示:

$$ID_{PCI} = ID_{PSS} + 3ID_{SSS} \quad (1)$$

其中, ID_{PCI} 、 ID_{PSS} 、 ID_{SSS} 分别代表PCI、PSS以及SSS的ID取值。然而, 用户设备在解调卫星波束发送的SSB时, 可能接收到其他卫星同频波束旁瓣干扰中的SSB, 从而引发PCI冲突, 干扰下行同步过程, 使用户无法通过

PCI 正确选择波束从而进行后续接入。

为减轻大规模低轨卫星星座中的 PCI 干扰,在非地面网络(non-terrestrial network, NTN)中, PCI 规划必须显式避免模 k (modulo- k , Mod- k) 冲突。具体地说,要规避 PCI Mod-3、Mod-4、Mod-30 冲突。

现有研究主要针对具有静态基站的地面网络展开,这些研究通常通过高复杂度的启发式算法或机器学习进行 PCI 分配,以迭代方式最大程度避免 PCI 模冲突。在长期演进(long term evolution, LTE)技术场景下,文献[5]研究了 LTE 分层 PCI 规划,使用的粒子群优化算法需要数百次迭代,且其贪婪阶段为静态的批处理模式,缺乏卫星场景下的动态适应性和大规模可扩展性,同时也未考虑 PCI Mod- k ($k=4,30$) 冲突问题。在 5G 新空口(5G new radio, 5G NR)网络中,文献[6]采用基于密度的带噪声应用空间聚类(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)聚类算法结合图着色启发式算法实现一次性 PCI 规划,但该方法仅适用于地面网络,算法迭代慢,难以实现快速收敛。文献[7]针对实际 5G 网络的多目标 PCI 分配问题提出了混合模因算法,但该算法依赖集中式的初始解预热,无法追踪秒级的拓扑变化。文献[8]面向 5G 超密集网络提出了基于 PCI 分组与小区聚类的方案以减轻 Mod- k 冲突,但其批量图着色复杂度随聚类数量线性增长,且缺乏在线重分配能力。综上,这些方案难以适应低轨卫星系统的高动态拓扑特性。因此,亟须一种低复杂度、快速收敛的 PCI 规划算法,以适应大规模低轨卫星网络场景特性。

尽管 PCI 和 SSB 规划技术在地面通信网络中的应用广泛且成熟[5-14],但在低轨卫星通信系统中,尚缺乏直接有效的 PCI 规划算法。因此,本文在构建适用于 LEO 星座的 PCI 规划方案时,参考了当前卫星通信系统中基于空间隔离与仰角阈值控制的频谱复用方法。文献[15-17]通过设置最小仰角或隔离角阈值以确定频率或波束的复用距离,从而有效降低同频干扰。这些方法的核心思想是:利用空间几何关系设计规避或复用策略。受此启发,本文在构建 PCI 规划基线算法时,通过设定合理的仰角门限与复用距离实现空间隔离,初步构建了一个具备干扰规避能力的 PCI 分配方案,作为后续优化算法的对比基准方案。

为解决现有通信网络 PCI 规划方法中存在的算法复杂度高、对动态拓扑变化适应性不足以及星载资源受限等问题,本文提出了一种面向低轨卫星星座的自适应两阶段启发式 PCI-SSB 联合规划算法。在阶段一,基于模拟退火算法生成最小复制单元的初始 PCI 规划,即结合初始

星座拓扑与模拟退火算法,生成最小复制单元,构建高效的 PCI 初始分配;在阶段二,基于分簇的禁忌搜索 PCI-SSB 重规划算法,即结合卫星分簇与禁忌搜索算法,动态调整簇内 PCI 及簇间 SSB 频点配置,实现精细化干扰抑制。

综上,本文提出的两阶段框架将全局快速初始化与局部动态优化相结合,形成了一种兼具可扩展性与干扰感知能力的 PCI-SSB 联合规划算法,为大规模低轨卫星星座提供了一种高效、低复杂度的规划算法。

1 系统模型

1.1 LEO 星座下 PCI-SSB 接入干扰模型

本文研究低轨卫星星座下行同步随机接入过程中的 PCI-SSB 干扰场景,如图 1 所示。假设星座中共有 N_s 颗卫星,每颗卫星均配置 N_b 个波束,其中心频率集合表示为 $f_b = \{f_i | i = 1, 2, \dots, N_b\}$,且对任意 $i \neq j$,均满足 $f_i \neq f_j$ 。每个波束的带宽集合记为 $B_b = \{B_i | i = 1, 2, \dots, N_b\}$,卫星覆盖半径设为 r_0 。以图 1 中的目标卫星 X 为例,展示其在下行同步阶段发送 SSB 的过程。被该波束照射的 N_u 个用户将对接收到的 SSB 进行解调,以获得 PSS 和 SSS 信息,从而完成后续的波束选择与随机接入过程。然而,这 N_u 个用户同时也会受到来自其他卫星的同频波束 $N_{b_{\text{interf}}}$ 的旁瓣干扰,这些干扰卫星的集合可表示为 $N_{S_{X_{\text{interf}}}} = \{N_i | \theta_{s_i, X} > \theta_{\text{threshold}}\}$,其中 s_i 表示干扰卫星, $\theta_{\text{threshold}}$ 表示可视仰角阈值,该集合描述了位于可见仰角范围内对卫星 X 的波束产生干扰的卫星集合,干扰会影响用户对目标卫星 X 的正确选择与随机接入。

1.2 波束间干扰模型

参考文献[18],波束在某一偏离主轴角度处的增益可表示为式(2):

$$G(\theta_{u,l}) = G_{\max} \left(\frac{J_1(r_{\theta_{u,l}})}{2r_{\theta_{u,l}}} + 36 \frac{J_3(r_{\theta_{u,l}})}{r_{\theta_{u,l}}^3} \right)^2 \quad (2)$$

其中, $\theta_{u,l}$ 表示用户 u 与波束 l 主轴之间的偏离角, $G_{\max}$ 表示低轨卫星的最大天线增益, $J(\cdot)$ 为 i 阶贝塞尔函数,

$$r_{\theta_{u,l}} = 2.0713 \frac{\sin(\theta_{u,l})}{\sin(\theta_{3\text{dB}})}, \quad \theta_{3\text{dB}} \text{ 为半功率波束宽角。用户 } u$$

与波束 l 之间的信道系数可参照文献[19]中的表达式,同时考虑低轨卫星高速运动带来的多普勒频移影响,进一步记为式(3):

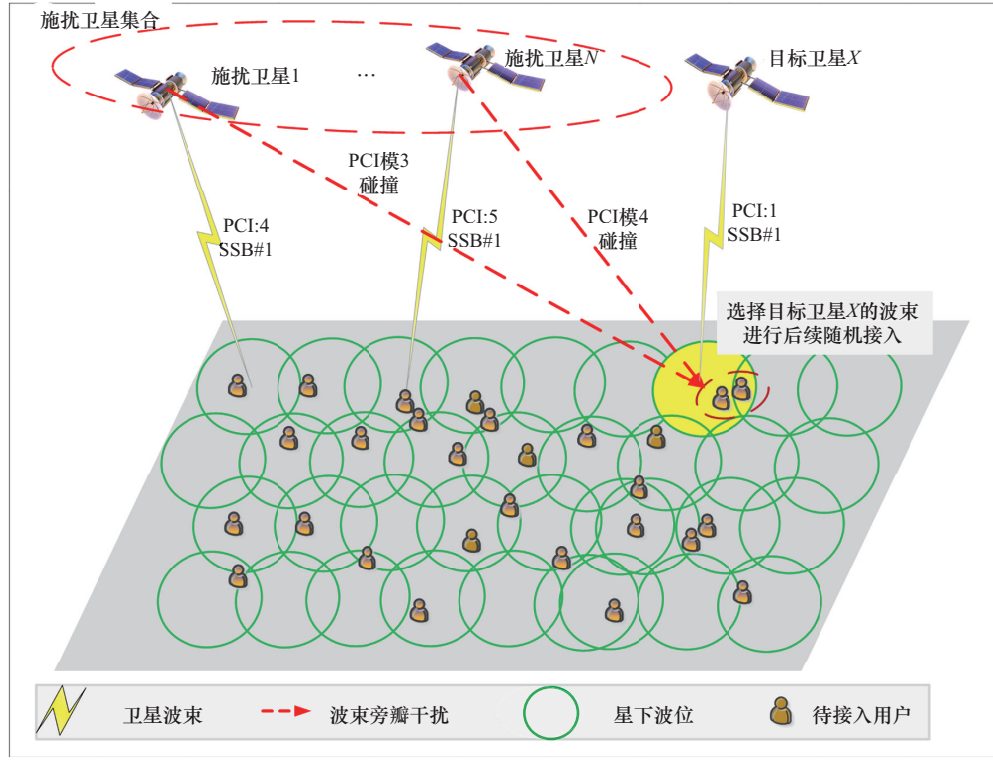


图1 低轨卫星星座下行同步随机接入过程中的PCI-SSB干扰场景

$$h_{u,l} = \frac{\sqrt{G(\theta_{u,l})G_r^u}}{4\pi \frac{d_{u,l}}{\lambda}} e^{j2\pi f_{d,u,l}t} \quad (3)$$

其中, G_r^u 表示用户 u 的接收天线增益, $d_{u,l}$ 为用户 u 与波束 l 所属卫星之间的距离, λ 为信号波长, $f_{d,u,l} = \frac{v_{s,u} \cos \varphi_l}{\lambda}$ 为多普勒频移, $v_{s,u}$ 为卫星 s 相对于用户 u 的径向速度, φ_l 为卫星速度矢量与用户—卫星连线之间的夹角。本文仅考虑同频波束间的干扰。以卫星 k 下的用户设备为例, 用户在时刻 t 受到干扰卫星 s 的同频干扰波束 l' 的干扰噪声比 (interference-to-noise ratio, INR) 可表示为式(4):

$$\text{INR}_{u,s,l'}^{(t)} = \frac{P_l |h_{u,l'}|^2}{N_0} \quad (4)$$

其中, P_l 表示干扰卫星 s 的波束 l' 的发射功率, N_0 表示接收端的噪声功率谱密度, 假设 N_0 为加性高斯白噪声的功率谱密度。可以看到, 多普勒频移主要影响信号的相位旋转, 而不会直接改变本文所关注的由 PCI 模冲突导致的同频波束干扰噪声比。

2 两阶段启发式 PCI-SSB 联合规划

2.1 优化问题建模

如前述系统模型所示, 低轨卫星星座系统的 PCI 规划

旨在最小化 PCI Mod- k ($k=3, 4, 30$) 之间的冲突, 并降低接入干扰。在 NTN 中, PCI 个数为 1 008 个, $0 \leq \text{ID}_{\text{PCI}} \leq 1 007$; 同时定义 $f_{\text{collision}}^{\text{Mod}-k}(\text{ID}_{\text{PCI}}^{s_0,l_0}, \text{ID}_{\text{PCI}}^{s,l}, f_{\text{SSB}}^{s_0,l_0}, f_{\text{SSB}}^{s,l})$ 判断卫星 s_0 的波束 l_0 和卫星 s 的波束 l 之间是否存在同频波束 Mod- k ($k=3, 4, 30$) 冲突, 若存在冲突, 该项为 1, 否则该项为 0。建立如式(5)所示的优化目标函数, 该目标函数表示最小化长期系统同频波束间干扰噪声比。

$$\begin{aligned} \min & \sum_{t=1}^{T_{\text{all}}} \sum_{u=1}^{N_{\text{all}}} \sum_{l=1}^{N_{b,x,\text{Interf}}} \text{INR}_{u,s,l}^t \cdot f_{\text{collision}}^{\text{Mod}-k}(\text{ID}_{\text{PCI}}^{s_0,l_0}, \text{ID}_{\text{PCI}}^{s,l}, f_{\text{SSB}}^{s_0,l_0}, f_{\text{SSB}}^{s,l}) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} 0 \leq \text{ID}_{\text{PCI}}^{s,l} \leq 1 007, \forall i,j \\ k = 3, 4, 30 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\text{INR}_{u,s,l}^t$ 为用户 u 在时刻 t 受到干扰卫星 s 的波束 l 的干扰噪声比, $f_{\text{collision}}^{\text{Mod}-k}(\text{ID}_{\text{PCI}}^{s_0,l_0}, \text{ID}_{\text{PCI}}^{s,l}, f_{\text{SSB}}^{s_0,l_0}, f_{\text{SSB}}^{s,l})$ 为卫星 s 的波束 l 与卫星 s_0 的波束 l_0 之间是否存在同频波束 PCI Mod- k 冲突的判断函数, $N_{b,x,\text{Interf}}$ 为所有可视仰角内的干扰卫星数, N_{all} 为用户总数, T_{all} 为系统运行的时间, 用于系统评估长时干扰规避效果。

2.2 基于模拟退火算法生成最小复制单元的初始 PCI 规划

基于模拟退火算法生成最小复制单元的初始 PCI 规划, 仅需在地面一次性产出 PCI 解, 随后全网复制, 针对

静态拓扑生成有效的规划初始解。

2.2.1 根据卫星拓扑关系建模最小复制单元

为了利用低轨卫星星座的固有拓扑邻近性, 本文将整个网络建模为规则六边形镶嵌结构: 每颗卫星 $S_{ij,k}$ (全局索引 i , 轨道平面 j , 平面内索引 k) 映射为一个六边形, 其 6 个相邻的六边形对应最主要的干扰源卫星, 即同轨道平面上的 2 颗沿轨邻居卫星和相邻轨道平面上的 4 颗交轨邻居卫星。

利用该规则性, 初始规划保证了这 6 个直接邻居之间的 PCI Mod- k ($k=3, 4, 30$) 无冲突分配, 从而消除了主要的接入干扰源。基于定义的最小复制单元 (minimum replication unit, MRU), 该算法将组合优化问题简化为同时满足 Mod-3 和 Mod-4 冲突约束, 这里因为 Mod-30 一致可保证 Mod-3 的约束。

构建 MRU 冲突矩阵 $\mathbf{MRU}$ 以覆盖整个卫星星座。对于具有 P 条轨道平面、每平面 Q 颗卫星的星座, 建立一个 $M \times N$ 大小的邻接矩阵 $\mathbf{X}$ 表示卫星之间的邻居关系, 定义见式(6):

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, \text{卫星 } i \text{ 和卫星 } j \text{ 被认为是主要干扰源} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

基于 $\mathbf{X}$, 构造代价函数 $E(\mathbf{MRU}) = \sum_{(i,j) \in \mathcal{N}} X_{ij} \cdot f_{\text{collision}}^{\text{Mod-}k}(\mathbf{MRU})$ 以量化任意候选矩阵 $\mathbf{MRU}$ 中的 Mod-3 和 Mod-4 冲突总数, 目标是 minimized $E(\mathbf{MRU})$ 。

2.2.2 利用模拟退火算法求解 MRU

利用模拟退火算法求解最优 MRU。算法以随机生成矩阵 $\mathbf{MRU}_0$ 作为初始解, 并设 $\mathbf{MRU}_{\text{best}} \leftarrow \mathbf{MRU}_0$, 初始温度 $T \leftarrow T_0$ 。每次迭代随机扰动 $\mathbf{MRU}(i,j)$ 元素以生成候选矩阵 $\mathbf{MRU}_{\text{new}}$, 计算其代价 E_{new} , 并根据 Metropolis 准则以概率 $p = \exp(-(E_{\text{new}} - E_{\text{best}})/T)$ 接受候选矩阵。温度按几何方式更新 $T = \alpha \cdot T$, 直至达到终止阈值 $T_{\min}$, 实现最小代价的配置被保留为 $\mathbf{MRU}_{\text{best}}$ 。

2.2.3 基于 MRU 进行 PCI 初始解规划

随后, 将最优模板 $\mathbf{M}_{\text{best}}$ 按平面和平面内分块复制, 实现全星座 PCI 规划。 $\mathbf{M}_{\text{best}}$ 中每个 (r_3, r_4) 对通过表 1 中的 PCI Mod-3 和 Mod-4 取值映射表 (记作 MT) 映射, $n \in \{0, 1, 2, \dots, 63\}$ 。

未填满完整 $M \times N$ 单元的卫星按照相同规则进行补齐, 使整个星座继承 MRU 的无冲突特性。因此, 所提出的算法可生成全局一致的 PCI 规划方案, 可实现在无须大

规模迭代优化的情况下最小化接入干扰, 且所有 SSB 频点均分配至波束中心频率。

表 1 PCI Mod-3 和 Mod-4 取值映射表

Mod-3 取值	Mod-4 取值	PCI 取值
0	0	$0+12 \times n$
0	1	$9+12 \times n$
0	2	$6+12 \times n$
0	3	$3+12 \times n$
1	0	$4+12 \times n$
1	1	$1+12 \times n$
1	2	$10+12 \times n$
1	3	$7+12 \times n$
2	0	$8+12 \times n$
2	1	$5+12 \times n$
2	2	$2+12 \times n$
2	3	$11+12 \times n$

2.3 基于聚类的禁忌搜索 PCI-SSB 重规划算法

为应对时变拓扑和用户分布, 所提算法将星座全局 PCI 重规划拆分为簇内子问题后, 求解目标仅为“快速消除簇内 Mod- k 冲突”。

2.3.1 计算冲突权重作为分簇依据

首先, 构建大小为 $N_s \times N_s$ 的加权邻接矩阵 $\mathbf{B}$, 评估卫星之间的距离 $d_{s,q}$ 造成接入干扰的程度; 然后, 根据参数 $\theta_{\text{threshold}}$, 利用式 $\rho_{\text{ref}} = 2 \cdot (R_{\text{earth}} + h_{\text{sat}}) \cdot \alpha$ 和 $\alpha = \arccos\left(\frac{R_{\text{earth}} \cos \theta_{\text{threshold}}}{R_{\text{earth}} + h_{\text{sat}}}\right) - \theta_{\text{threshold}}$ 计算卫星之间无干扰的距离 ρ_{ref} , 其中 R_{earth} 、 h_{sat} 分别代表地球半径、卫星高度, 再用 ρ_{ref} 作为 $\mathbf{B}_{s,q}$ 的条件, 见式(7):

$$\mathbf{B}_{s,q} = \begin{cases} \frac{1}{d_{s,q}}, & 0 < d_{s,q} \leq \rho_{\text{ref}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

随后, 每颗卫星 s 由三维特征向量 $\mathbf{W}_s = [U_s, \text{NS}_s, C_s^{\text{collision}}]^T$ 表示。 U_s 表示卫星 s 下的待接入用户数, NS_s 表示卫星 s 的邻居卫星数量, $C_s^{\text{collision}}$ 表示当前卫星 s 与邻居卫星之间的 PCI 冲突数。通过熵加权融合生成冲突权重 $\mathbf{D}_s = \mathbf{W}_s^T \mathbf{W}_s, w_j = (1 - E_j)/(1 - E_i)$, 利用生成的冲突权重 $\mathbf{D}_s$ 作为后续星座分簇的参数。

2.3.2 利用聚类算法进行星座分簇

首先, 算法利用卫星的用户数、邻居规模及当前冲突数构建三维特征向量 $\mathbf{W}_s = [U_s, \text{NS}_s, C_s^{\text{collision}}]^T$, 通过熵加权融合生成 $\mathbf{D}_s$, 并采用 K-means 聚类算法将整个星座

自适应地划分为若干冲突紧密的簇，为后续簇内精细化 PCI-SSB 调整奠定基础，刻画了卫星间干扰耦合的强弱关系，为后续以簇为单位的局部优化重规划算法提供了高效、可扩展的优化框架。

其次，算法利用肘部法为 K-means 聚类算法确定合适的聚类数目 K 。具体地，先令 K 在预设区间内逐次递增，运行多次 K-means 聚类算法并记录平均簇内平方和 (within-cluster sum of squares, WCSS)；随后计算相邻 K 值对应的斜率变化率，当 WCSS 下降幅度首次低于经验阈值或二阶差分达到最大时，即判定为肘部位置，从而自适应地获得最优簇数 K_{opt} ；最后，簇间采用不同频点的 SSB 隔离干扰，这样可以将问题拆解成更小规模的子问题。

2.3.3 基于禁忌搜索算法进行簇内 PCI 微调

针对簇内 PCI Mod- k 冲突的干扰规避问题模型，本质上是簇内卫星波束的 PCI 搜索问题。本文基于禁忌搜索算法对优化问题进行求解。

簇内 PCI 重分配优化问题解释如下。首先，在初始化阶段，算法输入簇 C_k 当前的 PCI 规划 R 、加权冲突权重函数 J 和最大迭代次数 I_{max} 。设置当前解 $R_{\text{current}} \leftarrow R$ 和最优解 $R_{\text{best}} \leftarrow R_{\text{current}}$ ，并计算初始冲突权重 J_{current} 。同时，初始化禁忌表 T 为空，用于记录近期修改的卫星 PCI 对 (s, R'_s) ，以防止循环搜索。这一步骤为后续迭代奠定了基础，确保算法从可行解出发。进入主循环后，算法首先检查终止条件：如果冲突权重 J_{current} 为 0（表示所有 Mod- k 冲突已消除）或当前迭代次数 I_{current} 达到 I_{max} 或连续无改进次数超过阈值，则流程终止；否则，算法继续选择冲突重要性最大的节点 h ，选择依据是冲突权重 w_{ij} 和冲突函数 $f_{\text{collision}}^{\text{Mod-}k}$ ，这确保了高干扰区域优先处理，体现了贪心策略的效率。接下来，算法通过扰动节点 h 生成候选解，扰动操作包括单点重着色（随机改变 h 对应卫星的 PCI 值）、双点重着色（同时调整 h 对应卫星和相邻节点卫星的 PCI 值）或两点交换（交换两颗卫星之间的 PCI 值）。候选解集 $R_{\text{candidate}}$ 随后被评估，计算新冲突权重 $J_{\text{candidate}}$ 。评估过程应用 Metropolis 准则：如果 $J_{\text{candidate}} < J_{\text{best}}$ ，即使解在禁忌表 T 中，也接受（破禁准则）；否则，仅接受非禁忌解。这平衡了探索与利用，避免算法陷入局部最优。在更新阶段，算法选择最佳候选解 R_{new} 更新当前解，并调整禁忌表 T ，添加新记录 (h, R'_h) 并移除旧记录。如果新解更优，则更新最优解和计数器；否则，无改进计数器递增。迭代计数器 I_{current} 增加后，流程返回终止检查，形成闭环。

所有簇优化完成后，重新计算全星座 PCI 冲突指标。如果冲突减少比例低于阈值 η_{min} ，则重新启动禁忌阶段，增大任期或提高扰动率。最终，为每个簇 C_k 分配唯一 SSB 中心频率 $\text{SSB}^k \in \left[0, \left\lceil \frac{B_l}{B_{\text{SSB}}} \right\rceil\right]$ ，其中 B_l 、 B_{SSB} 分别为波束 l 、SSB 信号块的带宽，保证簇间 SSB 异频无干扰、簇内 SSB 频点一致。

3 仿真结果与分析

3.1 仿真参数设置

仿真场景中的参数设置如下：所有用户在经度 180°W 至 180°E 、纬度 70°S 至 70°N 的区域内以均匀或聚类方式分布。星座的经纬度与高度信息由卫星工具包 (satellite tool kit, STK) 生成并导入仿真系统，用 Matlab 搭建的评估系统进行仿真验证。参考 3GPP TR 38.811，详细的仿真参数见表 2。

表2 仿真参数

仿真参数类型	参数取值
轨道高度	1 200 km
轨道倾角	50°
轨道面数量	24 个
单轨卫星数	18 颗
波位半径	25 km
星下用户终端密度	$10^{-4}/\text{km}^2$
卫星与用户天线类型	相控阵
卫星最大天线增益	42.51 dBi
用户天线接收增益	42.7 dBi
系统噪声温度	1 000 K
载波中心频率	20 GHz
系统带宽	240 MHz
仿真时长	600 s
MRU 规模	3×3
可视仰角阈值	20°

作为对比，本文设置以下对照规划方案。具体而言，分别考虑随机规划算法、基线仰角隔离规划算法（以下简称“基线对比算法”）、仅阶段一，以及阶段一+阶段二的完整算法，在用户均匀分布与聚簇分布两种场景下进行对比分析。

3.2 评估指标

评估指标有 INR 与 PCI 无碰撞概率两项。

INR: 统计星下所有尝试接入用户的接入 INR，可以表示不同算法通过规划 PCI-SSB 的接入干扰抑制情况。根据 ITU-R S.1432-1 规定^[20]，工作频率低于 30 GHz 的卫星系统需将系统干扰噪声比的阈值设定为 -12.2 dB。若 INR 高于此阈值，表明干扰不可忽略，将影响系统整体的接入性能。

PCI 无碰撞概率: 随着纬度升高，轨间卫星间距逐渐缩小，波束覆盖重数增加，导致 PCI 冲突造成的接入干扰愈发严重。为评估不同纬度下的干扰程度，本文定义纬度区间 $[i, j]$ 内的 PCI 无碰撞概率如下：

$$P_{\text{colli_free}}^{i,j} = \frac{N_{\text{success}}}{N_{\text{all}}} \quad (8)$$

其中， N_{success} 表示在 $[i, j]$ 纬度带内成功接入且未发生 PCI 碰撞的用户设备数量， N_{all} 为该纬度带内所有尝试接入的用户设备总数。

3.3 仿真结果与分析

图 2 给出了所提算法在阶段二不同簇数下的 INR 累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF)。从仿真结果可以看到，INR 整体随着簇数的增加先下降，在簇数为 8 个时达到最小值，随后再次上升。这是因为提高 K_{opt} 可以初步利用波束的带宽资源进行簇间的接入干扰规避。当采用 8 个簇时，所提算法在抑制接入干扰方面效果最佳，因为此时波束内可用的最大不同 SSB 频点数 $\left\lfloor \frac{B_l}{B_{\text{SSB}}} \right\rfloor = 8$ ，资源得到充分利用。

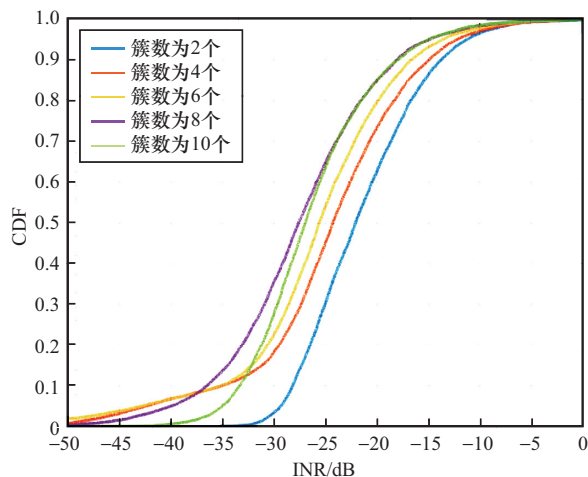


图 2 所提算法在阶段二不同簇数下的 INR CDF

图 3 展示了不同 PCI 规划算法及不同星下用户分布下的 INR CDF，主要有以下结论。

第一，在不同用户分布场景下，所提算法（阶段一+阶段二）在用户聚簇分布条件下会有更好的效果，相比用户均匀分布的条件，平均 INR 能再降低平均 1.2 dB，因为所提算法阶段二能够适应星下用户的不均匀与卫星的高动态特性。

第二，与随机规划算法和基线对比算法相比，所提算法的接入干扰分别降低了 10.6 dB 和 6.7 dB，表现出更优的接入干扰抑制性能。

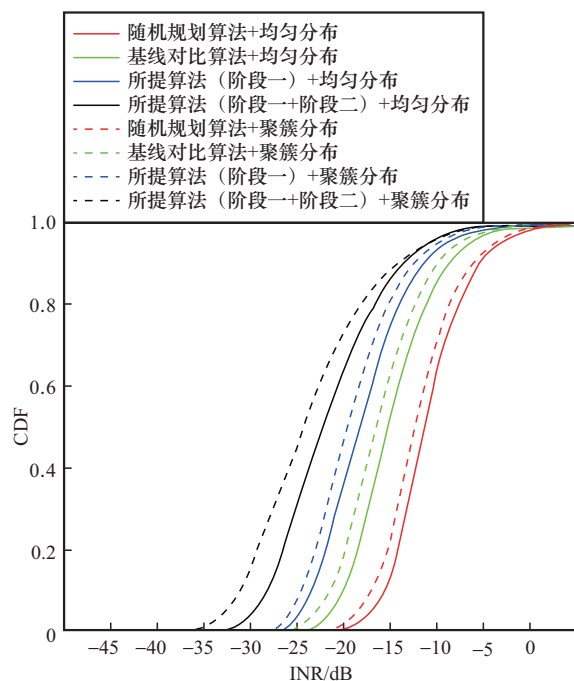


图 3 不同 PCI 规划算法及不同星下用户分布下的 INR CDF

图 4 展示了不同算法及不同用户分布下的 PCI 无碰撞概率，可得出以下结论。

第一，各算法在纬度 40°~50° 区间内的无碰撞概率最低。这是因为随着纬度升高，相邻轨道面的间距减小，星间干扰更严重；而超过 50° 后，高纬度每个波位受到的卫星干扰小，无碰撞概率随之上升。

第二，与随机规划算法和基线对比算法相比，所提算法（阶段一+阶段二）的 PCI 无碰撞概率在高纬度区域分别提升了 66% 和 23%。通过同时抑制 PCI 的 Mod- k 冲突，所提算法显著增强了系统整体的接入性能。

综上，所提算法的优越性从抑制系统整体接入干扰 INR，以及提高大规模低轨卫星星座下的接入并发控制能力-PCI 无碰撞概率两个方面得到了证明。

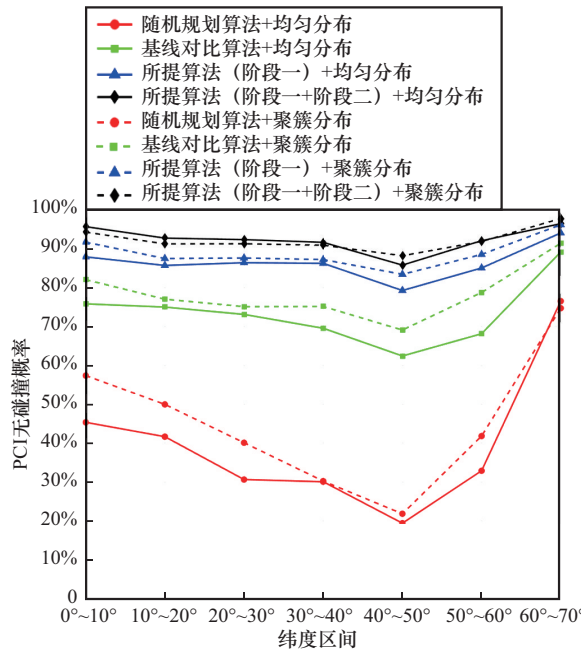


图4 不同算法及不同用户分布下的PCI无碰撞概率

3.4 所提算法计算复杂度分析

所提算法阶段二的计算复杂度显著降低, 主要归功于分簇策略将全局优化问题分解为多个小规模子问题。所提算法通过 K-means 聚类将 N 颗卫星划分为 K_{opt} 个簇, 每颗卫星仅与有限 M 个邻居存在干扰关系, 使得簇内禁忌搜索的复杂度降为 $O(T \cdot (N/K_{opt}) \cdot M)$, 其中 T 为固定迭代次数。由于 M 为常数, K_{opt} 与 N 无关, 因此总复杂度近似为 $O(N)$ 。

4 结束语

本文针对大规模低轨卫星网络中 PCI Mod- k 冲突导致的接入干扰问题, 提出一种两阶段 PCI-SSB 联合规划算法。所提算法通过模拟退火算法完成初始 PCI 规划, 并结合聚类与禁忌搜索算法实现动态重规划。仿真结果表明, 所提算法的干扰抑制性能较随机规划算法和基线对比算法分别提升 10.6 dB 和 6.7 dB, 在高纬度区域将 PCI 无碰撞接入概率分别提升 66% 和 23%, 验证了其低复杂度下的干扰规避能力与动态适应性。

参考文献

[1] Zhu X M, Jiang C X. Integrated satellite-terrestrial networks toward 6G: architectures, applications, and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(1): 437-461.
[2] Wang P, Zhang J X, Zhang X, et al. Convergence of satellite and

terrestrial networks: a comprehensive survey[J]. IEEE Access, 2020, 8: 5550-5588.
[3] Han Y F, Zhang C, Zhang G X. Dynamic beam hopping resource allocation algorithm based on deep reinforcement learning in multi-beam satellite systems[C]//Proceedings of the 2021 3rd International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST). Piscataway: IEEE Press, 2021: 68-73.
[4] 3GPP. Technical specification group radio access network; solutions for NR to support non-terrestrial networks (Release 16): TR 38.821 V16.2.0 [S]. 2023.
[5] Zhai Z H. Research on PCI planning for communication networks based on greedy algorithm and particle swarm algorithm[C]//Proceedings of the 2024 IEEE 6th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT). Piscataway: IEEE Press, 2024: 187-191.
[6] Manda B N S V B, Yama M. Automatic physical cell identity planning using machine learning[D]. Blekinge: Blekinge Tekniska Högskola, 2022.
[7] Andrade C E, Pessoa L S, Stawiarski S. The physical cell identity assignment problem: a practical optimization approach[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2024, 28(2): 282-292.
[8] Liu F, Meng Y, Chai J H, et al. A physical cell identity combinatorial optimal configuration scheme based on PCIs grouping and cells clustering[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 15th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT). Piscataway: IEEE Press, 2023: 15-21.
[9] Yang H M, Gao R P, Huang A P, et al. A solution to relieve ICI effects on system control information in OFDM-based mobile networks: conflict coordination on PDCCH via PCI planning[C]//Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2013: 5073-5077.
[10] Zakrzewska A, Lopez-Perez D, Ho L, et al. Cell ID management in multi-vendor and multi-RAT heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2019, 16(2): 417-429.
[11] Zhao K H, Yu H T, Lai Y M, et al. PCI planning based on judgmental nested genetic algorithm[C]//Proceedings of the 2025 IEEE 3rd International Conference on Image Processing and Computer Applications (ICIPCA). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1258-1262.
[12] Tian Z X, Wang Z Y, Shi Y Q. Research on community PCI planning based on multi model simulated annealing algorithm[C]//Proceedings of the 2024 International Conference on Electronics and Devices, Computational Science (ICEDCS). Piscataway: IEEE Press, 2024.
[13] Sun H M, Sun Y, Lu Y, et al. Research on PCI planning problem based on genetic algorithm and sequential algorithm[C]//Proceedings of the 2024 IEEE 6th International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS). Piscataway: IEEE

- Press, 2024: 778-782.
- [14] Liu M, Tu S S, Xiao C B, et al. The allocation and reuse scheme of physical cell identifications based on maximum degree first coloring algorithm[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(1): 582-591.
- [15] 张泓湜, 蒋伯峰, 等. 基于空间隔离的低轨卫星系统频谱共享方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(9): 1909-1917.
Zhang H S, Jiang B F, et al. Spatial isolation methodology for spectral coexistence in LEO satellite systems[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(9): 1909-1917.
- [16] 付春鑫, 蒋应富, 葛俊祥, 等. 基于 EPFD 分析的高低轨卫星角度间隔研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(5): 414-418.
Fu C X, Jiang Y F, Ge J X, et al. Research on angular separation of geostationary and low earth orbit satellites based on EPFD analysis [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022, 20(5): 414-418.
- [17] 王海旺, 邹诚, 常家超, 等. 基于发射波束旁瓣零陷的低轨卫星干扰规避策略[J]. 中国科学院大学学报, 2024, 41(4): 541-549.
Wang H W, Zou C, Chang J C, et al. Interference avoidance strategy for LEO satellite based on transmit beam sidelobe nulling[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2024, 41(4): 541-549.
- [18] 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, 2021, 9: 57578-57588.
- [19] Chen L, Ha V N, Lagunas E, et al. The next generation of beam hopping satellite systems: dynamic beam illumination with selective precoding[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(4): 2666-2682.

- [20] ITU-R. Allowable error performance degradation to an FSS hypothetical reference digital path caused by time-invariant interference for systems operating below 30 GHz: ITU-R S.1432-1[S]. 2006.

[作者简介]



杨飞 (2001-), 男, 北京邮电大学信息与通信工程学院硕士生, 主要研究方向为卫星互联网。



张兴 (1980-), 男, 北京邮电大学信息与通信工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为 5G/6G 移动通信系统、移动边缘计算与数据分析、卫星互联网。



王文博 (1965-), 男, 北京邮电大学副校长, 主要研究方向为无线传输技术、无线网络理论、无线信号处理。