

基于RSMA的LEO卫星通信系统宽点波束调度及预编码算法

柴 蓉^{1,2*}, 刘 瑾^{1,2}, 梁承超^{1,2}, 陈前斌^{1,2}

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 重庆市移动通信技术重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 多波束低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)卫星通信系统因具有广覆盖、高吞吐量、低时延及部署成本低等特性而受到广泛关注。本文研究基于速率分割多址接入(Rate Splitting Multiple Access, RSMA)机制的多波束LEO卫星通信系统的用户分簇、混合宽点波束调度及预编码问题。综合考虑簇内及簇间相似度,提出一种基于改进均值漂移算法的用户分簇策略。首先根据用户地理位置分布及卫星点波束覆盖范围确定初始分簇结果,进而引入簇内分散度及簇间距离等指标构建簇评估函数,并设计基于高斯核函数的调参机制,根据簇评估结果动态调整参数,以实现簇内用户聚合性与簇间区分度的协同优化。基于所确定的用户分簇策略,进而设计一种双空间尺度资源分配策略。具体地,在较大空间尺度,研究面向多个用户簇的宽波束覆盖问题。综合考虑星间传输性能差异及用户接入性能,建模系统成本函数,将宽波束覆盖问题建模为满足约束条件的系统成本函数最小化问题。采用分支定界法求解所建模问题,通过系统性地分解搜索空间,并结合上下界剪枝策略,逐步缩小可行解范围,从而确定宽波束覆盖的用户簇集合。基于给定的宽波束覆盖策略,在较小空间尺度,设计面向单用户簇的点波束调度及预编码方案,将点波束调度及预编码问题建模为长期卫星缓存队列长度最小化问题,并将所建模问题拆分为预编码子问题及点波束调度子问题依次进行求解。针对预编码子问题,首先引入松弛变量将目标函数转换为凸函数,进而针对非凸约束条件,采用一阶泰勒展开方法对其进行转换,并将包含非线性乘积项的凸约束转换为二阶锥约束,从而得到凸优化问题,可采用工具包进行高效求解。针对点波束调度子问题,将其建模为马尔可夫决策过程,并基于近端策略优化(Proximal Policy Optimization, PPO)算法确定点波束调度策略。仿真结果验证了所提算法的有效性。

关键词: 多波束低地球轨道卫星; 速率分割多址接入; 用户分簇; 混合宽点波束; 波束调度; 预编码

基金项目: 国家自然科学基金(No.62271097)

中图分类号: TN927+.2

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2026)01-0308-10

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20250114

Wide-Spot Beam Scheduling and Precoding Algorithm for RSMA-Based LEO Satellite Communication Systems

CHAI Rong^{1,2*}, LIU Jin^{1,2}, LIANG Chengchao^{1,2}, CHEN Qianbin^{1,2}

(1. School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing 400065, China)

Abstract: Multi-beam low earth orbit (LEO) satellite communication systems have attracted significant attention due to their wide coverage, high throughput, low latency and low deployment cost. In this paper, user clustering, hybrid wide-spot beam scheduling and precoding issues are investigated for rate splitting multiple access (RSMA)-based multi-beam LEO satellite communication systems. Considering intra- and inter-cluster similarities, a user clustering strategy based on an improved mean shift algorithm is proposed. Initial clustering results are firstly obtained according to the geographic distribution of users and the coverage area of satellite spot beams, and a clustering evaluation function is constructed by incorporating intra-cluster dispersion and inter-cluster distance, a Gaussian kernel-based parameter adjustment mechanism is designed to dynamically tune parameters according to the evaluation results, thereby achieving a synergistic optimization of intra-cluster user compactness and inter-cluster separability. Then, a dual spatial-scale resource allocation strategy is further developed based on the determined user clustering strategy. Specifically, at a large spatial scale, the problem of wide-beam coverage for multiple user clusters is studied. Taking both the inter-satellite transmission performance differences and user access performance into account, the system cost function is modeled, and the wide-beam coverage problem is formulated as a system cost function minimization problem, which is solved using the branch-and-bound method. By systematically de-

composing the search space and exploiting upper- and lower-bound pruning strategies, the feasible solution space is progressively reduced to obtain the set of user clusters for wide-beam coverage. At a small spatial scale, based on the wide-beam coverage strategy, spot beam scheduling and precoding schemes are designed for individual user cluster. The spot beam scheduling and precoding problem is formulated as a long-term satellite cache queue length minimization problem and decomposed into a precoding subproblem and a spot beam scheduling subproblem, solving them in sequence. For the precoding subproblem, the objective function is initially transformed into a convex form by introducing relaxation variables. For the non-convex constraints, we apply the first order Taylor expansion method to transform the constraints into convex ones, and the convex constraints involving nonlinear product terms are further transformed into second-order cone constraints, leading to a convex problem that can be efficiently solved using toolkits. Regarding the spot beam scheduling subproblem, it is modeled as a Markov decision process and the spot beam scheduling strategy is determined using the proximal policy optimization (PPO) algorithm. Simulation results validate the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: multi-beam LEO satellites; RSMA; user clustering; hybrid wide-spot beam; beam scheduling; precoding
Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62271097)

0 引言

低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星通信系统采用 LEO 卫星作为数据收发设备, 可为用户提供低时延、高速率的数据传输服务^[1]。多波束 LEO 卫星基于定向天线及多天线等技术生成宽波束及点波束, 可实现广域覆盖及特定区域的高速数据服务。混合宽点波束方案结合宽、点波束性能优势, 可显著提升系统传输性能^[2]。为实现多用户数据传输, 可采用速率分割多址接入 (Rate Splitting Multiple Access, RSMA) 机制以充分利用非正交传输叠加编码及空分多址技术性能优势。在基于 RSMA 的多波束 LEO 卫星通信系统中, 如何设计用户分簇、混合波束调度及 RSMA 预编码方案以提升系统性能成为亟待解决的问题。

近年来, 已有文献针对多波束卫星通信系统的用户分簇、波束调度及资源分配问题开展研究^[3-18]。文献[3-4]针对多波束卫星通信系统分别考虑簇内相似度^[3]或簇间差异性^[4]设计用户分簇方案。然而, 文献[3]主要关注簇内相关性, 较少考虑簇间差异性可能导致用户簇重叠覆盖, 簇间传输干扰增加; 文献[4]主要关注簇间差异性可能导致簇内用户相似度较低, 影响用户簇整体传输性能。因此, 应综合考虑簇内及簇间特性设计用户分簇方案。文献[5-8]针对多波束卫星通信系统设计波束调度方案, 实现系统吞吐量、业务时延优化^[5-6]及用户需求与系统容量之间的匹配^[7-8]。然而, 现有研究主要考虑点波束调度策略, 较少考虑混合宽点波束调度方案, 导致系统性能受限。

针对多天线卫星通信系统, 设计发送端预编码机制可实现系统性能提升^[9-12]。通过优化设计发送端数字预编码, 可实现用户最小速率最大化^[9]或用户安全和速率最大化^[10]。文献[11-12]联合优化卫星通信系统的模拟及数字预编码, 实现系统能效优化^[11]或谱效最大化^[12]。文献[13-15]联合设计卫星通信

系统的波束调度及预编码方案, 以实现卫星发送功率最小化^[13]、波束间干扰优化^[14]及系统容量与用户需求之间的匹配^[15]。文献[16-18]联合优化设计卫星通信系统波束调度及功率分配策略, 以实现系统能耗最小化。尽管文献[13-18]综合考虑卫星通信系统的波束调度及资源分配策略, 但主要考虑静态通信场景, 未充分考虑实际场景中用户业务随机到达及卫星高速运动导致的网络随机动态特性, 难以实现系统长期稳态性能优化。此外, 现有研究主要考虑系统能耗或传输速率优化, 较少考虑星间性能均衡及卫星缓存队列性能, 可能导致系统资源难以充分利用及用户体验下降。

针对现有研究存在的不足, 本文研究基于 RSMA 的多波束 LEO 通信系统的用户分簇、宽点波束调度及 RSMA 预编码问题。首先综合考虑簇内相似性及簇间差异性, 提出一种基于改进均值漂移算法的用户分簇策略, 提升系统资源利用率; 进而结合宽点波束性能优势, 设计一种双尺度资源分配策略, 在较大空间尺度, 研究用户簇的宽波束覆盖问题。综合考虑星间传输性能及用户簇数量, 将用户簇的宽波束覆盖问题建模为系统成本函数最小化问题, 进而基于分支定界法求解优化问题。基于宽波束覆盖策略, 在较小空间尺度设计面向单用户簇的点波束调度及预编码方案。将点波束调度及预编码联合优化问题建模为满足约束条件的长期卫星缓存队列长度最小化问题。为求解所建模优化问题, 将其拆分为预编码子问题及点波束调度子问题。针对预编码子问题, 分别对目标函数及非凸约束条件进行转换, 得到凸优化问题。对于点波束调度子问题, 将其建模为马尔可夫决策过程 (Markov Decision Process, MDP), 并基于近端策略优化 (Proximal Policy Optimization, PPO) 算法确定点波束调度策略。

1 系统模型

1.1 网络模型

本文考虑一个由 M 个 LEO 卫星和 K 个用户组成的多波束卫星通信系统。假设每个卫星均配备均匀平面天线阵。根据卫星波束覆盖范围和用户地理位置分布,将地面用户划分为多个用户簇。所有卫星均采用混合宽波束覆盖方案,即每个卫星均可产生一个宽波束及多个点波束,其中,宽波束提供大范围覆盖,可点亮多个用户簇;各点波束分别调度不同用户簇,以提供高速数据传输服务。不失一般性,假设各卫星的点波束数目相同。令 N_s 表示卫星点波束数量。本文所考虑的系统模型如图 1 所示。

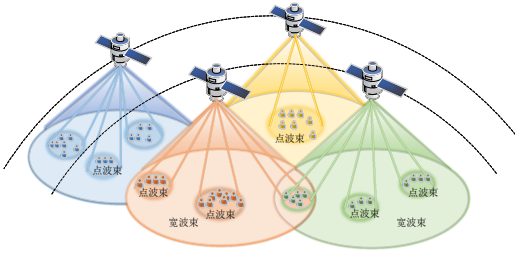


图1 系统模型图

Figure 1 System model

令 S_m 表示第 m 个卫星, U_k 表示第 k 个用户, $\mathbf{q}_k = [x_k, y_k]^T$ 表示 U_k 的位置, $1 \leq m \leq M, 1 \leq k \leq K$ 。简便起见,将系统时间划分为 T 个时隙,时隙宽度为 τ 。令 $\mathbf{q}_m(t) = [x_m(t), y_m(t), H_m]^T$ 表示 t 时隙 S_m 的位置。令 I 表示用户簇的数量, C_i 表示第 i 个用户簇, $1 \leq i \leq I$ 。假设各卫星占用不同频带,令 B 表示各卫星的信道带宽。各卫星的所有点波束采用全频复用的方式共享该卫星的信道带宽。

1.2 信道模型

令 $\mathbf{h}_{m,k}(t)$ 表示 t 时隙 S_m 传输数据至 U_k 时的下行信道增益,可建模为^[19]

$$\mathbf{h}_{m,k}(t) = g_{m,k}(t) e^{j2\pi(t\nu_{m,k} - f_c \tau_{m,k})} \mathbf{v}_{m,k} \quad (1)$$

其中, $\nu_{m,k}$, $\tau_{m,k}$ 和 f_c 分别表示 S_m 与 U_k 之间的多普勒频移、时延和载波频率; $g_{m,k}(t)$ 表示 S_m 与 U_k 之间链路的复增益,建模为 $g_{m,k}(t) = \frac{c\psi_{m,k}(t)}{4\pi f_c d_{m,k}(t)} \sqrt{g_m^t g_k^r}$; $\psi_{m,k}(t)$ 表示 t 时隙 S_m 与 U_k 之间的信道衰落系数, $\psi_{m,k}(t) \sim \mathcal{CN}(0, 1)$; g_m^t , g_k^r , c 分别表示 S_m 的发送天线增益、 U_k 的接收天线增益及光速; $d_{m,k}(t)$ 表示 t 时隙 S_m 与 U_k 之间的距离; $\mathbf{v}_{m,k}$ 表示 S_m 与 U_k 之间的阵列响应向量,可建模为 $\mathbf{v}_{m,k} = \mathbf{v}_{m,k}^x \otimes \mathbf{v}_{m,k}^y$, 其中, $\mathbf{v}_{m,k}^x$ 和 $\mathbf{v}_{m,k}^y$ 分别表示 x 轴和 y 轴方向的阵列响应向量, \otimes 表示克罗内克积。

1.3 信号传输模型

本文假设卫星采用 RSMA 机制传输数据至所关联的用户簇。根据 RSMA 传输机制,发送端将用户消息划分为公有消息及私有消息,并将所有公有消息统一编码为公有流,将各用户的私有消息独立编码为用户私有流,进而采用叠加编码方式传输数据至各用户。用户接收到消息后,采用连续干扰消除技术,依次解码公有流及对应的私有流。

令 $\mathbf{s}_m(t)$ 表示 t 时隙 S_m 的发送信号,可建模为^[20]

$$\mathbf{s}_m(t) = \sum_{i=1}^I \mu_{m,i}(t) \left(\mathbf{w}_{m,i}^c(t) x_i^c(t) + \sum_{k=1}^K \beta_{i,k} \mathbf{w}_{m,i,k}^p(t) x_k^p(t) \right) \quad (2)$$

其中, $x_i^c(t)$ 及 $x_k^p(t)$ 分别表示 t 时隙 C_i 的公有流及 U_k 的私有流; $\mathbf{w}_{m,i}^c(t)$ 和 $\mathbf{w}_{m,i,k}^p(t)$ 分别表示 t 时隙 S_m 对 C_i 的公有流预编码矢量和对 C_i 内 U_k 的私有流预编码矢量; $\mu_{m,i}(t) \in \{0, 1\}$ 表示 t 时隙 S_m 的点波束调度变量,若 t 时隙 S_m 的点波束调度 C_i , 则 $\mu_{m,i}(t) = 1$, 否则 $\mu_{m,i}(t) = 0$; $\beta_{i,k} \in \{0, 1\}$ 表示用户分簇策略,若 $U_k \in C_i$, 则 $\beta_{i,k} = 1$, 否则 $\beta_{i,k} = 0$ 。令 $y_{m,i,k}(t)$ 表示 t 时隙 C_i 内的 U_k 接收到的来自 S_m 的信号,可建模为^[20]

$$y_{m,i,k}(t) = \mu_{m,i}(t) \beta_{i,k} \mathbf{h}_{m,i,k}^H(t) \mathbf{s}_m(t) + n(t) \quad (3)$$

其中, $n(t)$ 表示 t 时隙的链路噪声。

1.4 用户速率建模

令 $\gamma_{m,i,k}^c(t)$ 表示 t 时隙 C_i 内的 U_k 接收 S_m 发送的公有流时对应的信干噪比,可建模为

$$\gamma_{m,i,k}^c(t) = \frac{\mu_{m,i}(t) \beta_{i,k} \left| \mathbf{h}_{m,i,k}^H(t) \mathbf{w}_{m,i}^c(t) \right|^2}{I_{m,k}^c(t) + I_{m,k}^p(t) + \sigma^2} \quad (4)$$

其中, $I_{m,k}^c(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^I \mu_{m,j}(t) \left| \mathbf{h}_{m,k}^H(t) \mathbf{w}_{m,j}^c(t) \right|^2$ 与 $I_{m,k}^p(t) =$

$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \mu_{m,i}(t) \beta_{i,k} \left| \mathbf{h}_{m,k}^H(t) \mathbf{w}_{m,i,k}^p(t) \right|^2$ 分别表示 t 时隙 U_k 解码

其公有流时其他用户簇的公有流及私有流产生的干扰功率,则对应的速率可建模为 $R_{m,i,k}^c(t) = B \log_2(1 + \gamma_{m,i,k}^c(t))$ 。

令 $\tilde{R}_{m,i}^c(t)$ 表示 t 时隙 S_m 发送公有流至用户簇 C_i 时对应的传输速率,可建模为 $\tilde{R}_{m,i}^c(t) = \min_{k \in \{k | \beta_{i,k} = 1\}} R_{m,i,k}^c(t)$ 。

不失一般性,本文假设簇内各用户均分公有流速率。令 $R_{m,i}^c(t)$ 表示 t 时隙 S_m 发送公有流至 C_i 时簇内各用户对应公有流速率,可建模为 $R_{m,i}^c(t) = \tilde{R}_{m,i}^c(t) / O_i$, 其中, $O_i = \sum_{k=1}^K \beta_{i,k}$ 表示 C_i 内用户数。

令 $\gamma_{m,i,k}^p(t)$ 及 $R_{m,i,k}^p(t)$ 分别表示 t 时隙 C_i 内 U_k 接收 S_m 发送私有流对应信干噪比及传输速率,可建模为

$$\gamma_{m,i,k}^p(t) = \frac{\mu_{m,i}(t) \beta_{i,k} \left| \mathbf{h}_{m,i,k}^H(t) \mathbf{w}_{m,i,k}^p(t) \right|^2}{I_{m,k}^p(t) - \left| \mathbf{h}_{m,i,k}^H(t) \mathbf{w}_{m,i,k}^p(t) \right|^2 + \sigma^2} \quad (5)$$

$$R_{m,i,k}^p(t) = B \log_2(1 + \gamma_{m,i,k}^p(t)) \quad (6)$$

令 $R_{m,i}(t)$ 表示 t 时隙 C_i 内的用户接收 S_m 的消息时对应的速率和, 可建模为

$$R_{m,i}(t) = \sum_{k=1}^K \beta_{i,k} (R_{m,i}^c(t) + R_{m,i,k}^p(t)) \quad (7)$$

2 基于改进均值漂移算法的用户分簇策略

本节提出基于改进均值漂移算法的用户分簇策略。该算法首先基于传统均值漂移算法确定初始成簇策略, 进而综合考虑簇内、簇间相似度, 定义成簇评估函数, 并设计高斯核函数调参机制以实现分簇策略更新。该算法的具体实现步骤如下。

(1) 初始化: 令 Φ 表示未分簇用户的集合, 即 $\Phi = \{U_k, 1 \leq k \leq K\}$, $C_i = \emptyset, 1 \leq i \leq K$, 令 $i = 1$ 。

(2) 选择初始中心点: 随机选择一个未分簇的用户, 将其位置作为初始中心点, 如选择 $U_k \in \Phi$, 将 q_k 作为 C_i 的初始中心点, 记为 $\bar{q}_i = q_k$ 。

(3) 确定初始簇成员: 计算未分簇用户与簇中心点的距离, 若不超过卫星点波束覆盖半径, 则将该用户添加至对应用户簇。令 R_b 表示卫星点波束覆盖半径, 若 $U_{k'} \in \Phi$ 且 $\|q_{k'} - \bar{q}_i\| \leq R_b$, 则将 $U_{k'}$ 添加至 C_i , 即 $C_i = C_i \cup \{U_{k'}\}$ 。

(4) 更新簇中心点: 令 M_i 表示 C_i 的均值漂移向量, 可建模为^[21]: $M_i = \sum_{k'=1}^{O_i} q_{k'} f(q_{k'} - \bar{q}_i) / \sum_{k'=1}^{O_i} f(q_{k'} - \bar{q}_i) - \bar{q}_i$,

其中, $f(q_{k'} - \bar{q}_i) = e^{-\|q_{k'} - \bar{q}_i\|^2 / (2\psi^2)}$ 为高斯核函数, ψ 为高斯核函数参数; 基于 $\bar{q}_i = \bar{q}_i + M_i$ 更新 C_i 的中心点。

(5) 更新簇成员: 重复步骤 (3) 和 (4), 直至 $M_i = 0$; 更新 C_i , 删除 C_i 中与 \bar{q}_i 之间的距离大于 R_b 的用户, 即若 $\|q_{k'} - \bar{q}_i\| > R_b$, $C_i = C_i \setminus \{U_{k'}\}$; 更新 Φ , 删除已分簇用户, 若 $U_{k'} \in C_i$, 则 $\Phi = \Phi \setminus \{U_{k'}\}$ 。

(6) 判断初始分簇算法是否终止: 判断是否存在未分簇的 $U_{k'}$, 若 $\Phi \neq \emptyset$, 则令 $i = i + 1$, 返回步骤 (2), 否则, 执行步骤 (7)。

(7) 计算成簇评估函数: 基于簇内及簇间距离确定成簇评估函数, 令 ζ_i 表示 C_i 的分散度, 定义为 C_i 内用户到中心点的平均距离, 可建模为 $\zeta_i =$

$$\sqrt{\frac{1}{L_i} \sum_{k=1}^{L_i} \|q_k - \bar{q}_i\|_2^2}; \text{ 令 } \bar{D}_{i,j} \text{ 表示 } C_i \text{ 与 } C_j \text{ 之间的距离, 可建模为 } \bar{D}_{i,j} = \|\bar{q}_i - \bar{q}_j\|_2; \text{ 令 } F_{i,j} \text{ 为 } C_i \text{ 与 } C_j \text{ 之间的相似度度量, 可建模为 } F_{i,j} = (\zeta_i + \zeta_j) / \bar{D}_{i,j}; \text{ 令 } F \text{ 表示成簇评估函数, 可建模为 } F = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left(\min_{1 \leq j \neq i \leq I} \{F_{i,j}\} \right)。$$

(8) 判断成簇策略更新条件: 令 F_{th} 为评估函数阈

值, 若 $F \leq F_{th}$, 算法终止, 当前分簇结果即为最终结果, 输出 $\beta_{i,k}$; 若 $F > F_{th}$, 令 $\psi = \rho\psi, 0 < \rho < 1$, 返回步骤 (1)。

3 宽波束覆盖问题建模及求解

给定用户分簇策略, 本节建模及求解面向多个用户簇的宽波束覆盖问题。

3.1 优化问题建模

卫星通信系统中各卫星服务能力的差异性, 以及用户位置分布和业务需求多样性对系统资源高效利用及星间负载均衡提出挑战。本节综合考虑各卫星的传输性能及用户接入性能, 建模宽波束覆盖问题。本文假设用户业务随机动态到达, 令 φ_k 表示各时隙 U_k 业务需求的平均值, \tilde{A}_i 表示各时隙 C_i 的平均业务需求量, 可建模为 $\tilde{A}_i = \sum_{k=1}^K \beta_{i,k} \varphi_k$ 。令 $L_{m,i}(t)$ 表示 t 时隙 S_m 传输数据至 C_i 的性能度量。综合考虑用户簇业务需求和星地链路传输性能, 可建模为 $L_{m,i}(t) = \tilde{A}_i / \tilde{R}_{m,i}(t)$, 其中, $\tilde{R}_{m,i}(t)$ 表示 t 时隙 S_m 至 C_i 的传输速率。简便起见, 定义 $\tilde{R}_{m,i}(t)$ 为 t 时隙 S_m 至 C_i 中心点的传输速率。令 $L_m(t)$ 表示 t 时隙 S_m 的性能度量, 可建模为 $L_m(t) = \sum_{i=1}^I \lambda_{m,i}(t) L_{m,i}(t)$, 其中, $\lambda_{m,i}(t) \in \{0, 1\}$ 表示 t 时隙 S_m 的宽波束调度变量, 若 t 时隙 S_m 的宽波束点亮用户簇 C_i , 则 $\lambda_{m,i}(t) = 1$, 否则 $\lambda_{m,i}(t) = 0$ 。

令 $\vartheta(t)$ 表示 t 时隙系统成本函数。综合考虑星间传输性能差异及波束所服务用户簇数量, 将 $\vartheta(t)$ 建模为

$$\vartheta(t) = \max_m \{L_m(t)\} - \min_m \{L_m(t)\} - \alpha \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \lambda_{m,i}(t) \quad (8)$$

其中, α 为权重系数。为实现各时隙系统成本函数最小化, 将宽波束覆盖问题建为

$$\begin{aligned} & \min_{\{\lambda_{m,i}(t)\}} \vartheta(t) \\ & \text{s.t. C1: } \lambda_{m,i}(t) = 0, \forall m, t, C_i \notin \Omega_m(t) \\ & \text{C2: } \sum_{m=1}^M \lambda_{m,i}(t) \leq 1, \forall i, t \\ & \text{C3: } \max_{i,j} \{\bar{D}_{i,j}\} + 2 \max_i \{r_i\} \leq 2r'_b, \forall i, j \end{aligned} \quad (9)$$

其中, 约束 C1 表示任意时隙卫星宽波束仅可调度该卫星覆盖范围内的用户簇, $\Omega_m(t)$ 表示 t 时隙 S_m 覆盖范围内的用户簇的集合; 约束 C2 表示任意时隙一个用户簇最多只能接入一个卫星; 约束 C3 为宽波束覆盖半径约束, 其中, r_i 表示 C_i 的覆盖半径, r'_b 表示卫星宽波束覆盖半径。

3.2 优化问题求解

为求解问题 (9), 引入辅助变量。令 $v(t) =$

$\max_m \{L_m(t)\}, \zeta(t) = \min_m \{L_m(t)\}$, 可将原问题重写如下:

$$\begin{aligned} & \min_{\{\lambda_{m,i}(t)\}, \{v(t)\}, \{\zeta(t)\}} v(t) - \zeta(t) - \alpha \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \lambda_{m,i}(t) \\ & \text{s.t.} \quad \text{C1} \sim \text{C3} \\ & \quad \text{C4: } L_m(t) \leq v(t), \forall m, t \\ & \quad \text{C5: } L_m(t) \geq \zeta(t), \forall m, t \end{aligned} \quad (10)$$

优化问题(10)为混合整数线性规划问题, 本文采用分支定界法, 通过系统性地分解搜索空间, 结合上下界剪枝策略, 逐步缩小可行解范围, 可确定宽波束覆盖策略。

4 点波束调度及预编码问题建模

本节基于所确定的用户分簇及宽波束覆盖策略, 建模面向单用户簇的点波束调度及预编码问题。综合考虑用户业务到达特性及系统传输性能, 建模卫星缓存队列模型, 进而将用户簇点波束调度及预编码问题建模为满足约束条件的卫星缓存队列长度最小化问题。

4.1 约束条件建模

本节对优化问题建模需考虑的约束条件进行分析阐述。

(1) 预编码功率约束: 任意时隙各卫星的发送功率须满足最大发送功率约束, 即

$$\begin{aligned} \text{C1: } & \sum_{i=1}^I \mu_{m,i}(t) \text{tr}(\mathbf{W}_{m,i}^c(t)) \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \mu_{m,i}(t) \beta_{i,k} \text{tr}(\mathbf{W}_{m,i,k}^p(t)) \leq P_{\text{sat}}, \forall m, t \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{W}_{m,i}^c(t)$ 和 $\mathbf{W}_{m,i,k}^p(t)$ 分别为 RSMA 公有流及私有流的预编码矩阵, 分别定义为 $\mathbf{W}_{m,i}^c(t) = \mathbf{w}_{m,i}^c(t) [\mathbf{w}_{m,i}^c(t)]^H$, $\mathbf{W}_{m,i,k}^p(t) = \mathbf{w}_{m,i,k}^p(t) [\mathbf{w}_{m,i,k}^p(t)]^H$, P_{sat} 表示卫星最大发送功率。

为确保簇内用户成功解码 RSMA 公有流, 公有流预编码矢量 $\mathbf{w}_{m,i}^c(t)$ 需满足如下约束:

$$\begin{aligned} \text{C2: } & \left| \mathbf{h}_{m,k}^H(t) \mathbf{w}_{m,i}^c(t) \right|^2 - \sum_{j=1, j \neq i}^I \mu_{m,j}(t) \left| \mathbf{h}_{m,k}^H(t) \mathbf{w}_{m,j}^c(t) \right|^2 \\ & - \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \mu_{m,i}(t) \beta_{i,k} \left| \mathbf{h}_{m,k}^H(t) \mathbf{w}_{m,i,k}^p(t) \right|^2 - \sigma^2 \geq \theta_{\text{th}}, \forall m, i, k, t \end{aligned} \quad (12)$$

其中, θ_{th} 为功率差值阈值。

根据预编码矩阵的定义可知, $\mathbf{W}_{m,i}^c(t)$ 和 $\mathbf{W}_{m,i,k}^p(t)$ 均为半正定矩阵, 即

$$\text{C3: } \mathbf{W}_{m,i}^c(t) \geq 0, \mathbf{W}_{m,i,k}^p(t) \geq 0, \forall m, i, k, t \quad (13)$$

(2) 点波束调度约束: 任意时隙卫星的点波束仅可调度其宽波束覆盖范围内的用户簇, 即

$$\text{C4: } \mu_{m,i}(t) \leq \lambda_{m,i}(t), \forall m, i, t \quad (14)$$

任意时隙各卫星点波束最多服务 N_s 个用户簇, 即

$$\text{C5: } \sum_{i=1}^I \mu_{m,i}(t) \leq N_s, \forall m, t \quad (15)$$

4.2 优化问题建模

令 $A_k(t)$ 表示 t 时隙 U_k 的业务需求量, $Q_{m,i}(t)$ 表示 t 时隙卫星 S_m 缓存的用户簇 C_i 的队列长度, 可建模为^[22]

$$Q_{m,i}(t) = \max \left\{ \min \left\{ Q_{m,i}(t-1) + \sum_{k=1}^K \beta_{i,k} A_k(t) - R_{m,i}(t) \tau, Q_{\text{max}} \right\}, 0 \right\} \quad (16)$$

其中, Q_{max} 表示卫星处用户簇的缓存队列区的最大容量。本文将联合点波束调度及预编码问题建模为一个满足约束条件的长期卫星缓存队列长度最小化问题, 即

$$\begin{aligned} & \min_{\{\mu_{m,i}(t)\}, \{\mathbf{w}_{m,i}^c(t)\}, \{\mathbf{w}_{m,i,k}^p(t)\}} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I Q_{m,i}(t) \\ & \text{s.t.} \quad \text{C1} \sim \text{C5} \end{aligned} \quad (17)$$

5 点波束调度及预编码问题求解

所建模的优化问题(17)为混合整数非线性规划 (Mixed Integer NonLinear Programming, MINLP) 问题, 难以直接进行求解。本节将该优化问题拆分为预编码子问题及点波束调度子问题依次求解。给定点波束调度策略, 首先求解预编码子问题, 引入松弛变量, 并利用一阶泰勒展开及二阶锥约束等方法将原问题转换为凸优化问题, 进而求解得到对应的预编码策略; 给定预编码策略, 点波束调度子问题为序贯决策问题, 将其建模为 MDP 问题, 并采用 PPO 算法确定点波束调度策略。

5.1 预编码子问题建模求解

本节假设点波束调度策略已确定, 建模及求解预编码子问题。由于不同卫星采用正交子信道进行信息传输互不干扰, 多星预编码子问题可简化为多个单星预编码子问题。

5.1.1 优化问题建模

不失一般性, 本节以卫星 S_m 为例, 建模单卫星预编码问题。考虑到传输速率对缓存队列长度的影响, 将队列长度优化问题转换为速率最大化问题。该问题可建模为

$$\begin{aligned} & \max_{\{\mathbf{w}_{m,i}^c(t)\}, \{\mathbf{w}_{m,i,k}^p(t)\}} \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (R_{m,i}^c(t) + R_{m,i,k}^p(t)) \\ & \text{s.t.} \quad \text{C1} \sim \text{C3} \end{aligned} \quad (18)$$

5.1.2 优化问题求解

由于优化问题(18)的目标函数为优化变量的非

凸函数,因此,该问题为非凸问题,难以直接进行求解。本节首先通过引入松弛变量将该问题的目标函数转换为凸函数;其次,针对目标函数转换过程中引入的非凸约束,应用一阶泰勒展开方法将其转换为凸约束,从而得到凸优化问题。为方便问题求解,将包含非线性乘积项的凸约束转换为二阶锥约束,进而可使用 CVX 工具箱求解该优化问题。

以下分别对目标函数中的 $R_{m,i}^c(t)$ 和 $R_{m,i,k}^p(t)$ 进行转换。首先引入松弛变量 $r_{m,i}^c(t)$ 替换 $R_{m,i}^c(t)$, 令 $\mathbf{H}_{m,k}(t) = \mathbf{h}_{m,k}(t)\mathbf{h}_{m,k}^H(t)$, 可知 $r_{m,i}^c(t)$ 需满足如下约束:

$$\text{C6: } e^{\frac{O_i r_{m,i}^c(t)}{B \log_2 c}} \leq \frac{\text{Tr}(\mathbf{H}_{m,k}(t)\mathbf{W}_{m,i}^c(t)) + l_{m,k}^c(t) + l_{m,k}^p(t) + \sigma^2}{l_{m,k}^c(t) + l_{m,k}^p(t) + \sigma^2} \quad (19)$$

其中, $l_{m,k}^c(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^I \mu_{m,j}(t) \text{Tr}(\mathbf{H}_{m,k}(t)\mathbf{W}_{m,j}^c(t))$, $l_{m,k}^p(t) = \sum_{i=1}^I \sum_{k'=1}^K \mu_{m,i}(t) \beta_{i,k'} \text{Tr}(\mathbf{H}_{m,k}(t)\mathbf{W}_{m,i,k'}^p(t))$ 。

约束条件 C6 为非凸约束,引入松弛变量,并对其转换。针对 C6 不等式右侧的分子项和分母项,分别引入松弛变量 $b_{m,i,k,1}(t)$ 和 $b_{m,i,k,2}(t)$, 得到如下约束条件:

$$\text{C7: } \text{Tr}(\mathbf{H}_{m,k}(t)\mathbf{W}_{m,i}^c(t)) + l_{m,k}^c(t) + l_{m,k}^p(t) + \sigma^2 \geq e^{b_{m,i,k,1}(t)} \quad (20)$$

$$\text{C8: } l_{m,k}^c(t) + l_{m,k}^p(t) + \sigma^2 \leq e^{b_{m,i,k,2}(t)} \quad (21)$$

将松弛变量 $b_{m,i,k,1}(t)$ 和 $b_{m,i,k,2}(t)$ 代入 C6, 可得到 C9:

$$\text{C9: } \frac{O_i r_{m,i}^c(t)}{B} \leq (b_{m,i,k,1}(t) - b_{m,i,k,2}(t)) \log_2 e \quad (22)$$

针对约束 C7 计算复杂度较高的问题,引入松弛变量 $\tau_{m,i,k,c}(t)$, 可得到约束 C10 及 C11:

$$\text{C10: } \tau_{m,i,k,c}(t) \leq \text{Tr}(\mathbf{H}_{m,k}(t)\mathbf{W}_{m,i}^c(t)) + l_{m,k}^c(t) + l_{m,k}^p(t) + \sigma^2 \quad (23)$$

$$\text{C11: } \tau_{m,i,k,c}(t) \log(\tau_{m,i,k,c}(t)) \geq \tau_{m,i,k,c}(t) b_{m,i,k,1}(t) \quad (24)$$

约束 C11 左侧为凸函数,对其应用一阶泰勒展开并进行转换,可得到约束 C12:

$$\text{C12: } \tau_{m,i,k,c}(t) \left(\log(\tau_{m,i,k,c}^{(n)}(t)) + 1 - b_{m,i,k,1}(t) \right) \geq \tau_{m,i,k,c}^{(n)}(t) \quad (25)$$

由 $ab \geq c$ 可知 $\left\| \left[a - b, 2\sqrt{c} \right] \right\|_2 \leq a + b$ 。令 $a = \tau_{m,i,k,c}(t)$, $b = \log(\tau_{m,i,k,c}^{(n)}(t)) + 1 - b_{m,i,k,1}(t)$, $c = \tau_{m,i,k,c}^{(n)}(t)$, 可将 C12 转换为二阶锥约束 C13:

$$\text{C13: } \left\| \left[\begin{array}{c} \tau_{m,i,k,c}(t) + b_{m,i,k,1}(t) - \left(\log(\tau_{m,i,k,c}^{(n)}(t)) + 1 \right) \\ 2\sqrt{\tau_{m,i,k,c}^{(n)}(t)} \end{array} \right] \right\|_2 \leq \tau_{m,i,k,c}(t) - b_{m,i,k,1}(t) + \log(\tau_{m,i,k,c}^{(n)}(t)) + 1 \quad (26)$$

针对非凸约束 C8, 对不等式右侧表达式应用一阶泰勒展开, 可得到约束 C14:

$$\text{C14: } l_{m,k}^c(t) + l_{m,k}^p(t) + \sigma^2 \leq e^{b_{m,i,k,2}^{(n)}(t)} (b_{m,i,k,2}(t) - b_{m,i,k,2}^{(n)}(t) + 1) \quad (27)$$

为处理目标函数中的非凸项 $R_{m,i,k}^p(t)$, 首先引入辅助变量 $r_{m,i,k}^p(t)$, 满足以下约束:

$$\text{C15: } B \log_2 \left(1 + \frac{\text{Tr}(\mathbf{H}_{m,k}(t)\mathbf{W}_{m,i,k}^p(t))}{l_{m,k}^p(t) - \text{Tr}(\mathbf{H}_{m,k}(t)\mathbf{W}_{m,i,k}^p(t)) + \sigma^2} \right) \geq r_{m,i,k}^p(t) \quad (28)$$

为处理非凸约束 C15, 引入松弛变量 $c_{m,i,k,1}(t)$ 和 $c_{m,i,k,2}(t)$, 得到如下约束:

$$\text{C16: } l_{m,k}^p(t) - \text{Tr}(\mathbf{H}_{m,k}(t)\mathbf{W}_{m,i,k}^p(t)) + \sigma_k^2 \leq e^{c_{m,i,k,2}(t)} \quad (29)$$

$$\text{C17: } l_{m,k}^p(t) + \sigma_k^2 \geq e^{c_{m,i,k,1}(t)} \quad (30)$$

$$\text{C18: } \frac{r_{m,i,k}^p(t)}{B} \leq (c_{m,i,k,1}(t) - c_{m,i,k,2}(t)) \log_2 e \quad (31)$$

针对非凸约束 C16, 应用泰勒展开方法, 转换如下:

$$\text{C19: } l_{m,k}^p(t) - \text{Tr}(\mathbf{H}_{m,k}(t)\mathbf{W}_{m,i,k}^p(t)) + \sigma^2 \leq e^{c_{m,i,k,2}^{(n)}(t)} (c_{m,i,k,2}(t) - c_{m,i,k,2}^{(n)}(t) + 1) \quad (32)$$

针对约束 C17, 引入松弛变量 $\tau_{m,i,k,p}(t)$, 转换如下:

$$\text{C20: } \tau_{m,i,k,p}(t) \leq l_{m,k}^p(t) + \sigma^2 \quad (33)$$

$$\text{C21: } \left\| \left[\begin{array}{c} \tau_{m,i,k,p}(t) + c_{m,i,k,1}(t) - \left(\log(\tau_{m,i,k,p}^{(n)}(t)) + 1 \right) \\ 2\sqrt{\tau_{m,i,k,p}^{(n)}(t)} \end{array} \right] \right\|_2 \quad (34)$$

$$\leq \tau_{m,i,k,p}(t) - c_{m,i,k,1}(t) + \log(\tau_{m,i,k,p}^{(n)}(t)) + 1$$

因此, 优化问题 (18) 可转换如下:

$$\begin{aligned} \max \quad & \left\{ \mathbf{w}_{m,i}^{(n)}(t), \{ \mathbf{w}_{m,i,k}^{(n)}(t) \}, \right. \\ & \left. \{ r_{m,i}^c(t) \}, \{ r_{m,i,k}^p(t) \}, \right. \\ & \left. \{ b_{m,i,k,1}(t) \}, \{ b_{m,i,k,2}(t) \}, \right. \\ & \left. \{ c_{m,i,k,1}(t) \}, \{ c_{m,i,k,2}(t) \}, \right. \\ & \left. \{ \tau_{m,i,k,c}(t) \}, \{ \tau_{m,i,k,p}(t) \} \right\} \end{aligned} \quad (35)$$

s.t. C1~C3, C9, C10, C13, C14, C18~C21

可以证明上述问题已转换为凸优化问题, 可以利用 CVX 工具箱进行求解。

5.2 基于深度强化学习的点波束调度算法

本节基于所确定的卫星预编码策略, 建模及求解单星点波束调度子问题。由于单星点波束调度问题为序贯决策问题, 本节将其建模为 MDP, 进而提出一种基于离散 PPO 算法的点波束调度算法。

5.2.1 MDP 建模

给定卫星预编码策略, 联合点波束调度及预编码问题 (17) 简化为点波束调度子问题, 可建模为

$$\begin{aligned} \min_{\{\mu_{m,i}(t)\}} & \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I Q_{m,i}(t) \\ \text{s.t.} & \text{C1, C4, C5} \end{aligned} \quad (36)$$

上述优化问题为 MINLP 问题,难以直接进行求解。本节将其转换为 MDP,并采用离散 PPO 算法确定卫星点波束调度策略。所建模的 MDP 模型由状态、动作和奖励组成。令 s_t 表示系统 t 时隙状态,建模为 $s_t = \{\lambda_{m,i}(t), \mathbf{h}_{m,k}(t), Q_{m,i}(t)\}$ 。令 a_t 表示 t 时隙智能体采取的动作,建模为 $a_t = \{\mu_{m,i}(t)\}$ 。给定系统状态 s_t ,智能体执行动作 a_t ,可得到对应的奖励 r_t ,将其建模为 $r_t = -\sum_{i=1}^I Q_{m,i}(t)$ 。

5.2.2 基于 PPO 算法的点波束调度策略

PPO 算法是一种基于策略梯度的强化学习算法。该算法包含策略网络和价值网络,其中策略网络根据输入的状态生成动作的概率分布,价值网络负责评估当前状态的价值。为训练策略网络,定义该网络的目标函数 $L(\theta_t)$ 为^[23-24]

$$L(\theta_t) = \hat{\mathbb{E}}_t \left[\min \left(\mu_t(\theta_t) A(t), \text{clip} \left(\mu_t(\theta_t), 1 - \varepsilon, 1 + \varepsilon \right) A(t) \right) \right] \quad (37)$$

其中, θ_t 为策略网络参数; ε 为超参数; $\mu_t(\theta_t) = \pi(a_t | s_t; \theta_t) / \pi(a_t | s_t; \theta_{\text{old}})$ 为比例函数, $\pi(a_t | s_t; \theta_t)$ 表示策略网络参数 θ_t 在状态 s_t 时采取动作 a_t 的概率, θ_{old} 表示更新前的策略网络参数; $A(t) = Q(s_t, a_t) - V_\phi(s_t)$ 为优势函数, $Q(s_t, a_t)$ 表示在状态 s_t 时采取动作 a_t 的动作价值函数, $V_\phi(s_t)$ 表示状态 s_t 的价值函数。可采用随机梯度上升法更新策略网络的参数 θ_t , 即 $\theta_{t+1} = \theta_t + \eta \nabla_{\theta_t} L(\theta_t)$, 其中, $\nabla_{\theta_t} L(\theta_t)$ 表示 $L(\theta_t)$ 关于 θ_t 的梯度, η 为学习率。定义价值网络的损失函数为 $L(\phi_t) = \hat{\mathbb{E}}_t \left[\frac{1}{2} (V_\phi(s_t) - V_t^{\text{tar}})^2 \right]$, 其中, V_t^{tar} 为 t 时隙目标价值函数; 采用随机梯度下降法更新价值网络的参数 ϕ_t , 即 $\phi_{t+1} = \phi_t - \eta \nabla_{\phi_t} L(\phi_t)$ 。

6 仿真结果及分析

本文采用 Matlab 和 Python 软件对所提算法性能进行验证和评估,并与相关文献所提算法进行比较。仿真场景由 4 个多天线 LEO 卫星和 30 个单天线地面用户组成,其中,仿真区域的大小为 $400 \text{ km} \times 400 \text{ km}$, LEO 卫星在地面的投影分别位于 $(100 \text{ km}, 100 \text{ km})$ 、 $(300 \text{ km}, 100 \text{ km})$ 、 $(100 \text{ km}, 300 \text{ km})$ 和 $(300 \text{ km}, 300 \text{ km})$ 处,用户随机分布在仿真区域内。仿真使用的相关参数如表 1 所示。

图 2 给出了基于改进均值漂移算法的用户分簇

表 1 仿真参数设置

Table 1 System parameter settings

仿真参数	数值
卫星高度	2 000 km
卫星最大发送功率	30~70 W
卫星发送天线增益	52 dBi
卫星天线数量	2,4,6,8
用户数量	30
用户接收天线增益	16 dBi
系统带宽	19~21 MHz
载波频率	20 GHz
噪声功率	-90 dBm
初始缓存队列	80~100 MHz
数据包到达量	50~80 MHz

结果,图中不同颜色的圆圈表示不同用户簇,对应颜色的五角星代表该用户簇的用户。从图中可以看出,所有用户均成功分簇,且用户簇内的用户分布较为集中,表明所提分簇算法具备良好的全局覆盖性,且簇中心具有较好的聚合性。这是因为本文基于经典均值漂移算法,引入了核函数参数自适应调整机制,可适应不同区域用户密度差异。此外,利用成簇评估函数,可兼顾簇内相关性及簇间差异性,从而有效减少多簇重叠区域,提升波束覆盖性能。

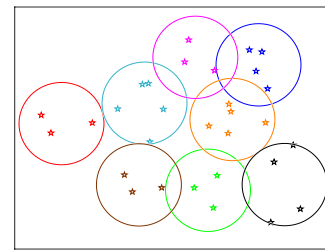


图 2 基于改进均值漂移算法的用户分簇结果

Figure 2 Improved mean shift algorithm-based user clustering results

图 3 给出了各时隙星间传输性能差异,用于刻画系统性能均衡程度。对比起见,图中给出了本文所提算法、基于距离优先的宽波束覆盖算法与文献[17]所提算法对应的结果,其中,基于距离优先的宽波束覆盖策略优先调度距离卫星较近的用户簇。从图中可以看出,相比对比算法,本文所提的宽波束覆盖策略对应的星间传输性能差值更小。这是因为本文所提的宽波束覆盖策略在关注用户簇覆盖数量的同时,引入星间传输性能差异量化指标,将其定义为系统中卫星性能最大值与最小值之间的差值。因而,所设计的宽波束覆盖策略可兼顾星间性能均衡及用户覆盖数量。基于距离优先的算法仅根据用户簇与卫星之间的距离确定用户簇调度策略,文献[17]所提算法

主要考虑需求与提供容量的匹配,未考虑不同卫星的性能差异,导致星间传输性能差异较大。

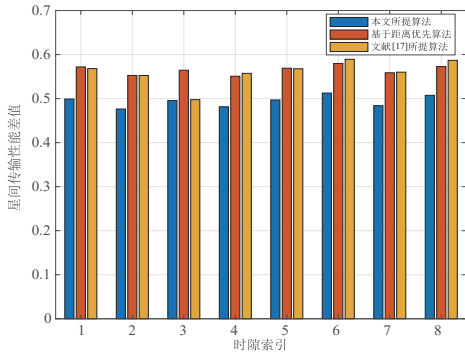


图3 各时隙星间传输性能差值(不同优化策略)

Figure 3 Inter-satellite transmission performance difference per time slot (different optimization strategies)

图4给出了卫星和速率与最大发送功率关系图。对比起见,图中给出了不同天线数量对应的卫星和速率。从图中可看出,随着卫星最大发送功率增加,卫星和速率相应增大。这是因为随着卫星最大发送功率的增加,可设计具有更优性能的发... (text continues)

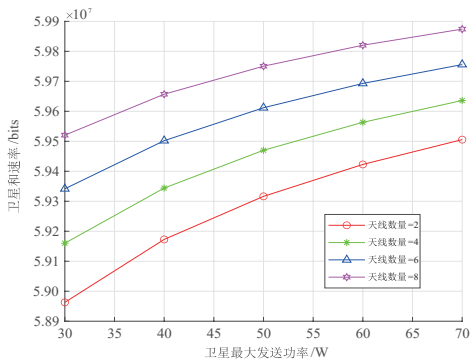


图4 卫星最大发送功率与卫星和速率关系图

Figure 4 Satellite sum rate versus transmit power

图5给出了本文提出的基于PPO的点波束调度算法对应的系统累积奖励与算法训练轮数关系图。从图中可看出,当训练轮数较少时,累积奖励呈现较大波动;随着训练轮数的增加,累积奖励值趋于稳定,算法达到收敛。由图还可以看出,算法收敛时对应的训练轮次数量较低。这是因为PPO算法通过引入裁剪机制有效控制了策略更新幅度。此外,PPO算法优化策略函数,通过重要性采样重复利用经验数据,可提高样本效率,提升算法训练稳定性及收敛性

能。图中也给出了不同算法学习率对应的系统累积奖励对比。从图中可以看出,学习率较高时,算法收敛相对较快。这是因为较高的学习率可以加速神经网络参数调整,减少算法收敛所需的训练轮次。

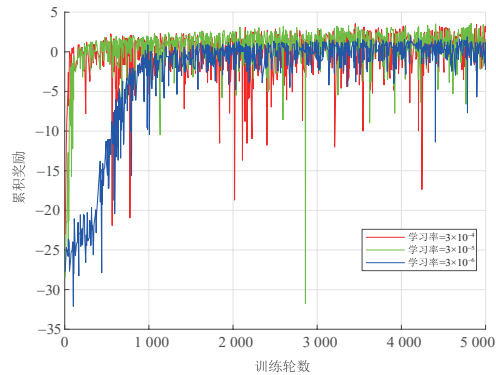


图5 系统累积奖励与算法训练轮数关系图

Figure 5 Reward versus the number of episodes

图6给出了卫星缓存队列长度与卫星最大发送功率关系图。图中给出了本文所提算法与文献[17]所提算法对应的系统性能对比,以及不同系统带宽对应的系统性能对比。从图中可以看出,随着卫星最大发送功率的增加,卫星缓存队列长度相应减小。这是因为随着卫星最大发送功率增加,发送端预编码性能提升,导致数据传输速率增大,缓存队列长度相应减小。对比不同系统带宽对应的卫星缓存队列长度可以看出,随着系统带宽增加,卫星缓存队列长度减小。这是因为增加系统带宽可以提高链路传输速率,导致缓存队列长度相应减小。与文献[17]中提出的算法相比,本文提出的算法具有更好的性能。这是因为文献[17]所提出的算法主要设计点波束调度策略,未考虑混合宽点波束调度,且未采用RSMA传输机制,导致链路传输速率降低,卫星队列长度相应增加。

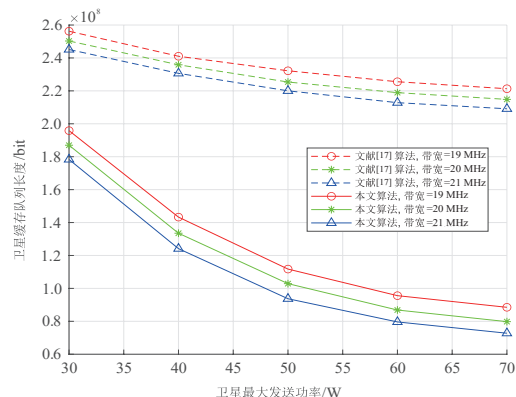


图6 卫星最大发送功率与卫星缓存队列长度关系图

Figure 6 Queue length versus transmit power

7 结论

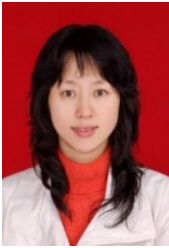
本文研究基于 RSMA 传输机制的多波束卫星通信系统中的用户分簇、混合宽点波束调度及预编码问题,以实现长期卫星缓存队列长度最小化。首先提出一种基于改进均值漂移算法的用户分簇策略,进而设计双尺度资源分配策略。仿真评估了天线数量、卫星最大发送功率和系统带宽等参数对系统性能的影响。仿真结果表明,相比于对比算法,本文所提算法可实现星间传输性能均衡及卫星队列长度性能优化。

参考文献

- [1] Luo Xuewen, Chen H H, Guo Qing. LEO/VLEO satellite communications in 6G and beyond networks-technologies, applications, and challenges[J]. IEEE Network, 2024, 38(5): 273-285.
- [2] Su Yongtao, Liu Yaoqi, Zhou Yiqing, et al. Broadband LEO satellite communications: Architectures and key technologies[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(2): 55-61.
- [3] Liu Qizan, Li Xi, Ji Hong, et al. User grouping-based beam handover scheme with load-balancing for LEO satellite networks[C]//GLOBECOM 2023 - 2023 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE, 2023: 3965-3970.
- [4] Zhu Hongtao, Wang Zhenyong, Li Dezhi, et al. Double grouping-based group handover scheme for mega LEO satellite networks[J]. China Communications, 2025, 22(2): 77-94.
- [5] Lin Zhiyuan, Ni Zuyao, Kuang Linling, et al. Satellite-terrestrial coordinated multi-satellite beam hopping scheduling based on multi-agent deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(8): 10091-10103.
- [6] Meng Meng, Hu Bo, Chen Shanzhi, et al. Dynamic beam pattern based on cooperation multi-agent VDN-D3QN for LEO satellite communication system[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2025, 9(2): 725-738.
- [7] Deng Huimin, Ying Kai, Feng Daquan, et al. Satellites beam hopping scheduling for interference avoidance[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2024, 42(12): 3647-3658.
- [8] Zhu Jianfeng, Sun Yaohua, Peng Mugen. Beam management in low earth orbit satellite communication with handover frequency control and satellite-terrestrial spectrum sharing[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(7): 5247-5263.
- [9] Meng Meng, Hu Bo, Chen Shanzhi, et al. Max-Min fairness robust beamforming for LEO satellite multibeam communication systems with two CSI uncertainty model[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(6): 9368-9381.
- [10] Huang Mengyan, Gong Fengkui, Li Guo, et al. Secure precoding for satellite NOMA-aided integrated sensing and communication[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(18): 29533-29545.
- [11] Alsenwi M, Lagunas E, Chatzinotas S. Robust beamforming for massive MIMO LEO satellite communications: A risk-aware learning framework[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(5): 6560-6571.
- [12] Lan Maomao, Hei Yongqiang, Li Wentao, et al. DNN based hybrid precoding design for IRS-aided mmWave MIMO systems with phase modulation array[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(12): 16123-16134.
- [13] Han Zhihao, Yang Tao, Liu Rongke. On beam hopping pattern design for satellite communication systems with hybrid precoding[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(1): 1364-1369.
- [14] Chen Lin, 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.
- [15] Gupta V K, Ha V N, Lagunas E, et al. Combining time-flexible GEO satellite payload with precoding: The cluster hopping approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(12): 16508-16523.
- [16] Chen Lin, Wu Linlong, Lagunas E, et al. Joint power allocation and beam scheduling in beam-hopping satellites: A two-stage framework with a probabilistic perspective[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(10): 14685-14701.
- [17] Jia Huaiqi, Wang Ying, Peng Haixia, et al. Dynamic beam hopping and resource allocation for non-uniform traffic demand in NGSO satellite communication systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(1): 816-830.
- [18] 柴蓉, 刘磊, 梁承超, 等. 面向用户多样化业务需求的多波束卫星系统动态资源分配算法[J]. 电子学报, 2024, 52(7): 2438-2448.
Chai Rong, Liu Lei, Liang Chengchao, et al. Diverse user service requirement-oriented dynamic resource allocation algorithm for multi-beam satellite systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(7): 2438-2448. (in Chinese)

- [19] Yue Tong, Liu Aijun, Liang Xiaohu. Double-layer precoder and cluster-based power allocation design for LEO satellite communication with massive MIMO[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(2): 650-654.
- [20] Clerckx B, Joudeh H, Hao Chenxi, et al. Rate splitting for MIMO wireless networks: A promising PHY-layer strategy for LTE evolution[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 98-105.
- [21] Carreira-Perpinan M A. Gaussian mean-shift is an EM algorithm[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(5): 767-776.
- [22] Neely M J. Stochastic network optimization with application to communication and queueing systems[M]. Cham: Springer International Publishing, 2010.
- [23] 张思雅, 柴蓉, 梁承超, 等. 基于成本函数优化的多波束卫星通信系统波束调度及资源分配算法[J]. 电子学报, 2025, 53(4): 1232-1240.
- Zhang Siya, Chai Rong, Liang Chengchao, et al. Cost function optimization-based beam scheduling and resource allocation algorithm for multibeam satellite communication systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2025, 53(4): 1232-1240. (in Chinese)
- [24] Gu Yang, Cheng Yuhu, Philip Chen C L, et al. Proximal policy optimization with policy feedback[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52(7): 4600-4610.

作者简介



柴蓉 女, 1974年7月出生于青海省西宁市。现为重庆邮电大学教授、博士生导师。主要研究方向为空地一体化网络架构及关键技术等。

E-mail: chairong@cqupt.edu.cn



梁承超 男, 1988年4月出生于贵州省贵阳市。现为重庆邮电大学教授、博士生导师。主要研究方向为移动通信、无线网络、卫星互联网及优化理论等。

E-mail: liangcc@cqupt.edu.cn



刘瑾 女, 1996年11月出生于河北省唐山市。现为重庆邮电大学硕士研究生。主要研究方向为卫星通信、无线资源分配等。

E-mail: s230131065@stu.cqupt.edu.cn



陈前斌 男, 1967年4月出生于四川省营山县。现为重庆邮电大学教授。主要研究方向为无线通信等。中国电子学会会员编号: E190000713S。

E-mail: chenqb@cqupt.edu.cn