

面向用户传输差异的低轨道地球卫星资源分配策略

陈发堂, 黄淼, 金宇峰

(重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 低轨道地球卫星 (LEO) 上行链路通信场景下, 针对不同用户对于高容量传输 (HCT) 和高可靠性传输 (HRT) 需求的差异性, 对 2 种不同需求的用户进行频谱共享, 建立 HRT 用户需求受限下的 HCT 用户总和容量最大化的资源分配模型, 并联合用户功率和信道资源进行优化。基于信道衰减统计特性进行功率分配, 以应对信道衰减的随机性带来的不确定性挑战, 在功率分配的基础上, 应用匈牙利算法对用户进行两两配对, 共用同一信道。为了提升 HCT 用户的公平性, 将最小遍历容量的最大化纳入优化目标, 并在已有算法基础上引入一个平衡矩阵进行求解。仿真结果表明, 相较于其他几种算法, 所提算法在相同 HRT 用户中断概率下, HCT 用户的总和容量最高, 改进后算法在提升 HCT 用户公平性和鲁棒性上也有显著效果。

关键词: 低轨道地球卫星; 资源分配; 频谱共享; 匈牙利算法

中图分类号: TN927

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2023153

Resource allocation strategy of low earth orbit satellite oriented to user transmission difference

CHEN Fatang, HUANG Miao, JIN Yufeng

School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: In the low earth orbit (LEO) uplink communication scenario, aiming at the different needs of different users for high capacity transmission (HCT) and high reliability transmission (HRT), the spectrum of two users with different needs was shared, a resource allocation model for maximizing the total capacity of HCT users under the constraint of HRT users was established, and the user power and channel resources were optimized. Based on the statistical characteristics of channel fading, the power allocation was carried out to deal with the uncertainty challenge caused by the randomness of channel fading. On the basis of power allocation, the Hungarian algorithm was used to pair users to share the same channel. In order to improve the fairness of HCT users, the maximization of minimum ergodic capacity was included in the optimization goal, and a balance matrix was introduced to solve the problem based on the existing algorithms. Simulation results show that the total capacity of HCT users of the proposed algorithm is higher than that of other algorithms under the same HRT user outage probability, and the improved algorithm also has a significant effect on improving the fairness and robustness of HCT users.

Keywords: low earth orbit satellite, resource allocation, spectrum sharing, Hungarian algorithm

0 引言

低轨道地球 (LEO, low earth orbit) 卫星凭借其低成本、低时延、低功耗、低衰减等优势^[1-2], 近年

来得到了工业界和学术界的广泛关注, 已成为下一代移动通信网络的重要组成部分, 是未来空天地一体化发展的重要研究方向^[3-4]。然而, 随着 LEO 的大量部署, 所服务的用户逐渐增多, 频谱资源竞争

收稿日期: 2023-04-12; 修回日期: 2023-07-08

通信作者: 黄淼, S210101054@stu.cqupt.edu.cn

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目 (No.cstc2021jcyj-msxmX0454)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of Chongqing (No.cstc2021jcyj-msxmX0454)

激烈，用户对于传输性能的需求差异也越发明显。传统的无差别资源分配策略已不再适应用户增加所带来的差异性，并且无差别的资源分配也无法针对用户的需求做出公平性分配。因此，针对用户需求的差异性和资源分配的公平性的研究也是 LEO 资源分配的一个重要研究方向，目前已有大量研究为此做出了贡献。

文献[5]针对差异化服务需求以及容量请求的分布不均匀问题，研究了基于 DVB-S2X 卫星波束跳变的最优策略，确保每个波束服务公平性的同时，最大限度地提高传输的吞吐量。文献[6]通过设计低轨道地球卫星波束跳变策略，最大限度地提升波束照射的不同小区之间的服务公平性，特别是时延公平性。文献[7]以卫星能效最大化为优化目标，建立联合卫星功率和用户功率的优化模型。文献[8]联合低轨道地球卫星的波束和功率建立资源分配模型，以最大化全局能效为优化目标，并针对所建模型的非凸特性，将联合分配模型解耦为波束分配和功率分配进行求解。文献[9]针对用户不均匀分布的服务请求问题，提出了基于遗传算法的动态波束分配算法，并引入一种基于时分复用的多动作选择方法进一步降低算法复杂度。文献[10]提出一种基于用户服务质量约束的动态无线资源分配方案，对无线资源从无线射频单元选择、子载波分配和无线射频单元功率分配 3 个维度进行研究。文献[11]针对用户需求的非均匀分布，提出了联合功率和频谱分配的资源分配模型，并实现了一种带有寻优控制策略的遗传算法求解模型。

尽管现有研究在满足用户差异化传输方面已经取得了较大的成果，但仍存在以下两方面的问题：1) 现有研究大多只针对用户容量需求差异或者用户传输质量，而很少兼顾两者进行研究；2) 大多数低轨道地球卫星资源分配研究只关注星载资源和下行链路频谱优化问题，而很少考虑用户的功率资源和上行链路频谱优化问题。

针对以上问题，本文主要工作如下。

1) 根据用户对传输需求的差异，将用户划分为高可靠性传输 (HRT, high reliability transmission) 用户和高容量传输 (HCT, high capacity transmission) 用户，并联合上行链路用户功率资源和信道资源，建立 HRT 用户高可靠性传输条件下的 HCT 用户总和容量最大化模型。该模型为一个非凸非线性的多目标混合整数优化问题，很难直接求解。

2) 将所建模型解耦为功率分配和信道分配。其中，功率分配建立在信道衰减的统计特性基础上，以应对信道衰减的随机变化带来的挑战；信道分配建立在功率分配的基础上，应用匈牙利算法进行组合优化。

3) 为了提升 HCT 用户传输的公平性，本文在已建模型的基础上将最小 HCT 用户容量的最大化纳入优化目标，并引入一个平衡矩阵，协调最大值和最小值的关系，以确保资源分配的公平性。

1 系统模型

本文考虑 LEO 上行链路通信场景，如图 1 所示。LEO 和用户通信的天线特性参考 ITU-S.672^[12]，将单馈源圆波束的天线辐射特性估算参数定义为

$$G(\varphi) = \begin{cases} G_m - 3\left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^2, & 0 \leq \varphi \leq 2.88\varphi_0 \\ G_m - 25, & 2.88\varphi_0 < \varphi \leq 6.32\varphi_0 \\ \pi(\varphi), & 6.32\varphi_0 < \varphi \leq \varphi_1 \\ 0, & \varphi_1 < \varphi \end{cases} \quad (1)$$

其中， $G(\varphi)$ 为偏离主轴 φ 方向上的增益，单位为 dBi；离轴角 φ 为用户偏离波束中心方向的角度； G_m 为主瓣的最大增益； φ_0 为半波束角；

$\pi(\varphi) = G_m - 5 - 25 \lg\left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)$ ； φ_1 为使 $\pi(\varphi) = 0$ 时的 φ

值。假设 LEO 有 M 个波束，第 b 个波束内存在 U 个 HCT 用户和 V 个 HRT 用户。将波束集合表示为 $O = \{b | b = 1, 2, \dots, M\}$ ，HCT 用户集合表示为 $A = \{u | u = 1, 2, \dots, U\}$ ，HRT 用户集合表示为 $B = \{v | v = 1, 2, \dots, V\}$ ，为了提升频谱利用率和便于干扰管理，将 HCT 用户和 HRT 用户进行两两配对，共用同一上行链路信道^[13]。假设共用同一信道的 2 个用户存在干扰，而与其他用户之间的干扰忽略不计。

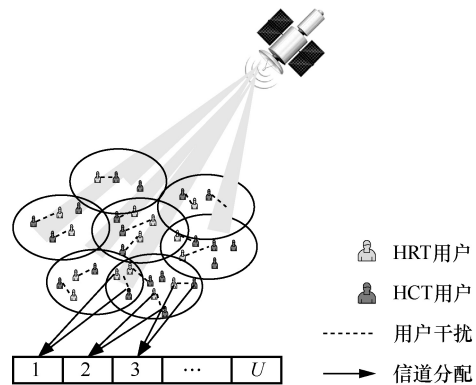


图 1 LEO 上行链路通信场景

1.1 信道模型

LEO 通信的信道增益主要包括收发端天线增益、自由空间损耗和大气衰减等^[14]，本文将信道衰减定义为自由空间损耗和其他非视距传播引起的衰减，计算式为

$$\gamma_{u,b} = \omega_{u,b} \sqrt{\eta_{u,b}} \quad (2)$$

其中， $\gamma_{u,b}$ 表示第 b 个波束中的第 u 个 HCT 用户的信道衰减因子，后文中的所有用户均表示第 b 个波束内的用户； η 表示路径损耗，定义为 $\eta = \left(\frac{c}{4\pi f D} \right)^2$ ， f 表示载波频率， D 表示传输距离， c 表示光速； $\omega_{u,b}$ 表示第 u 个 HCT 用户与 LEO 通信的非视距衰减系数，根据 LEO 的信道衰减特性，假设该衰减系数服从瑞利分布^[15]。

本文定义 HCT 用户与 LEO 通信的信道增益为

$$h_{u,b} = G_{u,b}(\varphi_t) G_{u,b}(\varphi_r) \gamma_{u,b} = g_{u,b} \gamma_{u,b} \quad (3)$$

其中， $G_{u,b}(\varphi_t)$ 表示 HCT 用户的天线发射增益， $G_{u,b}(\varphi_r)$ 表示 LEO 对 HCT 用户的天线接收增益， $g_{u,b}$ 表示发射天线和接收天线增益之积。HRT 用户的信道增益可表示为 $h_{v,b}$ 。

1.2 干扰模型

本文主要考虑共用同一信道的用户之间的干扰，而不同信道用户之间的干扰忽略不计。因此，对于 HCT 用户的通信仅存在一个与之匹配的 HRT 用户的干扰，反之亦然。定义 HCT 用户和 HRT 用户与 LEO 通信的信道干扰分别为

$$I_{u,b} = \sum_{v \in B} \varepsilon_{u,v}^b P_{v,b} h_{v,b} \quad (4)$$

$$I_{v,b} = \sum_{u \in A} \varepsilon_{u,v}^b P_{u,b} h_{u,b} \quad (5)$$

其中， $\varepsilon_{u,v}^b \in \{0,1\}$ ， $\varepsilon_{u,v}^b = 1$ 表示第 u 个 HCT 用户与第 v 个 HRT 用户共用同一信道； $P_{u,b}$ 和 $P_{v,b}$ 分别表示第 u 个 HCT 用户与第 v 个 HRT 用户的发射功率。

2 HCT 用户容量的最大化模型

基于式(3)~式(5)所示的信道增益和干扰，定义 LEO 在第 b 个波束中接收到的 HCT 用户和 HRT 用户的信噪比分别为

$$\text{SINR}_{u,b} = \frac{P_{u,b} h_{u,b}}{n_0 + I_{u,b}} \quad (6)$$

$$\text{SINR}_{v,b} = \frac{P_{v,b} h_{v,b}}{n_0 + I_{v,b}} \quad (7)$$

其中， n_0 为噪声功率。由于信道变化的随机特性，本文以各态历经容量的均值作为 HCT 用户容量的评估参数，且后文中的所有用户容量均表示各态历经容量。定义 HCT 用户的各态历经容量为

$$C_{u,v,b} = E[\text{lb}(1 + \text{SINR}_{u,b})] \quad (8)$$

本文目标是在确保 HRT 用户的中断概率小于某个阈值的条件下，保证 HCT 用户容量最大化，其中，中断概率为信噪比低于某个阈值的概率。为此，波束 b 中的所有 HCT 用户容量最大化模型为

$$\begin{aligned} & \max \sum_{b \in O} \sum_{u \in A} \varepsilon_{u,v}^b C_{u,v,b} \\ & \text{s.t. C1: } \Pr\{\text{SINR}_{v,b} < \lambda_0\} < p_0 \\ & \quad \text{C2: } 0 \leq P_{v,b} \leq P_{\max}, \forall v, b \\ & \quad \text{C3: } 0 \leq P_{u,b} \leq P_{\max}, \forall m, b \\ & \quad \text{C4: } \sum_{u \in A} \varepsilon_{u,v}^b \leq 1, \sum_{v \in B} \varepsilon_{u,v}^b \leq 1 \\ & \quad \text{C5: } \varepsilon_{u,v}^b \in \{0,1\}, \forall u, v, b \end{aligned} \quad (9)$$

其中， $C_{u,v,b}$ 表示第 u 个 HCT 用户与第 v 个 HRT 用户共用同一信道时的容量， λ_0 为 HRT 用户信噪比的阈值， p_0 为 HRT 用户中断概率的阈值， P_{\max} 为用户最大发射功率。C1 确保 HRT 用户的中断概率小于某个阈值。C2 和 C3 为用户发射功率不高于最大值和非负值保证。C4 和 C5 确保一个 HCT 用户与 HRT 用户两两配对，共享同一信道资源。该问题为一个联合信道分配和功率分配的混合整数优化问题，针对该问题的非线性和非凸特性，可以将该问题解耦为功率分配和信道分配 2 个阶段进行求解。

1) 功率分配阶段。仅考虑任意两对用户共用同一信道时信道容量的最优化问题，此时的决策变量只有 $P_{u,b}$ 和 $P_{v,b}$ 。

2) 信道分配阶段。在任意两对用户的功率分配得到求解的基础上进行用户配对，求解整体信道容量的最大值，此时问题转化为一个指配问题。

2.1 功率分配模型

本节暂不考虑信道分配对 HCT 用户容量的影响，仅考虑使每对共用同一信道的 HCT 用户的容量最大化和 HRT 用户的可靠性传输，假设每个 HCT 用户均有一个 HRT 用户与其共用一个信道，式(9)可简化为

$$\begin{aligned}
& \max C_{u,v,b} \\
& \text{s.t. C1: } \Pr\{\text{SINR}_{v,b} < \lambda_0\} < p_0 \\
& \quad \text{C2: } 0 \leq P_{v,b} \leq P_{\max}, \forall v,b \\
& \quad \text{C3: } 0 \leq P_{u,b} \leq P_{\max}, \forall u,b
\end{aligned} \quad (10)$$

该问题的决策变量只有 2 个，即 HCT 用户的发射功率 $P_{u,b}$ 和 HRT 用户的发射功率 $P_{v,b}$ ，约束条件 C1 包含了 $P_{u,b}$ 和 $P_{v,b}$ 的关系，为了得到 $P_{u,b}$ 和 $P_{v,b}$ 之间的关系，将 C1 进一步展开为

$$\begin{aligned}
& \Pr\{\text{SINR}_{v,b} < \lambda_0\} < p_0 \\
& \Rightarrow \Pr\left\{\frac{P_{v,b}h_{v,b}}{n_0 + P_{u,b}h_{u,b}} < \lambda_0\right\} < p_0 \\
& \Rightarrow \Pr\left\{\frac{P_{v,b}g_{v,b}\omega_{v,b}\sqrt{\eta_{v,b}}}{n_0 + P_{u,b}g_{u,b}\omega_{u,b}\sqrt{\eta_{u,b}}} < \lambda_0\right\} < p_0 \\
& \Rightarrow \Pr\left\{\omega_{v,b} < \frac{\lambda_0(n_0 + P_{u,b}g_{u,b}\omega_{u,b}\sqrt{\eta_{u,b}})}{P_{v,b}g_{v,b}\sqrt{\eta_{v,b}}}\right\} < p_0 \\
& \Rightarrow \Pr\{\omega_{v,b} < \alpha + \beta\omega_{u,b}\} < p_0
\end{aligned} \quad (11)$$

其中， $\omega_{u,b}$ 和 $\omega_{v,b}$ 为信道衰减系数，均服从参数为 σ 的瑞利分布，且相互独立。为了方便计算，式(11)中的 α 和 β 分别为

$$\alpha = \frac{\lambda_0 n_0}{P_{v,b}g_{v,b}\sqrt{\eta_{v,b}}}, \quad \beta = \frac{\lambda_0 P_{u,b}g_{u,b}\sqrt{\eta_{u,b}}}{P_{v,b}g_{v,b}\sqrt{\eta_{v,b}}} \quad (12)$$

附录 1 对式(11)进一步推导，得到

$$\begin{aligned}
& \int_0^\infty \int_0^{\alpha + \beta\omega_{u,b}} \frac{\omega_{v,b}}{\sigma^2} e^{-\frac{\omega_{v,b}^2}{2\sigma^2}} \frac{\omega_{u,b}}{\sigma^2} e^{-\frac{\omega_{u,b}^2}{2\sigma^2}} d\omega_{v,b} d\omega_{u,b} < p_0 \\
& \Rightarrow 1 - \int_0^\infty \frac{\omega_{u,b}}{\sigma^2} e^{-\frac{(\alpha + \beta\omega_{u,b})^2 + \omega_{u,b}^2}{2\sigma^2}} d\omega_{u,b} < p_0 \\
& \Rightarrow 1 - \int_0^\infty \frac{\omega_{u,b}}{\sigma^2} e^{-\frac{(\beta^2 + 1)\omega_{u,b}^2 + 2\alpha\beta\omega_{u,b} + \alpha^2}{2\sigma^2}} d\omega_{u,b} < p_0
\end{aligned} \quad (13)$$

其中

$$\lim_{\omega_{u,b} \rightarrow \infty} (\beta^2 + 1)\omega_{u,b}^2 + 2\alpha\beta\omega_{u,b} + \alpha^2 = \lim_{\omega_{u,b} \rightarrow \infty} (\beta^2 + 1)\omega_{u,b}^2 \quad (14)$$

$$\lim_{\omega_{u,b} \rightarrow 0} (\beta^2 + 1)\omega_{u,b}^2 + 2\alpha\beta\omega_{u,b} + \alpha^2 = \alpha^2 \quad (15)$$

由于式(13)积分无法获取其精确表达式，而此处积分仅仅是为了获取 HRT 用户和 HCT 用户功率的不等关系，因此，仅取其近似表达式。式(14)和式(15)表明， $(\beta^2 + 1)\omega_{u,b}^2 + 2\alpha\beta\omega_{u,b} + \alpha^2$ 的一次项在无穷大和无穷小时可以忽略不计，因此，本文将式(13)

积分简化为

$$\begin{aligned}
& \int_0^\infty \frac{\omega_{u,b}}{\sigma^2} e^{-\frac{(\beta^2 + 1)\omega_{u,b}^2 + \alpha^2}{2\sigma^2}} d\omega_{u,b} \\
& \Rightarrow \frac{1}{\beta^2 + 1} e^{-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}} \\
& \Rightarrow \frac{P_{v,b}^2 g_{v,b}^2 \eta_{v,b}}{\lambda_0^2 P_{u,b}^2 g_{u,b}^2 \eta_{u,b} + P_{v,b}^2 g_{v,b}^2 \eta_{v,b}} e^{-\frac{\lambda_0^2 n_0^2}{2\sigma^2 P_{v,b}^2 g_{v,b}^2 \eta_{v,b}}}
\end{aligned} \quad (16)$$

将式(16)的积分结果代入式(13)中可得

$$\begin{aligned}
& 1 - \frac{P_{v,b}^2 g_{v,b}^2 \eta_{v,b} e^{-\frac{\lambda_0^2 n_0^2}{2\sigma^2 P_{v,b}^2 g_{v,b}^2 \eta_{v,b}}}}{\lambda_0^2 P_{u,b}^2 g_{u,b}^2 \eta_{u,b} + P_{v,b}^2 g_{v,b}^2 \eta_{v,b}} < p_0 \\
& \Rightarrow P_{u,b}^2 < \frac{P_{v,b}^2 g_{v,b}^2 \eta_{v,b} \left(e^{-\frac{\lambda_0^2 n_0^2}{2\sigma^2 P_{v,b}^2 g_{v,b}^2 \eta_{v,b}}} + p_0 - 1 \right)}{(1 - p_0) \lambda_0^2 g_{u,b}^2 \eta_{u,b}} \\
& \Rightarrow P_{u,b} < P_{v,b} \sqrt{\frac{g_{v,b}^2 \eta_{v,b} \left(e^{-\frac{\lambda_0^2 n_0^2}{2\sigma^2 P_{v,b}^2 g_{v,b}^2 \eta_{v,b}}} + p_0 - 1 \right)}{(1 - p_0) \lambda_0^2 g_{u,b}^2 \eta_{u,b}}} \\
& \Rightarrow P_{u,b} < P_{v,b} f(P_{v,b})
\end{aligned} \quad (17)$$

其中， $f(P_{v,b})$ 是关于 $P_{v,b}$ 的单调增函数。由于固定 $P_{v,b}$ 时， $C_{u,v,b}$ 随 $P_{u,b}$ 单调递增，因此当 $P_{u,b} = \min(P_{\max}, P_{v,b} f(P_{v,b}))$ 时， $C_{u,v,b}$ 最大。接着在固定 $P_{u,b}$ 的情况下确定 $P_{v,b}$ 的取值。 $P_{v,b}$ 存在 2 种取值情况，分别讨论如下。

1) 当 $P_{\max} > P_{v,b} f(P_{v,b})$ 时， $P_{u,b} = P_{v,b} f(P_{v,b})$ ，代入式(8)可得

$$\begin{aligned}
C_{u,v,b} &= E \left[\text{lb} \left(1 + \frac{P_{u,b} h_{u,b}}{n_0 + P_{v,b} h_{v,b}} \right) \right] = \\
& E \left[\text{lb} \left(1 + \frac{P_{v,b} f(P_{v,b}) h_{u,b}}{n_0 + P_{v,b} h_{v,b}} \right) \right] = \\
& E \left[\text{lb} \left(1 + \frac{f(P_{v,b}) h_{u,b}}{\frac{n_0}{P_{v,b}} + h_{v,b}} \right) \right]
\end{aligned} \quad (18)$$

由式(18)可以得出，当 $P_{u,b} = P_{v,b} f(P_{v,b})$ 时， $C_{u,v,b}$ 随着 $P_{v,b}$ 单调递增，因此 $P_{v,b} = P_{\max}$ 时， $C_{u,v,b}$ 最大。

2) 同理，当 $P_{\max} < P_{v,b} f(P_{v,b})$ 时， $P_{u,b} = P_{\max}$ ，代入式(8)可以得出 $C_{u,v,b}$ 随 $P_{v,b}$ 单调递减。由于 $P_{v,b} f(P_{v,b})$ 是关于 $P_{v,b}$ 的增函数，因此当 $P_{v,b} f(P_{v,b}) = P_{\max}$ 时， $P_{v,b}$ 取值最小，此时 $C_{u,v,b}$ 最大。

综上所述， $C_{u,v,b}$ 取最大值时的 $P_{u,b}$ 和 $P_{v,b}$ 分别为

$$(P_{u,b}^*, P_{v,b}^*) = \begin{cases} (P_{\max} f(P_{\max}), P_{\max}), P_{\max} f(P_{\max}) < P_{\max} \\ (P_{\max}, \nabla(P_{v,b} f(P_{v,b}) = P_{\max})), P_{\max} f(P_{\max}) \geq P_{\max} \end{cases} \quad (19)$$

其中, $\nabla(\cdot)$ 表示求方程的解, $P_{u,b}^*$ 和 $P_{v,b}^*$ 为 $C_{u,v,b}$ 最大时的 $P_{u,b}$ 和 $P_{v,b}$ 。

2.2 信道分配模型

2.1 节的功率分配确定了任意共用同一信道的 HCT 用户容量最大值和 HRT 用户的可靠性传输, 本节主要目标是匹配 HCT 和 HRT 用户共用同一信道使整体 HCT 用户容量最大化。因此, 信道分配模型可简化为

$$\begin{aligned} \max & \sum_{b \in \mathbf{O}} \sum_{u \in \mathbf{A}} \varepsilon_{u,v}^b C_{u,v,b}^* \\ \text{s.t. C1:} & \sum_{u \in \mathbf{A}} \varepsilon_{u,v}^b \leq 1, \sum_{v \in \mathbf{B}} \varepsilon_{u,v}^b \leq 1 \\ \text{C2:} & \varepsilon_{u,v}^b \in \{0, 1\}, \forall u, v, b \end{aligned} \quad (20)$$

其中, $C_{u,v,b}^* = \max C_{u,v,b}$ 。当 HRT 用户的数量低于 HCT 用户数量时, 则有部分 HCT 用户单独使用一个信道, 假设该类用户受到的干扰忽略不计, 此时 HCT 用户的容量最大值为

$$C_{u,v,b}^* = E \left[\text{lb} \left(1 + \frac{P_{\max} h_{u,b}}{n_0} \right) \right] \quad (21)$$

至此, 信道分配模型简化为一个组合优化问题。匈牙利算法是一种在多项式时间内求解任务分配问题的组合优化算法, 因此本文应用匈牙利算法对 HRT 用户和 HCT 用户进行配对以获取整体最大 HCT 用户容量, 为了便于表示, 本文将元素 $\varepsilon_{u,v}^b$ 和元素 $C_{u,v,b}^*$ 构成的矩阵分别定义为 $\boldsymbol{\varepsilon}^b$ 和 \mathbf{C}^b , 其大小均为 $U \times V$ 。具体步骤如算法 1 所示。

算法 1 针对式(9)的资源分配算法

初始化 HRT 和 HCT 用户数量 U 和 V 、用户功率最大值 P_{\max} 以及 LEO 网络各项参数

- 1) for $b = 1, 2, \dots, M$
- 2) if $U > V$
- 3) for $u = 1, 2, \dots, U; v = 1, 2, \dots, V$
- 4) if $u > V$
- 5) 根据式(21)计算 $C_{u,v,b}^*$
- 6) else if $u \leq V$
- 7) 根据式(19)获取 $(P_{u,b}^*, P_{v,b}^*)$

- 并将其代入式(8)计算 $C_{u,v,b}^*$
- 8) end if
- 9) end for
- 10) else if $U == V$
- 11) for $u = 1, 2, \dots, U; v = 1, 2, \dots, V$
- 12) 根据式(19)获取 $(P_{u,b}^*, P_{v,b}^*)$ 并将其代入式(8)计算 $C_{u,v,b}^*$
- 13) end for
- 14) 将矩阵 $-\mathbf{C}^b$ 作为代价矩阵代入匈牙利算法, 获取最优分配矩阵 $\boldsymbol{\varepsilon}^b$
- 15) end if
- 16) end for
- 17) 计算 $\sum_{b \in \mathbf{O}} \sum_{u \in \mathbf{A}} \varepsilon_{u,v}^b C_{u,v,b}^*$

3 最小 HCT 用户容量的最大化模型

第 2 节从整体 HCT 用户容量最大化的角度进行资源分配, 确保了整体 HCT 用户传输的高吞吐量, 但由于部分用户的信道衰减严重, 信道分配过程中无法确保每个 HCT 用户的容量都最大, 但是可以通过算法在求整体容量最大化的同时, 使最小 HCT 用户容量尽可能大。本节在式(20)的信道分配中将最小 HCT 用户容量的最大化纳入优化目标, 其问题建模为

$$\begin{aligned} \max & \sum_{b \in \mathbf{O}} \sum_{u \in \mathbf{A}} \varepsilon_{u,v}^b C_{u,v,b}^* \\ \max \min & \boldsymbol{\varepsilon}^b \mathbf{C}^b \\ \text{s.t. C1:} & \sum_{u \in \mathbf{A}} \varepsilon_{u,v}^b \leq 1, \sum_{v \in \mathbf{B}} \varepsilon_{u,v}^b \leq 1 \\ \text{C2:} & \varepsilon_{u,v}^b \in \{0, 1\}, \forall u, v, b \end{aligned} \quad (22)$$

该问题的求解目标是在求整体 HCT 用户容量的基础上确保最小 HCT 用户容量的值能够最大化。该问题是一个平衡最大最小值的问题, 针对该问题的特性, 引入一个平衡系数 $\delta_{u,v}^b$, 并将其定义为

$$\delta_{u,v}^b = \begin{cases} 0, & C_{u,v,b}^* > C_{b,\min} \\ -1, & C_{u,v,b}^* \leq C_{b,\min} \end{cases} \quad (23)$$

如果经过信道分配后的 $C_{u,v,b}^*$ 全部大于 $C_{b,\min}$, 那么 $C_{b,\min}$ 就是 HCT 用户容量的最小值, 使这个最小值最大化就是需要完成的目标, 因此, 可以将 $C_{u,v,b}^*$ 的组合问题转换为 $\delta_{u,v}^b$ 的组合问题; 然后, 应用匈牙利算法使其成本值为 0, 即满足 $C_{u,v,b}^*$ 全部大于 $C_{b,\min}$; 最后, 通过二分搜索 $C_{b,\min}$, 找出能使匈

匈牙利算法成本为 0 的最大 $C_{b,\min}$ ，此时的分配策略也是整体 HCT 用户容量最大化的分配策略，其具体求解过程如算法 2 所示。

算法 2 针对式(22)的资源分配算法

初始化 HRT 和 HCT 用户数量 U 和 V 、用户功率最大值 P_{\max} 以及 LEO 网络各项参数

- 1) 应用算法 1 获取 C^b ，并按升序排列
- 2) 定义 left = 1, right = UV
- 3) for $b = 1, 2, \dots, M$
- 4) while left < right do
- 5) mid = $\frac{\text{right} + \text{left}}{2}$
- 6) 初始化平衡矩阵 δ^b ，以及 $C_{b,\min} = C_{b,\text{mid}}$
- 7) for $u = 1, 2, \dots, U; v = 1, 2, \dots, V$
- 8) if $C_{v,u,b} \leq C_{b,\min}$
- 9) $\delta_{u,v}^b = -1$
- 10) else if $C_{v,u,b} > C_{b,\min}$
- 11) $\delta_{u,v}^b = 0$
- 12) end if
- 13) end for
- 14) 将平衡矩阵 δ^b 作为成本矩阵代入匈牙利算法中，获取其分配结果 ε^b
- 15) 根据分配结果计算平衡偏移
- 16) $d = \sum_{u \in A} \varepsilon_{u,v}^b \delta_{u,v}^b$
- 17) if $d < 0$
- 18) 最小值向左移动，即 right = mid
- 19) else if $d = 0$
- 20) 最小值向右移动，即 left = mid
- 21) end if
- 22) end while
- 23) 根据最后获取的分配结果计算 $\sum_{b \in \mathcal{O}} \sum_{u \in A} \varepsilon_{u,v}^b C_{u,v,b}^*$
- 24) $C_{b,\min}$ 即波束 b 的最小 HCT 用户容量
- 25) end for

4 仿真结果与分析

4.1 参数设置

为了验证所提算法的有效性及其性能，本文对多波束 LEO 通信的上行链路场景进行仿真，LEO 的主要参数设置参考 3GPP NTN 38.811 标准^[16]，具体的仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数名称	取值
卫星高度 H /km	600
卫星波束个数 M /个	10
LEO 波束半径 R /km	60
半波束角 φ_0	2°
上行链路载频 f /GHz	20
卫星最大天线增益 G_m^r /dBi	40
用户最大天线增益 G_m^t /dBi	20
噪声功率 n_0 /dBm	174
用户最大发射功率 P_{\max} /dBm	30
HRT 用户信噪比阈值 λ_0	3
HRT 用户中断概率阈值 p_0	0.3
波束内 HRT 用户数 U /个	50
波束内 HCT 用户数 V /个	50
瑞利分布参数 σ	0.3

4.2 仿真结果分析

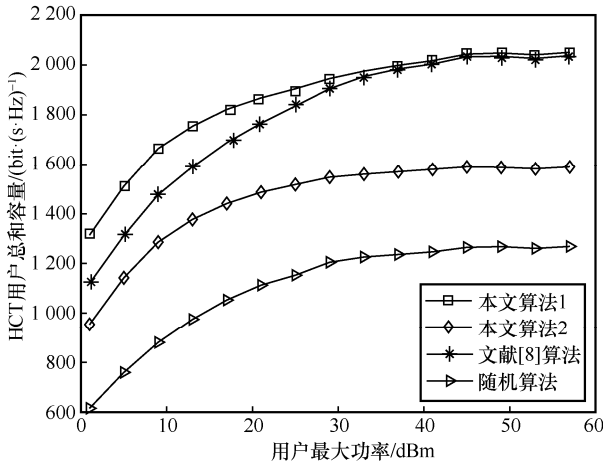
为了验证所提算法的优越性，本节对比了文献[8]中的两步分配算法和随机算法。对比算法具体介绍如下。

文献[8]算法。该算法分两步进行分配，即功率分配和信道分配，功率与信道交替优化。先初始化功率为最大功率，然后应用匈牙利算法进行信道分配，确定信道分配后应用丁克尔巴赫算法进行功率优化。

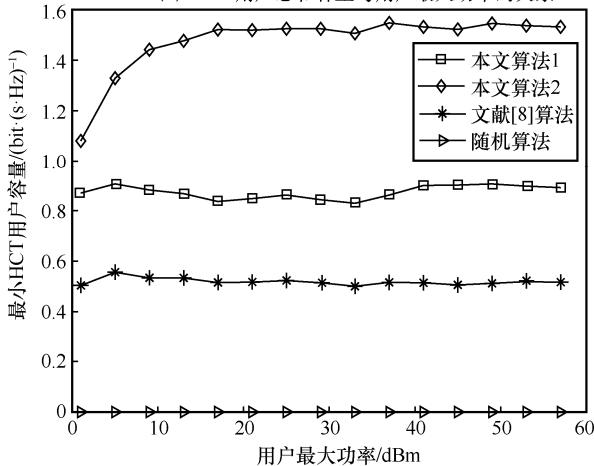
随机算法。随机算法是在信道分配过程中，将用户进行两两随机配对，但是在功率分配中依然与本文算法中的分配策略保持一致。

本文所有仿真均取 1 000 次通信链路结果的平均值作为最后的仿真结果。图 2(a)和图 2(b)分别展示了 LEO 覆盖下 HCT 用户总和容量和最小 HCT 用户容量与用户最大功率的关系。从图 2(a)可以看出，随着用户最大功率的提升，HCT 用户总和容量逐渐增加， $P_{\max} = [0, 30]$ dBm 时，对用户最大功率的变化较为敏感； $P_{\max} > 30$ dBm 时，HCT 用户的总和容量变化缓慢，这是由于当 P_{\max} 较大时，用户之间的干扰限制了 HCT 用户容量的提升。当用户最大功率较低时，本文算法 1 对于 HCT 用户总和容量的提升明显高于其他几种算法；当用户最大功率 P_{\max} 较高时，算法 1 与文献[8]算法的 HCT 用户总和容量相差不大，这是因为用户最大功率越高，本文算法 1 受共用信道干扰的影响越大，因此对于 HCT

用户容量的提升有限。从图 2(b)可以看出，本文算法 2 的最小 HCT 用户容量明显高于其他算法。只有本文算法 2 的最小 HCT 用户容量随着最大功率的提升而提升，这是因为只有本文算法 2 将最小 HCT 用户容量纳入了优化目标，证明了其优化的有效性。



(a) HCT用户总和容量与用户最大功率的关系



(b) 最小HCT用户容量与用户最大功率的关系

图 2 HCT 用户容量与用户最大功率的关系

为了更直观地体现算法 2 能提升 HCT 用户容量的公平性，图 3 显示了几种不同分配算法下的 HCT 用户容量的累积分布函数。从图 3 可以看出，算法 2 的 HCT 用户容量集中分布于[2,4]bit/(s·Hz)，相比于其他几种算法，其最大值与最小值之间相差更小，分布更集中，证明了其分配的公平性更高。

下面验证 HRT 用户的可靠性传输性能与 HCT 用户总和容量的关系，图 4 显示了 HCT 用户容量与 HRT 用户中断概率的关系。从图 4 中可以看出，随着 HRT 用户中断概率的增加，HCT 用户总和容量和最小 HCT 用户容量均呈上升趋势，证明了 HRT 用户的可靠性传输与 HCT 用户的容量存在耦合关系。图 4(a)的结果表明，当牺牲 HRT 用户的可靠性

传输时，HCT 用户的容量就会增加。本文算法 1 在相同 HRT 用户中断概率下，HCT 用户总和容量相比于随机算法提升了约 62%，相较于文献[8]算法的提升并不明显，但文献[8]算法的最小 HCT 用户容量明显低于本文算法 1 和本文算法 2。如图 4(b)所示，随着 HRT 用户中断概率的增加，本文算法 2 的最小 HCT 用户容量增加最明显，且相同中断概率下，本文算法 2 相较于文献[8]算法的最小 HCT 用户容量提升了约 33%。

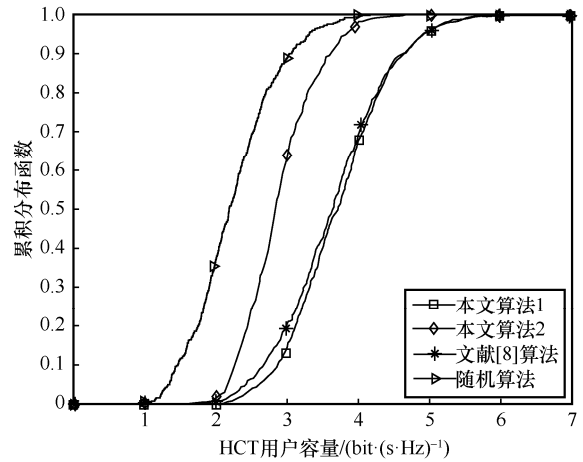
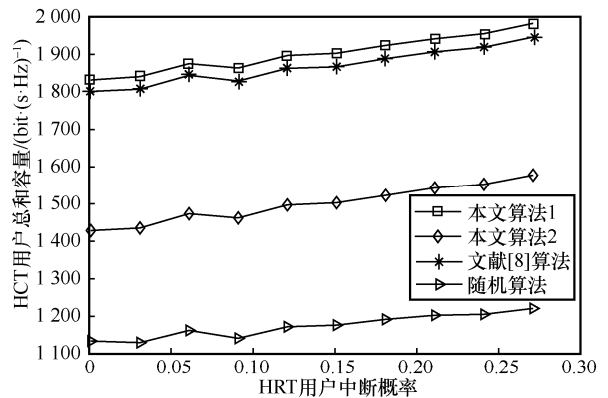
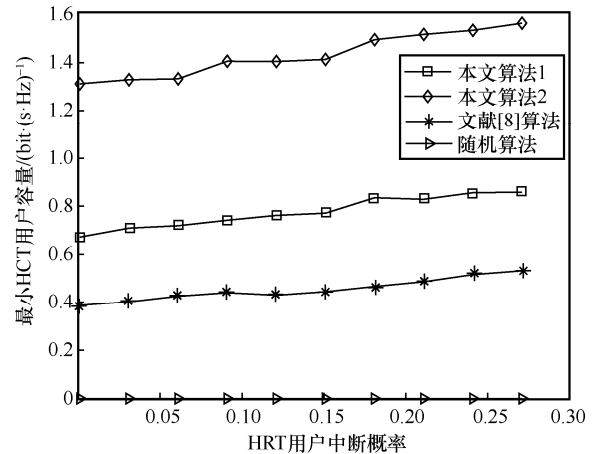


图 3 HCT 用户容量的累积分布函数



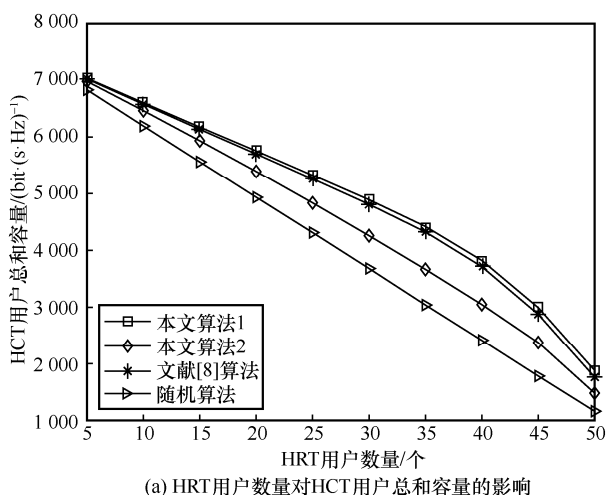
(a) HCT用户总和容量与HRT用户中断概率的关系



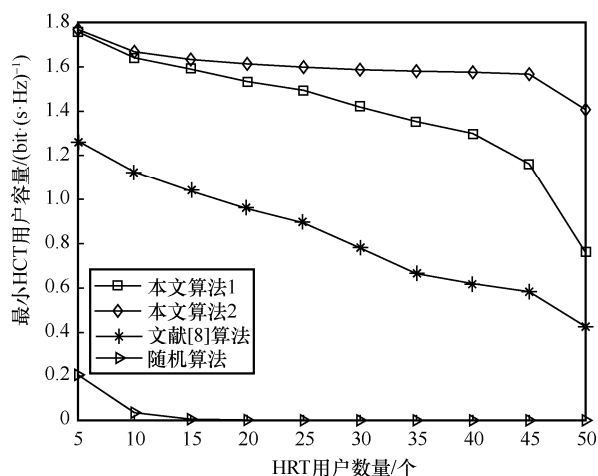
(b) 最小HCT用户容量与HRT用户中断概率的关系

图 4 HCT 用户容量与 HRT 用户中断概率的关系

HRT 用户数量对 HCT 用户容量的影响如图 5 所示。从图 5(a)可以看出,随着 HRT 用户数量的增加,HCT 用户总和容量逐渐减小,其中本文算法 1 和文献[8]算法在提升 HCT 用户总和容量方面有着明显优势。从图 5(b)可以看出,本文算法 2 随着 HRT 用户数量的增加,最小 HCT 用户容量下降速度相比于其他算法更缓慢,证明了其抵抗 HRT 用户干扰的能力更强,拥有更好的鲁棒性;文献[8]算法随着 HRT 用户数量增加,最小 HCT 用户容量明显下降,证明了其抗干扰能力较差。



(a) HRT 用户数量对 HCT 用户总和容量的影响



(b) HRT 用户数量对最小 HCT 用户容量的影响

图 5 HRT 用户数量对 HCT 用户容量的影响

5 结束语

本文主要研究了 LEO 上行链路通信场景的资源分配问题,针对用户对传输性能需求的差异性,本文将具有不同性能需求的用户两两配对,制定了同时优化传输可靠性和传输容量的资源分配模型,

旨在使 HRT 用户中断概率保持较低水平的同时,确保 HCT 用户的容量足够大,其中,本文以 HRT 用户的信噪比低于某个阈值的概率作为中断概率。该模型为一个联合信道分配和功率分配的组合优化问题,针对该问题的难解性,将其解耦为功率分配和信道分配。对于功率分配,本文主要通过信道衰减的统计特性,获取 HCT 用户和 HRT 用户的约束关系,并根据该约束关系,推导出用户功率与 HCT 用户容量的变化关系,从而获取最佳功率分配。对于信道分配,本文应用匈牙利算法求解最佳组合方案。最后,为了提升资源分配的公平性,本文在算法 1 的基础上提出算法 2,将对最小 HCT 用户容量的提升纳入优化方案。仿真结果表明,本文算法 1 在满足 HRT 用户中断概率较低的同时,能获取的 HCT 用户总和容量最大。本文算法 2 在用户的公平性上有显著优势,且其对于 HRT 用户的抗干扰能力最强。

附录 1 式(11)~式(13)的推导

式(11)中 $\omega_{u,b}$ 和 $\omega_{v,b}$ 为信道衰减系数,其服从参数为 σ 的瑞利分布。瑞利分布的分布函数为

$$F(z) = \int_0^z \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{\sigma^2}} dx, 0 < x \quad (24)$$

由于 $\omega_{u,b}$ 和 $\omega_{v,b}$ 为不同用户的信道衰减,因此相互独立,则有

$$\begin{aligned} & \Pr\{\omega_{v,b} < \alpha + \beta\omega_{u,b}\} \\ & \Rightarrow \Pr\{0 < \omega_{v,b} < \alpha + \beta\omega_{u,b}, 0 < \omega_{u,b} < \infty\} \\ & \Rightarrow F(\alpha + \beta\omega_{u,b})F(\infty) \\ & \Rightarrow \int_0^\infty \int_0^{\alpha + \beta\omega_{u,b}} \frac{\omega_{v,b}}{\sigma^2} e^{-\frac{\omega_{v,b}^2}{\sigma^2}} \frac{\omega_{u,b}}{\sigma^2} e^{-\frac{\omega_{u,b}^2}{\sigma^2}} d\omega_{v,b} d\omega_{u,b} \quad (25) \end{aligned}$$

参考文献:

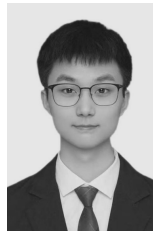
- [1] WANG C X, HAIDER F, GAO X Q, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 122-130.
- [2] CHEN S Z, ZHAO J. The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 36-43.
- [3] AGI WAL M, ROY A, SAXENA N. Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 1617-1655.
- [4] KODHELI O, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Satellite communications in the new space era: a survey and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 23(1): 70-109.
- [5] HU X, ZHANG Y C, LIAO X L, et al. Dynamic beam hopping method based on multi-objective deep reinforcement learning for next

- generation satellite broadband systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2020, 66(3): 630-646.
- [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] MA Y Y, LV T J, ZHANG X W, et al. High energy efficiency transmission in MIMO satellite communications[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [8] LIAO Q B, KANEKO M. Global energy efficiency optimization of a Ka-band multi-beam LEO satellite communication system[J]. IEEE Access, 2021, 9: 55232-55243.
- [9] WANG L B, HU X, MA S J, et al. Dynamic beam hopping of multi-beam satellite based on genetic algorithm[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Parallel & Distributed Processing with Applications, Big Data & Cloud Computing, Sustainable Computing & Communications, Social Computing & Networking (ISPA/BDCLOUD/SocialCom/SustainCom). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1364-1370.
- [10] 徐东明, 谭静茹, 关文博. 基于改进遗传算法的 C-RAN 网络动态无线资源分配[J]. 电讯技术, 2021, 61(10): 1225-1232.
XU D M, TAN J R, GUAN W B. Dynamic wireless resource allocation based on improved genetic algorithm in C-RAN networks[J]. Telecommunication Engineering, 2021, 61(10): 1225-1232.
- [11] 王磊, 郑军, 贺川, 等. 高通量多波束通信卫星系统资源分配方法[J]. 中国空间科学技术, 2021, 41(5): 85-94.
WANG L, ZHENG J, HE C, et al. Resource allocation in high throughput multibeam communication satellite systems[J]. Chinese Space Science and Technology, 2021, 41(5): 85-94.
- [12] International Telecommunication Union-Radio (ITU-R). Satellite antenna radiation pattern for use as a design objective in the fixed-satellite service employing geostationary satellites: Rec. ITU-R S. 672 [S]. 1997.
- [13] 蔡艳, 张晶, 朱洪波. 基于空间位置的混合频谱共享系统功率分配研究[J]. 通信学报, 2014, 35(2): 104-110.
CAI Y, ZHANG J, ZHU H B. Power allocation of hybrid spectrum sharing based on the spatial location[J]. Journal on Communications, 2014, 35(2): 104-110.
- [14] 陈前斌, 麻世庆, 段瑞吉, 等. 基于迁移深度强化学习的低轨道地球卫星跳波束资源分配方案[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(2): 407-417.
CHEN Q B, MA S Q, DUAN R J, et al. A novel beam hopping resource allocation scheme of low earth orbit satellite based on transfer deep reinforcement learning[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(2): 407-417.
- [15] 梁承超, 段瑞吉, 麻世庆, 等. 面向能效的低轨道地球卫星联合跳波束调度和功率分配算法[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(2): 436-445.
LIANG C C, DUAN R J, MA S Q, et al. Joint beam hopping scheduling and power allocation of LEO satellites oriented energy efficiency[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(2): 436-445.
- [16] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks: TR 38.811 V15.4.0[S]. 2020.

[作者简介]



陈发堂 (1965-), 男, 重庆人, 重庆邮电大学研究员、硕士生导师, 主要研究方向为移动通信物理层算法仿真及软件开发。



黄森 (1998-), 男, 四川达州人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为低轨卫星无线通信资源分配算法。



金宇峰 (1999-), 男, 湖北荆州人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为低轨卫星边缘计算与任务卸载。