

基于能量效率的星地 NOMA 网络功率分配算法

李 信, 李勇军, 赵尚弘

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安 710077)

摘要: 为了提高卫星地面网络的能量效率和用户服务公平性, 减小系统内干扰, 本文提出了一种基于能量效率的星地非正交多址 (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) 网络功率分配算法。首先基于最大化系统能量效率原则, 设计了一种卫星用户选择和地面用户分组策略。其次以系统内干扰、最大发射功率以及用户服务质量为约束条件, 建立了地面和卫星功率分配优化模型, 利用连续凸近似和 Dinkelbach 法, 将基于能量效率的非凸问题转化为凸优化问题, 并利用拉格朗日对偶法和次梯度迭代法求得解析解。研究表明, 当基站最大发射功率为 50 dBm 时, 相对于贪婪算法策略, 所提配对策略能量效率提升约 13.4%, 相对于固定相关度策略, 所提配对策略能量效率提升约 8.2%, 相比于正交多址功率分配策略, 所提联合最优功率分配算法系统能量效率提升约 10.1%。

关键词: 卫星通信; 星地链路; 非正交多址; 功率分配; 能量效率; 凸优化; 服务质量

基金项目: 国家自然科学基金 (No.91638101); 陕西省自然科学基金 (No.2018JM6069)

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)05-1310-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220259

Power Allocation in Satellite-Terrestrial NOMA Network Based on Energy Efficiency

LI Xin, LI Yong-jun, ZHAO Shang-hong

(Institute of Information and Navigation, Air Force Engineer University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: In order to improve the energy efficiency and service fairness of satellite-terrestrial networks, and reducing the intra-system interference, this paper proposes an energy-efficiency power allocation algorithm for satellite-terrestrial non-orthogonal multiple access networks. Firstly, we design a strategy for satellite users selection and terrestrial users grouping based on the principle of maximizing system energy efficiency. Secondly, we establish a satellite and terrestrial power allocation optimization model under the constraints of the intra-system interference, maximum emission power, and users service quality. Then, the non-convex problem based on energy efficiency is converted into the convex optimization problem by the successive convex approximation and Dinkelbach method. The analytical solutions are obtained by the Lagrangian dual and subgradient iteration approach. The results show that the energy efficiency of the proposed pairing strategy improves by about 13.4% relative to the greedy algorithm strategy and improves by about 8.2% relative to the fixed correlation strategy when the maximum emission power of the base station is 50 dBm. And the energy efficiency of the proposed joint optimal power allocation algorithm increases by about 14.5% compared to the orthogonal multiple access power allocation strategy.

Key words: satellite communications; satellite-terrestrial link; non-orthogonal multiple access; power allocation; energy efficiency; convex optimization; service quality

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.91638101); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (No.2018JM6069)

1 引言

随着无线通信技术的飞速发展, 移动数据业务和流量呈现爆炸式增长, 给地面网络有限的频谱资源带来了巨大的挑战^[1,2]。借助于日益成熟的卫星通信手

段, 实现卫星通信与地面 5G 蜂窝网络的深度融合是未来的一个发展趋势^[3,4]。相比于传统的正交多址技术 (Orthogonal Multiple Access, OMA), 地面 5G 网络中的非正交多址技术 (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) 可以显著提高网络的吞吐量和可靠性, 同时还

可以满足异构网络的要求^[5,6]. 将 NOMA 技术应用到星地协同网络中,还可以进一步提高网络的能效,适用于未来大规模的网络连接^[7].

NOMA 技术的关键是通过发射机的叠加编码(Superposition Coding, SC)和接收机的连续干扰消除技术(Successive Interference Cancellation, SIC)为不同信道条件的多个用户提供服务^[8,9]. 随着认知无线电以及毫米波技术的发展,为了进一步共享有限的频率资源,卫星网络和地面蜂窝网络将在同一频段下进行工作,一个不可避免地问题就是两个网络间的同频干扰^[10-13]. 通过在地面基站和卫星处执行波束成形可以在一定程度上减小两个网络间的干扰,然而该方法存在一定瓶颈. 另一个有效的途径是通过设计功率分配算法(power allocation algorithm)减小两个网络间的干扰,进而提高整个网络的能量效率(energy efficiency)^[14].

近年来, NOMA 网络资源分配问题已经取得了许多有价值的成果. 文献[15]利用 Stackelberg 博弈模型,提出了一种基于价格的功率分配方案,研究了基站收益和用户效用的最大化问题,并证明了其性能优于统一功率分配方案. 文献[16]研究了最大化总传输功率和用户最小速率约束下的上行 NOMA 吞吐量最大化问题,通过凸优化(convex optimization)方法进行求解,并证明了其性能优于正交多址分配方案. 考虑到不完美信道状态对资源分配的影响,文献[17]提出了一种多蜂窝多用户 NOMA 网络的稳健资源分配算法,并证明了该算法具有良好的摄动抑制能力.

然而上述研究都是基于地面蜂窝网络,忽略了卫星网络的作用. 针对卫星网络的应用,文献[18]提出了一种两阶段多目标优化算法来解决多波束卫星的功率分配问题,利用帕累托最优来作为功率与速率的折衷,显著降低了系统能耗并提高了用户满意度. 文献[19]提出了一种最大化网络吞吐量的卫星地面协作方案,将卫星和地面的吞吐量建模为一个联合优化问题,利用凸优化算法进行求解. 在文献[19]基础上,文献[20]研究了卫星地面 NOMA 网络的能量效率优化问题,利用交替方向乘法法来进行求解,并分析了天线数量对能量效率的影响. 然而以上研究没有考虑引入卫星后对地面网络造成干扰使地面网络能量效率下降的问题,并且在优化时缺少对卫星功率资源紧缺性的考虑.

本文研究了基于能量效率的星地 NOMA 网络功率分配问题,针对星地协同网络中卫星对地面网络造成的干扰问题,提出了一种星地协同功率分配算法,通过凸优化方法进行求解,并通过仿真验证了所提算法的有效性.

2 系统模型与问题描述

2.1 星地 NOMA 网络模型

本文考虑基于 NOMA 的星地网络下行传输场景,卫星和地面基站协同为地面用户提供服务,系统模型如图 1 所示. 星地 NOMA 网络由地面网关、卫星、地面基站、用户及其对应的链路构成. 地面网关是整个星地协同网络的核心,其通过卫星和基站的链路状态反馈信息来获取两个网络的信道以及干扰信息,利用功率分配算法对两个网络做出功率分配决策,从而实现对星地协同网络的集中控制. 考虑到系统负载和实现的复杂性,地面网络采用双用户 NOMA 方案,并且该方案可扩充到多用户场景条件.

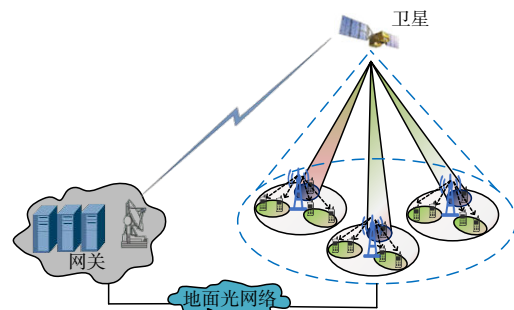


图 1 基于 NOMA 的星地网络系统模型

假设系统中有 1 颗卫星和 R 个地面基站,用户集表示为 $\{U_1, U_2, \dots, U_R\}$, U_r 表示基站 r 覆盖范围的用户集. 基站配备 N 根天线,在基站处采用波束成形技术来减少组间干扰,每一个基站可以为最多 N 组用户提供服务. 卫星和地面基站配备多天线,用户配备单天线. 地面基站需要为 K_r 个用户提供服务,假设 $K_r > 2N$,即基站不能为所有用户服务,由卫星为剩余 $K_r - 2N$ 个用户提供服务. 系统参数如表 1 所示.

表 1 系统参数描述

符号	定义	符号	定义
K_r	基站用户数量	P_{SC}	卫星电路功率消耗
N	基站天线数量	σ_n	加性高斯白噪声
M	卫星天线数量	α_{Bri}	NOMA 功率分配因子
P_{Bmax}	基站最大发射功率	\mathbf{h}_{Bri}	基站信道向量
P_{Smax}	卫星最大发射功率	\mathbf{h}_{Sri}	卫星信道向量
P_{Bri}	基站用户功率	ω_{ri}	基站迫零波束矢量
P_{Sri}	卫星用户功率	\mathbf{v}_{ri}	卫星迫零波束矢量
P_{BC}	基站电路功率消耗		

地面基站和卫星处的发射信号分别表示为

$$y_{Br} = \sum_{i=1}^N \omega_{ri} \sqrt{P_{Bri}} (\sqrt{\alpha_{Bri}} x_{Bri} + \sqrt{1 - \alpha_{Bri}} x_{Bri'}) \quad (1)$$

$$y_S = \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{K_r - 2N} \mathbf{v}_{ri} \sqrt{P_{Sri}} x_{Sri} \quad (2)$$

y_{Br} 表示第 r 个地面基站的发射信号, x_{Brim} 表示近端用户接收信号, x_{Brif} 表示远端用户接收信号, 并且 $E[|x_{Brim}|^2] = E[|x_{Brif}|^2] = 1$. y_s 表示卫星向地面用户的发射信号, x_{Sri} 表示卫星用户接收信号, 并且 $E[|x_{Sri}|^2] = 1$.

2.2 卫星用户选择和地面分组策略

功率分配前要确定由卫星节点服务的用户, 设 \mathbf{h}_{Sri} 和 \mathbf{h}_{Bri} 分别表示卫星和基站信道增益向量, 定义信道增益比 $\eta_{r,j} = |\mathbf{h}_{Sri}|/|\mathbf{h}_{Bri}|$. 由于很难找到低复杂度的最优卫星用户选择策略, 本文选择了一种次优的选择策略. 选择 $\eta_{r,j}$ 大的用户作为卫星用户, 实现较大卫星信道增益和较小的基站干扰. 首先计算用户的 $\eta_{r,j}$, 按照递减顺序排序, 选取前 $K_r - 2N$ 个用户作为卫星用户.

然后基于 NOMA 策略进行地面用户分组, 将 $2N$ 个用户按照信道增益 $|\mathbf{h}_{Bri}|$ 降序排列, 前 N 个用户作为近端用户, 后 N 个用户作为远端用户, 将分组问题转化为远近用户配对问题. 由文献[19]可知, 如果两个用户的信道是线性相关的, 在执行迫零波束形成时, 干扰将被完全消除. 受此启发, 将具有高信道相关性的用户进行配对. 用户间的信道相关系数定义为

$$\text{Corr}(i,j) = \frac{|\mathbf{h}_{Bri} \mathbf{h}_{Bri}^H|}{|\mathbf{h}_{Bri}| |\mathbf{h}_{Bri}|} \quad (3)$$

考虑系统的公平性, 需要兼顾每一组用户的信道相关系数, 定义信道相关系数阈值 ρ_{th} :

$$\text{Corr}(i,j) = \frac{|\mathbf{h}_{Bri} \mathbf{h}_{Bri}^H|}{|\mathbf{h}_{Bri}| |\mathbf{h}_{Bri}|} \geq \rho_{th} \quad (4)$$

为找到最大的 ρ_{th} , 将用户配对问题转化为二部图的完美配对问题, 利用匈牙利算法进行解决, 实现算法如算法 1 所示:

算法 1 基于 NOMA 的地面用户配对策略

- 1: 计算 K_r 个用户的 $\eta_{r,j}$, 选取前 $K_r - 2N$ 个用户作为卫星用户
- 2: 将基站 r 的 $2N$ 个用户按照 $|\mathbf{h}_{Bri}|$ 递减顺序排列
- 3: 前 N 个用户作为近端用户集 U_{Brim} , 后 N 个用户作为远端用户集 U_{Brif}
- 4: 初始化二部图 $G = (V, E)$, 边集 $e(i,j) = 0$
- 5: 利用式(3)计算近端用户和远端用户间的 $\text{Corr}(i,j)$
- 6: 初始化 $\rho_L = 0, \rho_R = 1, \epsilon = \epsilon_0$
- 7: repeat $\rho_{th} = (\rho_L + \rho_R)/2$
- 8: 对于所有近端用户和远端用户
- 9: if $\text{Corr}(i,j) > \rho_{th}, e(i,j) = 1$
- 10: else $e(i,j) = 0$
- 11: end if
- 12: 利用匈牙利算法计算二部图 G 的最大匹配度 G_m
- 13: if $G_m = N$, then
- 14: $\rho_L = \rho_{th}$
- 15: else $\rho_R = \rho_{th}$
- 16: end if
- 17: until $\rho_R - \rho_L \leq \epsilon$

算法 1 的运算复杂度主要来自于用户信道增益比排序、匈牙利算法计算最大匹配度和满足计算精度 ϵ 三部分, 由文献[21]可知, N 对节点的匈牙利算法计算复杂度为 $O(N^2)$, 因此算法 1 的计算复杂度为 $O(N^2 \log_2(\epsilon) + RK \log_2 K)$.

2.3 功率分配模型

2.3.1 地面功率分配模型

第 r 个基站的第 i 组近端用户和远端用户接收到的信号分别表示为

$$y_{Brim} = \mathbf{h}_{Brim}^H \sum_{i=1}^N \omega_{ri} \sqrt{P_{Bri}} (\sqrt{\alpha_{Bri}} x_{Brim} + \sqrt{1 - \alpha_{Bri}} x_{Brif}) + y_{Srim} + n \quad (5)$$

$$y_{Brif} = \mathbf{h}_{Brif}^H \sum_{i=1}^N \omega_{ri} \sqrt{P_{Bri}} (\sqrt{\alpha_{Bri}} x_{Brim} + \sqrt{1 - \alpha_{Bri}} x_{Brif}) + y_{Srif} + n \quad (6)$$

y_{Srim} 和 y_{Srif} 分别表示卫星用户对基站近端用户和远端用户的干扰信号, n 为加性高斯白噪声. 基于 NOMA 策略, 第 i 组近端用户和远端用户信噪比分别表示为

$$\gamma_{Brim} = \frac{|\mathbf{h}_{Brim}^H \omega_{ri}|^2 P_{Bri} \alpha_{Bri}}{\sigma_{BBI} + \sigma_{SBI} + \sigma_n} \quad (7)$$

$$\gamma_{Brif} = \frac{|\mathbf{h}_{Brif}^H \omega_{ri}|^2 P_{Bri} (1 - \alpha_{Bri})}{|\mathbf{h}_{Brif}^H \omega_{ri}|^2 P_{Bri} \alpha_{Bri} + \sigma_{BBI} + \sigma_{SBI} + \sigma_n} \quad (8)$$

σ_{BBI} 表示基站的组间干扰, σ_{SBI} 表示卫星用户对基站用户的干扰, 表达式分别为

$$\sigma_{BBI} = \sum_{j=1, j \neq i}^N |\mathbf{h}_{Bri}^H \omega_{rj}|^2 P_{Bri} \quad (9)$$

$$\sigma_{SBI} = \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^{K_r - 2N} |\mathbf{h}_{Sri}^H \omega_{rj}|^2 P_{Sri} \quad (10)$$

第 i 组用户的信道容量为

$$C_{Bri} = \log_2(1 + \gamma_{Brim}) + \log_2(1 + \gamma_{Brif}) \quad (11)$$

基站的能量效率 η_B 表示为

$$\eta_B = \frac{\sum_{i=1}^N C_{Bri}}{P_B + P_{BC}} = \frac{\sum_{i=1}^N \log_2(1 + \gamma_{Brim}) + \log_2(1 + \gamma_{Brif})}{\sum_{i=1}^N P_{Bri} + P_{BC}} \quad (12)$$

优化问题 P_1 表示为

$$\begin{aligned} & \max \eta_B \\ & \text{s.t. } C_1: \sum_{i=1}^N P_{Bri} \leq P_{Bmax} \\ & C_2: \sigma_{BBI} + \sigma_{SBI} + \sigma_n \leq P_{th} \end{aligned} \quad (13)$$

P_{th} 为干扰温度阈值, 约束条件 C_1 表示发射功率约束, 约束条件 C_2 表示干扰温度阈值约束.

2.3.2 卫星功率分配模型

第 i 个卫星用户接收到的信号表示为

$$y_{Sri} = \mathbf{h}_{Sri}^H \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{K_r-2N} \mathbf{v}_{ri} \sqrt{P_{Sri}} x_{Sri} + y_{Bri} + n \quad (14)$$

y_{Bri} 表示基站用户的干扰信号. 卫星用户解调信噪比表示为

$$\gamma_{Sri} = \frac{|\mathbf{h}_{Sri}^H \mathbf{v}_{ri}|^2 P_{Sri}}{\sigma_{BSI} + \sigma_{SSI} + \sigma_n} \quad (15)$$

σ_{BSI} 表示基站用户对卫星用户的干扰, σ_{SSI} 表示卫星用户间干扰, 表达式分别为

$$\sigma_{BSI} = \sum_{j=1}^N |\mathbf{h}_{Bri}^H \boldsymbol{\omega}_{rj}|^2 P_{Bri} \quad (16)$$

$$\sigma_{SSI} = \sum_{r=1}^R \sum_{j=1, j \neq i}^{K_r-2N} |\mathbf{h}_{Sri}^H \mathbf{v}_{rj}|^2 P_{Sri} \quad (17)$$

第 i 个卫星用户的信道容量为

$$C_{Sri} = \log_2(1 + \gamma_{Sri}) \quad (18)$$

卫星用户的能量效率 η_s 表示为

$$\eta_s = \frac{\sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{K_r-2N} C_{Sri}}{P_s + P_{SC}} = \frac{\sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{K_r-2N} \log_2(1 + \gamma_{Sri})}{\sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{K_r-2N} P_{Sri} + P_{SC}} \quad (19)$$

优化问题 P_2 表示为

$$\begin{aligned} & \max \eta_s \\ & \text{s.t. } C_3: \sum_{i=1}^N P_{Sri} \leq P_{S \max} \\ & \quad C_4: \sigma_{BSI} + \sigma_{SSI} + \sigma_n \leq P_{th} \end{aligned} \quad (20)$$

约束条件 C_3 表示发射功率约束, 约束条件 C_4 表示干扰温度阈值约束.

2.4 功率分配因子选取

功率分配因子选取既要考虑系统能量效率, 又要兼顾用户公平性. 为了最大化系统能量效率, 由文献 [22] 知, 此时 α_{Bri} 的值应设定为 1, 然而这意味着功率都分配给近端用户, 违背了 NOMA 策略的原则并且忽视了用户间公平性. 考虑用户公平性, 以传统的正交频分多址 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) 为基准, 远端用户的信道容量不应小于引入卫星网络后采用 OFDMA 的容量, 如式 (21) 所示:

$$C_{Bri} = \log_2(1 + \gamma_{Bri}) \geq \frac{1}{2} \log_2\left(1 + \frac{|\mathbf{h}_{Bri}^H \boldsymbol{\omega}_{ri}|^2 P_{Bri}}{\sigma_{SBI} + \sigma_n}\right) \quad (21)$$

由此得到功率分配因子 α_{Bri} 的上界:

$$\begin{aligned} \alpha_{Bri} & \leq \alpha_{Bri1} = \\ & \frac{|\mathbf{h}_{Bri}^H \boldsymbol{\omega}_{ri}|^2 P_{Bri} - (\sigma_{BSI} + \sigma_{SBI} + \sigma_n) \left(\sqrt{1 + \frac{|\mathbf{h}_{Bri}^H \boldsymbol{\omega}_{ri}|^2 P_{Bri}}{\sigma_{SBI} + \sigma_n}} - 1 \right)}{|\mathbf{h}_{Bri}^H \boldsymbol{\omega}_{ri}|^2 P_{Bri} \sqrt{1 + \frac{|\mathbf{h}_{Bri}^H \boldsymbol{\omega}_{ri}|^2 P_{Bri}}{\sigma_{SBI} + \sigma_n}}} \end{aligned} \quad (22)$$

当远端用户受到的干扰过大时, 由式 (22) 计算出的 α_{Bri} 可能为负值. 考虑到对近端用户的保护, 还应该确保近端用户的信道容量不应该小于引入卫星网络后采用 OFDMA 时的容量:

$$C_{Bri} = \log_2(1 + \gamma_{Bri}) \geq \frac{1}{2} \log_2\left(1 + \frac{|\mathbf{h}_{Bri}^H \boldsymbol{\omega}_{ri}|^2 P_{Bri}}{\sigma_{SBI} + \sigma_n}\right) \quad (23)$$

由此可以得到功率分配因子 α_{Bri} 的下界:

$$\begin{aligned} \alpha_{Bri} & \geq \alpha_{Bri2} \\ & = \frac{\left(\sqrt{1 + \frac{|\mathbf{h}_{Bri}^H \boldsymbol{\omega}_{ri}|^2 P_{Bri}}{\sigma_{SBI} + \sigma_n}} - 1 \right) (\sigma_{BSI} + \sigma_{SBI} + \sigma_n)}{|\mathbf{h}_{Bri}^H \boldsymbol{\omega}_{ri}|^2 P_{Bri}} \end{aligned} \quad (24)$$

通过式 (22) 和 (24) 可以确定功率分配因子 α_{Bri} 的取值范围. 考虑到在 NOMA 网络中, 由于近端用户的信道条件较好, 对系统的总体性能贡献更大, 因此在兼顾公平性的前提下倾向于保护近端用户, 功率分配因子选取原则如式 (25) 所示:

$$\alpha_{Bri} = \min\{\max\{\alpha_{Bri1}, \alpha_{Bri2}\}, 1\} \quad (25)$$

3 功率分配模型优化

3.1 地面功率分配优化

由于优化问题 P_1 是非线性分式规划问题, 难以求得全局最优解, 根据 Dinkelbach 法, 优化问题 P_1 问题可以改写为优化问题 P_3 :

$$\begin{aligned} & \max \sum_i^N [\log_2(1 + \gamma_{Bri}) + \log_2(1 + \gamma_{Bri})] \\ & \quad - \eta_B \left(\sum_i^N P_{Bri} + P_{BC} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

s.t. C_1, C_2

由于式 (26) 为非凸函数, 采用 SCA 将问题转化为凸优化问题. 文献 [23] 证明了 SCA 的收敛性. 采用对数近似法对目标函数进行逼近.

$$\ln(1 + \gamma_{Bri}) \geq \theta_{Bri} \ln \gamma_{Bri} + \beta_{Bri} \quad (27)$$

式 (27) 中,

$$\theta_{Bri} = \frac{\bar{\gamma}_{Bri}}{1 + \bar{\gamma}_{Bri}} \quad (28)$$

$$\beta_{Bri} = \ln(1 + \bar{\gamma}_{Bri}) - \frac{\bar{\gamma}_{Bri}}{1 + \bar{\gamma}_{Bri}} \ln \bar{\gamma}_{Bri} \quad (29)$$

进行变量替换, 令 $P_{Bri} = e^{\hat{P}_{Bri}}$, 原优化问题可以表述为优化问题 P_4 :

$$\begin{aligned} & \max \sum_i^N [\ln(1 + \gamma_{Bri}) + \ln(1 + \gamma_{Bri})] \\ & \quad - \eta_B \left(\sum_i^N e^{\hat{P}_{Bri}} + P_{BC} \right) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\text{s.t. } C_5: \sum_{i=1}^N e^{\hat{P}_{Bri}} \leq P_{B \max}, \quad C_2$$

通过拉格朗日对偶法求解该问题,拉格朗日函数为

$$L(\mathbf{e}^{\hat{P}_{Bri}}, \eta_B, \lambda_B, \varphi_B) = \sum_{i=1}^N [\ln(1 + \gamma_{Bri}) + \ln(1 + \gamma_{Bri})] - \eta_B (\sum_{i=1}^N \mathbf{e}^{\hat{P}_{Bri}} + P_C) + \lambda_B (P_{Bmax} - \sum_{i=1}^N \mathbf{e}^{\hat{P}_{Bri}}) + \varphi_B (P_{th} - \psi_1) \quad (31)$$

其对偶问题 $D_B(\lambda_B, \varphi_B)$ 为

$$\max_{\lambda_B, \varphi_B} D_B(\lambda_B, \varphi_B) \quad (32)$$

$$D_B(\lambda_B, \varphi_B) = \inf_{\hat{P}_{Bri}} \{L(\mathbf{e}^{\hat{P}_{Bri}}, \eta_B, \lambda_B, \varphi_B)\}$$

根据 KKT 条件,最优功率分配解为

$$P_{Bri}(t+1) = \mathbf{e}^{\hat{P}_{Bri}(t+1)} = \left[\frac{\theta_{Bri}}{\ln 2 \cdot \kappa \frac{1}{\psi_2} (\mathbf{h}_{Bri}^H \boldsymbol{\omega}_{ri})^2 \mathbf{e}^{\hat{P}_{Bri}} \alpha + \psi_1} + \frac{\theta_{Bri}}{\ln 2 \cdot \kappa} \right]^+ \quad (33)$$

式中,

$$[x]^+ = \max\{0, x\} \quad (34)$$

$$\kappa = (\eta_B + \lambda_B + \varphi_B \sum_{r=1}^R \sum_{j=1, j \neq i}^N |\mathbf{h}_{Bri}^H \boldsymbol{\omega}_{rj}|^2) \quad (35)$$

$$\psi_1 = \sigma_{BBI} + \sigma_{SBI} + \sigma_n \quad (36)$$

$$\psi_2 = \sigma_{SBI} + \sigma_n \quad (37)$$

采用次梯度迭代方法对参数 λ_B 和 φ_B 进行更新:

$$\lambda_B^{t+1} = \left[\lambda_B^t - d_1 (P_{Bmax} - \sum_{i=1}^N \mathbf{e}^{\hat{P}_{Bri}}) \right]^+ \quad (38)$$

$$\varphi_B^{t+1} = \left[\varphi_B^t - d_2 (P_{th} - \psi_1) \right]^+ \quad (39)$$

式中, d_1, d_2 为迭代步长. 地面基站功率分配的算法实现如算法 2 所示.

该算法内层循环更新拉格朗日参数和分配功率的计算复杂度为 $O(N^2)$, 外层循环个更新凸近似因子和能量效率计算复杂度为 $O(N^2)$, 由于有 R 个地面基站, 因此该算法的计算复杂度为 $O(RN^2)$.

3.2 卫星功率分配优化

对优化问题 P_2 采用 Dinkelbach 法, 同时利用 SCA 和变量替换, 卫星能量效率优化问题可改写为优化问题 P_5 :

$$\max \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{K_r-2N} \left[\ln \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_{Sri}^H \mathbf{v}_{ri}|^2 \mathbf{e}^{\hat{P}_{Sri}}}{\sigma_{BSI} + \sigma_{SSI} + \sigma_n} \right) \right] - \eta_S (\sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{K_r-2N} \mathbf{e}^{\hat{P}_{Sri}} + P_{SC}) \quad (40)$$

$$\text{s.t. } C_6: \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{K_r-2N} \mathbf{e}^{\hat{P}_{Sri}} \leq P_{Smax}, C_4$$

算法 2 地面基站功率分配策略

- 1: 初始化: $P_{Bri}(t) = 0, \eta_B = 0$, 最大迭代次数 $B_1, B_2, \theta_{Bri} = \theta_{Bri} = 1, \beta_{Bri} = 1, \beta_{Bri} = 0, t_1 = t_2 = 1$
- 2: repeat
- 3: 初始化拉格朗日因子 λ_B, φ_B , 迭代步长 d_1, d_2
- 4: 根据式(9)、式(10)初始化 $\sigma_{BBI}, \sigma_{SBI}$
- 5: repeat
- 6: 根据式(33)更新 $P_{Bri}(t+1)$
- 7: 根据式(38)、式(39)更新 λ_B, φ_B
- 8: 根据式(9)、式(10)更新 $\sigma_{BBI}, \sigma_{SBI}$
- 9: $t_1 = t_1 + 1$
- 10: until λ_B, φ_B 收敛 or $t_1 \geq B_1$
- 11: $P_{Bri}(t_1) = P_{Bri}(t_1 + 1)$
- 12: 根据式(12)计算基站能量效率 η_B
- 13: 根据式(28)、式(29)更新 $\theta_{Bri}, \beta_{Bri}$
- 14: $t_2 = t_2 + 1$
- 15: until η_B 收敛 or $t_2 \geq B_2$

通过拉格朗日对偶法得到最优功率分配解为

$$P_{Sri}(t+1) = \mathbf{e}^{\hat{P}_{Sri}(t+1)} = \left[\frac{\theta_{Sri} (\sigma_{BSI}^2 + \sigma_n^2)}{\ln 2 (\eta_S + \mu_S + \phi_S \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{K_r-2N} |\mathbf{h}_{Sri}^H \mathbf{v}_{ri}|^2 \mathbf{e}^{\hat{P}_{Sri}^{[t]}})} \right]^+ \quad (41)$$

采用次梯度迭代方法对参数 μ_S 和 ϕ_S 进行更新:

$$\mu_S^{t+1} = [\mu_S^t - d_3 (P_{Smax} - \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{K_r-2N} \mathbf{e}^{\hat{P}_{Sri}})]^+ \quad (42)$$

$$\phi_S^{t+1} = [\phi_S^t - d_4 (P_{th} - \psi_3)]^+ \quad (43)$$

$$\psi_3 = \sigma_{BSI} + \sigma_{SSI} + \sigma_n \quad (44)$$

式中 d_3, d_4 为迭代步长. 卫星功率分配的算法实现如算法 3 所示.

算法 3 卫星功率分配策略

- 1: 初始化: $P_{Sri}(t_3) = 0, \eta_S = 0, \beta_{Sri} = 0$, 内外层最大迭代次数 $S_1, S_2, t_3 = t_4 = 1$
- 2: repeat
- 3: 初始化拉格朗日因子 μ_S, ϕ_S , 迭代步长 d_3, d_4
- 4: 根据式(16)、式(17)初始化 $\sigma_{BSI}, \sigma_{SSI}$
- 5: repeat
- 6: 根据式(41)更新 $P_{Sri}(t_3 + 1)$
- 7: 根据式(42)、式(43)更新 μ_S, ϕ_S
- 8: 根据式(16)、式(17)更新 $\sigma_{BSI}, \sigma_{SSI}$
- 9: $t_3 = t_3 + 1$
- 10: until μ_S 和 ϕ_S 收敛 or $t_3 \geq S_1$
- 11: $P_{Sri}(t_3) = P_{Sri}(t_3 + 1)$
- 12: 根据式(19)计算卫星能量效率 η_S
- 13: 根据式(28)、式(29)更新 $\theta_{Sri}, \beta_{Sri}$
- 14: $t_4 = t_4 + 1$
- 15: until η_S 收敛 or $t_4 \geq S_2$

设卫星为 L 个用户提供服务,其中 $L = \sum_{r=1}^R (K_r - 2N)$.

该算法内层循环更新拉格朗日参数和分配功率的计算复杂度为 $O(L^2 + LNR)$,外层循环更新凸近似因子和能量效率计算复杂度为 $O(L^2)$,因此该算法的计算复杂度为 $O(L^2 + LNR)$.

3.3 卫星地面联合功率分配优化

由于卫星用户和基站用户之间的相互干扰,单独对一个目标进行优化无法得到整个网络的最优功率分配策略.为了得到整个星地网络的最优功率分配策略,提出了星地联合优化功率分配策略,实现步骤如算法 4 所示.

算法 4 联合功率分配策略

```

1:初始化:  $t = 1, P_{Bri}(t) = 0, P_{Sri}(t) = 0$ , 最大迭代次数  $M$ 
2: for  $r = 1:R$  do
3: 根据算法 3 更新  $P_{Bri}(t+1)$ 
4: end for
5: 根据算法 4 更新  $P_{Sri}(t+1)$ 
6:  $t = t + 1$ 
7: if  $\max(P_{Bri}(t+1) - P_{Bri}(t), P_{Sri}(t+1) - P_{Sri}(t)) \leq \epsilon$  or  $t \geq M$ 
8: end if
9: else 参数更新  $P_{Bri}(t) = P_{Bri}(t+1), P_{Sri}(t) = P_{Sri}(t+1)$ 
10: 执行步骤 2

```

在算法 4 中,算法 2 和算法 3 将分别基于上一次迭代得到功率分配方案来继续进行迭代,得到的结果用于下一次迭代,直至算法收敛或达到最大迭代次数,因此算法 4 的计算复杂度为 $O(L^2 + LNR + RN^2)$.

4 仿真结果与分析

4.1 仿真参数设置

为了验证本文所提功率分配算法的有效性,分析系统能量效率与不同参数之间的权衡关系,利用 MATLAB 对本文所提算法进行仿真分析.假设系统中存在 1 个卫星和 4 个地面基站,卫星天线数为 8,基站配备 4 个天线.系统参数如表 2 所示

表 2 系统参数

参数	数值
用户数目 K	24
载波频率 f	2 GHz
带宽 B	10 MHz
噪声功率谱密度 N_0	-174 dBm/Hz
干扰温度阈值 P_{th}	-80 dBm
基站最大发射功率 P_{Bmax}	43 dBm
卫星最大发射功率 P_{Smax}	90 dBm
卫星高度 H	1 000 km

本文设置了对比的两种用户配对策略,第一种为基于贪婪算法的配对策略(greedy algorithm),只有用户间相关度最大时,才会将这两个用户进行配对^[24];第二种为固定用户相关度策略(fixed correlation),设置固定的用户配对相关阈值,选择具有最大信道增益差异的用户进行配对^[25].同时设置了用于对比本文基于 NOMA 的联合最优功率分配方案(NOMA Joint Optimal Power Allocation, NOMA-JOPA)的两种功率分配算法,第一种为基于正交多址的联合最优功率分配策略^[26](OMA Joint Optimal Power Allocation, OMA-JOPA),第二种为基于 NOMA 的分别优化算法(NOMA Separately Optimal Power Allocation, NOMA-SOPA).

4.2 仿真结果分析

功率分配算法的收敛性如图 2 所示,图 2 中的星地用户能量效率和由卫星用户能量效率和地面用户能量效率求和得出.由图 2 可知,迭代大约 15 次后,算法达到收敛,星地用户能量效率和收敛到 3.32 bps/Hz/W,其中卫星用户能量效率收敛到 1.3 bps/Hz/W,地面用户能量效率收敛到 2.02 bps/Hz/W.可以看出地面用户能量效率明显优于卫星用户,这是由于干扰温度阈值的存在限制了卫星用户的发射功率,影响了卫星用户的能量效率.

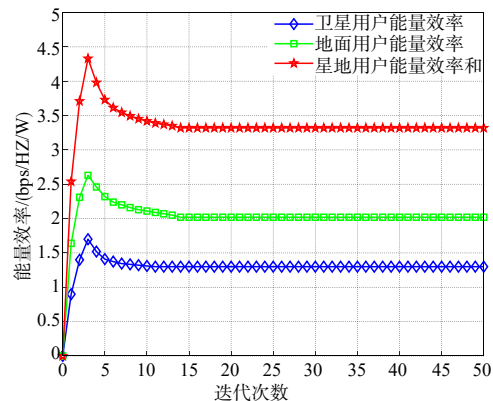


图 2 系统能量效率收敛性

图 3 所示为干扰温度阈值对能量效率的影响.随着干扰温度阈值的增大,地面网络的能量效率逐渐下降,卫星网络的能量效率逐渐增加,星地能量效率和先减小后增大,最终都趋于稳定.这是由于增大干扰温度阈值,卫星可以以更大的发射功率为地面用户进行服务,卫星网络的能量效率得到了提升,而地面网络受到的干扰增大,因此能量效率有所下降.由于地面和卫星最大发射功率的限制,整个系统的能量效率最终趋于稳定.虽然引入卫星网络牺牲了一部分地面网络的能效,但是可以为更大范围内的更多用户提供随时随地的服务.

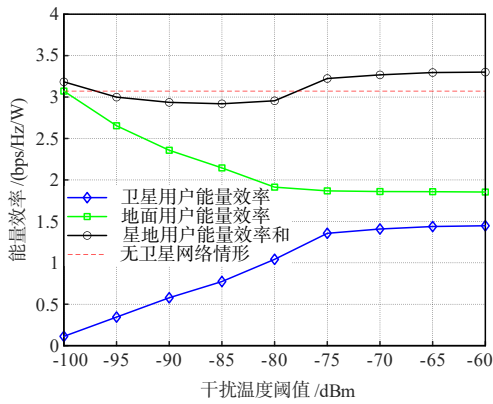


图3 干扰温度阈值对能量效率的影响

为了评价所提算法对系统能量效率的影响,并且考虑到卫星功率资源的宝贵性,引入系统能量效率 η ,定义为

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N C_{Bri} + \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^{K-2N} C_{Sri}}{P_B + P_{BC} + \zeta(P_S + P_{SC})} \quad (45)$$

式(45)中 ζ 表示卫星功率重要性因子,通常设置为2~5.图4所示为不同干扰温度阈值下基站天线数目对系统能效的影响.由图4可知,随着基站天线数目的增加,系统能量效率先增加后趋于稳定.这是由于增加基站天线数目,减小了不同组间用户的干扰,而由于基站最大发射功率的约束,系统能效存在一定的上限.并且随着天线数目的增多,干扰温度阈值对系统能量效率的影响也逐渐增加,具有较小干扰温度阈值的系统能量效率更高.

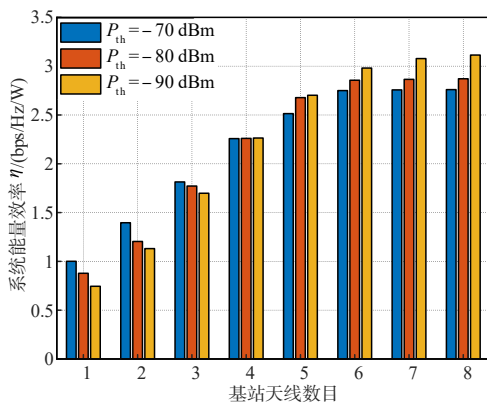


图4 基站天线数目对系统能效的影响

图5所示为不同配对策略下系统能量效率的比较.随着发射功率的增大,系统能量效率先增大后减小.这是由于随着发射功率的增大,会使功率的线性增幅大于用户速率的对数增幅.当基站最大发射功率为50 dBm时,本文所提配对策略相对于贪婪算法策略和固定相关度策略分别获得了约13.4%和8.2%的能量效率

提升,说明在进行用户配对时不仅要考虑信道增益差异大的用户进行配对,还要考虑到用户之间的信道相关度,可以通过增大用户相关度来减小用户间干扰,进一步提升系统能量效率.

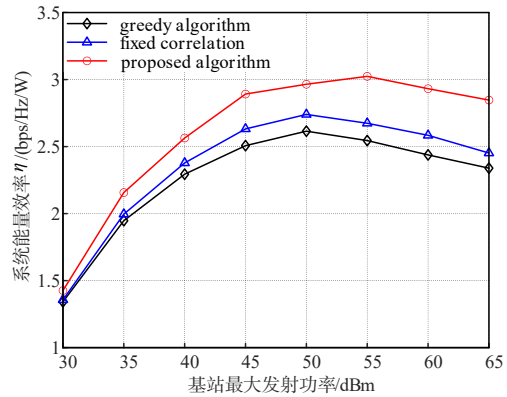


图5 不同配对策略比较

图6所示为不同功率分配算法下系统的能量效率的比较.随着发射功率的增大,系统能量效率先增大后减小.当基站最大发射功率为50 dBm时,相比基于正交多址的分别最优功率分配策略,本文所提算法提升了10.1%的系统能量效率.另外联合最优功率分配策略在分别最优策略的基础上只获得了4.9%的能量效率提升,但代价是算法复杂度的提升,因此可以在能量效率提升和算法复杂度之间进行权衡选取.

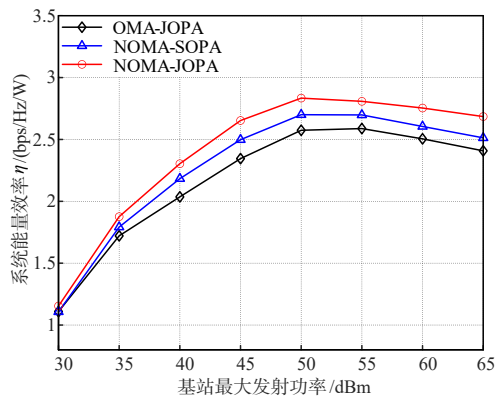


图6 不同功率分配方案比较

5 结论

本文针对星地网络的功率资源优化问题进行了研究,在NOMA技术基础上,提出了一种基于能量效率的星地网络功率分配算法.首先介绍了星地NOMA下行链路功率分配模型,其次将功率分配问题分解为卫星用户选择、地面用户分组和星地功率分配3个子问题,运用图论和凸优化的相关知识对卫星和地面功率分配问题进行求解,最后提出了一种星地网络协同功率分

配策略来进一步优化星地网络的能量效率. 数值结果表明, 本文所提的功率分配策略显著提升了系统的能量效率, 并且就算法复杂度和能量效率提升的关系进行了权衡分析.

参考文献

- [1] ZHANG H J, LIU N, CHU X L, et al. Network slicing based 5G and future mobile networks: Mobility, resource management, and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(8): 138-145.
- [2] 蒋继胜, 朱晓荣. H2H 与 M2M 共存场景下的上行资源分配算法[J]. *电子学报*, 2018, 46(5): 1259-1264.
JIANG Ji-sheng, ZHU Xiao-rong. An uplink resource allocation algorithm under the scenario of coexistence of H2H & M2M based on knapsack model[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(5): 1259-1264. (in Chinese)
- [3] CHEN S Z, SUN S H, KANG S L. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G[J]. *China Communications*, 2020, 17(12): 156-171.
- [4] WANG W J, CHEN T T, DING R, et al. Location-based timing advance estimation for 5G integrated LEO satellite communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(6): 6002-6017.
- [5] ANIMESH Y, CHEN Q, PROMOD K V, et al. On performance comparison of multi-antenna HD-NOMA, SCMA, and PD-NOMA schemes[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(4): 715-719.
- [6] HUANG R L, WAN D H, JI F, et al. Performance analysis of NOMA-based cooperative networks with relay selection [J]. *China Communications*, 2020, 17(11): 111-119.
- [7] WANG A Y, LEI L, EVA L, et al. NOMA-enabled multi-beam satellite systems: Joint optimization to overcome offered-requested data mismatches[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(1): 900-913.
- [8] CHANG Z, LEI L, ZHANG H Q, et al. Energy-efficient and secure resource allocation for multiple-antenna NOMA with wireless power transfer[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2018, 2(4): 1059-1071.
- [9] LIN Y H, YANG Z, GUO H Y. Proportional fairness-based energy-efficient power allocation in downlink MIMO-NOMA systems with statistical CSI[J]. *China Communications*, 2019, 16(12): 47-55.
- [10] LIN Z, LIN M, WANG J B, et al. Joint Beamforming and power allocation for satellite-terrestrial integrated networks with non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2019, 13(3): 657-670.
- [11] LI B, FEI Z S, CHU Z, et al. Robust chance-constrained secure transmission for cognitive satellite-terrestrial networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(5): 4208-4219.
- [12] LIN Z, LIN M, ZHU W P, et al. Secure and energy efficient transmission for RSMA-based cognitive satellite-terrestrial Networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(2): 251-255.
- [13] ZHANG Y M, ZHANG H J, ZHOU H, et al. Resource allocation in terrestrial-satellite-based next generation multiple access networks with interference cooperation[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 2022, 40(4): 1210-1221.
- [14] MUHAMMED A J, MA Z, ZHANG Z Q, et al. Energy-efficient resource allocation for NOMA based small cell networks with wireless backhauls[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(6): 3766-3781.
- [15] LI C Y, ZHANG Q, LI Q Z, et al. Price-based power allocation for non-orthogonal multiple access systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(6): 664-667.
- [16] ZUO H L, TAO X F. Power allocation optimization for uplink non-orthogonal multiple access systems[C]//9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing(WCSP). Nanjing: IEEE, 2017: 1-5.
- [17] 徐勇军, 谢豪, 陈前斌. 基于不完美 CSI 的异构 NOMA 网络能效优化算法[J]. *通信学报*, 2020, 41(7): 131-140.
XU Y J, XIE H, CHEN Q B. Energy efficiency optimization algorithm for heterogeneous NOMA network based on imperfect CSI[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(7): 131-140.
- [18] ARAVANIS A I, BHAVANI SHANKAR M R, ARAPOGLOU P D, et al. Power allocation in multibeam satellite systems: A two-stage multi-objective optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(6): 3171-3182.
- [19] ZHU X M, JIANG C X, KUANG L L, et al. Non-orthogonal multiple access based integrated terrestrial-satellite networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(10): 2253-2267.
- [20] WANG L N, WU Y N, ZHANG H J, et al. Resource allocation for NOMA based space-terrestrial satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(2): 1065-1075.
- [21] GALIL Z. Efficient algorithms for finding maximum

- matching in graphs[J]. ACM Computing Surveys, 1986, 18(1): 23-38.
- [22] DING Z G, ADACHI F, POOR. H V. The application of MIMO to non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(1): 537-552.
- [23] MARKS B R, WRIGHT G P. Technical note—A general inner approximation algorithm for nonconvex mathematical programs[J]. Operations Research, 1978, 26(4): 681-683.
- [24] DENG B Y, JIANG C X, YAN J, et. al. Joint multigroup precoding and resource allocation in integrated terrestrial-satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 8075-8090.
- [25] KIM Y B, LIM S, KIM H, et al. Non-orthogonal multiple access in a downlink multiuser beamforming system[C]// MILCOM 2013—2013 IEEE Military Communications Conference. Piscataway: IEEE, 2014: 1278-1283.
- [26] DAI L L, WANG B C, PENG M G, et. al. Hybrid precoding-based millimeter-wave massive MIMO-NOMA with simultaneous wireless information and power transfer[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(1): 131-141.

作者简介



李 信 男,1997年生于河南南阳. 现为空军工程大学信息与导航学院博士研究生. 主要研究方向为卫星光通信、星地资源分配技术.
E-mail: 1300358390@qq.com



李勇军 男,1979年生于陕西西安. 现为空军工程大学信息与导航学院教授、博士生导师. 主要研究方向为卫星光通信与网络、空间微波光子技术.
E-mail: tz_228@163.com



赵尚弘 男,1964年生于甘肃兰州. 现为空军工程大学信息与导航学院教授、博士生导师. 主要研究方向为激光原理技术卫星光通信与网络、空间微波光子技术.
E-mail: zhaoshangh@aliyun.com