用于上行发射功率最小化的低地球轨道卫星到用户分配与资源分配

Hung Nguyen-Kha Vu Nguyen Ha SnT，卢森堡大学 SnT，卢森堡大学 khahung.nguyen@uni.lu vu-nguyen.ha@uni.lu

Eva Lagunas SnT，卢森堡大学 eva.lagunas@uni.lu

Symeon Chatzinotas SnT，卢森堡大学 symeon.chatzinotas@uni.lu

Joel Grotz SES S.A.，卢森堡 joel.grotz@ses.com

arXiv:2302.01437v1 [eess.SP] 2 Feb 2023

摘要——本文旨在为地面与非地面融合网络开发卫星-用户关联和资源分配机制，以最小化总发射功率。在该网络中，由低地球轨道卫星组成的星座为地面基站（基站）和卫星用户设备（卫星用户设备）提供无线接入服务。在这项工作中，除了为卫星用户设备维持传统的卫星通信连接外，低地球轨道卫星还为基站提供回传链路，以便上传从其地面用户接收的数据。综合考虑各卫星用户设备的业务需求和基站的汇总需求，我们建立了一个混合整数规划模型，其中包含由卫星关联选择、功率控制和带宽分配相关变量所产生的二元变量。为解决这一具有挑战性的问题，本文提出一种基于迭代优化的算法，通过松弛二元变量并交替更新所有变量来求解。此外，还提出一种贪心机制作为比较。最后，给出数值结果，以验证所提出算法的有效性。

索引词——地面与非地面网络融合、低地球轨道卫星星座、资源分配、卫星关联、功率最小化。

一、引言

近年来，设备数量的快速增长、宽带流量的增加，以及物联网（IoT）时代新应用的涌现，给地面网络（TN）运营商带来了挑战 [1]–[4]。尽管第五代（5G）新空口蜂窝网络已经开发并部署，能够带来高速率、高能效和低时延等优势，但由于回传链路和传输网络的建设成本高昂，农村和城市边缘地区的普遍覆盖这一关键问题仍未得到有效解决 [2]–[5]。

为克服这些挑战，低地球轨道（LEO）卫星与地面网络（TN）的集成被视为一种颇具前景的解决方案 [4]–[10]。得益于卫星间链路和较低的轨道高度，低地球轨道卫星星座不仅能够凭借广泛的覆盖范围提供全球连接，还能提供足够低时延的连接和高速率服务。因此，低地球轨道卫星星座有助于在孤立小区与核心网之间建立高速、可靠的回传连接 [5], [11]。然而，将低地球轨道连接增强为地面基站的回传链路，也需要解决一些传统技术问题，例如卫星用户/基站关联、功率控制，以及面向新型地面与非地面集成系统的带宽分配 [4]。

关于卫星与卫星用户设备/基站的关联，文献中已提出一些卫星-用户关联方案 [12]–[14]。文献 [15]针对地面用户提出了基于信道强度的卫星选择方法；然而，在实际系统中，信道增益可能变化过于频繁，从而降低网络性能。此外，该研究仅关注卫星选择，未考虑数据需求和卫星容量限制。文献 [12], 提出了一种卫星-网关关联策略，采用图论方法构建二分图，并根据信道增益和卫星覆盖范围设定权重，进而通过求解最大权匹配得到关联方案。文献 [13]则将卫星选择问题建模为势博弈。文献 [14], 部署低地球轨道卫星以辅助地面网络，旨在固定带宽分配的条件下，优化用户关联和传输功率，从而最大化网络总吞吐量。据我们所知，先前相关研究尚未考虑在数据需求和负载均衡约束下联合优化低地球轨道卫星关联与资源分配的问题，这促使我们研究这些问题。

本文旨在最小化为卫星用户和地面网络用户提供服务的低地球轨道卫星与地面网络集成系统的上行发射功率。在该系统中，低地球轨道卫星能够同时为蜂窝基站提供回传链路，并为卫星用户设备提供无线接入服务。针对卫星用户和地面用户的需求，我们将功率最小化问题建模为一个联合设计低地球轨道卫星关联、发射功率和带宽分配的 NP-hard 混合整数规划（ MIP ）。具体而言，由于二元变量和连续变量之间的耦合，以及速率函数和目标函数的非凸性，该优化问题难以直接求解。因此，我们提出了一种基于交替优化方法的迭代算法来解决该问题。数值结果表明，所提出的算法具有收敛性和有效性。

本文其余部分安排如下。第二节介绍系统模型与问题建模。第三节

分别介绍我们提出的迭代算法和基于贪心的算法。第四节展示数值结果，最后第五节给出结论

.

II. 系统模型与问题表述

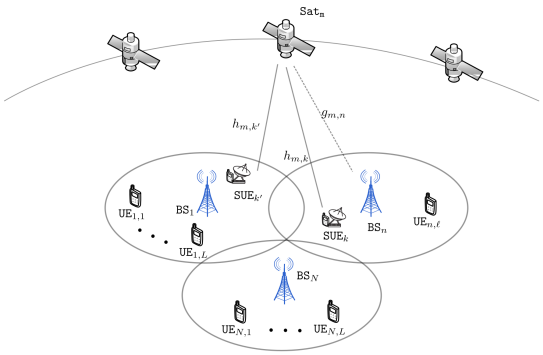

图 1. ISTN通信系统示例。

我们考虑如图 1 所示的星地融合网络（ISTN）通信系统的上行传输，该系统由 M 颗低地球轨道卫星、 N 个地面基站及其用户，以及 K 个卫星用户设备组成。令 $\mathcal{M}$、 $\mathcal{N}$、$\mathcal{L}_n$ 和 $\mathcal{K}$ 分别表示低地球轨道卫星、基站、由基站 n服务的小区 n 中的用户设备（UE），以及卫星用户设备的集合。在这一融合系统中，低地球轨道卫星除了像传统卫星通信系统一样为卫星用户设备提供无线接入服务外，还为基站提供回传服务，以便将用户数据卸载至核心网。为方便起见，分别将第 m–颗低地球轨道卫星、第 n–个基站、基站 n的第 ℓ–个用户设备，以及第 k–个卫星用户设备记为 LEO$_m$、BS$_n$、UE$_{n,\ \ell}$和 SUE$_k$。链路 LEO $_m$ –SUE$_k$ 和 LEO$_m$ –BS$_n$ 的信道增益建模为

$$h_{m,k} = \frac{G^{\text{LEO}} G^{\text{SUE}} \psi(\vartheta_{m,k})}{\text{PL}_{m,k}} \text{ and } g_{m,n} = \frac{G^{\text{LEO}} G^{\text{BS}} \psi(\vartheta_{m,n})}{\text{PL}_{m,n}}, \quad (1)$$

其中，PL$_{m,\ i}$ =$(4\pi f_c d_{m,\ i}/c)^2$ 和 $d_{m,\ i}$ 分别表示自由空间路径损耗以及低地球轨道卫星 m 与卫星用户设备/基站 i之间的距离； G^{LEO}、 G^{SUE} 和 G^{BS} 分别为低地球轨道卫星、卫星用户设备和基站的最大天线增益；$\vartheta_{m,\ k}$ 和 $\vartheta_{m,\ n}$ 分别为低地球轨道卫星m 到卫星用户设备$_k$ 和基站n的波束轴向角。此外，考虑到信道， [16]、 $\psi(\vartheta)$在信道增益公式中表示波束方向图函数，其表达式为

$$\psi(\vartheta) = \begin{cases} 1 & , \vartheta = 0, \\ 4\left|\frac{J_1(ka\sin\vartheta)}{ka\sin\vartheta}\right| & , \vartheta \neq 0, \end{cases}$$

其中， $k = 2\pi f_c/c$、 a、 f_c和 c 分别为天线孔径半径、工作频率和光速。

A. 卫星与卫星用户终端之间的通信

对于低地球轨道卫星—卫星用户终端链路，我们假设每颗低地球轨道卫星提供的无线接入服务对位于其相应覆盖范围内的所有卫星用户设备和基站均可用。随后，每个卫星用户设备可根据其位置、传输预算，以及卫星上的可用无线资源，选择一颗低地球轨道卫星进行数据传输。为实现低地球轨道卫星—卫星用户终端关联，我们引入一个新变量 $\boldsymbol{\alpha}$,$[\alpha_{m,k}]_{\forall(m,k)\in(\mathcal{M}\times\mathcal{K})}$ ， 定义如下

$$\alpha_{m,k} = \begin{cases} 1, & \text{SUE}_k \text{ is served by LEO}_m, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

由于卫星通信采用定向天线，因此假设每个卫星用户设备最多只能由覆盖范围内选定的一颗低地球轨道卫星提供服务，由此得到以下约束:

$$(C1): \quad \sum_{\forall m\in\mathcal{M}} \alpha_{m,k} \leq 1, \forall k \in \mathcal{K}. \quad (3)$$

当卫星用户设备$_k$ 由低地球轨道卫星m提供服务时，令 W_k^{SUE}为分配给卫星用户设备$_k$ 的带宽， $p_{m,\ k}$ 表示该用户的传输功率。本文假设采用正交带宽分配，据此，卫星用户设备$_k$ 的信噪比（SNR）可表示为

$$\gamma_{m,k}^{\text{SUE}} = \frac{p_{m,k} h_{m,k}}{\sigma_m W_k^{\text{SUE}}}, \quad (4)$$

其中， σ_m 表示低地球轨道m处每 Hz 的噪声功率谱密度。于是，卫星用户设备$_k$ 在低地球轨道m 处可实现的速率可表示为

$$R_{m,k}^{\text{SUE}} = W_k^{\text{SUE}} \log_2(1+\gamma_{m,k}^{\text{SUE}}) = W_k^{\text{SUE}} \log_2\left(1+\frac{p_{m,k} h_{m,k}}{\sigma_m W_k^{\text{SUE}}}\right). \quad (5)$$

考虑低地球轨道卫星关联决策后，卫星用户设备$_k$ 可实现的传输速率可描述为

$$R_k^{\text{SUE}}(\mathbf{p}, \mathbf{W}^{\text{SUE}}, \boldsymbol{\alpha}) = \sum_{\forall m\in\mathcal{M}} \alpha_{m,k} R_{m,k}^{\text{SUE}}, \quad (6)$$

其中， $\mathbf{p}$ $[p_{m,k}]_{\forall m,\ k}$ 和 $\mathbf{W}^{\text{SUE}}$ ， $[W_k^{\text{SUE}}]_{\forall k}$。针对每个卫星用户设备的通信速率需求，引入以下约束，

$$(C2): \quad R_k^{\text{SUE}}(\mathbf{p}, \mathbf{W}^{\text{SUE}}, \boldsymbol{\alpha}) \geq \bar{R}_k^{\text{SUE}}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (7)$$

其中， $\bar{R}_k^{\text{SUE}}$表示卫星用户设备$_k$所需的传输速率。

B. 从基站向低地球轨道卫星进行数据卸载

在该系统中，我们假设一个小区内地面用户设备的上行数据传输先由相应基站汇集，然后通过卫星回传链路传输至核心网。令$\bar{R}_{n,\ \ell}^{\text{UE}}$ 表示小区 n中用户 ℓ 所需的数据速率，即用户设备$_{n,\ \ell}$。那么，基站n 需要卸载的数据量可定义为$\bar{R}_n^{\text{BS}} = \sum_{\forall\ell\in\mathcal{L}_n} \bar{R}_{n,\ \ell}^{\text{UE}}$。与卫星用户设备类似，每个基站都会选择一颗低地球轨道卫星进行关联，以卸载数据。记 $\boldsymbol{\mu}$ ， $[\mu_{m,n}]_{\forall(m,n)\in(\mathcal{M}\times\mathcal{N})}$ 为基站与低地球轨道卫星之间的关联变量，其确定方式为

$$\mu_{m,n} = \begin{cases} 1, & \text{BS}_n \text{ is served by LEO}_m, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (8)$$

注意，每个基站最多只能由一颗低地球轨道卫星提供服务；与（$C1$）类似，这也可由以下约束表示:

$$(C3): \quad \sum_{\forall m\in\mathcal{M}} \mu_{m,n} \leq 1, \forall n \in \mathcal{N}, \quad (9)$$

令 W_n^{BS} 表示分配给基站n的回传信道带宽。那么，当基站n 由低地球轨道卫星m提供服务时，在低地球轨道卫星m 处接收到的基站n传输信号的信噪比可表示为

$$\gamma_{m,n}^{\mathrm{BS}} = \frac{P_{m,n} g_{m,n}}{\sigma_m W_n^{\mathrm{BS}}}, \tag{10}$$

其中 $P_{m,\ n}$ 表示基站 n面向低地球轨道m 的发射功率。因此，基站 n 在低地球轨道m 上的可达卸载速率可表示为

$$R_{m,n}^{\mathrm{BS}} = W_n^{\mathrm{BS}} \log_2(1+\gamma_{m,n}^{\mathrm{BS}}) = W_n^{\mathrm{BS}} \log_2\left(1+\frac{P_{m,n} g_{m,n}}{\sigma_m W_n^{\mathrm{BS}}}\right). \tag{11}$$

考虑基站 n的低地球轨道关联选择，其卸载速率可概括为

$$R_n^{\mathrm{BS}}(\mathbf{P}, \mathbf{W}^{\mathrm{BS}}, \boldsymbol{\mu}) = \sum_{\forall m \in \mathcal{M}} \mu_{m,n} R_{m,n}^{\mathrm{BS}}, \tag{12}$$

其中，P $[P_{m,n}]_{\forall m,\ n}$ 和 W^{BS} , $[W_n^{\mathrm{BS}}]_{\forall n}$。为成功将与基站 n关联的用户设备的所有数据转发至核心网，必须满足以下条件，

$$(C4): \quad R_n^{\mathrm{BS}}(\mathbf{P}, \mathbf{W}^{\mathrm{BS}}, \boldsymbol{\mu}) \geq \bar{R}_n^{\mathrm{BS}}, \forall n \in \mathcal{N}. \tag{13}$$

C. 问题建模

在本研究中，我们旨在满足所有用户的传输速率需求，同时最小化所有基站和卫星用户设备的总发射功率。设计目标可数学表述为以下功率最小化问题，

$$\begin{aligned}
\min_{\substack{\mathrm{p},\mathbf{P},\mathbf{W}^{\mathrm{SUE}},\\ \mathbf{W}^{\mathrm{BS}},\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\mu}}} \quad & \sum_{\substack{\forall m \in \mathcal{M}\\ \forall n \in \mathcal{K}}} \alpha_{m,k} p_{m,k} + \sum_{\substack{\forall m \in \mathcal{M}\\ \forall n \in \mathcal{N}}} \mu_{m,n} P_{m,n} \qquad (14)\\
\text{s.t.} \quad & \text{constraints } (C1)-(C4),\\
& (C5): \quad \sum_{\forall m \in \mathcal{M}} \alpha_{m,k} p_{m,k} \leq p_k^{\max}, \forall k \in \mathcal{K},\\
& (C6): \quad \sum_{\forall m \in \mathcal{M}} \mu_{m,n} P_{m,n} \leq P_n^{\max}, \forall n \in \mathcal{N},\\
& (C7): \quad \sum_{\forall k \in \mathcal{K}} \alpha_{m,k} W_k^{\mathrm{SUE}}\\
& \qquad + \sum_{\forall n \in \mathcal{N}} \mu_{m,n} W_n^{\mathrm{BS}} \leq W_m^{\mathrm{LEO}}, \quad \forall m \in \mathcal{M},\\
& (C8): \quad \alpha_{m,k}, \mu_{m,n} \in \{0,1\}, \forall (m,n,k),
\end{aligned}$$

其中，约束 $(C5)$ 和 $(C6)$ 表示对卫星用户设备和基站最大发射功率的限制。约束 $(C7)$ 则表示，在每颗低地球轨道卫星上，为基站和卫星用户设备提供服务所分配的总带宽低于预先设定的可用带宽。

III. 所提解决方案

可以看出，原优化问题 (14) 是非凸的，由于二元关联变量与功率和带宽分配变量之间存在耦合，因此难以直接求解。为了解决这一关键问题并提出一种高效的机制来求解问题 (14)，我们首先将其分解为两个子问题。具体而言，第一个子问题旨在针对给定的低地球轨道卫星关联决策，优化功率和带宽分配变量 $\mathrm{P,p,W}^{\mathrm{SUE}}$ and W^{BS} 。另一个子问题则着重于确定关联变量 $\boldsymbol{\alpha}$ 和 $\boldsymbol{\mu}$ ，以降低总传输功率，其中 $\mathrm{P,p,W}^{\mathrm{SUE}}$ and W^{BS}的取值已知。随后，通过交替迭代求解这两个子问题来确定问题 (14) 的解。

A. 功率与带宽分配优化

在迭代 i 中，一旦将 $(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\mu})$ 固定为 $(\boldsymbol{\alpha}^{(i)}, \boldsymbol{\mu}^{(i)})$，相应的功率与带宽分配，即 $\mathrm{P,p,W}^{\mathrm{SUE}}$ 和 W^{BS} ，即可通过求解以下优化问题进行优化，

$$\begin{aligned}
\min_{\substack{\mathbf{p},\mathbf{P},\\ \mathbf{W}^{\mathrm{SUE}},\mathbf{W}^{\mathrm{BS}}}} \quad & \sum_{\substack{\forall m \in \mathcal{M}\\ \forall k \in \mathcal{K}}} \bar{\alpha}_{m,k} p_{m,k} + \sum_{\substack{\forall m \in \mathcal{M}\\ \forall n \in \mathcal{N}}} \bar{\mu}_{m,n} P_{m,n} \qquad (15)\\
\text{s.t.} \quad & (C2.1): \quad \bar{R}_k^{\mathrm{SUE}} \leq R_k^{\mathrm{SUE}}(\mathbf{p}, \mathbf{W}^{\mathrm{SUE}}, \bar{\boldsymbol{\alpha}}), \quad \forall k \in \mathcal{K},\\
& (C4.1): \quad \sum_{\forall \ell \in \mathcal{L}_n} \bar{R}_{n,\ell}^{\mathrm{UE}} \leq R_n^{\mathrm{BS}}(\mathbf{P}, \mathbf{W}^{\mathrm{BS}}, \bar{\boldsymbol{\mu}}), \forall n \in \mathcal{N},\\
& (C5.1): \quad \sum_{\forall m \in \mathcal{M}} \bar{\alpha}_{m,k} p_{m,k} \leq p_k^{\max}, \forall k \in \mathcal{K},\\
& (C6.1): \quad \sum_{\forall m \in \mathcal{M}} \bar{\mu}_{m,n} P_{m,n} \leq P_n^{\max}, \forall n \in \mathcal{N},\\
& (C7.1): \quad \sum_{\forall k \in \mathcal{K}} \bar{\alpha}_{m,k} W_k^{\mathrm{SUE}}\\
& \qquad + \sum_{\forall n \in \mathcal{N}} \bar{\mu}_{m,n} W_n^{\mathrm{BS}} \leq W_m^{\mathrm{LEO}}, \quad \forall m \in \mathcal{M},
\end{aligned}$$

其中，$(\bar{\boldsymbol{\alpha}}, \bar{\boldsymbol{\mu}}) = (\boldsymbol{\alpha}^{(i)}, \boldsymbol{\mu}^{(i)})$，而 $(C2.1)$、$(C4.1)$ $-$ $(C7.1)$ 则根据给定的关联变量值，由 $(C2)$、$(C4)$ $-$ $(C7)$ 更新得到。为求解该问题，我们首先通过以下定理刻画其凸性。

定理 1：问题 (15) 是凸的。

证明：可以看出，在固定 $(\bar{\boldsymbol{\alpha}}, \bar{\boldsymbol{\mu}})$ 的情况下，速率函数 $R_k^{\mathrm{SUE}}(\mathrm{p}, \mathrm{W}^{\mathrm{SUE}}, \bar{\boldsymbol{\alpha}})$ 和 $R_n^{\mathrm{BS}}(\mathrm{P}, \mathrm{W}^{\mathrm{BS}}, \bar{\boldsymbol{\mu}})$ 是凹函数，因此约束 $(C4.1)$ 和 $(C5.1)$ 是凸的。此外，在关联变量固定时，约束 $(C6.1)$、$(C7.1)$ 以及 (15) 中的目标函数均为线性。因此，问题 (15) 是凸的。 ■

根据定理 1，问题 (15) 的最优解可以借助一些标准优化工具求得，例如 Gurobi、Mosek、GAMS、CVX [17]。

B. 低地球轨道卫星关联更新：松弛与投影

本节考虑在迭代 i 中基站和卫星用户设备的LEO卫星关联决策，此时发射功率和带宽分配固定为 $(\mathrm{p}^{(i+1)}, \mathrm{P}^{(i+1)}, (\mathrm{W}^{\mathrm{SUE}})^{(i+1)}, (\mathrm{W}^{\mathrm{BS}})^{(i+1)})$。因此，迭代 $(i+1)$ 中的LEO卫星关联优化问题可写为

$$\begin{aligned}
\min_{\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{\alpha}} \quad & \sum_{\substack{\forall m \in \mathcal{M}\\ \forall n \in \mathcal{N}}} \mu_{m,n} \bar{P}_{m,n} + \sum_{\substack{\forall m \in \mathcal{M}\\ \forall k \in \mathcal{K}}} \alpha_{m,k} \bar{p}_{m,k} \qquad (16)\\
& \text{满足约束 } (C1)、(C3) \text{ 和 } (C8),\\
& (C2.2): \quad \bar{R}_k^{\mathrm{SUE}} \leq R_k^{\mathrm{SUE}}(\bar{\mathbf{p}}, \bar{\mathbf{W}}^{\mathrm{SUE}}, \boldsymbol{\alpha}), \quad \forall k \in \mathcal{K},\\
& (C4.2): \quad \sum_{\forall \ell \in \mathcal{L}_n} \bar{R}_{n,\ell}^{\mathrm{UE}} \leq R_n^{\mathrm{BS}}(\bar{\mathbf{P}}, \bar{\mathbf{W}}^{\mathrm{BS}}, \boldsymbol{\mu}), \forall n \in \mathcal{N},\\
& (C5.2): \quad \sum_{\forall m \in \mathcal{M}} \mu_{m,n} \bar{P}_{m,n} \leq P_n^{\max}, \forall n \in \mathcal{N},\\
& (C6.2): \quad \sum_{\forall m \in \mathcal{M}} \alpha_{m,k} \bar{p}_{m,k} \leq p_k^{\max}, \forall k \in \mathcal{K},
\end{aligned}$$

算法1 求解问题 (14) 的所提出的算法

阶段1:
1: 初始化:
2: 设置 $i := 0$ 并生成一个初始点 $(\boldsymbol{\alpha}^{(0)}, \boldsymbol{\mu}^{(0)})$。
3: 重复
4: 求解 (15)，得到 $(\mathrm{p}^\star, \mathrm{P}^\star, (\mathrm{W}^{\mathrm{SUE}})^\star, (\mathrm{W}^{\mathrm{BS}})^\star)$。
5: 更新 $(\mathrm{p}^{(i+1)}, \mathrm{P}^{(i+1)}, (\mathrm{W}^{\mathrm{SUE}})^{(i+1)}, (\mathrm{W}^{\mathrm{BS}})^{(i+1)}) = (\mathrm{p}^\star, \mathrm{P}^\star, (\mathrm{W}^{\mathrm{SUE}})^\star, (\mathrm{W}^{\mathrm{BS}})^\star)$.
6: 求解整数线性问题 (16)，得到 $(\boldsymbol{\alpha}^\star, \boldsymbol{\mu}^\star)$
7: 使用 (17) 更新 $(\boldsymbol{\alpha}^{(i+1)}, \boldsymbol{\mu}^{(i+1)})$
8: 直到收敛
9: 输出-1: 最优解 $(\mathrm{p}^\star, \mathrm{P}^\star, (\mathrm{W}^{\mathrm{SUE}})^\star, (\mathrm{W}^{\mathrm{BS}})^\star, \boldsymbol{\alpha}^\star, \boldsymbol{\mu}^\star)$ 其中 $(\boldsymbol{\alpha}^\star, \boldsymbol{\mu}^\star)$ 为连续值。
阶段 2:
10: 将 $(\boldsymbol{\alpha}^\star, \boldsymbol{\mu}^\star)$ 舍入以恢复二进制值。
11: 使用恢复后的关联变量运行步骤 4，以获得精确解 $(\mathrm{p}^\star, \mathrm{P}^\star, (\mathrm{W}^{\mathrm{SUE}})^\star, (\mathrm{W}^{\mathrm{BS}})^\star)$.
12: 输出-2: 问题 (14) 的最优解 $(\mathrm{p}^\star, \mathrm{P}^\star, (\mathrm{W}^{\mathrm{SUE}})^\star, (\mathrm{W}^{\mathrm{BS}})^\star, \boldsymbol{\alpha}^\star, \boldsymbol{\mu}^\star)$ 对于问题 (14)。

$$(C7.2): \quad \sum_{\forall n \in \mathcal{N}} \mu_{m,n} \bar{W}_n^{\mathrm{BS}} + \sum_{\forall k \in \mathcal{K}} \alpha_{m,k} \bar{W}_k^{\mathrm{SUE}} \leq W_m^{\mathrm{LEO}}, \quad \forall m \in \mathcal{M},$$

其中 $(\bar{\mathrm{p}}\ \bar{\mathrm{P}}\ \bar{\mathrm{W}}^{\mathrm{SUE}}, \bar{\mathrm{W}}^{\mathrm{BS}}) = (\mathrm{p}^{(i+1)}, \mathrm{P}^{(i+1)}, (\mathrm{W}^{\mathrm{SUE}})^{(i+1)}, (\mathrm{W}^{\mathrm{BS}})^{(i+1)})$。约束 $(C2.2)$、$(C4.2)$–$(C7.2)$ 是在功率和带宽分配取固定值的情况下，由 $(C2)$、$(C4)$ – $(C7)$ 重写得到的。可以看出，问题 (16) 是一个整数线性规划，可以利用一些标准优化工具高效求解，例如 MATLAB（“intlinprog”函数）、Gurobi、Mosek、GAMS、CVX [17]。

备注1：值得注意的是，求解 (16) 得到的结果是二进制值。如果将这些二进制数用于更新功率和带宽分配（如问题 (15) 所示），则后续迭代中的解可能会陷入无法改进的局部最优点 [18]–[20]。

为避免子问题 (15) 受限于严格的二进制值，本文采用一种类似于 [18]–[20] 中所介绍的松弛与投影方法。具体而言，在得到 (16) 的二元解 $(\boldsymbol{\alpha}^\star, \boldsymbol{\mu}^\star)$ 后，为避免子问题 (15) 受限于严格二进制可行点 $(\boldsymbol{\alpha}^{(i)}, \boldsymbol{\mu}^{(i)})$，我们采用以下更新

$$(\boldsymbol{\alpha}^{(i+1)}, \boldsymbol{\mu}^{(i+1)}) = (1-\varrho)(\boldsymbol{\alpha}^{(i)}, \boldsymbol{\mu}^{(i)}) + \varrho(\boldsymbol{\alpha}^\star, \boldsymbol{\mu}^\star), \quad (17)$$

其中，$0 < \varrho < 1$ 是更新速率。通过交替迭代优化发射功率和带宽分配 $(\mathrm{p}, \mathrm{P}, \mathrm{W}^{\mathrm{SUE}}, \mathrm{W}^{\mathrm{BS}})$（通过求解 (15)），并按照 (17) 更新 $(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\mu})$，可以有效地求解问题 (15)。所提出的算法总结于算法1中。

C. 基于贪心的求解方法

为便于比较，本节介绍一种用于求解问题（15）的贪心算法，并将其总结于算法2中。按照这种低复杂度方法，假设每颗低地球轨道卫星最多服务 $\lfloor N/M + 0.5 \rfloor$ 个基站和 $\lfloor K/M + 0.5 \rfloor$ 个卫星用户设备，以确保所有低地球轨道卫星共同为基站和卫星用户设备提供服务。随后，将信道增益最佳的低地球轨道卫星与基站配对，以及与卫星用户设备配对，直至所有基站和卫星用户设备均得到服务。接着，每颗低地球轨道卫星为所有已服务的卫星用户设备和基站均匀分配带宽。基于贪心的算法总结于算法2中。为方便起见，我们使用 MATLAB 表示法表示信道增益矩阵 g 和 h 的索引。

算法2 贪心算法

1: 输入: 信道增益矩阵 h 和 g
2: 设置从 LEO可用的连接数量 m 至基站和卫星用户设备: $N^{\mathrm{BS},\ m\ \mathrm{a}} := \lfloor N/M + 0.5 \rfloor$ 和 $N^{\mathrm{SUE},\ m\ \mathrm{a}} := \lfloor K/M + 0.5 \rfloor$
3: 重复
4: 查找 g 中最大元素的索引: $(m^{\max}, n^{\max})$
5: if $N^{\mathrm{BS},\ m^{\max}\ \mathrm{a}} > 0$ 则
6: 更新 $\mu_{m^{\max},\ n^{\max}} = 1, N^{\mathrm{BS},\ m^{\max}\ \mathrm{a}} = N^{\mathrm{BS},\ m^{\max}\ \mathrm{a}} - 1$ 和 $\mathrm{g}(:, n^{\max}) = \mathbf{0}$
7: **else**
8: 更新 $\mathrm{g}(m^{\max}, :) := \mathbf{0}$
9: 结束 if
10: 直到所有基站均已分配
11: 重复
12: 查找 h 中最大元素的索引: $(m^{\max}, k^{\max})$
13: if $N^{\mathrm{SUE},\ m\ \mathrm{a}} > 0$ 则
14: 更新 $\mu_{m^{\max},\ k^{\max}} = 1, N^{\mathrm{SUE},\ m\ \mathrm{a}} = N^{\mathrm{SUE},m\ \mathrm{a}} - 1$ 和 $\mathrm{h}(:, k^{\max}) = \mathbf{0}$
15: **else**
16: 更新 $\mathrm{h}(m^{\max}, :) := \mathbf{0}$
17: 结束 if
18: 直到所有卫星用户设备均已分配
19: 计算 LEO$_m$ 中每位用户的带宽: $\bar{W}_m^{\mathrm{per}} = W_m^{\mathrm{LEO}} / (\sum_{\forall k} \alpha_{m,\ k} + L \sum_{\forall n} \mu_{m,n})$
20: 设置 $W_k^{\mathrm{SUE}} := \sum_{\forall m} \alpha_{m,k} \bar{W}_m^{\mathrm{per}}$ 和 $W_n^{\mathrm{BS}} := L \sum_{\forall m} \mu_{m,n} \bar{W}_m^{\mathrm{per}}$
21: 输出: $\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\alpha}, W_n^{\mathrm{BS}}$ 和 $W_k^{\mathrm{SUE}}, \forall n, k$

表 I 仿真参数

参数	值
低地球轨道卫星带宽，W_m^{LEO}	500 兆赫
低地球轨道卫星高度	340 千米
低地球轨道卫星天线增益，G^{LEO}	42 dBi
基站天线增益，G^{BS}	32.8 dBi
SUE天线增益，G^{SUE}	10 dBi
工作频率，f_c	27.5 GHz
噪声功率功率谱密度，σ_m	-174 dBm/Hz
卫星用户设备最大功率，$p_k^{\max}$	20 分贝瓦
基站最大功率，$P_n^{\max}$	40 分贝瓦
卫星用户设备数量，K	10
基站数量，N	10
用户需求，$\bar{R}_k^{\mathrm{SUE}} = \bar{R}_{n^{\mathrm{UE}},\ell}^{\mathrm{UE}} = \bar{R}$	100 兆比特每秒

IV. 数值结果

本节通过数值结果评估所提出算法的性能。仿真参数汇总于表 I 中。在这些仿真中，我们考虑了一个面积为 25 km^2 的正方形区域，其中心位于地理坐标（φ_0, θ_0）=（40° N 20°E）。在该区域内，随机部署了 K 个卫星用户设备和 N 个基站。这里，连接到每个基站的用户设备数量设置为$^-$，并采用均值为 $L = 10$ 的泊松分布生成。此外，假设有 3 颗低地球轨道卫星（$M = 3$）覆盖该区域，这些卫星取自 Walker 星座的一个轨道。相邻两颗低地球轨道卫星之间的纬度差为 0.02°，中间的低地球轨道卫星在（φ_0, θ_0）处投影。例如，一个由$K = 10$ 个卫星用户设备和 $N = 10$ 个基站组成、由三颗低地球轨道卫星提供服务的仿真拓扑为

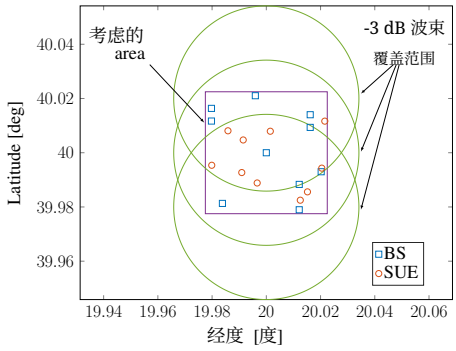

图2。包含 $K = 10$ 个卫星用户设备、 $N = 10$ 个基站的仿真拓扑。

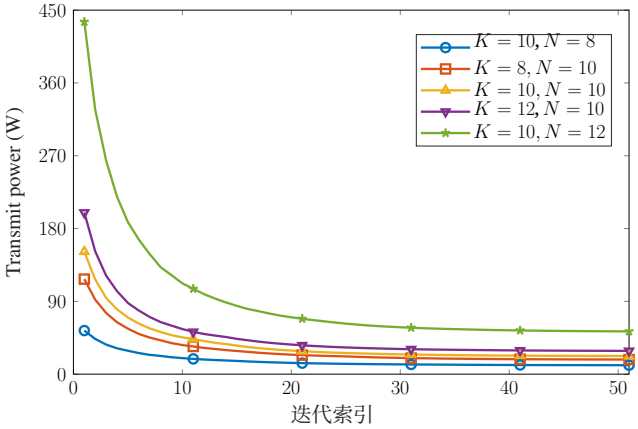

图3. 所提出的算法的收敛速率。

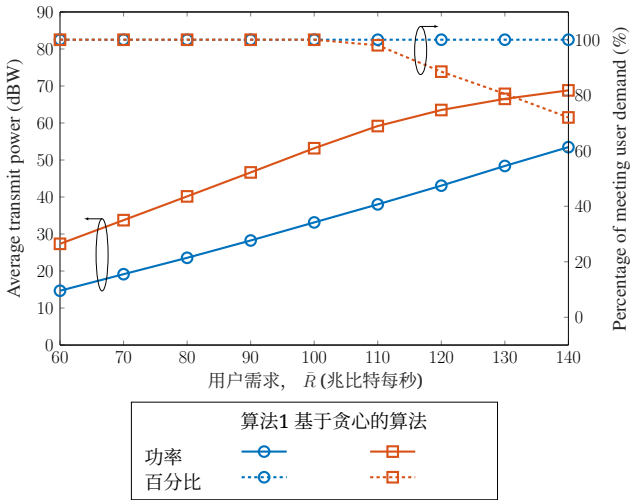

图4. 平均发射功率与用户需求的关系。

如图2所示。

图3展示了所提出算法在不同卫星用户设备数和基站数下的收敛行为，即$K = 8$、10、12 和 $N = 8$、10、12。可以观察到，总发射功率先下降，并在经过少量迭代次数后趋于饱和，这证实了所提出算法的收敛性。可以看出，较多的卫星用户设备和基站会导致收敛所需的迭代次数增加。具体而言，根据（K, N） = （10, 8）和（8, 10）的方案，约需 16 次迭代即可收敛，而（10, 10）和（10, 12）（或（12,10））方案对应的迭代次数分别约为 22 次和 31 次。不出所料，对于规模更大的系统，运行算法1需要更多迭代次数才能收敛。

图4展示了用户需求 R 对发射功率的影响，其中比较了两种提出的算法在不同用户需求下的总传输功率。正如预期的那样，对于这两种算法，基站和卫星用户设备都需要消耗更多功率，以满足更高的用户需求。尤其是，随着 R 增加，两种机制返回的发射功率都会迅速上升。具体而言，基于贪心的算法在 $R = 60$ 兆比特每秒和 $R = 120$ 兆比特每秒这两个点之间的功耗差距 约为36 dB，而算法1的差距仅为28 dB。此外，当 R 大于100兆比特每秒时，基于贪心的算法无法返回一个可行的解，即无法满足所有用户的需求。随着 R 增加，满足数据需求的卫星用户设备/基站所占百分比会下降。在这些不可行情景中，未满足需求的基站/卫星用户设备必须耗尽其全部发射功率预算，且无法消耗超过该预算的功率。这解释了为什么当 R 大于100兆比特每秒时，与算法1相比，贪心算法的发射功率增幅略微放缓。相反，算法1不仅在实现更低传输功率方面优于贪心算法，而且在所有仿真场景中都能满足用户需求。

图5展示了发射功率随低地球轨道$_2$ (W_2^{LEO})不同带宽预算的变化情况。此外，该图还给出了两种所提出的算法在仿真场景中获得可行解的百分比。正如预期，低地球轨道$_2$ 的带宽减小时，卫星用户设备和基站会消耗更多功率。再次证明，算法1优于贪心算法：在低地球轨道$_2$的所有带宽预算下，算法1得到的传输功率都远低于贪心算法。具体而言，当 W_2^{LEO}从700兆赫降至100兆赫时，我们所提出的第一种算法使系统的功率消耗约为28分贝瓦至49分贝瓦，而采用贪心算法时，发射功率则为47分贝瓦至94分贝瓦。此外，在所有考虑的场景中，算法1都能满足所有用户的需求，而当 W_2^{LEO}低于500兆赫时，贪心算法则无法做到这一点。因此，该图再次证实了算法1的有效性。

为更详细地了解低地球轨道$_2$, 最大带宽的影响，图6展示了根据算法1的实施结果，在不同 W_2^{LEO}取值下每颗低地球轨道卫星服务的用户数量。可以看出，卫星用户设备和基站优先连接到低地球轨道$_2$ ，因为其信道增益更好。当 W_2^{LEO} 减小时，可分配给连接到低地球轨道$_2$ 的卫星用户设备/基站的带宽也随之减少。因此，为了优化发射功率并满足业务需求，部分已连接的卫星用户设备/基站必须

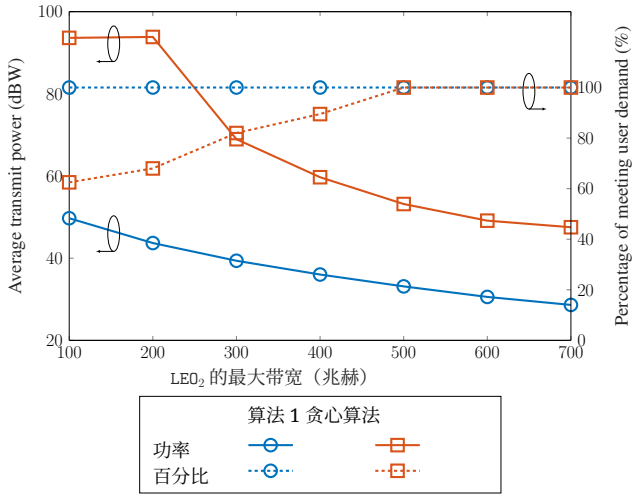

图 5. 平均发射功率与 LEO$_2$ 的最大带宽之间的关系。

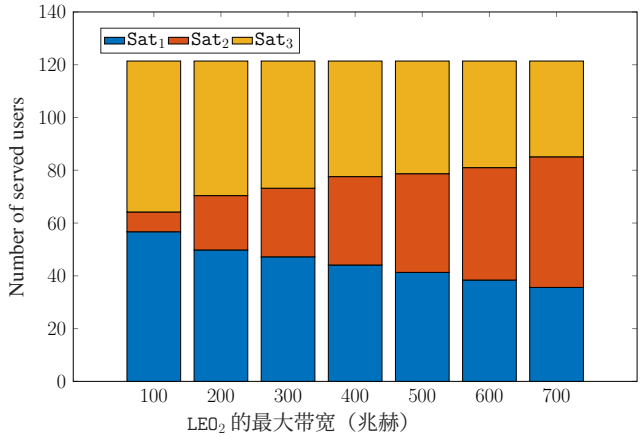

图6. 拓扑中卫星连接数与 LEO$_2$ 的最大带宽之间的关系。

将连接从低地球轨道$_2$ 切换到其他卫星。这些结果证明，所提出的算法能够灵活适应各种网络环境。

五、结论

本文研究了低地球轨道卫星与地面网络融合的上行链路系统，其中低地球轨道卫星同时为卫星用户设备提供服务，并为蜂窝网络提供回传链路。随后，我们在满足用户需求要求的条件下，构建了涵盖发射功率、带宽分配以及低地球轨道卫星-SUE/BS关联的功率最小化问题。为有效求解该问题，我们提出了一种基于交替优化方法的迭代算法。数值结果表明，与基于贪心的算法相比，所提出的算法是有效的。

致谢

本研究得到卢森堡国家研究基金（FNR）项目INSTRUCT（IPBG19/14016225/INSTRUCT）的资助。

参考文献

[1] M. Giordani、M. Polese、M. Mezzavilla、S. Rangan 和 M. Zorzi，“迈向6G网络：用例与技术”，IEEE Commun. Mag.，第58卷，第3期，第55–61页，2020年3月。[2] P.-D. Nguyen、V. N. Ha 和 L. B. Le，“面向回传受限协作式MEC系统的计算卸载与资源分配”，载于《IEEE第90届车辆技术会议（VTC2019-Fall）论文集》，2019年，第1–6页。[3] V. N. Ha、L. B. Le 和 N.-D. Dao，“前传容量约束受限的云无线接入网协作多点传输设计”，IEEE Trans. Veh. Technol.，第65卷，第9期，第7432–7447页，2016年。[4] M. Giordani 和 M. Zorzi，“6G时代的非地面网络：挑战与机遇”，IEEE网络，第35卷，第2期，第244–251页，2021年3月。[5] O. Kodheli、E. Lagunas、N. Maturo、S. K. Sharma、B. Shankar、J. F. M. Montoya、J. C. M. Duncan、D. Spano、S. Chatzinotas、S. Kisseleff、J. Querol、L. Lei、T. X. Vu 和 G. Goussetis，“新太空时代的卫星通信：综述与未来挑战”，IEEE Commun. Surveys Tuts.，第23卷，第1期，第70–109页，2021年第1季度。[6] M. Giordani 和 M. Zorzi，“毫米波卫星通信：6G时代的关键推动力”，载于《2020年国际计算、网络与通信会议（ICNC）》，2020年2月，第383–388页。[7] V. N. Ha、T. T. Nguyen、E. Lagunas、J. C. Merlano Duncan 和 S. Chatzinotas，“地球静止轨道载荷功率最小化：联合预编码与波束跳跃设计”，载于《全球通信大会2022——2022年IEEE全球通信大会论文集》，2022年，第6445–6450页。[8] L. Chen、V. N. Ha、E. Lagunas、L. Wu、S. Chatzinotas 和 B. Ottersten，“新一代波束跳跃卫星系统：采用选择性预编码的动态波束照射”，IEEE Trans. Wireless Commun.，2022年。[9] E. Lagunas、V. N. Ha、T. V. Chien、S. Andrenacci、N. Mazzali 和 S. Chatzinotas，“基于多播最小均方误差预编码的卫星系统：用户调度与等效信道的影响”，载于《2022年IEEE第96届车辆技术会议（VTC2022-Fall）》，2022年，第1–6页。[10] V. N. Ha、Z. Abdullah、G. Eappen、J. C. M. Duncan、R. Palisetty、J. L. G. Rios、W. A. Martins、H.-F. Chou、J. A. Vasquez、L. M. Garces-Socarras、H. Chaker 和 S. Chatzinotas，“大规模多输入多输出卫星通信的联合线性预编码与离散傅里叶变换波束成形设计”，载于《2022年IEEE全球通信大会研讨会（GC Wkshps）》，2022年，第1121–1126页。[11] K. Liolis、A. Geurtz、R. Sperber、D. Schulz、S. Watts、G. Poziopoulou、B. Evans、N. Wang、O. Vidal、B. Tiomela Jou、M. Fitch、S. Diaz Sendra、P. Sayyad Khodashenas 和 N. Chuberre，“面向增强型移动宽带的5G天地一体化网络用例与场景：SaT5G方案”，Int. J. Satellite Commun. Netw.，第37卷，第2期，第91–112页，2019年。[12] L. Feng、Y. Liu、L. Wu、Z. Zhang 和 J. Dang，“基于多输入多输出技术的低地球轨道卫星网络卫星切换策略”，IEEE Commun. Lett.，第24卷，第7期，第1505–1509页，2020年7月。[13] Y. Wu、G. Hu、F. Jin 和 J. Zu，“基于势博弈的低地球轨道卫星网络卫星切换策略”，IEEE开放获取期刊，第7卷，第133 641–133 652页，2019年9月。[14] C.-Q. Dai、J. Luo、S. Fu、J. Wu 和 Q. Chen，“天地一体化网络中面向弹性回传的动态用户关联”，IEEE系统期刊，第14卷，第4期，第5025–5036页，2020年12月。[15] E. Juan、M. Lauridsen、J. Wigard 和 P. E. Mogensen，“基于低地球轨道的非地面网络中的5G新空口移动性性能”，载于《2020年IEEE全球通信大会研讨会（GC Wkshps）》，2020年12月，第1–6页。[16] 3GPP，“支持非地面网络的新空口（NR）研究”，第三代合作伙伴计划（3GPP），技术报告（TR）38.811，2020年9月，版本15.4.0。[17] M. Grant 和 S. Boyd，“CVX：用于规范凸规划的MATLAB软件，2.1版”，http://cvxr.com/cvx，2014年3月。[18] M. Sanjabi、M. Razaviyayn 和 Z.-Q. Luo，“异构网络中最优的联合基站分配与波束成形”，IEEE Trans. Signal Process.，第62卷，第8期，第1950–1961页，2014年。[19] V. N. Ha、D. H. N. Nguyen 和 J.-F. Frigon，“毫米波正交频分多址系统中的子信道分配与混合预编码”，IEEE Trans. Wireless Commun.，第17卷，第9期，第5900–5914页，2018年。[20] V. N. Ha 和 L. B. Le，“虚拟化正交频分多址云无线接入网中的端到端网络切片”，IEEE开放获取期刊，第5卷，第18 675–18 691页，2017年。