

# 基于效用优化的星地融合网络联合用户 关联及资源块调度算法

柴 蓉, 陈米铃, 李锦红

(重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065)

**摘 要:** 星地融合网络通过实现卫星网络与地面蜂窝网络的有机融合, 可为用户提供灵活的网络接入服务, 满足多场景用户应用需求。然而, 卫星网络拓扑结构的动态变化、星地链路的复杂特性、多网和多用户资源调度粒度的显著差异性, 以及资源共享模式的多样性, 均对星地融合网络用户关联及资源调度问题带来困难及挑战。本文针对星地融合网络下行链路增强型移动宽带用户 (Enhanced mobile broadband User, EU) 及高可靠低延迟通信用户 (ultra-Reliable and low latency communications User, RU) 数据传输场景, 研究用户关联及资源调度问题。在满足用户传输需求、网络可用资源、资源共享模式等约束条件下, 将联合用户关联及资源块调度问题建模为系统效用函数最大化问题。由于该优化问题为强耦合问题, 不易直接求解, 本文将原优化问题分解功率分配子问题、用户关联及资源调度子问题。针对功率分配子问题, 利用拉格朗日部分松弛法对离散变量进行连续化, 进而将功率分配子问题转换为凸优化问题, 采用拉格朗日对偶算法进行求解。基于得到的功率分配策略, 本文提出一种启发式算法确定用户关联模式及资源块分配策略, 在对蜂窝网络可用时频资源状态进行评估的基础上, 分别针对时频资源充足及时频资源不充足的情况设计用户关联及资源块调度策略。针对时频资源充足情况, 根据用户资源调度模式, 分别定义 RU 及 EU 的时空资源调度粒度, 进而针对采用正交频分多址接入 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) 模式的 RU 及 EU, 基于 K-M 匹配算法优化确定时频资源块调度策略; 进而, 针对采用穿孔模式的 RU 与 EU, 提出一种基于贪婪算法的 EU 资源块重调度策略, 以满足用户最小传输速率; 针对占用相邻子信道的 EU 优化确定 OFDMA 模式及非正交多址接入 (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) 模式, 以实现效用函数的提升。针对蜂窝网络时频资源不充足的情况, 为无法接入蜂窝网络的用户分配卫星关联模式, 并设计基于 Kuhn-Munkres 匹配算法的资源块调度策略。最后, 通过仿真验证本文所提算法的有效性。

**关键词:** 星地融合网络; 用户关联; 资源调度; 效用优化; 业务需求; 对偶算法

**基金项目:** 国家自然科学基金 (No.62271097, No.62001076)

**中图分类号:** TN927.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2023)12-3483-13

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

**DOI:** 10.12263/DZXB.20220403

## Utility Optimization-Based Joint User Association and Resource Allocation Algorithm for Integrated Satellite-Terrestrial Network

CHAI Rong, CHEN Mi-ling, LI Jin-hong

(School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications,  
Chongqing 400065, China)

**Abstract:** By organically integrating the satellite network with the terrestrial network, the integrated satellite-terrestrial networks can provide flexible network access services for users and meet the requirements of various application scenarios. However, the dynamic changes of satellite network topology, the complex characteristics of satellite-ground links, the significant difference of resource scheduling granularity between multi-network and multi-user and the diversity of resource sharing modes all pose great challenges to the data transmission in the integrated terrestrial-satellite network. The user association and resource scheduling problem is studied for the downlink data transmission scenario of the integrated terrestrial-satellite network which consists of enhanced mobile broadband user (EU) and ultra-reliable and low latency communications user (RU). The joint user association and resource allocation problem is modeled as the system utility function maxi-

mization problem under the constraints of user transmission requirements, network available resources and transmission limitations. The formulated optimization problem is a strong coupling problem, which is not easy to solve directly. Then, the original problem is transformed into two sub-problems, i. e., power allocation sub-problem, user association and resource scheduling sub-problem. To tackle the power allocation sub-problem, Lagrange partial relaxation method is used to relax discrete variables into continuous ones, then new variables are introduced to decouple the previously defined variables, and simplified power distribution sub-problem is formulated, which is solved by Lagrange dual algorithm. Based on the obtained power allocation strategies, a heuristic algorithm is proposed to determine user association and resource block allocation strategy. Based on evaluating the available state of time-frequency resources in cellular network, user association and resource block scheduling strategies are designed respectively for the situation of sufficient time-frequency resource and insufficient time-frequency resource. Under the condition of sufficient time-frequency resource, the time-space resource scheduling granularity of RU and EU is defined according to the user resource scheduling mode, and then the time-frequency resource block scheduling strategy is optimized and determined based on Kuhn-Munkres matching algorithm when users apply orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) mode. Furthermore, for RU and EU that utilize puncturing mode, a resource block rescheduling strategy is proposed based on greedy algorithm to meet the minimum transmission rate of users. The OFDMA mode and non-orthogonal multiple access (NOMA) mode are determined for the EU occupying adjacent sub-channels to improve the utility function. In view of the insufficient time-frequency resources in cellular network, satellite association mode is assigned to users who cannot access the cellular network, and a resource block scheduling strategy is designed based on Kuhn-Munkres matching algorithm. Finally, the effectiveness of the proposed algorithm is verified by MATLAB simulation software.

**Key words:** integrated terrestrial-satellite network; user association; resource scheduling; utility optimization; service requirement; dual algorithm

**Foundation Item(s):** National Natural Science Foundation of China (No.62271097, No.62001076)

## 1 引言

随着第五代移动通信系统(5th Generation mobile communication system, 5G)与智能终端通信技术的快速发展,移动多媒体业务与各类新兴应用需求不断增长,无线数据流量迅猛增加,地面移动通信系统面临着巨大挑战<sup>[1]</sup>.采用卫星通信技术等非地面通信技术,可为地面用户提供不间断的网络连接能力.卫星通信系统覆盖范围广、容量大、可靠性高,能够与地面移动通信网络进行优势互补,成为未来无线通信的重要组成部分<sup>[2-4]</sup>.星地融合网络利用卫星通信与地面移动通信系统各自的优势,将两者进行有机融合,可为用户提供更优的数据传输服务,满足各种应用场景需求,实现网络性能提升.然而,卫星网络拓扑结构的动态变化、星间和星地链路的复杂特性以及用户需求的多样化等均对星地融合网络中数据传输问题提出挑战.此外,卫星网络与地面网络体系结构、网络可用资源及资源调度粒度均存在较大差异.如何综合考虑用户业务需求和数据传输模式,设计有效的用户关联及资源调度算法,成为亟待解决的问题.

近年已有研究针对星地融合网络数据传输场景,设计用户关联及资源调度策略.文献[5-7]针对星地融合网络中联合用户关联及资源调度算法开展研究,并提出基于系统和速率最大化的联合优化策略.文献[5]根据用户所需内容选择关联基站或卫星,以优化通信

容量和服务质量,在满足回程链路容量和服务质量约束下,建模用户关联及资源调度问题为系统和速率最大化问题,并通过连续凸逼近算法进行求解,从而实现系统和速率优化.文献[6]在满足最大功率约束和最小数据传输速率要求的情况下,建模联合用户关联及资源调度问题为系统和速率最大化问题,并通过使用自适应调度方案、最小均方误差准则及对数线性优化,确定最优用户关联及功率分配策略.文献[7]在满足卫星与基站发送功率和用户服务质量(Quality of Service, QoS)需求条件下,将联合用户关联及资源调度问题建模为系统和速率最大化问题,并提出一种基于快速收敛的迭代惩罚函数算法求解该优化问题,从而确定优化策略.

文献[8,9]针对星地融合网络中联合用户关联及资源调度算法开展研究,设计基于系统能效优化的联合用户关联及资源调度策略.针对星地融合网络中联合用户关联及资源调度算法,文献[8]提出了一种迭代优化算法,在满足系统吞吐量及延迟要求的同时,优化用户关联及资源调度策略,从而实现系统能效优化.文献[9]综合考虑星地链路和星间链路的缓存、计算和通信资源,将联合用户关联和资源调度算法建模为具有约束限制的网络能效最大化问题,并使用泰勒级数逼近的几何规划方法进行求解,实现系统能效优化.

星地融合网络数据传输场景中,在满足用户数据与业务需求的同时,需考虑用户QoS需求.文献[10,11]

提出了基于 QoS 优化的资源调度算法. 文献[10]考虑了多波束卫星网络的资源调度问题, 提出各波束内采用非正交多址接入 (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) 技术以提高数据传输性能的假设; 在满足卫星用户的 QoS 需求情况下, 优化设计波束功率分配策略及卫星用户的功率分配比例, 实现各波束内传输速率最大化. 文献[11]提出了一种星地融合网络联合用户关联及资源调度算法, 其中卫星回程链路与地面回程链路及地面无线接入链路共享时间资源; 综合考虑用户传输速率、网络可用资源及用户关联模式等约束条件, 将联合用户关联及资源调度问题建模为满足 QoS 需求的能耗最小化问题; 为了求解该优化问题, 提出一种基于双重分解的分布式迭代算法, 以获得最优用户关联策略和资源调度策略.

目前已有文献针对星地融合网络中联合用户关联及资源调度策略开展研究, 但很少有文章考虑卫星网络及地面网络各类用户资源调度粒度不同的问题及资源共享模式对用户传输性能的影响, 因此这些策略难以满足实际网络应用需求. 此外, 现有研究多以系统和速率及系统能效优化为目标来设计用户关联及资源调度方案, 然而, 这些研究未综合考虑用户业务特性差异及不同传输模式对系统整体性能的影响, 因此难以实现系统性能优化. 本文综合考虑了用户业务特性、各类资源共享模式对应的数据传输性能来进行系统效用函数建模, 进而将联合用户关联及资源调度问题建模为多约束的系统效用函数最大化问题. 由于该优化问题为强耦合问题, 不易直接求解, 本文将原优化问题分解功率分配子问题、用户关联及资源调度子问题. 为了求解功率分配子问题, 利用拉格朗日部分松弛法对离散变量进行连续化, 进而应用麦考密克等价消除优化变量之间的耦合关系, 将功率分配子问题转换为凸优化问题, 并采用拉格朗日对偶算法进行求解. 基于已得的功率分配策略, 进而提出一种启发式算法分别求解不同时频资源情况下的用户关联及资源调度策略, 从而实现效用函数优化.

## 2 系统模型

### 2.1 网络模型

本文考虑由一个卫星、多个 5G 基站 (5G next generation Node-B, gNB)、多个增强型移动宽带用户 (Enhanced mobile broadband User, EU)、多个高可靠低延迟通信用户 (ultra-Reliable and low latency communications User, RU) 组成的星地融合网络下行链路数据传输场景, 其中, gNB 和卫星均可与核心网相连. 假设 EU 和 RU 随机地分布在 gNB 的覆盖范围内, 用户通过接入 gNB 或卫星获取数据. 令  $BS_m$  表示第  $m$  个 gNB,  $M$  表示 gNB 的数量,  $K_m^e$  和

$K_m^r$  分别表示  $BS_m$  覆盖区域内 EU 和 RU 的数目,  $1 \leq m \leq M$ . 令  $U_{m,i}^e$  和  $U_{m,j}^r$  分别表示  $BS_m$  覆盖区域的第  $i$  个 EU 和第  $j$  个 RU,  $1 \leq i \leq K_m^e, 1 \leq j \leq K_m^r$ . 本文考虑用户业务不同需求 (如紧急性、重要程度等), 根据用户业务需求, 设定用户业务权值. 令  $w_{m,i}^e$  和  $w_{m,j}^r$  分别表示  $U_{m,i}^e$  和  $U_{m,j}^r$  的业务权值. 本文所考虑系统模型如图 1 所示.

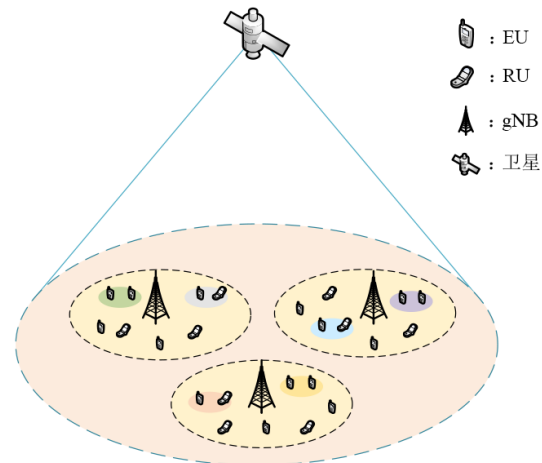


图 1 系统模型

### 2.2 多用户资源共享模型

考虑实际蜂窝网络系统框架, 将系统传输时间划分为多个时隙, 每个时隙由  $S_0$  个子时隙组成. 令系统总子时隙数目为  $S$ , 各子时隙的长度为  $\tau^b$ . EU 的时域调度单位为一个时隙, 考虑 RU 业务的紧急性, 其时域调度单位为一个子时隙. 假设蜂窝网络总传输带宽为给定常数, 可划分为  $F$  个带宽相同的子信道, 每个子信道带宽为  $W^b$ . EU 的频域调度单位为一个子信道. 考虑到 RU 业务的高可靠性传输需求, 通常需要为各 RU 分配多个连续子信道. 不失一般性, 假设为各 RU 分配相同的子信道数. 令  $F'$  表示分配给各 RU 的子信道数目. 为了提高系统资源利用率及用户传输性能, 假设 gNB 之间采用全频率复用, 即各 gNB 共用  $F$  个子信道. 与同一 gNB 关联的用户可采用正交频分多址接入 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) 模式、非正交多址接入 (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) 模式以及穿孔模式接入网络. 具体而言, 各 EU 及 RU 可采用 OFDMA 模式独立占用子信道进行数据交互, 多个 EU 之间可采用 NOMA 模式接入网络, EU 与 RU 间采用穿孔模式接入网络, 即 RU 占用分配给 EU 的子时隙资源接收来自 gNB 的数据. 为避免干扰 RU 的数据传输, EU 在该子时隙不进行数据交互<sup>[12]</sup>. 图 2 给出了系统资源共享模型图.

假设卫星网络与蜂窝网络使用不同的频段, 且卫星网络总传输带宽为给定常数, 可划分为  $L$  个子信道, 各子信道带宽均为  $W^s$ . 假设 RU 仅可通过接入 gNB 获

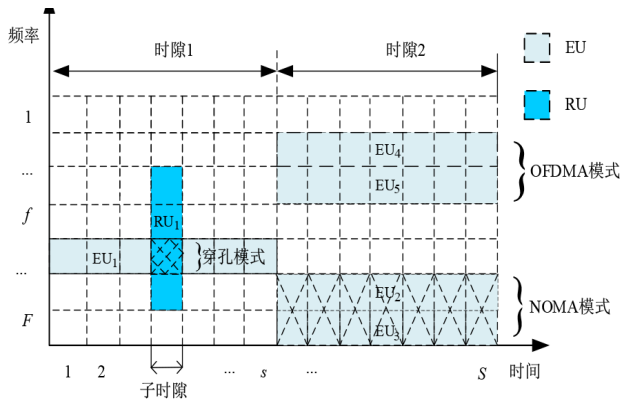


图2 系统资源共享模型图

取数据,称该模式为gNB关联模式;EU可采用gNB关联模式或通过接入卫星获取数据,称后者为卫星关联模式.多个采用卫星关联模式的EU通过OFDMA模式接入卫星子信道.

卫星网络的传输时间可划分为等长时隙.令 $T$ 为时隙数,每个时隙大小为 $\tau^s$ .假设 $\tau^s$ 足够小,每个时隙内的卫星链路状态可视为静态.为了描述用户与卫星之间通信链路的连接状态,本文引入了二元连接标识符.令 $\delta_{m,i,t}^s \in \{0,1\}$ 表示 $t$ 时隙 $U_{m,i}^c$ 与卫星间的连通性.若 $t$ 时隙 $U_{m,i}^c$ 与卫星间存在物理链路,则 $\delta_{m,i,t}^s = 1$ ,否则, $\delta_{m,i,t}^s = 0$ .

### 3 问题建模

本节首先针对采用不同资源共享模式的用户的传输速率进行分析建模,进而定义系统效用函数,考虑信道特性、用户关联、资源调度及用户QoS需求等限制条件,建模联合用户关联及资源调度问题为系统效用函数最大化问题.

#### 3.1 用户传输速率建模

以下将分别对RU和EU在不同资源共享模式下的链路传输速率进行分析建模.

##### 3.1.1 RU传输速率建模

根据资源共享模式不同,RU可采用OFDMA模式和穿孔模式进行数据传输,以下分别建模相应传输速率.

###### (1)RU传输速率建模(OFDMA模式)

若RU使用OFDMA模式接入蜂窝网络,RU与同一gNB内的用户独立占用各子信道,从而避免同一gNB内的用户干扰.然而,由于gNB之间采用全频率复用,RU会受到来自其他gNB的干扰.令 $R_{m,j,f,s}^{r,o}$ 表示 $U_{m,j}^r$ 采用OFDMA模式占用子时隙 $s$ 的第 $f$ 个子信道接收来自 $BS_m$ 的数据时所对应的链路传输速率,可建模为

$$R_{m,j,f,s}^{r,o} = W^b \log_2(1 + \gamma_{m,j,f,s}^{r,o}) \quad (1)$$

其中, $\gamma_{m,j,f,s}^{r,o}$ 表示 $U_{m,j}^r$ 采用OFDMA模式占用子时隙 $s$ 的

第 $f$ 个子信道接收来自 $BS_m$ 的数据时所对应的信干噪比,可表示为

$$\gamma_{m,j,f,s}^{r,o} = \frac{P_{m,j,f,s}^{r,o} |h_{m,j,f,s}^r|^2}{I_{m,j,f,s}^r + I_{m,j,f,s}^c + \sigma^2} \quad (2)$$

其中, $P_{m,j,f,s}^{r,o}$ 表示 $U_{m,j}^r$ 采用OFDMA模式占用子时隙 $s$ 的第 $f$ 个子信道接收来自 $BS_m$ 数据时所对应的发送功率, $h_{m,j,f,s}^r$ 表示 $U_{m,j}^r$ 在子时隙 $s$ 的第 $f$ 个子信道上接收来自 $BS_m$ 数据时所对应的信道增益, $\sigma^2$ 为噪声功率, $I_{m,j,f,s}^r$ 和 $I_{m,j,f,s}^c$ 分别表示 $U_{m,j}^r$ 在子时隙 $s$ 的第 $f$ 个子信道上受到来自其他gNB下RU及EU的干扰. $I_{m,j,f,s}^r$ 可建模为

$$I_{m,j,f,s}^r = I_{m,j,f,s}^{r,o} + I_{m,j,f,s}^{r,c} \quad (3)$$

其中, $I_{m,j,f,s}^{r,o}$ 和 $I_{m,j,f,s}^{r,c}$ 分别表示 $U_{m,j}^r$ 在子时隙 $s$ 的第 $f$ 个子信道上受到来自其他gNB下采用OFDMA模式及穿孔模式的RU的干扰. $I_{m,j,f,s}^{r,o}$ 可建模为

$$I_{m,j,f,s}^{r,o} = \sum_{m'=1, m' \neq m}^M \sum_{j'=1}^{K_{m'}^r} x_{m',j',f,s}^{r,o} P_{m',j',f,s}^{r,o} |h_{m',m,j,f,s}^r|^2 \quad (4)$$

其中, $x_{m',j',f,s}^{r,o}$ 表示 $U_{m',j'}^r$ 采用OFDMA模式占用子时隙 $s$ 的第 $f$ 个子信道接收来自 $BS_{m'}$ 的数据时的关联变量, $h_{m',m,j,f,s}^r$ 表示在子时隙 $s$ 的第 $f$ 个子信道上 $BS_{m'}$ 与 $U_{m,j}^r$ 链路的信道增益.

式(3)中, $I_{m,j,f,s}^{r,c}$ 可表示为

$$I_{m,j,f,s}^{r,c} = \sum_{m'=1, m' \neq m}^M \sum_{j'=1}^{K_{m'}^r} x_{m',j',f,s}^{r,c} P_{m',j',f,s}^{r,c} |h_{m',m,j,f,s}^r|^2 \quad (5)$$

其中, $x_{m',j',f,s}^{r,c}$ 和 $P_{m',j',f,s}^{r,c}$ 分别表示 $U_{m',j'}^r$ 采用穿孔模式占用子时隙 $s$ 的第 $f$ 个子信道接收来自 $BS_{m'}$ 的数据时所对应的二元关联变量及发送功率.

式(2)中, $U_{m,j}^r$ 在子时隙 $s$ 的第 $f$ 个子信道上受到的来自其他gNB下EU的干扰 $I_{m,j,f,s}^c$ 可表示如下:

$$I_{m,j,f,s}^c = I_{m,j,f,s}^{e,o} + I_{m,j,f,s}^{e,c} + I_{m,j,f,s}^{e,n} \quad (6)$$

其中, $I_{m,j,f,s}^{e,o}$ , $I_{m,j,f,s}^{e,c}$ 和 $I_{m,j,f,s}^{e,n}$ 分别表示 $U_{m,j}^c$ 在子时隙 $s$ 的第 $f$ 个子信道上受到的来自其他gNB下采用OFDMA模式、穿孔模式及NOMA模式的EU的干扰.

式(6)中, $I_{m,j,f,s}^{e,o}$ 可建模为

$$I_{m,j,f,s}^{e,o} = \sum_{m'=1, m' \neq m}^M \sum_{i=1}^{K_{m'}^e} x_{m',i,f,s}^{e,o} P_{m',i,f,s}^{e,o} |h_{m',m,j,f,s}^e|^2 \quad (7)$$

其中, $x_{m',i,f,s}^{e,o}$ 和 $P_{m',i,f,s}^{e,o}$ 分别表示 $U_{m',i}^c$ 采用OFDMA模式占用子时隙 $s$ 的第 $f$ 个子信道接收来自 $BS_{m'}$ 的数据时的二元关联变量及发送功率.

式(6)中, $I_{m,j,f,s}^{e,c}$ 表示如下:

$$I_{m,j,f,s}^{e,c} = \sum_{m'=1, m' \neq m}^M \sum_{i=1}^{K_{m'}^e} x_{m',i,f,s}^{e,c} P_{m',i,f,s}^{e,c} |h_{m',m,j,f,s}^e|^2 \quad (8)$$

其中, $P_{m',i,f,s}^{e,c}$ 表示 $U_{m',i}^c$ 采用穿孔模式占用子时隙 $s$ 的第 $f$ 个子信道接收来自 $BS_{m'}$ 的数据时所对应的发送功率.

式(6)中, $I_{m,j,f,s}^{e,n}$ 可建模为

$$I_{m,j,f,s}^{e,n} = \sum_{m'=1, m' \neq m}^M \sum_{i=1}^{K_{m'}^{e,n}} \sum_{i'=1}^{K_{m'}^{e,n}} x_{m',i,i',f,s}^n \left( P_{m',i,i',f,s}^{e,n,1} + P_{m',i,i',f,s}^{e,n,2} \right) \left| h_{m',m,j,f,s}^r \right|^2 \quad (9)$$

其中,  $x_{m',i,i',f,s}^n$  表示  $U_{m',i}^e$  和  $U_{m',i'}^e$  采用 NOMA 模式占用子时隙  $s$  的第  $f$  个子信道接收来自  $BS_{m'}$  的数据时的二元关联变量,  $P_{m',i,i',f,s}^{e,n,1}$  和  $P_{m',i,i',f,s}^{e,n,2}$  分别表示  $U_{m',i}^e$  和  $U_{m',i'}^e$  采用 NOMA 模式接入 gNB 时  $U_{m',i}^e$  及  $U_{m',i'}^e$  占用子时隙  $s$  的第  $f$  个子信道接收来自  $BS_{m'}$  的数据时所对应的发送功率.

(2) RU 传输速率建模(穿孔模式)

令  $R_{m,j,f,s}^{r,c}$  表示  $U_{m,j}^r$  采用穿孔模式占用子时隙  $s$  的第  $f$  个子信道接收来自  $BS_m$  的数据时所对应的链路传输速率, 可建模为

$$R_{m,j,f,s}^{r,c} = W^b \log_2 \left( 1 + \gamma_{m,j,f,s}^{r,c} \right) \quad (10)$$

其中,  $\gamma_{m,j,f,s}^{r,c}$  表示  $U_{m,j}^r$  采用穿孔模式占用子时隙  $s$  的第  $f$  个子信道接收来自  $BS_m$  的数据时所对应的信干噪比, 可表示为

$$\gamma_{m,j,f,s}^{r,c} = \frac{P_{m,j,f,s}^{r,c} |h_{m,j,f,s}^r|^2}{I_{m,j,f,s}^e + I_{m,j,f,s}^e + \sigma^2} \quad (11)$$

### 3.1.2 EU 传输速率建模

根据资源共享模式不同, EU 可采用 OFDMA 模式、穿孔模式、NOMA 模式及卫星关联模式进行数据传输, 以下分别建模相应传输速率.

(1) EU 传输速率建模(OFDMA 模式)

当 EU 使用 OFDMA 模式接入网络时, EU 与同一 gNB 内的用户独立地占用各子信道, 从而避免同一 gNB 内的用户干扰, 但由于 gNB 之间采用全频率复用, EU 会受到来自其他 gNB 的干扰. 令  $R_{m,i,f,s}^{e,o}$  表示  $U_{m,i}^e$  采用 OFDMA 模式占用子时隙  $s$  的第  $f$  个子信道接收来自  $BS_m$  数据时所对应的链路传输速率, 可建模为

$$R_{m,i,f,s}^{e,o} = W^b \log_2 \left( 1 + \gamma_{m,i,f,s}^{e,o} \right) \quad (12)$$

其中,  $\gamma_{m,i,f,s}^{e,o}$  表示  $U_{m,i}^e$  采用 OFDMA 模式占用子时隙  $s$  的第  $f$  个子信道接收来自  $BS_m$  的数据时所对应的信干噪比, 可表示为

$$\gamma_{m,i,f,s}^{e,o} = \frac{P_{m,i,f,s}^{e,o} |h_{m,i,f,s}^e|^2}{I_{m,i,f,s}^{e,r} + I_{m,i,f,s}^{e,e} + \sigma^2} \quad (13)$$

其中,  $h_{m,i,f,s}^e$  表示  $U_{m,i}^e$  在子时隙  $s$  的第  $f$  个子信道上接收的来自  $BS_m$  数据时所对应的信道增益,  $I_{m,i,f,s}^{e,r}$  和  $I_{m,i,f,s}^{e,e}$  分别表示  $U_{m,i}^e$  在子时隙  $s$  的第  $f$  个子信道上受到的来自其他 gNB 下 RU 及 EU 的干扰.

式(13)中,  $I_{m,i,f,s}^{e,r}$  可建模为

$$I_{m,i,f,s}^{e,r} = I_{m,i,f,s}^{e,r,o} + I_{m,i,f,s}^{e,r,c} \quad (14)$$

其中,  $I_{m,i,f,s}^{e,r,o}$  和  $I_{m,i,f,s}^{e,r,c}$  分别表示  $U_{m,i}^e$  在子时隙  $s$  的第  $f$  个子信道上受到的来自其他 gNB 下采用 OFDMA 模式及穿孔模式的 RU 的干扰.

式(14)中,  $I_{m,i,f,s}^{e,r,o}$  可建模为

$$I_{m,i,f,s}^{e,r,o} = \sum_{m'=1, m' \neq m}^M \sum_{j=1}^{K_{m'}^{e,r}} x_{m',j,f,s}^{r,o} P_{m',j,f,s}^{r,o} |h_{m',m,i,f,s}^e|^2 \quad (15)$$

其中,  $h_{m',m,i,f,s}^e$  表示在子时隙  $s$  的第  $f$  个子信道上  $BS_{m'}$  与  $U_{m,i}^e$  链路的信道增益.

式(14)中,  $I_{m,i,f,s}^{e,r,c}$  可表示为

$$I_{m,i,f,s}^{e,r,c} = \sum_{m'=1, m' \neq m}^M \sum_{j=1}^{K_{m'}^{e,r}} x_{m',j,f,s}^{r,c} P_{m',j,f,s}^{r,c} |h_{m',m,i,f,s}^e|^2 \quad (16)$$

式(13)中,  $U_{m,i}^e$  在子时隙  $s$  的第  $f$  个子信道上受到的来自其他 gNB 下 EU 的干扰  $I_{m,i,f,s}^{e,e}$  表示如下:

$$I_{m,i,f,s}^{e,e} = I_{m,i,f,s}^{e,e,o} + I_{m,i,f,s}^{e,e,c} + I_{m,i,f,s}^{e,e,n} \quad (17)$$

其中,  $I_{m,i,f,s}^{e,e,o}$ ,  $I_{m,i,f,s}^{e,e,c}$  和  $I_{m,i,f,s}^{e,e,n}$  分别表示  $U_{m,i}^e$  在子时隙  $s$  的第  $f$  个子信道上受到的来自其他 gNB 下采用 OFDMA 模式、穿孔模式及 NOMA 模式的 EU 的干扰.

式(17)中,  $I_{m,i,f,s}^{e,e,o}$  可建模为

$$I_{m,i,f,s}^{e,e,o} = \sum_{m'=1, m' \neq m}^M \sum_{i'=1}^{K_{m'}^{e,o}} x_{m',i',f,s}^{e,o} P_{m',i',f,s}^{e,o} |h_{m',m,i,f,s}^e|^2 \quad (18)$$

式(17)中,  $U_{m,i}^e$  在子时隙  $s$  的第  $f$  个子信道上受到的来自其他 gNB 下采用穿孔模式的 EU 的干扰  $I_{m,i,f,s}^{e,e,c}$  可表示如下:

$$I_{m,i,f,s}^{e,e,c} = \sum_{m'=1, m' \neq m}^M \sum_{i'=1}^{K_{m'}^{e,c}} x_{m',i',f,s}^{e,c} P_{m',i',f,s}^{e,c} |h_{m',m,i,f,s}^e|^2 \quad (19)$$

式(17)中,  $I_{m,i,f,s}^{e,e,n}$  可建模为

$$I_{m,i,f,s}^{e,e,n} = \sum_{m'=1, m' \neq m}^M \sum_{i_1=1}^{K_{m'}^{e,n}} \sum_{i_2=1, i_2 \neq i_1}^{K_{m'}^{e,n}} x_{m',i_1,i_2,f,s}^n \left( P_{m',i_1,i_2,f,s}^{e,n,1} + P_{m',i_1,i_2,f,s}^{e,n,2} \right) |h_{m',m,i,f,s}^e|^2 \quad (20)$$

(2) EU 传输速率建模(穿孔模式)

令  $R_{m,i,f,s}^{e,c}$  表示  $U_{m,i}^e$  采用穿孔模式占用子时隙  $s$  的第  $f$  个子信道接收来自  $BS_m$  的数据时所对应的链路传输速率, 可建模为

$$R_{m,i,f,s}^{e,c} = W^b \log_2 \left( 1 + \gamma_{m,i,f,s}^{e,c} \right) \quad (21)$$

其中,  $\gamma_{m,i,f,s}^{e,c}$  表示  $U_{m,i}^e$  采用穿孔模式占用子时隙  $s$  的第  $f$  个子信道接收来自  $BS_m$  的数据时所对应的信干噪比, 可表示为

$$\gamma_{m,i,f,s}^{e,c} = \frac{P_{m,i,f,s}^{e,c} |h_{m,i,f,s}^e|^2}{I_{m,i,f,s}^{e,r} + I_{m,i,f,s}^{e,e} + \sigma^2} \quad (22)$$

(3) EU 传输速率建模(NOMA 模式)

当 EU 采用 NOMA 模式接入网络时, EU 不仅会受到来自其他 gNB 下用户的干扰, 还会受到来自同一 gNB 下 EU 的干扰. 假设  $U_{m,i}^e$  和  $U_{m,i'}^e$  组成 NOMA 组, 且有  $h_{m,i,f}^e \leq h_{m,i',f}^e$ . 因此,  $U_{m,i}^e$  的传输速率  $R_{m,i,i',f,s}^{e,n,1}$  可表示为

$$R_{m,i,i',f,s}^{e,n,1} = 2W^b \log_2 \left( 1 + \gamma_{m,i,i',f,s}^{e,n,1} \right) \quad (23)$$

其中,  $\gamma_{m,i,i',f,s}^{e,n,1}$  表示  $U_{m,i}^e$  与  $U_{m,i'}^e$  采用 NOMA 模式接入网络时  $U_{m,i}^e$  占用子时隙  $s$  的第  $f$  个子信道接收来自  $BS_m$  的数据时所对应的信干噪比, 可建模为

$$\gamma_{m,i,i',f,s}^{e,n,1} = \frac{P_{m,i,i',f,s}^{e,n,1} |h_{m,i,i',f,s}^e|^2}{I_{m,i,f,s}^{e,r} + I_{m,i,f,s}^{e,c} + I_{m,i,f,s}^n + \sigma^2} \quad (24)$$

其中,  $I_{m,i,f,s}^n$  表示  $U_{m,i}^e$  受到同一 NOMA 组中  $U_{m,i'}^e$  的干扰, 可表示为

$$I_{m,i,f,s}^n = \sum_{i'=1, i' \neq i}^{K_m^c} x_{m,i,i',f,s}^n P_{m,i,i',f,s}^{e,n,2} |h_{m,i,i',f,s}^e|^2 \quad (25)$$

对  $U_{m,i}^e$  进行解码后,  $U_{m,i'}^e$  的传输速率可建模为

$$R_{m,i,i',f,s}^{e,n,2} = 2W^b \log_2(1 + \gamma_{m,i,i',f,s}^{e,n,2}) \quad (26)$$

其中,  $\gamma_{m,i,i',f,s}^{e,n,2}$  表示  $U_{m,i}^e$  与  $U_{m,i'}^e$  采用 NOMA 模式接入网络时  $U_{m,i'}^e$  占用子时隙  $s$  的第  $f$  个子信道接收来自  $BS_m$  的数据时所对应的信干噪比, 可建模为

$$\gamma_{m,i,i',f,s}^{e,n,2} = \frac{P_{m,i,i',f,s}^{e,n,2} |h_{m,i,i',f,s}^e|^2}{I_{m,i,f,s}^{e,r} + I_{m,i,f,s}^{e,c} + \sigma^2} \quad (27)$$

#### (4) EU 传输速率建模 (卫星关联模式)

当 EU 无法通过接入 gNB 获取数据时, 可采用卫星关联模式进行数据获取. 令  $x_{m,i,l,t}^s$  表示卫星在时隙  $t$  占用子信道  $l$  传输数据至  $U_{m,i}^e$  所对应的二元关联变量,  $1 \leq l \leq L$ . 令  $R_{m,i,l,t}^s$  表示卫星在时隙  $t$  占用子信道  $l$  传输数据至  $U_{m,i}^e$  所对应的传输速率, 可建模为

$$R_{m,i,l,t}^s = x_{m,i,l,t}^s W^s \log_2(1 + \gamma_{m,i,l,t}^s) \quad (28)$$

其中,  $x_{m,i,l,t}^s$  和  $\gamma_{m,i,l,t}^s$  分别表示在  $t$  时隙卫星占用子信道  $l$  传输数据至  $U_{m,i}^e$  所对应的二元关联变量及信道增益,  $\gamma_{m,i,l,t}^s$  可建模为

$$\gamma_{m,i,l,t}^s = \frac{P_{m,i,l,t}^s |h_{m,i,l,t}^s|^2}{\sigma^2} \quad (29)$$

其中,  $P_{m,i,l,t}^s$  和  $h_{m,i,l,t}^s$  分别表示在  $t$  时隙卫星占用子信道  $l$  传输数据至  $U_{m,i}^e$  所对应的发送功率及信道增益,  $h_{m,i,l,t}^s$  可建模为<sup>[13]</sup>

$$h_{m,i,l,t}^s = \sqrt{\frac{G_{Tx}^s G_{Rx}^e L_{m,i,l,t}^s}{\kappa_s T_s W^s}} \quad (30)$$

其中,  $G_{Tx}^s$  表示卫星发送天线增益,  $G_{Rx}^e$  表示 EU 接收天线增益,  $\kappa_s$  和  $T_s$  分别表示波尔曼兹常数和系统噪声温度,  $L_{m,i,l,t}^s$  表示卫星在时隙  $t$  占用子信道  $l$  传输数据至  $U_{m,i}^e$  所对应的自由空间损耗, 可建模为

$$L_{m,i,l,t}^s = \left( \frac{c}{4\pi d_{m,i,l,t}^s z_l^s} \right)^2 \quad (31)$$

其中,  $d_{m,i,l,t}^s$  表示  $t$  时隙卫星与  $U_{m,i}^e$  间的距离,  $z_l^s$  表示第  $l$  个卫星子信道的载波频率.

### 3.2 系统效用函数建模

综合用户传输性能和业务需求, 本文将系统效用

函数  $Q$  建模为 EU 和 RU 在各种传输模式下的效用函数之和, 即

$$Q = \sum_{m=1}^M \left( \sum_{i=1}^{K_m^c} W_{m,i}^e Q_{m,i}^e + \sum_{j=1}^{K_m^r} W_{m,j}^r Q_{m,j}^r \right) \quad (32)$$

其中,  $Q_{m,i}^e$  表示  $U_{m,i}^e$  在使用 OFDMA 模式、穿孔模式、NOMA 模式和卫星关联模式接入网络时获得的数据量之和, 可建模为

$$Q_{m,i}^e = Q_{m,i}^{e,o} + Q_{m,i}^{e,c} + Q_{m,i}^{e,n} + Q_{m,i}^{e,s} \quad (33)$$

其中,  $Q_{m,i}^{e,o}$  表示  $U_{m,i}^e$  使用 OFDMA 模式接入网络时获得的数据量, 可表示为

$$Q_{m,i}^{e,o} = \sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S x_{m,i,f,s}^{e,o} R_{m,i,f,s}^{e,o} \tau^b \quad (34)$$

式(33)中,  $Q_{m,i}^{e,c}$  表示  $U_{m,i}^e$  使用穿孔模式接入网络时获得的数据量, 可建模为

$$Q_{m,i}^{e,c} = \sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S (1 - x_{m,i,f,s}^{e,c}) R_{m,i,f,s}^{e,c} \tau^b \quad (35)$$

式(33)中,  $Q_{m,i}^{e,n}$  表示  $U_{m,i}^e$  使用 NOMA 模式接入网络时获得的数据量, 可表示为

$$Q_{m,i}^{e,n} = \sum_{i'=1, i' \neq i}^{K_m^c} \sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S x_{m,i,i',f,s}^n (R_{m,i,i',f,s}^{e,n,1} + R_{m,i,i',f,s}^{e,n,2}) \tau^b \quad (36)$$

式(33)中,  $Q_{m,i}^{e,s}$  表示  $U_{m,i}^e$  通过卫星关联模式进行数据获取时获得的数据量, 可建模为

$$Q_{m,i}^{e,s} = \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T x_{m,i,l,t}^s R_{m,i,l,t}^s \tau^s \quad (37)$$

式(32)中,  $Q_{m,j}^r$  表示  $U_{m,j}^r$  在使用 OFDMA 模式和穿孔模式接入网络时获得的数据量之和, 可表示如下:

$$Q_{m,j}^r = Q_{m,j}^{r,o} + Q_{m,j}^{r,c} \quad (38)$$

其中,  $Q_{m,j}^{r,o}$  表示  $U_{m,j}^r$  采用 OFDMA 模式接入网络时获得的数据量, 可建模为

$$Q_{m,j}^{r,o} = \sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S x_{m,j,f,s}^{r,o} R_{m,j,f,s}^{r,o} \tau^b \quad (39)$$

式(38)中,  $Q_{m,j}^{r,c}$  表示  $U_{m,j}^r$  采用穿孔模式接入网络时获得的数据量, 可表述为

$$Q_{m,j}^{r,c} = \sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S x_{m,j,f,s}^{r,c} R_{m,j,f,s}^{r,c} \tau^b \quad (40)$$

### 3.3 优化问题建模

综合考虑优化目标以及各类约束条件, 将星地融合网络中的联合用户关联及资源调度问题建模为系统效用函数最大化问题, 如式(41)所示:

$$\begin{aligned} & \max_{X,P} Q \\ \text{s. t.} \quad & \text{C1: } \sum_{f=1}^F x_{m,i,f,s}^{e,o} + \sum_{f=1}^F x_{m,i,f,s}^{e,c} + \sum_{i'=1, i' \neq i}^{K_m^c} \sum_{f=1}^F x_{m,i,i',f,s}^n \\ & + \sum_{l=1}^L x_{m,i,l,t}^s \leq 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{C2: } & \sum_{i=1, i \neq i'}^{K_m^e} \sum_{f=1}^F x_{m,i,i',f,s}^n \leq 1 \\
 \text{C3: } & \sum_{s=1}^S x_{m,j,f,s}^{r,o} + \sum_{s=1}^S x_{m,j,f,s}^{r,c} \leq 1 \\
 \text{C4: } & \sum_{j=1}^{K_m^r} x_{m,i,f,s}^{r,o} + \sum_{j=1}^{K_m^r} x_{m,i,f,s}^{r,c} \leq 1 \\
 \text{C5: } & \sum_{i=1}^{K_m^e} x_{m,i,f,s}^{e,o} + \sum_{i=1}^{K_m^e} x_{m,i,f,s}^{e,c} \leq 1 \\
 \text{C6: } & \sum_{i=1}^{K_m^e} \sum_{i'=1, i' \neq i}^{K_m^e} x_{m,i,i',f,s}^n \leq 2 \\
 \text{C7: } & x_{m,i,i',f+1,s}^n = 1, \text{ if } x_{m,i,i',f,s}^n = 1, 1 \leq f \leq F-1 \\
 \text{C8: } & \prod_{s=1+(n-1)S_0}^{nS_0} x_{m,i,f,s}^{e,o} = 1, \text{ if } x_{m,i,f,s'}^{e,o} = 1 \\
 & \text{and } \sum_{s=1+(n-1)S_0, s \neq s'}^{nS_0} x_{m,i,f,s}^{e,o} = 0 \\
 \text{C9: } & \prod_{s=1+(n-1)S_0}^{nS_0} x_{m,i,f,s}^{e,c} = 1, \text{ if } x_{m,i,f,s'}^{e,c} = 1 \\
 & \text{and } \sum_{s=1+(n-1)S_0, s \neq s'}^{nS_0} x_{m,i,f,s}^{e,c} = 0 \\
 \text{C10: } & \prod_{s=1+(n-1)S_0}^{nS_0} x_{m,i,i',f,s}^n = 1, \text{ if } x_{m,i,i',f,s'}^n = 1 \\
 & \text{and } \sum_{s=1+(n-1)S_0, s \neq s'}^{nS_0} x_{m,i,i',f,s}^n = 0 \\
 \text{C11: } & \prod_{f=1+(k-1)F'}^{F'k} x_{m,j,f,s}^{r,o} = 1, \text{ if } x_{m,j,f',s}^{r,o} = 1 \\
 & \text{and } \sum_{f=1+(k-1)F', f \neq f'}^{F'k} x_{m,j,f,s}^{r,o} = 0 \\
 \text{C12: } & \prod_{f=1+(k-1)F'}^{F'k} x_{m,j,f,s}^{r,c} = 1, \text{ if } x_{m,j,f',s}^{r,c} = 1 \\
 & \text{and } \sum_{f=1+(k-1)F', f \neq f'}^{F'k} x_{m,j,f,s}^{r,c} = 0 \\
 \text{C13: } & x_{m,i,l,t}^s = 0, \text{ if } d_{m,i,t}^s = 0, \forall l \\
 \text{C14: } & \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^{K_m^s} \sum_{t=1}^L \sum_{l=1}^T x_{m,i,l,t}^s P_{m,i,l,t}^s \leq P^s \\
 \text{C15: } & \sum_{j=1}^{K_m^r} \sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S P_{m,j,f,s}^r + \sum_{i=1}^{K_m^e} \sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S P_{m,i,f,s}^e \leq P_m^b \\
 \text{C16: } & R_{m,j}^r \geq R_{m,j}^{r,\min} \\
 \text{C17: } & R_{m,t}^e \geq R_{m,t}^{e,\min} \tag{41}
 \end{aligned}$$

式(41)中,  $X$  为用户关联及资源调度集合, 即  $X = \{x_{m,j,f,s}^{r,o}, x_{m,j,f,s}^{r,c}, x_{m,i,f,s}^{e,o}, x_{m,i,f,s}^{e,c}, x_{m,i,i',f,s}^n\}$ ,  $P$  为功率分配集合, 即

$$P = \{P_{m,j,f,s}^{r,o}, P_{m,j,f,s}^{r,c}, P_{m,i,f,s}^{e,o}, P_{m,i,f,s}^{e,c}, P_{m,i,i',f,s}^{e,n,1}, P_{m,i,i',f,s}^{e,n,2}, P_{m,i,l,t}^s\}.$$

C1~C7 为关联模式及资源调度约束; C8~C10 为 EU 时隙约束, 即 EU 的时域调度单位为一个时隙, 在 C8~C10 中,  $n$  的取值范围为  $1 \leq n \leq S'$ ,  $S' = S/S_0$ ,  $s' \in \{1 + (n-1)S_0, nS_0\}$ ; C11~C12 为 RU 子信道约束, 即 RU 在子时隙  $s$  上占据连续  $F'$  个子信道, 在 C11~C12 中,  $k$  的取值范围为  $1 \leq k \leq K$ ,  $K = F/F'$ ,  $f' \in \{1 + (k-1)F', F'k\}$ ; C13 为物理链路约束; C14~C15 为发送功率约束; C16~C17 为用户传输速率需求,  $R_{m,j}^{r,\min}$  和  $R_{m,j}^r$  分别表示  $U_{m,j}^r$  的最小数据传输速率和实际传输速率,  $R_{m,i}^{e,\min}$  和  $R_{m,i}^e$  分别表示  $U_{m,i}^e$  的最小数据传输速率和实际传输速率. 在约束 C15 中,  $P_{m,j,f,s}^r$  和  $P_{m,i,f,s}^e$  分别表示  $U_{m,j}^r$  和  $U_{m,i}^e$  在子时隙  $s$  的第  $f$  个子信道上接收来自 BS <sub>$m$</sub>  的数据时所对应的发送功率, 即

$$\begin{aligned}
 P_{m,j,f,s}^r &= x_{m,j,f,s}^{r,o} P_{m,j,f,s}^{r,o} + x_{m,j,f,s}^{r,c} P_{m,j,f,s}^{r,c} \tag{42} \\
 P_{m,i,f,s}^e &= x_{m,i,f,s}^{e,o} P_{m,i,f,s}^{e,o} + x_{m,i,f,s}^{e,c} P_{m,i,f,s}^{e,c} \\
 &+ \sum_{i'=1, i' \neq i}^{K_m^e} x_{m,i,i',f,s}^n (P_{m,i,i',f,s}^{e,n,1} + P_{m,i,i',f,s}^{e,n,2}) \tag{43}
 \end{aligned}$$

## 4 优化问题求解

由于优化问题式(41)为一个强耦合问题, 难以直接求解. 为了确定资源调度和用户关联策略, 将优化问题式(41)转化为两个子问题, 即功率分配子问题和用户关联及资源调度子问题, 并通过拉格朗日对偶算法和启发式算法进行求解, 从而实现系统效用函数的优化.

### 4.1 功率分配子问题求解

为求解功率分配子问题, 首先将优化问题式(41)中的用户关联及资源调度变量连续化, 即令  $0 \leq x_{m,j,f,s}^{r,o} \leq 1$ ,  $0 \leq x_{m,i,f,s}^{e,o} \leq 1$ ,  $0 \leq x_{m,i,l,t}^s \leq 1$ ,  $0 \leq x_{m,j,f,s}^{r,c} \leq 1$ ,  $0 \leq x_{m,i,f,s}^{e,c} \leq 1$ ,  $0 \leq x_{m,i,i',f,s}^n \leq 1$ . 同时, 针对用户关联变量  $X$  与功率分配变量  $P$  间的强耦合问题, 引入新变量  $\tilde{P} = \{\tilde{P}_{m,j,f,s}^{r,o}, \tilde{P}_{m,j,f,s}^{r,c}, \tilde{P}_{m,i,f,s}^{e,o}, \tilde{P}_{m,i,f,s}^{e,c}, \tilde{P}_{m,i,i',f,s}^{e,n,1}, \tilde{P}_{m,i,i',f,s}^{e,n,2}, \tilde{P}_{m,i,l,t}^s\}$ , 其中,  $\tilde{P}_{m,j,f,s}^{r,o} = x_{m,j,f,s}^{r,o} P_{m,j,f,s}^{r,o}$ ,  $\tilde{P}_{m,j,f,s}^{r,c} = x_{m,j,f,s}^{r,c} P_{m,j,f,s}^{r,c}$ ,  $\tilde{P}_{m,i,f,s}^{e,o} = x_{m,i,f,s}^{e,o} P_{m,i,f,s}^{e,o}$ ,  $\tilde{P}_{m,i,f,s}^{e,c} = x_{m,i,f,s}^{e,c} P_{m,i,f,s}^{e,c}$ ,  $\tilde{P}_{m,i,i',f,s}^{e,n,1} = x_{m,i,i',f,s}^n P_{m,i,i',f,s}^{e,n,1}$ ,  $\tilde{P}_{m,i,i',f,s}^{e,n,2} = x_{m,i,i',f,s}^n P_{m,i,i',f,s}^{e,n,2}$ ,  $\tilde{P}_{m,i,l,t}^s = x_{m,i,l,t}^s P_{m,i,l,t}^s$ ; 并针对信干噪比公式中分母的干扰项对问题求解带来的挑战, 引入干扰门限条件, 令

$$I_{m,j,f,s}^r + I_{m,j,f,s}^e \leq I^r \tag{44}$$

$$I_{m,i,f,s}^{e,r} + I_{m,i,f,s}^{e,c} + I_{m,i,f,s}^n \leq I^e \tag{45}$$

其中,  $I^r$  和  $I^e$  分别表示 RU 和 EU 的干扰门限值.

因此, 通过消除优化变量  $X$  和  $P$  间的耦合关系可将原优化问题转换为功率分配子问题:

$$\begin{aligned}
 & \max_{\tilde{P}} \tilde{Q} \\
 & \text{s.t.} \quad \text{C1: } \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{K_m^s} \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \tilde{P}_{m,i,l,t}^s \leq P^s \\
 & \quad \text{C2: } \sum_{j=1}^{K_m^r} \sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S \tilde{P}_{m,j,f,s}^r + \sum_{i=1}^{K_m^e} \sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S \tilde{P}_{m,i,f,s}^e \leq P_m^b \quad (46) \\
 & \quad \text{C3: } \tilde{R}_{m,j}^r \geq R_{m,j}^{r,\min} \\
 & \quad \text{C4: } \tilde{R}_{m,i}^e \geq R_{m,i}^{e,\min} \\
 & \quad \text{C5: } \tilde{I}_{m,j,f,s}^r + \tilde{I}_{m,j,f,s}^e \leq I^r \\
 & \quad \text{C6: } \tilde{I}_{m,i,f,s}^{e,r} + \tilde{I}_{m,i,f,s}^{e,e} + \tilde{I}_{m,i,f,s}^n \leq I^e
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & L\left(\tilde{P}_{m,j,f,s}^{r,c}, \tilde{P}_{m,i,f,s}^{e,c}, \tilde{P}_{m,i,l,t}^s, \tilde{P}_{m,j,f,s}^{r,o}, \tilde{P}_{m,i,f,s}^{e,o}, \tilde{P}_{m,i,i',f,s}^{e,n,1}, \tilde{P}_{m,i,i',f,s}^{e,n,2}, \mu, \mu_m, \eta_{m,j}^r, \eta_{m,i}^e, \theta_{m,j}^r, \theta_{m,i}^e\right) \\
 & = \tilde{Q} + \mu \left( P^s - \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{K_m^s} \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \tilde{P}_{m,i,l,t}^s \right) + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^{K_m^r} \eta_{m,j}^r \left( \tilde{R}_{m,j}^r - R_{m,j}^{r,\min} \right) + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{K_m^e} \eta_{m,i}^e \left( \tilde{R}_{m,i}^e - R_{m,i}^{e,\min} \right) \\
 & \quad + \sum_{m=1}^M \left( P_m^b - \sum_{i=1}^{K_m^e} \sum_{i'=1, i' \neq i}^{K_m^e} \sum_{j=1}^{K_m^r} \sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S \left( \tilde{P}_{m,j,f,s}^{r,c} + \tilde{P}_{m,i,f,s}^{e,c} + \tilde{P}_{m,j,f,s}^{r,o} + \tilde{P}_{m,i,f,s}^{e,o} + \tilde{P}_{m,i,i',f,s}^{e,n,1} + \tilde{P}_{m,i,i',f,s}^{e,n,2} \right) \right) \\
 & \quad + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{K_m^e} \sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S \theta_{m,i}^e \left( I^e - \tilde{I}_{m,i,f,s}^{e,r} - \tilde{I}_{m,i,f,s}^{e,e} - \tilde{I}_{m,i,f,s}^n \right) + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^{K_m^r} \sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S \theta_{m,j}^r \left( I^r - \tilde{I}_{m,j,f,s}^r - \tilde{I}_{m,j,f,s}^e \right)
 \end{aligned} \quad (47)$$

其中,  $\mu, \mu_m, \eta_{m,j}^r, \eta_{m,i}^e, \theta_{m,j}^r, \theta_{m,i}^e$  为拉格朗日乘子. 将优化问题式(46)转换为拉格朗日对偶问题:

$$\begin{aligned}
 & \min_{\mu, \mu_m, \eta_{m,j}^r, \eta_{m,i}^e, \theta_{m,j}^r, \theta_{m,i}^e} \max_{\tilde{P}} L \\
 & \text{s.t.} \quad \mu, \mu_m, \eta_{m,j}^r, \eta_{m,i}^e, \theta_{m,j}^r, \theta_{m,i}^e \geq 0
 \end{aligned} \quad (48)$$

优化问题式(48)由两个子问题组成,即内部最大化问题和外部最小化问题,可以采用基于迭代的拉格朗日对偶算法进行求解. 给定一组拉格朗日乘子,可求解内部最大化问题,以获得局部最优功率分配策略. 进而,基于已得的最优功率分配策略求解外部最小化问题,从而使用次梯度下降法实现拉格朗日乘子更新.

将拉格朗日函数式(47)分别对  $\tilde{P}_{m,j,f,s}^{r,c}, \tilde{P}_{m,i,f,s}^{e,c}, \tilde{P}_{m,i,l,t}^s, \tilde{P}_{m,j,f,s}^{r,o}, \tilde{P}_{m,i,f,s}^{e,o}, \tilde{P}_{m,i,i',f,s}^{e,n,1}$  和  $\tilde{P}_{m,i,i',f,s}^{e,n,2}$  进行求导,可得局部最优的功率分配策略  $\tilde{P}^*$ ,即

$$\tilde{P}_{m,j,f,s}^{r,c,*} = \left( \frac{W^b |h_{m,j,f}^r|^2 (w_{m,j}^r \tau^b + \eta_{m,j}^r) - \mu_m \ln 2 (I^r + \sigma^2)}{\mu_m |h_{m,j,f}^r|^2 \ln 2} \right)^+ \quad (49)$$

$$\tilde{P}_{m,i,f,s}^{e,c,*} = \left( \frac{W^b |h_{m,i,f}^e|^2 (w_{m,i}^e \tau^b + \eta_{m,i}^e) - \mu_m \ln 2 (I^e + \sigma^2)}{\mu_m |h_{m,i,f}^e|^2 \ln 2} \right)^+ \quad (50)$$

$$\tilde{P}_{m,i,l,t}^{s,*} = \left( \frac{W^s |h_{m,i,l,t}^s|^2 (w_{m,i}^s \tau^s + \eta_{m,i}^s) - \mu \ln 2 \sigma^2}{\mu |h_{m,i,l,t}^s|^2 \ln 2} \right)^+ \quad (51)$$

其中,  $\tilde{Q}$ 表示将  $\tilde{P}$ 代入  $Q$ 的表达式中对应的系统效用函数;  $\tilde{R}_{m,j}^r$ 和  $\tilde{R}_{m,i}^e$ 分别表示将  $\tilde{P}$ 代入  $R_{m,j}^r$ 及  $R_{m,i}^e$ 的表达式中得到的用户传输速率;  $\tilde{I}_{m,j,f,s}^r, \tilde{I}_{m,j,f,s}^e, \tilde{I}_{m,i,f,s}^{e,r}, \tilde{I}_{m,i,f,s}^{e,e}$ 和  $\tilde{I}_{m,i,f,s}^n$ 分别表示将  $\tilde{P}$ 代入  $I_{m,j,f,s}^r, I_{m,j,f,s}^e, I_{m,i,f,s}^{e,r}, I_{m,i,f,s}^{e,e}$ 和  $I_{m,i,f,s}^n$ 中对应的干扰值.

可以证明优化问题式(46)的目标函数  $\tilde{Q}$ 是一个凸函数,约束条件C1,C2,C5,C6为线性约束,C3和C4的不等式约束函数为凸函数,因此,优化问题式(46)为凸优化问题,可采用拉格朗日对偶算法<sup>[14]</sup>进行求解. 建立优化问题式(46)的拉格朗日函数为

$$\tilde{P}_{m,j,f,s}^{r,o,*} = \left( \frac{W^b |h_{m,j,f}^r|^2 (w_{m,j}^r \tau^b + \eta_{m,j}^r) - \mu_m \ln 2 \sigma^2}{\mu_m |h_{m,j,f}^r|^2 \ln 2} \right)^+ \quad (52)$$

$$\tilde{P}_{m,i,f,s}^{e,o,*} = \left( \frac{W^b |h_{m,i,f}^e|^2 (w_{m,i}^e \tau^b + \eta_{m,i}^e) - \mu_m \ln 2 \sigma^2}{\mu_m |h_{m,i,f}^e|^2 \ln 2} \right)^+ \quad (53)$$

$$\tilde{P}_{m,i,i',f,s}^{e,n,1,*} = \left( \frac{W^b |h_{m,i,f}^e|^2 (w_{m,i}^e \tau^b + \eta_{m,i}^e) - \mu_m \ln 2 (I^e + \sigma^2)}{\mu_m |h_{m,i,f}^e|^2 \ln 2} \right)^+ \quad (54)$$

$$\tilde{P}_{m,i,i',f,s}^{e,n,2,*} = \left( \frac{W^b |h_{m,i',f}^e|^2 (w_{m,i'}^e \tau^b + \eta_{m,i'}^e) - \mu_m \ln 2 (I^e + \sigma^2)}{\mu_m |h_{m,i',f}^e|^2 \ln 2} \right)^+ \quad (55)$$

其中,  $[x]^+ = \max\{0, x\}$ ,并采用梯度下降法对式(48)中的拉格朗日乘子进行更新.

## 4.2 用户关联及资源调度子问题求解

### 4.2.1 子问题建模

本节基于已得的最优用户功率分配策略  $\tilde{P}^*$ ,为用户设计用户关联及资源调度策略. 将用户关联及资源调度问题建模为

$$\begin{aligned}
 & \max_X \bar{Q} \\
 \text{s.t.} \quad & \text{C1} \sim \text{C13 in (46)} \\
 & \text{C14: } \bar{R}_{m,j}^r \geq R_{m,j}^{r,\min} \\
 & \text{C15: } \bar{R}_{m,i}^e \geq R_{m,i}^{e,\min} \\
 & \text{C16: } \bar{I}_{m,j,f,s}^r + \bar{I}_{m,j,f,s}^e \leq I^r \\
 & \text{C17: } \bar{I}_{m,i,f,s}^{e,r} + \bar{I}_{m,i,f,s}^{e,e} + \bar{I}_{m,i,f,s}^n \leq I^e
 \end{aligned} \tag{56}$$

其中,  $\bar{Q}$  表示最优功率分配策略  $\tilde{P}^*$  对应的系统效用函数;  $\bar{R}_{m,j}^r$  和  $\bar{R}_{m,i}^e$  分别表示将最优功率分配策略  $\tilde{P}^*$  代入  $R_{m,j}^r$  及  $R_{m,i}^e$  的表达式中得到的用户传输速率;  $\bar{I}_{m,j,f,s}^r$ ,  $\bar{I}_{m,j,f,s}^e$ ,  $\bar{I}_{m,i,f,s}^{e,r}$ ,  $\bar{I}_{m,i,f,s}^{e,e}$  和  $\bar{I}_{m,i,f,s}^n$  分别表示将最优功率分配策略  $\tilde{P}^*$  代入  $I_{m,j,f,s}^r$ ,  $I_{m,j,f,s}^e$ ,  $I_{m,i,f,s}^{e,r}$ ,  $I_{m,i,f,s}^{e,e}$  和  $I_{m,i,f,s}^n$  中对应的干扰值.

#### 4.2.2 子问题求解

由于用户与卫星间的距离较远,星地链路传输性能通常较蜂窝链路性能差,因此,当蜂窝网络传输资源充足时,用户更倾向于接入 gNB,而非接入卫星.为求解所建模用户关联及资源调度子问题,本节首先评估 gNB 可用时频资源与用户需求关系,进而分别针对 gNB 时频资源充足及时频资源不充足两种情况,求解用户关联及资源调度策略.

##### (1) 时频资源充足

时频资源充足是指 gNB 可满足所有 EU 及 RU 的通信需求,此时无须借助卫星进行辅助通信,即令  $x_{m,i,l,t}^{s,*} = 0, \forall i$ . 为求解时频资源充足情况下的用户关联及资源调度策略,本节提出一种启发式算法. 算法的主要思想:首先,基于 OFDMA 模式分别为 RU 和 EU 分配最优时频资源;然后,判断各 RU 与 EU 是否存在资源共享.若 RU 与 EU 间不存在资源共享,则分别评估两个 EU 在相邻子信道上采用 OFDMA 模式和 NOMA 模式的效用函数,并为 EU 分配较高效用函数所对应的传输模式.若 RU 与 EU 间存在资源共享,为了满足 EU 传输性能需求,局部调整 EU 的资源调度策略. 算法具体步骤如下.

##### (a) 基于 OFDMA 模式的资源调度策略

本节首先考虑 RU 和 EU 在 OFDMA 模式下的资源调度策略. 为了评估 RU 和 EU 在不同时频资源上的传输性能,分别定义 RU 及 EU 的时频资源块. 由于 RU 在一个子时隙上占用  $F'$  个连续子信道,方便起见,令  $(s,k)$  表示在子时隙  $s$  上的第  $k$  个连续的时频资源,  $1 \leq k \leq K$ . 令  $\bar{Q}_{m,j,k,s}^{r,o}$  表示  $U_{m,j}^r$  在时频资源块  $(s,k)$  上的效用函数,即

$$\bar{Q}_{m,j,k,s}^{r,o} = \sum_{f=1+(k-1)F'}^{kF'} w_{m,j}^r R_{m,j,f,s}^{r,o} \tau^b.$$

接下来首先确定 RU 在 OFDMA 模式下的最优资源调度策略. 令  $Q^r$  表示 RU 在 OFDMA 模式下的效用函数

之和,即  $Q^r = \sum_{m=1}^M \sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S x_{m,j,k,s}^r \bar{Q}_{m,j,k,s}^{r,o}$ , 其中,  $x_{m,j,k,s}^r$  为  $U_{m,j}^r$

占用时频资源块  $(s,k)$  接收来自 BS<sub>m</sub> 的数据时的资源块调度变量.  $x_{m,j,k,s}^r = 1$ , 则表示为  $U_{m,j}^r$  分配时频资源块  $(s,k)$ ; 否则,  $x_{m,j,k,s}^r = 0$ .

将 RU 在 OFDMA 模式下的资源块调度问题建模为效用函数最大化问题,即

$$\begin{aligned}
 & \max_{x_{m,j,k,s}^r} Q^r \\
 \text{s.t.} \quad & \text{C3} \sim \text{C4, C11} \sim \text{C12, C16 in (56)}
 \end{aligned} \tag{57}$$

分析式(57)可知, RU 在 OFDMA 模式下的资源调度问题为一对一匹配问题,可采用二分图匹配算法,如 K-M 算法<sup>[15]</sup>进行求解. 将 RU 与 gNB 的资源块之间的关联问题映射为一个加权完全二部图  $G = (V_1, V_2, E, W)$ , 其中,  $V_1$  和  $V_2$  分别表示顶点集合,  $V_1$  表示 RU 集合,  $V_2$  表示时频资源块  $(s,k)$  集合,  $E = \{e(v_1, v_2)\}$  表示集合  $V_1$  与  $V_2$  间的边集,  $W = \{w(v_1, v_2)\}$  表示边  $e(v_1, v_2) \in E$  的权值集合, 其中,  $w(v_1, v_2)$  表示 RU 在对应时频资源块上的效用函数. 若  $v_1 = U_{m,j}^r, v_2 = (s,k)$ , 可得  $w(v_1, v_2) = \bar{Q}_{m,j,k,s}^{r,o}$ . 基于 K-M 算法, 可得 RU 在 OFDMA 模式下的局部最优时频资源块分配策略, 即  $\tilde{x}_{m,j,k,s}^{r,*}$ . 根据  $x_{m,j,k,s}^r$  的定义, 可相应确定  $\tilde{x}_{m,j,f,s}^{r,o,*}, f \in \{1+(k-1)F', kF'\}$ .

考虑到 EU 在同一子信道上占据  $S_0$  个连续子时隙, 令  $(n,f)$  表示第  $n$  个时隙的第  $f$  个子信道,  $1 \leq n \leq S', \bar{Q}_{m,i,f,n}^{e,o}$  表示 EU 在时频资源块  $(n,f)$  上的效用函数, 可得

$$\bar{Q}_{m,i,f,n}^{e,o} = \sum_{s=1+(n-1)S_0}^{nS_0} w_{m,i}^e R_{m,i,f,s}^{e,o} \tau^b.$$

令  $x_{m,i,f,n}^e$  表示  $U_{m,i}^e$  占用时频资源块  $(n,f)$  接收 BS<sub>m</sub> 发送的数据时的资源调度变量.  $x_{m,i,f,n}^e = 1$ , 则表示  $U_{m,i}^e$  在时频资源块  $(n,f)$  上进行数据交互; 否则,  $x_{m,i,f,n}^e = 0$ . 类似地, 可将 EU 在 OFDMA 模式下的资源调度问题建模为效用函数最大化问题, 并基于 K-M 的算法确定 EU 的局部最优资源调度策略, 即  $\tilde{x}_{m,i,f,n}^{e,*}$ . 根据  $x_{m,i,f,n}^e$  的定义, 可相应确定  $\tilde{x}_{m,i,f,s}^{e,o,*}, s \in \{1+(n-1)S', nS'\}$ .

##### (b) 基于 NOMA 模式的资源调度策略

基于 RU 和 EU 在 OFDMA 模式下的资源块调度策略, 判断 RU 与 EU 是否存在时频资源共享, 即  $x_{m,j,f,s}^{r,o} = 1$ , 且  $x_{m,i,f,s}^{e,o} = 1$ . 若 RU 与 EU 之间不存在时频资源共享, 则进一步考虑 EU 可否通过采用 NOMA 模式提升传输性能. 基本思路: 针对占用相邻子信道的两个 EU, 计算其在 OFDMA 模式和 NOMA 模式下的效用函数, 若 NOMA 模式对应的效用函数较高, 则为 EU 分配 NOMA 传输模式.

若用户  $U_{m,i}^e$  和  $U_{m,i'}^e$  占用同一时隙的相邻子信道, 即

$x_{m,i',f,s}^n = 1$ , 且  $x_{m,i',f+1,s}^n = 1$ , 计算两个用户采用 OFDMA 模式对应的效用函数之和, 即  $Q^o = Q_{m,i',f,s}^{e,o} + Q_{m,i',f+1,s}^{e,o}$ . 若  $U_{m,i}^e$  和  $U_{m,i'}$  采用 NOMA 模式占用子信道  $f$  及  $f+1$  接收来自 BS<sub>*m*</sub> 的数据, 根据前述功率分配策略可得 NOMA 模式对应的效用函数之和, 即  $Q^n = (w_{m,i}^e \bar{R}_{m,i',f,s}^{e,n,1} + w_{m,i'}^e \bar{R}_{m,i',f,s}^{e,n,2}) \tau^b$ . 若  $Q^n \geq Q^o$ , 则为  $U_{m,i}^e$  和  $U_{m,i'}$  分配 NOMA 模式; 否则, 为  $U_{m,i}^e$  和  $U_{m,i'}$  分配 OFDMA 模式.

### (c) 基于贪婪算法的 EU 资源块重调度方案

针对 RU 和 EU 存在时频资源共享的情况, 本节提出一种局部关联策略调整方案. 若 RU 与 EU 存在资源共享, 需采用穿孔模式进行数据交互, 使 EU 的传输性能下降. 首先判断采用穿孔模式的 EU 是否满足最小传输速率需求, 若是, 则为 EU 分配穿孔模式及相应的时频资源块, 否则需为 EU 重新设计资源块调度策略. 针对这一问题, 本节提出一种基于贪婪算法的 EU 资源块重调度策略.

令  $\Phi^{n,e}$  表示不满足最小传输速率需求的 EU 集合, 即  $\Phi^{n,e} = \{U_{m,i}^e | R_{m,i',f,s}^{e,o} < R_{m,i'}^{e,\min}\}$ . 假设已为  $U_{m,i'} \in \Phi^{n,e}$  确定局部最优时频资源块  $(n,f)$ , 判断是否存在其他 EU 可使用时频资源块  $(n,f)$  进行通信. 若不存在, 则为  $U_{m,i'} \in \Phi^{n,e}$  分配卫星关联模式. 若存在其他 EU 可使用时频资源块  $(n,f)$  进行通信, 则为 EU 进行局部资源块重新分配.

简单起见, 对于  $U_{m,i'} \in \Phi^{n,e}$ , 根据蜂窝链路传输速率对 EU 进行升序排序, 首先调整对应传输速率最小的用户, 以  $U_{m,i_1}^e$  表示. 令  $\Phi_{i_1}^e$  表示在时频资源块  $(n,f)$  上满足最小传输速率需求未分配穿孔模式的 EU 的集合, 即  $\Phi_{i_1}^e = \{U_{m,i}^e | R_{m,i',f,s}^{e,o} \geq R_{m,i_1}^{e,\min}, x_{m,i',f_1,s_1}^{e,o} = 1, x_{m,i',f_1,s_1}^{e,c} = 0, \forall j\}$ . 对于任意  $U_{m,i_1}^e \in \Phi_{i_1}^e$ , 将  $U_{m,i_1}^e$  与  $U_{m,i}^e \in \Phi_{i_1}^e$  进行时频资源块交换, 计算对应效用函数之和. 令  $Q'$  表示  $U_{m,i_1}^e \in \Phi_{i_1}^e$  和  $U_{m,i}^e \in \Phi_{i_1}^e$  互换时频资源块  $(n,f)$  及  $(n_1,f_1)$  后两者效用函数之和, 即  $Q' = \sum_{s=1+(n-1)S_0}^{nS_0} w_{m,i}^e R_{m,i',f,s}^{e,c} \tau^b + \sum_{s=1+(n_1-1)S_0}^{n_1S_0} w_{m,i_1}^e R_{m,i_1',f_1,s}^{e,o} \tau^b$ . 选择对应  $Q'$  值最大的  $U_{m,i}^e \in \Phi_{i_1}^e$  与  $U_{m,i_1}^e \in \Phi_{i_1}^e$  进行时频资源块交换, 即  $x_{m,i',f,s}^{e,c} = 1$ , 且  $x_{m,i_1',f_1,s_1}^{e,o} = 1$ . 更新  $\Phi^{n,e} = \Phi^{n,e} \setminus \{U_{m,i_1}^e\}$ . 重复上述过程, 直至  $\Phi^{n,e} = \emptyset$ , 其中,  $\emptyset$  为空集. 若存在  $U_{m,i'} \in \Phi^{n,e}$  无可用资源进行调整, 则为  $U_{m,i'} \in \Phi^{n,e}$  设计卫星关联模式.

### (2) 时频资源不充足

时频资源不充足是指 gNB 无法为所有 RU 及 EU 提供数据传输服务. 简便起见, 假设 gNB 可支持所有 RU

的接入服务, 但无法为所有 EU 提供数据传输服务. 此时, 应为无法接入 gNB 的 EU 设计卫星关联模式. 将 EU 在卫星关联模式下的资源块调度问题建模为效用函数最大化问题, 进而采用基于 K-M 的算法进行求解, 从而确定最优资源调度策略, 即  $x_{m,i,l,t}^{s,*} = 1$ .

## 5 RU 及 EU 的时延分析及对比评估

为满足 5G 典型 URLLC 业务低时延需求, 5G 从子帧结构设计、多业务资源复用等方面进行改进及性能提升. 与 4G/LTE 技术不同, 5G 采用更短的子帧结构, 将最小调度单位由长度为 1 ms 的单个子帧缩短至长度为 0.125 ms 的子时隙, 从而实现数据的快速收发. 为进一步降低数据传输及确认时延, 5G 引入自包含的时隙结构, 即数据传输与接收确认可在一个子时隙内完成, 即用户最快可在 0.125 ms 内完成数据传输. 因此, 与 4G/LTE 技术所支持的各项业务及 5G 的 eMBB 业务相比, URLLC 业务时延可显著降低. 此外, 针对 4G/LTE 技术中不同业务资源不能重叠导致的业务传输时延的问题, 5G 支持 URLLC 业务与 eMBB 业务重叠, 即 URLLC 业务以穿孔模式实现与 eMBB 业务的复用, 并通过抢占指示提高 RU 的解码成功率.

针对本文所考虑系统模型中 5G 基站 gNB 发送 URLLC 业务至 RU 的场景, 对 RU 的时延性能进行分析如下. RU 的延迟主要由 gNB 至 RU 之间的传输时延及传播时延两部分组成. 令  $D$  表示用户延迟, 可得  $D = D_t + D_p$ , 其中,  $D_t$  和  $D_p$  分别表示用户的传输时延及传播时延. 具体地, 用户的传输时延  $D_t$  定义为传输特定长度的数据包所需时间, 令  $S$  和  $R$  分别表示数据包大小及链路传输速率, 可得  $D_t = S/R$ . 由于典型 URLLC 业务如智能工厂自动控制、智能交通安全相关业务等均为小数据量业务, 业务数据包尺寸通常小于 1 000 byte (8 000 bit), 而 5G 最低下行传输速率可达 100 Mbps, 因此数据传输时延  $D_t$  低于 0.08 ms.

用户的传播时延  $D_p$  是指电磁波从发送端传播至接收端所需时间, 令  $d$  表示发送端与接收端之间的距离,  $v$  表示电磁波传播速率, 可得  $D_p = d/v$ . 由于 5G 采用小基站结构, 基站覆盖区域为几十至百米量级. 不失一般性, 令  $d = 300$  m,  $v = 3 \times 10^8$  m/s, 可得数据传播时延为 0.001 ms, 远低于数据传输时延 0.08 ms, 因此可近似认为 RU 的时延主要由数据传输时延决定. 由于 5G 业务的最小传输单元为长度为 0.125 ms 的子时隙, 因此, 典型 URLLC 业务可在一个子时隙完成传输, 即用户时延为 0.125 ms. 相比而言, 5G 的 eMBB 业务仍采用 4G 的子帧结构, 其最小调度单位为一个子帧, 长度为 1 ms, 因此, eMBB 业务的最短时延为 1 ms. 另外, 由于通常 eMBB 业务的数据量较大, 如大于  $10^6$  bit, 数据无法在一个子帧内完成,

因此,基站需为用户分配多个时频资源块以完成数据传输,相应地,eMBB业务时延远较URLLC业务更长.

### 6 仿真结果分析

在仿真场景中,本节考虑由两个gNB和一个卫星构成的星地融合网络下行链路数据传输场景.仿真区域大小为1 000 m×1 000 m,gNB位于仿真区域中心,EU和RU随机地分布在gNB的覆盖范围内,卫星分布在高度为800~1 200 km的轨道中.仿真中其他参数如表1所示<sup>[16]</sup>.

表1 仿真参数

仿真参数	值
EU数目	30
RU数目	10
基站发送功率	0.2 W
卫星发送功率	40 W
EU时域调度单位	7
RU频域调度单位	4
基站子信道带宽	180 kHz
卫星子信道带宽	20 MHz
噪声功率	-104 dBm
玻尔曼兹常数	228.6 dBm
系统噪声温度	25 dBm
卫星发送天线增益	27 dBi
EU接收天线增益	24.99 dBi

图3给出了所提算法在不同噪声功率下的系统效用函数与迭代次数的关系图.从图中可以看出系统效用函数经少量迭代后即可收敛.比较不同噪声功率对应的系统效用函数,可以看出系统效用函数随着噪声功率的增加而降低.这是因为噪声功率越大,网络传输性能降低,传输速率变小,进而系统效用函数降低.

图4给出了系统效用函数与基站子信道带宽在不同噪声功率限制下的性能曲线关系图.由图可得,系统

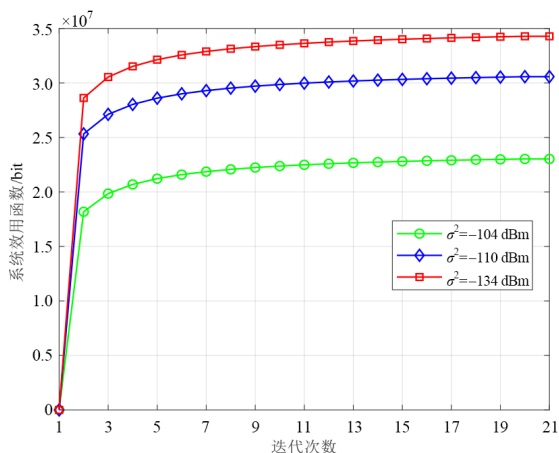


图3 系统效用函数与迭代次数关系图

效用函数随着基站子信道带宽的增加而增加.这是由于更大的基站子信道带宽会导致更高的传输速率,从而提高系统效用函数.此外,本文所提算法明显优于文献[11]所提算法.这是因为本文考虑了星地融合网络数据协作传输:当用户在某个时隙无法从基站处获取数据时,可以采用卫星关联模式进行数据传输,从而提高用户获取数据的灵活性;且当网络资源有限时,采用不同的数据传输方案,可为更多的用户提供数据接入服务,从而提高系统效用函数.

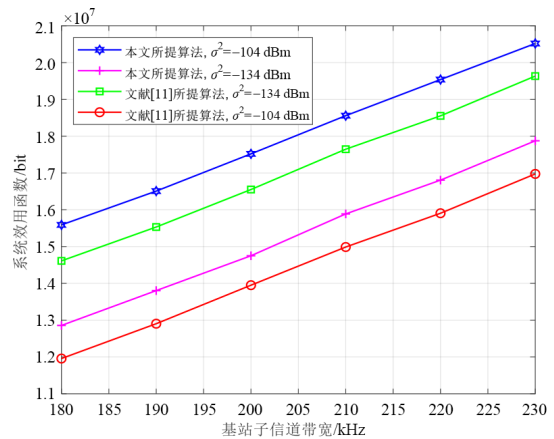


图4 系统效用函数与基站子信道带宽关系图

图5给出了系统效用函数与卫星子信道带宽在不同基站数目情况下的关系图,并比较了本文所提算法与文献[11]所提算法的性能.由图可知,系统效用函数随着卫星子信道带宽的增加而增加,原因在于随着卫星子信道带宽的增加,数据传输速率增加,从而系统效用函数增加.比较本文所提算法与文献[11]所提算法的性能,可见本文所提算法明显优于文献[11]所提算法.这是因为本文所提算法可实现最大化系统效用函数,而文献[11]所提算法倾向于最小化系统能耗,可能会导致较低的系统效用函数.另外,可以看到随着基站

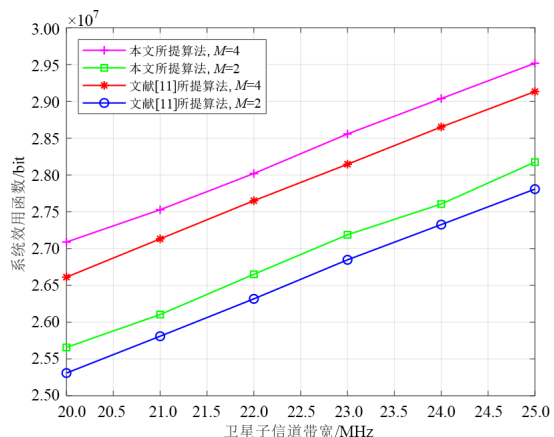


图5 系统效用函数与卫星子信道带宽关系图

数目的增加,系统效用函数随之增加。

图6给出了本文所提算法在不同子信道带宽下系统效用函数与基站数目关系图。从图中可以看出,随着基站数目的增加,系统效用函数也随之增加。这是因为随着基站数目的增加,更多的用户需要从基站或卫星处获取数据,因此在网络中传输的数据量增多,进而系统效用函数增加。此外,随着基站子信道和卫星子信道带宽的增加,系统效用函数也随之增加。

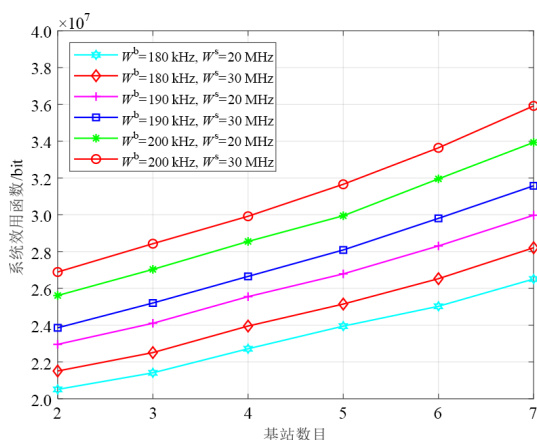


图6 系统效用函数与基站数目关系图

## 7 结束语

针对星地融合网络下行链路传输场景,本文提出了基于系统效用函数优化的联合用户关联及资源块调度算法。在满足用户传输速率需求、发送功率及网络可用资源等约束条件下,将联合用户关联及资源块调度问题建模为满足多约束的系统效用函数最大化问题。由于原优化问题为强耦合问题,难以直接确定最优解,本文提出一种启发式算法确定用户关联模式及资源块分配策略。在对蜂窝网络可用时频资源状态进行评估的基础上,分别针对时频资源充足及时频资源不充足的情况设计用户关联及资源块调度策略。针对时频资源充足情况,分别针对采用OFDMA模式及穿孔模式的RU与EU,设计资源块调度及重调度策略;针对占用相邻子信道的EU优化确定OFDMA模式及NOMA模式,以实现效用函数的提升。针对蜂窝网络时频资源不充足的情况,为无法接入蜂窝网络的用户分配卫星关联模式,并设计基于K-M匹配算法的资源块调度策略。最后,通过数值分析验证所提算法的有效性。

### 参考文献

[1] LIU J J, SHI Y P, FADLULLAH Z M, et al. Space-air-ground integrated network: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2714-2741.  
 [2] 朱立东, 吴廷勇, 卓永宁. 卫星通信导论[M]. 第4版. 北

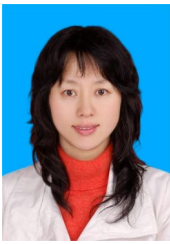
京: 电子工业出版社, 2015.

ZHU L D, WU T Y, ZHUO Y N. Introduction to Satellite Communications[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015. (in Chinese)

- [3] ZHANG Z J, ZHANG W Y, TSENG F H. Satellite mobile edge computing: Improving QoS of high-speed satellite-terrestrial networks using edge computing techniques[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 70-76.  
 [4] SWEETING M N. Modern small satellites-changing the economics of space[J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(3): 343-361.  
 [5] ZHANG Y D, YIN L G, JIANG C X, et al. Joint beamforming design and resource allocation for terrestrial-satellite cooperation system[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 68(2): 778-791.  
 [6] PENG D Y, BANDI A, LI Y, et al. Hybrid beamforming, user scheduling, and resource allocation for integrated terrestrial-satellite communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(9): 8868-8882.  
 [7] 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.  
 [8] ZHANG M Q, ZHOU W Y. Energy-efficient collaborative data downloading by using inter-satellite offloading[C]// 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE, 2020: 1-6.  
 [9] FU S, GAO J, ZHAO L. Collaborative multi-resource allocation in terrestrial-satellite network towards 6G[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(11): 7057-7071.  
 [10] LIU X, ZHAI X B, LU W D, et al. QoS-guarantee resource allocation for multibeam satellite industrial Internet of Things with NOMA[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(3): 2052-2061.  
 [11] HU Y, CHEN M Z, SAAD W. Joint access and backhaul resource management in satellite-drone networks: A competitive market approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(6): 3908-3923.  
 [12] 3GPP. System Architecture for the 5G System (5GS): 3GPP TS 23.501[S/OL]. [2022]. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3144>.  
 [13] GOLKAR A, LLUCH I CRUZ I. The Federated Satellite Systems paradigm: Concept and business case evaluation

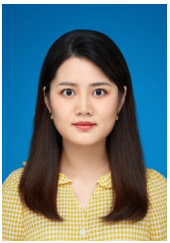
- [J]. Acta Astronautica, 2015, 111: 230-248.
- [14] BOYD S, VANDENBERGHE L, FAYBUSOVICH L. Convex optimization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(11): 1859.
- [15] ZHOU X T, YANG L Q, YUAN D F. Bipartite matching based user grouping for grouped OFDM-IDMA[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(10): 5248-5257.
- [16] ZHOU D, SHENG M, WANG X J, et al. Mission aware contact plan design in resource-limited small satellite networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(6): 2451-2466.

#### 作者简介



柴 蓉 女, 1974 年出生. 重庆邮电大学教授、博士生导师. 主要研究方向为移动通信、卫星通信、软件定义网络、无线资源管理及移动性管理技术等.

E-mail: chairong@cqupt.edu.cn



陈米铃 女, 1996 年出生. 重庆邮电大学硕士研究生. 主要研究方向为星地融合网络.

E-mail: 18242033735@qq.com



李锦红(通讯作者) 女, 1988 年出生. 重庆邮电大学博士研究生. 主要研究方向为卫星互联网、无线通信、优化理论.

E-mail: leejinhong@foxmail.com