 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i6.6021

A Study on Resource Scheduling Methods in Satellite-Terrestrial Integrated Networks

Chao Li[1] Jingyang Tan[1] Jiajia Mi[2]

1. Unicom Air Net Co., Ltd., Beijing, 100000, China
2. China Unicom Online Information Technology Co., Ltd., Beijing, 102600, China

Abstract

This paper addresses the problem of efficient resource utilization in complex communication network environments and proposes a resource scheduling method that considers both system aggregate rate and user capacity. By constructing a communication model involving users, base stations, and satellites, an optimization model of objective functions is established to maximize system aggregate rate and balance user capacity, with a detailed formulation process for scheduling strategies designed accordingly. The method comprehensively considers multiple factors such as user required rates and channel capacity, and employs game theory and two-sided matching algorithms for optimal resource allocation. Research results show that this method can effectively improve system resource utilization, balance data throughput and user access, and provide new ideas and methods for resource scheduling in communication networks.

Keywords

resource scheduling; system aggregate rate; user capacity; satellite-terrestrial integrated network; two-sided matching

一种星地融合网络下的资源调度方法的研究

李超[1] 谭景阳[1] 糜佳佳[2]

1. 联通航美网络有限公司，中国 · 北京 100000
2. 联通在线信息科技有限公司，中国 · 北京 102600

摘　要

本文针对复杂通信网络环境下资源高效利用问题，提出一种基于系统合速率和用户容量考虑的资源调度方法。通过构建包含用户、基站和卫星的通信模型，建立以最大化系统合速率与平衡用户容量为目标的函数优化模型，并设计了详细的调度策略制定流程。该方法综合考虑用户需求速率、信道容量等多种因素，利用博弈论和双边匹配算法进行资源优化分配。研究结果表明，该方法能够有效提升系统资源利用率，平衡数据吞吐与用户接入，为通信网络资源调度提供了新的思路和方法。

关键词

资源调度；系统合速率；用户容量；星地融合网络；双边匹配

1 引言

随着 6G 通信技术向空天地一体化融合演进，由地面基站（BS）、低轨卫星（LEO）等构成的混合接入网络成为未来泛在通信的核心架构[1]。在多用户、多基站与卫星协同的通信场景中，如何合理分配有限的网络资源，实现系统最大合速率和用户容量的有效平衡，成为提升通信网络性能的关键问题。而传统的资源调度方法在处理异构网络环境下的资源分配时，往往难以兼容卫星高时延、低带宽的信道条件[2]，为满足星地融合网络的资源调度需求，文献 [3] 提出了一种业务驱动的卫星网络资源弹性调度方法，但未考虑信道容量问题；文献 [4] 对星地网络带宽进行了分析，但未考虑用户接入数量的限制；文献 [5] 提出了一种基于博弈论的星地网络边缘算力资源调度策略，但未考虑多终端接入时，资源复用引入的带宽降低问题；文献 [6] 针对用户可接入基站或卫星进行数据回传的场景建立了效用模型，但为考虑基站和用户均需通过卫星作为数据回传路径的情况。

博弈论作为一种研究决策主体之间相互作用和策略选择的理论，为星地融合网络资源调度提供了新的思路和方法。博弈论可以用于分析和优化资源调度算法中的竞争行为，将网络中的各个参与者视为博弈的局中人，他们在资源分配过程中根据自身的利益和目标进行决策。通过构建合理的博弈模型，可以使各参与者在追求自身利益最大化的同时，实现网络资源的优化配置，提高算法的性能和效率。在

【作者简介】李超（1985–），男，中国北京人，本科，工程师，从事卫星网络系统搭建、融合通信频谱资源合理化利用与高效管理、异构网络下终端小型化的研究。

星地融合网络资源调度中应用博弈论，能够充分考虑各参与者的自主决策和相互影响，使资源分配更加公平、合理，从而提升网络的整体性能和用户满意度。因此，研究一种高效的资源调度方法具有重要的理论意义和实际应用价值。

2 通信模型构建

本研究构建的通信模型包含 X 个用户、Y 个基站和 Z 个卫星。用户集合表示为$\{U_1, U_2, ..., U_X\}$，基站集合表示为$\{B_1, B_2, ..., B_Y\}$，卫星集合表示为$\{S_1, S_2, ..., S_Z\}$。用户与基站、卫星之间的接入方式如下图所示，用户 x 产生的数据可发送至基站 y，再由基站 y 通过卫星 z 进行回传，也可以直接接入卫星 z 进行回传。

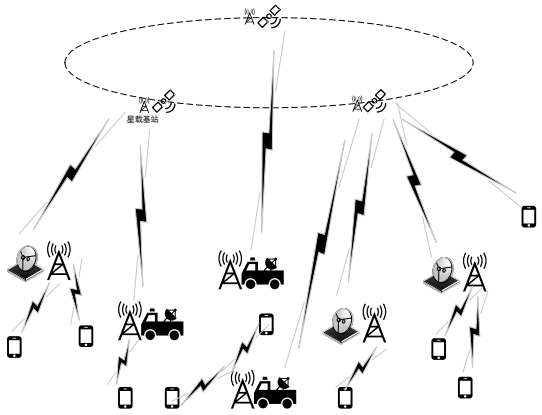


图 1 用户数据回传模型

网络通信调度的离散时隙为 T，在每个时隙 T 内，卫星 z 可用信道数量为N_z^S，基站 y 可用信道数量为N_y^G。这些信道资源是星地融合网络中实现数据传输的关键载体，它们的合理分配和有效利用，对于提高网络的整体性能和用户的通信体验起着决定性的作用。

3 函数优化模型建立

为实现系统资源的最大化利用，综合考虑系统合速率和用户容量，建立函数优化模型。目标函数为：

$$\max_{\{c_{x,y,ng},c_{x,z,ns}\}} \sum_{y=1}^{Y}\sum_{x=1}^{X}\sum_{ng=1}^{N_y^G}\left(c_{x,y,ng}\times R_x\right)+\sum_{z=1}^{Z}\sum_{x=1}^{X}\sum_{ns=1}^{N_z^S}\left(c_{x,z,ns}\times R_x\right)+\mu\left(\sum_{y=1}^{Y}\sum_{x=1}^{X}\sum_{ng=1}^{N_y^G}c_{x,y,ng}+\sum_{z=1}^{Z}\sum_{x=1}^{X}\sum_{ns=1}^{N_z^S}c_{x,z,ns}\right)$$

其中，$c_{x,y,ng}$表示用户 x 返程数据与基站 y 的第 ng 个信道的占用情况，它是一个决策变量，取值为 0 或 1，用于描述用户与基站之间的信道占用关系。当$c_{x,y,ng}=1$时，表示用户 x 使用基站 y 的第 ng 个信道进行数据传输；当$c_{x,y,ng}=0$时，则表示用户 x 未使用该信道。同样，$c_{x,y,ng}=1$表示用户 x 返程数据占用卫星 z 的第 ns 个信道，$c_{y,z,ng}=1$表示基站 y 返程数据占用的信道为卫星 z 的第 ng 个信道。R_{xy}为用户 x 的需求通信速率，它反映了用户对数据传输速率的要求。μ为系统容量在系统优化模型中的折扣因子，它用于平衡系统合速率和用户容量之间的关系，通过调整μ的值，可以根据实际需求实现资源的优化配置。

约束条件为：

$$c_{x,y,ng}\times R_x \le c_{x,y,ng}\times R_{x,y}$$

$$c_{x,z,ns}\times R_x \le c_{x,z,ns}\times R_{x,z}$$

$$\sum_{x=1}^{X}\sum_{ng=1}^{N_y^G}\left(c_{x,y,ng}\times R_x\right)\le\sum_{z=1}^{Z}\sum_{ns=1}^{N_z^S}\left(c_{y,z,ns}\times R_{y,z}\right)$$

$$\sum_{y=1}^{Y}\sum_{ng=1}^{N_y^G}c_{x,y,ng}+\sum_{z=1}^{Z}\sum_{ns=1}^{N_z^S}c_{x,z,ns}\le 1$$

$$\sum_{x=1}^{X}c_{x,y,ng}\le 1$$

$$\sum_{z=1}^{Z}\sum_{ns=1}^{N_z^S}c_{y,z,ns}\le 1$$

$$\sum_{x=1}^{X}c_{x,z,ns}+\sum_{y=1}^{Y}c_{y,z,ns}\le 1$$

$$\left\lceil\frac{\sum_{x=1}^{X}\sum_{ng=1}^{N_y^G}c_{x,y,ng}}{N_y^G}\right\rceil=\sum_{z=1}^{Z}\sum_{ns=1}^{N_z^S}c_{y,z,ns}$$

约束 1）表示当用户 x 所接入的基站可以满足 x 的需求速率；

约束 2）表示当用户 x 所接入的卫星可以满足 x 的需求速率；

约束 3）表示基站从所有终端处接收的数据量低于卫星分配给基站使用的信道容量；

约束 4）表示对于任意用户 x，在时隙内最多被分配 1 个基站中的 1 个信道或 1 个卫星中的 1 个信道；

约束 5）表示对于基站 y 的任意信道 ng，在 T 时隙内最多被分配给 1 个用户；

约束 6）表示对于任意基站 y，在时隙内最多被分配 1 个卫星中的 1 个信道；

约束 7）表示对于卫星 z 的任意信道 ns，在 T 时隙内最多被分配给 1 个用户或 1 个基站；

约束 8）表示只有分配回程卫星链路的基站才支持用户数据回程。

这些约束条件从不同角度对资源分配进行限制，保证了系统的稳定性和资源分配的合理性。

4 调度策略制定流程

4.1 信道容量估算与筛选

用户 x 根据自身到各基站、卫星的信噪比，利用公式

$C = W_{y,ng} \times \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)$完成信道容量估算，其中$W_{y,ng}$为基站 y 的 ng 信道带宽。将估算得到的信道容量与自身速率需求 Rx 进行对比，筛选出符合传输需求的基站和卫星。

4.2 虚拟基站生成

若筛选结果中存在卫星，则生成虚拟基站B_{Y+x}，并设定虚拟基站信道$N_{Y+x}^{G} = 1$，以便后续进行资源分配建模。

4.3 映射集合构建

构建用户与基站（含虚拟基站）间映射的集合，当用户 x 与基站 y 的 ng 信道映射存在时，则$c_{x,y,ng} = 1$，否则$c_{x,y,ng} = 0$。

4.4 基站与卫星博弈模型构建与求解

博弈模型建模：博弈局中人为基站$y \in \{B_1, B_2, ..., B_{Y+X}\}$和卫星$z \in \{S_1, S_2, ..., S_Z\}$，$c_{y,z,ns}$为局中人的决策变量。

基站效用模型：$U^B = \sum_{y=1}^{Y+X} U_y^B$，其中$U_y^B = \sum_{z=1}^{Z} \sum_{ns=1}^{N_y^S} \left(c_{y,z,ns} \times U_{y,z,ns}^B\right)$，$U_{y,z,ns}^B = \sum_{ns=1}^{N_y^S} W_{z,ns} \times \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)_{y,z}$，其中$\frac{S}{N}$为基站 y 到卫星 z 的信道比，$W_{ns}$为卫星 z 的 ns 信道的带宽，反映了基站选择卫星信道传输数据时的效用。

卫星效用模型：$U^S = \sum_{z=1}^{z} U_z^S$，其中$U_z^B = \sum_{y=1}^{Y+X} \sum_{ns=1}^{N_y^S} \left(c_{y,z,ns} \times D_y\right)$，$D_y = \sum_{x=1}^{X} \sum_{ng=1}^{N_y^G} \left(c_{x,y,ng} \times R_x\right) + \mu \sum_{x=1}^{X} \sum_{ng=1}^{N_y^G} c_{x,y,ng}$，体现了卫星在与基站通信过程中的效用。

偏好列表建立：基站 y 计算到各卫星的效用函数$U_{y,z}^B$并降序排列建立本地偏好列表；卫星 z 对D_y降序排列建立本地偏好列表。

优化求解：基于双边匹配算法对基站及卫星效用函数进行优化求解，分离出虚拟基站并完成与用户 x 的映射，即$c_{x,z,ns} = c_{Y+x,z,ns}$。

4.5 用户与基站博弈模型构建与求解

博弈模型建模：博弈局中人为基站$y \in \{B_1, B_2, ..., B_Y\}$和用户$x \in \{U_1, U_2, ..., U_X\}$，$c_{x,y,ng}$为局中人的决策变量。

用户效用模型：$U^U = \sum_{x=1}^{X} U_x^U$，其中$U_x^U = \sum_{y=1}^{Y} \sum_{ng=1}^{N_y^S} \left(c_{x,y,ng} \times D_y^{'}\right)$，$D_y^{'} = \sum_{z=1}^{Z} \sum_{ns=1}^{N_z^S} \left[c_{y,z,ns} \times W_{z,ns} \times \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)_{y,z}\right]$，$D_y^{'}$反映用户选择基站信道传输数据时的效用，取卫星基站双边匹配后基站 y 可达到的最大上行速率。

基站效用模型：$U^{B2} = \sum_{y=1}^{Y} U_y^{B2}$，其中$U_y^{B2} = \sum_{x=1}^{X} \sum_{ng=1}^{N_y^G} \left(c_{x,y,ng} \times R_x\right)$，体现基站在与用户通信过程中的效用。

偏好列表建立：用户 x 计算到各基站的效用函数并降序排列建立本地偏好列表；基站 y 对用户需求速率 R_x 降序排列建立本地偏好列表。

优化求解：基于双边匹配算法对用户及基站效用函数进行优化求解，得出$c_{x,y,ng}$。

4.6 系统效用计算与调度策略制定

完成上述步骤后，计算系统效用，并根据计算结果制定整个系统的调度策略，实现资源的合理分配。

5 方法分析

该资源调度方法综合考虑了用户需求速率、信道容量、系统容量折扣因子等多种因素，能够更全面地反映通信网络的实际情况，避免了单一因素考虑带来的资源分配不合理问题。

双边匹配算法是一种用于解决两组不同对象之间匹配问题的算法，其核心思想是通过不断调整匹配关系，使两组对象之间的匹配达到某种最优状态。在星地融合网络资源调度模型中，将基站和卫星视为两组不同的对象，通过双边匹配算法实现它们之间的信道资源分配。具体来说，基站和卫星根据各自的效用函数计算对方的偏好列表，然后基于这些偏好列表进行匹配。在匹配过程中，算法会不断尝试找到使双方效用都能得到提升的匹配组合，直到达到一个稳定的状态，即不存在任何一方可以通过单方面改变匹配关系来提高自身效用的情况，这种稳定状态对应着博弈模型中的均衡解。

均衡解具有稳定性，在该状态下，基站和卫星都没有动机单方面改变自己的策略。因为任何一方改变策略都无法提高自身的效用，反而可能导致效用降低。这使得资源分配方案在一定程度上保持稳定，基站和卫星之间的信道资源得到了合理分配。

6 结论

本文提出的基于系统合速率和用户容量考虑的资源调度方法，通过构建通信模型、建立函数优化模型和设计详细的调度策略流程，为通信网络资源调度提供了一种有效的解决方案。该方法能够在复杂通信环境下，综合考虑多种因素，实现系统合速率和用户容量的平衡，提高资源利用率。

参考文献

[1] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (Release 16)[R]. Technical Report, 2023.

[2] 李明欣,陈山枝,谢东亮,等.异构无线网络中基于非合作博弈论的资源分配和接入控制[J].软件学报,2010,21(8):2037-2049.

[3] 李佳豪,吴畏虹,刘江,等.业务驱动卫星网络资源弹性调度策略综述[J].移动通信,2024,48(9):50-56.

[4] 成克伟,王五兔.星地一体化通信系统地面网络可用带宽分析[J].电子设计工程,2016,24(7):90-92.

[5] Tong, M., Wang, X., Li, S., Peng, L.Joint Offloading Decision and Resource Allocation in Mobile Edge Computing-Enabled SatelliteTerrestrial Network[J].ymmetry 2022,14,564.

[6] 柴荣,陈米铃,李锦红.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[J].电子学报,2023,51(12):3483-3495.