

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2022.10.011

引用格式:张佳庚,杜丰,师有为,等.基于双连接和回传带宽配置的系统吞吐量效用和最大化算法[J].电讯技术,2022,62(10):1452-1458.

[ZHANG Jiageng, DU Feng, SHI Youwei, et al. Algorithm for maximizing sum of system throughput utility based on dual connectivity and backhaul bandwidth allocation[J]. Telecommunication Engineering, 2022, 62(10): 1452-1458.]

基于双连接和回传带宽配置的系统 吞吐量效用和最大化算法*

张佳庚^{1a,1b}, 杜 丰^{1a}, 师有为², 王 齐^{1a}, 刘 俊^{1a}, 锁志海^{1a}

(1. 西安交通大学 a. 网络信息中心; b. 信息与通信技术学院, 西安 710054; 2. 国防科技大学 信息通信学院, 西安 710106)

摘 要:针对双连接可行的异构无线网络中关于用户关联和回传带宽配置的联合优化问题,构建了一个新的网络吞吐量效用和最大化框架。将该联合优化问题建模为一个非凸的混合整数分式优化问题。为了便于求解,首先将原建模问题进行去分式化转换,然后针对转换后依旧非凸的混合整数非线性优化问题,将其分解为两个优化子问题分别求解。通过固定用户关联变量,得到了最优的回传带宽配置机制;通过固定回传带宽配置因子变量,提出一个有效的迭代算法求解双连接可行的用户关联子问题。相比固定的回传带宽配置机制,所提算法可以获得最优的回传单位带宽配置因子值,同时拥有最优的系统吞吐量和系统吞吐量效用和性能。

关键词:异构无线网;双连接技术;用户关联;回传带宽配置;系统吞吐量应用

开放科学(资源服务)标识码(OSID):  [微信扫描二维码
听独家语音释文
与作者在线交流
享本刊专属服务](#)

中图分类号:TN926 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2022)10-1452-07

Algorithm for Maximizing Sum of System Throughput Utility Based on Dual Connectivity and Backhaul Bandwidth Allocation

ZHANG Jiageng^{1a,1b}, DU Feng^{1a}, SHI Youwei², WANG Qi^{1a}, LIU Jun^{1a}, SUO Zhihai^{1a}

(1a. Network & Information Center; 1b. School of Information and Communication Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China;

2. College of Information and Communication, National University of Defense Technology, Xi'an 710106, China)

Abstract: For the joint optimization problem of user association and return bandwidth configuration in dual connected heterogeneous wireless networks, a new network throughput utility and maximization framework is constructed. The joint optimization problem is modeled as a nonconvex mixed integer fractional optimization problem. In order to facilitate the solution, the original modeling problem is transformed into a fractional form, and then for the transformed mixed integer nonlinear optimization problem which is still nonconvex, it is decomposed into two optimization subproblems to be solved respectively. By fixing the user correlation variable, the optimal return bandwidth allocation mechanism is obtained. By fixing the return bandwidth allocation factor variable, an effective iterative algorithm is proposed to solve the dual connection feasible user association subproblem. Compared with the fixed return bandwidth allocation mechanism, the proposed algorithm can obtain the optimal return unit bandwidth allocation factor, and has the optimal system throughput, system throughput utility and performance.

Key words: heterogeneous wireless network; dual connectivity technology; user association; backhaul bandwidth allocation; system throughput utility

* 收稿日期:2021-06-02;修回日期:2021-09-06
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61973244)
通信作者:张佳庚

0 引言

为了支撑不断涌现的新兴的移动通信场景, 第五代(5G)移动通信系统具有网络异构化、部署密集化和业务多样化等特点。作为支撑 5G 的一种候选关键技术, 双连接技术已经受到了学术界的广泛关注。

双连接是指用户设备可以关联至同频部署或者异频部署的一个宏基站和一个小基站, 并且同时与其通信。根本上讲, 双连接是一种演进的小小区增强技术, 是载波聚合技术在非理想回传网络场景下的应用实现。因此, 相比传统的单关联的异构无线网络, 双连接可行的异构网络结构通过提升频谱利用率来有效提升系统吞吐量, 特别是系统边缘用户的吞吐量。在一个双连接可行的异构无线网络中, 用户设备可以被关联至宏基站和一个小基站, 实现双连接通信方式。小基站需要与宏基站通过宏基站到小基站之间的回程链路相连接, 而宏基站作为服务网管实现所有用户数据与核心网之间的请求发送。因此, 双连接结构的实现性能很大程度上受到回程容量的限制, 特别是在宏基站和小基站同频部署的非理想回传异构无线网络中, 回传带宽的配置机制将是一个至关重要的问题。

现有文献已经针对双连接可行的异构无线网络的相关问题展开了研究, 比如用户关联^[1-4]、带宽分配^[4]、功率控制^[3,5-6]和流量调度^[5,7]等。但大多数现有的工作^[1-3]只考虑异构网络异频部署场景, 而不考虑共信道(同频)部署场景。尤其在宏基站和小基站同频部署的非理想回传异构无线网络中, 关于双连接可行的用户关联与回传带宽配置的联合优化问题未见有文献展开研究。尽管文献[4]考虑了宏基站和小基站同频部署的非理想回传异构无线网络场景, 但是其仅仅关注双连接可行的用户关联与前传带宽配置的联合优化问题。

针对以上考虑, 本文通过联合优化用户关联和回传带宽配置, 使得在满足前传容量不超过回传容量的前提下, 最大化系统吞吐量效用之和。

1 系统模型

考虑一个两层异构网络的下行传输过程。该网络由一个宏基站和多个可开放接入的小基站组成, 它们共同服务于在网络覆盖范围内的随机分布的用户。首先, 假设所有的用户设备都有两个无线电接口, 都具备同时与一个宏基站和一个小基站通信的

能力。接下来, 假设从小基站到宏基站之间的无线回传链路和从小基站到用户设备之间的前传链路以共信道方式部署。每一个用户设备被分配若干子信道, 且假设所有信道是平稳衰落, 同时每一个小基站在每一个子信道上分配相同的功率。

不失一般性, 如图 1 所示, 本文考虑由一个宏基站、 M 个小基站和随机分布的 N 个用户组成的下行异构无线网络场景。定义所有用户的集合、所有小基站的集合和所有基站的集合分别为 $\mathcal{N}$ 、 $\mathcal{M}$ 和 $\mathcal{M}^0$ 。于是, 以上集合可以分别被表示为 $\mathcal{N}=\{1,2,\cdots,N\}$ 、 $\mathcal{M}=\{1,2,\cdots,M\}$ 和 $\mathcal{M}^0=\{0,1,2,\cdots,M\}$, 其中 $\mathcal{M}^0$ 中元素 0 代表宏基站, 同时存在 $\mathcal{M}\cup\{0\}=\mathcal{M}^0$ 。

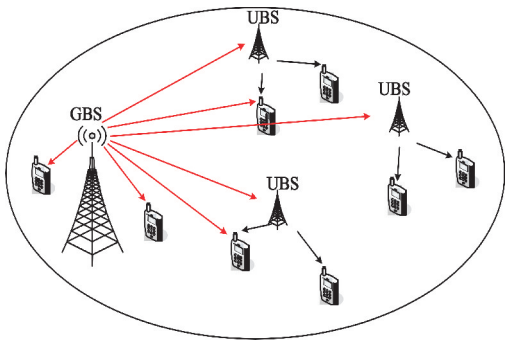


图 1 双连接可行的下行两层异构网络场景图

本文采用双连接 3C 架构^[6]。在 3C 架构中, 所有下行数据流首先传送到宏基站, 再经宏基站按照一定算法和比例进行分割后, 由 X2 接口把部分数据发送给相应小基站, 最终在宏基站和相应小基站上同时给用户设备下发数据。可见, 该 3C 架构对宏基站和小基站之间的回程容量需求较高。

2 问题建模

小基站配置单一天线, 采用单输入单输出 (Single-Input Single-Output, SISO) 的模式进行信号传输。而宏基站部署毫米波天线阵列, 天线数为 A_1 , 针对小基站的波束成形分组大小为 A_g ($A_1 \gg A_g$)。不失一般性, 假设采用正交频分多址接入机制。 α 定义为每个小基站的回传单位带宽配置因子, $0 < \alpha < 1$ 。

假设用户设备 i 被关联至第 j 个小基站, 那么其可获得的单位带宽最大用户速率可以表示为

$$R_{i,j}=\text{lb}\left(1+\frac{P_{i,j}g_{i,j}}{\sigma^2+\sum_{j'\in\mathcal{M},j'\neq j}p_{i,j'}g_{i,j'}}\right).$$

(1)

式中: $p_{i,j}$ 为第 j 个小基站向用户设备 i 发送信号的发射功率, $g_{i,j}$ 为第 j 个小基站向用户设备 i 发送信

号的路径增益, $\sum_{j' \in \mathcal{M}, j' \neq j} p_{i,j'} g_{i,j'}$ 为宏基站对被关联至第 j 个小基站的用户设备 i 的干扰, σ^2 为加性高斯白噪声功率。

从文献[1]中可知,小基站 j 的单位带宽最大回程速率 R_j^{back} 可以表示为

$$R_j^{\text{back}} = \text{lb} \left(1 + \frac{A_i - A_g + 1P_0 G_j}{A_g \sigma^2} \right). \quad (2)$$

式中: P_0 为第 j 个小基站向宏基站发送信号的发射功率, G_j 为第 j 个小基站向宏基站发送信号的路径增益。假设用户设备 i 被关联至宏基站,那么其可获得的单位带宽最大用户速率 $R_{i,0}$ 可以表示为^[1]

$$R_{i,0} = A_g \text{lb} \left(1 + \frac{A_i - A_g + 1P_0 D_i}{A_g \sigma^2} \right). \quad (3)$$

式中: D_i 为宏基站向第 i 个用户设备发送信号的路径增益。

假设用户关联矩阵为 $\mathbf{z}, \mathbf{z} = \{z_{i,j} | i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{M}^0\}$, 那么 $z_{i,j}$ 存在如下定义:

$$z_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{如果用户设备 } i \text{ 被关联至} \\ & \text{小基站 } j \text{ 或宏基站} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}. \quad (4)$$

本文考虑双连接可行的用户关联机制,即用户设备可以被同时关联至宏基站和某个小基站,那么可以得到关联约束如下:

$$\begin{cases} \sum_{j \in \mathcal{M}} z_{i,j} = 1, \forall i \in \mathcal{N} \\ z_{i,j} = 1, \forall i \in \mathcal{N}, j = 0 \end{cases}. \quad (5)$$

假设各基站向关联至自己的用户分配均匀的前传带宽,如果关联至基站 j 的用户数为 u_j ,那么基站 j 为服务的用户设备 i 分配的单位带宽为 $\frac{1}{u_j}, u_j = \sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j}$,进而基站 j 为服务的用户设备 i 提供的用户速率实际上可以表达为 $z_{i,j} \frac{1}{\sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j}} R_{i,j}$ 。用户设备 i 可得到的总的吞吐量 R_i 表示为

$$R_i = \sum_{j \in \mathcal{M}^0} (1-\alpha) z_{i,j} \frac{1}{\sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j}} R_{i,j}, \quad (6)$$

那么用户的速率约束可以写成

$$R_i \geq R_i^t, \forall i \in \mathcal{N}. \quad (7)$$

式中: R_i^t 为用户 i 需求的最小速率。另外,考虑每个小基站的前传容量不能超过其获得的回传容量,那么式(8)的约束条件必须满足。

$$\sum_{i \in \mathcal{N}} (1-\alpha) z_{i,j} \frac{1}{\sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j}} R_{i,j} \leq \alpha R_j^{\text{back}}, \forall j \in \mathcal{M}. \quad (8)$$

本文的优化目标是在考虑用户速率需求的同

时,通过联合优化用户关联变量和前传带宽配置变量,最大化各个用户吞吐量效用的总和。优化问题(P1)可以建模为以下形式:

$$\max_{\mathbf{z}, \alpha} \sum_{j \in \mathcal{M}^0} \sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j} \lg \left(\frac{(1-\alpha) R_{i,j}}{\sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j}} \right) \quad (9a)$$

s. t.

$$\begin{cases} \text{C1: } \sum_{i \in \mathcal{N}} (1-\alpha) z_{i,j} \frac{1}{\sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j}} R_{i,j} \leq \alpha R_j^{\text{back}}, \forall j \in \mathcal{M} \\ \text{C2: } \sum_{j \in \mathcal{M}^0} (1-\alpha) z_{i,j} \frac{1}{\sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j}} R_{i,j} \geq R_i^t, \forall i \in \mathcal{N} \\ \text{C3: } \sum_{j \in \mathcal{M}} z_{i,j} = 1, \forall i \in \mathcal{N} \\ \text{C4: } z_{i,j} = 1, \forall i \in \mathcal{N}, j = 0 \\ \text{C5: } z_{i,j} \in \{0, 1\}, \forall i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{M}^0 \\ \text{C6: } \alpha \in [0, 1] \\ \text{C7: } \sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j} = u_j, \forall j \in \mathcal{M}^0 \\ \text{C8: } u_j \leq M, \forall j \in \mathcal{M}^0 \end{cases}. \quad (9b)$$

式中: $\mathbf{z} = \{z_{i,j}, \forall i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{M}^0\}$, α 为一个连续单一变量。在问题 P1 中,目标函数表示最大化用户吞吐量效用之和;C1 确保每个小基站的前传容量不能超过其获得的回传容量;C2 条件确保每个用户的最小需求速率得到满足;C3~C5 联合确保每一个用户终端可以同时被关联至宏基站和某个小基站,实现双连接关联机制;C5 和 C6 分别是二进制的用户关联变量约束和连续的被分配给每个小基站的单位回传带宽资源配置变量约束。

通过观察发现,问题 P1 存在以下三个显著特点:第一,优化目标和约束条件中存在分式项 $1/\sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j}$;第二,两个优化变量既存在连续变量 α ,也存在离散变量 $z_{i,j}$;第三,优化目标和几个约束条件中存在连续变量和离散变量耦合乘积关系,比如 $\alpha z_{i,j}$ 。因此,问题 P1 是一个非凸的混合整数分式优化问题。显然,该问题也是一个非确定性多项式难题(Non-deterministic Polynomial Hard, NP-hard),同时随着问题规模变大求解复杂度变高,通常不能用精确算法求解,必须寻求其有效的近似算法。

为了简化问题 P1,首先考虑去除优化目标和约束条件中的分式。简化后的问题(P2)具体形式如下:

$$\max_{\mathbf{z}, \alpha} \sum_{j \in \mathcal{M}^0} \sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j} \lg((1-\alpha) R_{i,j}) - \sum_{j \in \mathcal{M}^0} \sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j} \lg(\sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j}) \quad (10a)$$

s. t.

$$\begin{cases} \text{C1: } \sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j} (1-\alpha) R_{i,j} \leq \alpha R_j^{\text{back}} \sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j}, \forall j \in \mathcal{M} \\ \text{C2: } \sum_{j \in \mathcal{M}^0} \frac{z_{i,j}}{K} (1-\alpha) R_{i,j} \geq R_i^t, \forall i \in \mathcal{N} \\ \text{C3: } \sum_{j \in \mathcal{M}} z_{i,j} = 1, \forall i \in \mathcal{N} \\ \text{C4: } z_{i,j} = 1, \forall i \in \mathcal{N}, j=0 \\ \text{C5: } z_{i,j} \in \{0, 1\}, \forall i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{M}^0 \\ \text{C6: } \alpha \in [0, 1] \\ \text{C7: } \sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j} = u_j, \forall j \in \mathcal{M}^0 \\ \text{C8: } u_j \leq M, \forall j \in \mathcal{M}^0 \\ \text{C9: } K = \frac{N}{M} \end{cases} \quad (10b)$$

其中, 优化目标是借助对数函数的性质进行的等价变换; 在 C1 中, 由于 $\sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j} = u_j$ 表示被关联至基站 j 的用户数, 因此给 C1 的左右两侧同时乘以该项, 就可以等价得到 P2 的第一个约束; 在 C2 中, 由于和式的不同, 明显 C2 不能像 C1 一样进行等价转换。为了简化问题, 用常数 $K = \frac{N}{M}$ 来取代 $\sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j} = u_j$,

表示 N 个用户被均匀关联至 M 个基站上。需要强调的是, 基于用户随机部署和前向资源均匀分配假设, 同时对数函数的自然公平性属性, 这样的简化假设是合理的。

转换后的问题 P2 依旧是一个混合整数非线性优化问题, 问题的非凸性质没有发生明显变化, 依旧是一个 NP-hard 问题。为此, 采用交替优化方法将问题 P2 分解为两个优化子问题, 即已知用户关联情况下的回传资源配置优化问题和已知回传资源配置因子情况下的用户关联优化问题。

3 问题求解

首先, 在已知用户关联情况下, 问题 P2 可以转化为一个回传资源配置优化问题 (P2-1), 具体形式如下:

$$\max_a \lg(1-\alpha) \quad (11a)$$

s. t.

$$\begin{cases} \text{C1: } \sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j} (1-\alpha) R_{i,j} \leq \alpha R_i^{\text{back}} \sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j}, \forall j \in \mathcal{M} \\ \text{C2: } \sum_{j \in \mathcal{M}^0} z_{i,j} (1-\alpha) R_{i,j} \geq \frac{N}{M} R_i^t, \forall i \in \mathcal{N} \\ \text{C6: } \alpha \in [0, 1] \end{cases} \quad (11b)$$

观察可知, 子问题 P2-1 是一个连续变量凸优化问题, 显然其很容易求解。通过变换, C1 可以等价

$$\begin{cases} \alpha \geq \alpha_1 \\ \alpha_1 = \max \left(\frac{\sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j} R_{i,j}}{\sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j} (R_{i,j} + R_j^{\text{back}})}, \forall j \in \mathcal{M} \right) \end{cases} \quad (12)$$

通过变换, C2 可以等价

$$\begin{cases} \alpha \leq \alpha_2 \\ \alpha_2 = \min \left(1 - \frac{NR_i^t}{M \sum_{j \in \mathcal{M}^0} z_{i,j} R_{i,j}}, \forall i \in \mathcal{N} \right) \end{cases} \quad (13)$$

综上, 如果 $\alpha_1 > \alpha_2$, 则问题 P2-1 无解, 说明问题 P2-1 的基本条件即用户关联解是固定且已知的, 不够合理; 如果 $\alpha_1 \leq \alpha_2$, P2-1 问题的解为 $\alpha = \alpha_1$ 。

进而, 在已知回传资源配置因子的情况下, 问题 P2 可以转化为一个用户关联和前传资源配置联合优化问题 (P2-2), 具体形式如下:

$$\max_z \sum_{j \in \mathcal{M}^0} \sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j} \lg((1-\alpha) R_{i,j}) - \sum_{j \in \mathcal{M}^0} \sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j} \lg(\sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j}) \quad (14a)$$

s. t.

$$\begin{cases} \text{C1: } \sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j} (1-\alpha) R_{i,j} \leq \alpha R_j^{\text{back}} \sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j}, \forall j \in \mathcal{M} \\ \text{C2: } \sum_{j \in \mathcal{M}^0} z_{i,j} (1-\alpha) R_{i,j} \geq \frac{N}{M} R_i^t, \forall i \in \mathcal{N} \\ \text{C3: } \sum_{j \in \mathcal{M}} z_{i,j} = 1, \forall i \in \mathcal{N} \\ \text{C4: } z_{i,j} = 1, \forall i \in \mathcal{N}, j=0 \\ \text{C5: } z_{i,j} \in \{0, 1\}, \forall i \in \mathcal{N}, j \in \mathcal{M}^0 \\ \text{C6: } \sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j} = u_j, \forall j \in \mathcal{M}^0 \\ \text{C7: } u_j \leq M, \forall j \in \mathcal{M}^0 \end{cases} \quad (14b)$$

借助负载变量 $\{\sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j} = u_j\}$, 并且引入 3 个拉格朗日乘子 λ, ν 和 ω , 问题 P2-2 对应的拉格朗日函数可以写成

$$\begin{aligned} L(z, \lambda, \nu, \omega) = & \sum_{j \in \mathcal{M}^0} \sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j} (\lg((1-\alpha) R_{i,j}) - \lg(\sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j})) + \\ & \sum_{j \in \mathcal{M}} \lambda_j (\alpha u_j R_j^{\text{back}} - \sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j} (1-\alpha) R_{i,j}) + \\ & \sum_{i \in \mathcal{N}} \nu_i \left(\sum_{j \in \mathcal{M}^0} z_{i,j} \frac{(1-\alpha)}{K} R_{i,j} - R_i^t \right) + \sum_{j \in \mathcal{M}^0} \omega_j (u_j - \sum_{i \in \mathcal{N}} z_{i,j}). \end{aligned} \quad (15)$$

通过移项和归类之后, 拉格朗日函数进一步可以写成

$$L(z, \lambda, \nu, \omega) = \sum_{j \in \mathcal{M}^0} \sum_{i \in \mathcal{N}} L_{i,j}^1(z, \lambda, \nu, \omega) + \sum_{j \in \mathcal{M}} L_j^2(u, \lambda, \nu), \quad (16)$$

$$L_{i,j}^1(z,\lambda,\nu,\omega)=z_{i,j}(\lg((1-\alpha)R_{i,j})-\lambda_j(1-\alpha)R_{i,j}+\nu_i\frac{(1-\alpha)}{K}R_{i,j}-\omega_j)), \tag{17}$$

$L_j^2(u,\lambda,\omega)=u_j(\lambda_j\alpha R_j^{back}+\omega_j-\lg(u_j))。$ (18)
通过观察可以发现 $L_{i,j}^1(z,\lambda,\nu,\omega)$ 和 $L_j^2(u,\lambda,\omega)$ 是解耦的,因而根据朗格朗日对偶方法可知,求解 P2-2 就可以分解两个子问题,即分别求解 $L_{i,j}^1(z,\lambda,\nu,\omega)$ 和 $L_j^2(u,\lambda,\omega)$ 的最大值。那么,第一个子问题的解可以被定义为

$$z_{i,j}^{(t+1)}=\begin{cases} 1, & \text{if } i=j', \forall i\in\mathcal{N} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}。 \tag{19}$$

式中:

$$j'=\arg\max_j \lg(R_{i,j})-\lambda_j(1-\alpha)R_{i,j}+\nu_i\frac{(1-\alpha)}{K}R_{i,j}+\omega_j。 \tag{20}$$

同样,通过设置 $L_j^2(u,\lambda,\omega)$ 的偏导数为 0,在满足 C7 的条件下,可以得到 μ_j 的值:

$$u_j^{(t+1)}=\min(e^{\lambda_j\alpha R_j^{back}+\omega_j-1},M)。 \tag{21}$$

对于拉格朗日乘子 λ,ν 和 ω 的更新,本文采用传统的次梯度法,过程如下:

$$\lambda_j^{(t+1)}=[\lambda_j^{(t)}-\varepsilon_1(\alpha\mu_j^{(t+1)}R_j^{back}-\sum_{i\in\mathcal{N}}z_{i,j}^{(t+1)}(1-\alpha)R_{i,j})]^+, \tag{22}$$

$$\nu_i^{(t+1)}=\left[\nu_i^{(t)}-\varepsilon_2\left(\sum_{j\in\mathcal{M}^0}z_{i,j}^{(t+1)}\frac{(1-\alpha)}{K}R_{i,j}-R_u\right)\right]^+ \omega_j^{(t+1)}= \omega_j^{(t)}-\varepsilon_3(u_j^{(t+1)}-\sum_{i\in\mathcal{N}}z_{i,j}^{(t+1)})。 \tag{23}$$

式中: $[\alpha]^+=\max(\alpha,0),\varepsilon_1,\varepsilon_2$ 和 ε_3 是三个被恰当选择的步长值。

借助式(19)和(21)获得相应的变量解,同时根据式(22)和(23)更新几个拉格朗日乘子,随着这三个乘子的更新迭代并最终收敛,至此问题 P2-2 就可以求解。

4 双关联和回传带宽资源配置联合优化算法

通过分别求解两个子问题得到相应的用户关联解和回传带宽分配因子,在循环内依次更新这两个变量值,最终当函数目标值收敛或者循环触发终止次数,迭代优化结束。最终问题 P1 的求解算法(以下简称为 JDCBA 算法)总结如下:

- Step 1 计算 $R_{i,j}$ 和 $R_j^{back}, \forall i\in\mathcal{N},j\in\mathcal{M}^0。$
- Step 2 输入初始化数据: $t=1,T_{\max}=15,\alpha_1=0.8。$
- Step 3 If $t\geq 1$ 且 $t\leq T_{\max}$
- Step 4 已知 α_t ,求解问题 P2-2,获得二进制关

联变量的解 z

- Step 5 已知 z ,求解问题 P2-1,获得新的回传单位带宽配置因子 α_{t+1}
- Step 6 if 问题 P2 的目标值收敛
- Step 7 终止循环,执行 Step 12
- Step 8 else
- Step 9 $t=t+1$
- Step 10 end if
- Step 11 end if
- Step 12 输出数据。

5 仿真分析

针对异构无线网络中双关联可行的用户关联和回传单位带宽资源配置联合优化问题,本节通过电脑(i9-10900K 处理器、32 GB 内存)安装的 Matlab R2017a 数学仿真验证所提算法的性能。所考虑的场景是由 1 个宏基站和 3 个小基站组成的双层异构网络的下行链路传输场景。宏基站固定部署在坐标中心位置(0,0),而小基站和所有用户设备以一种相对随机的方式分布在以(350,350)m 为圆心、半径为 350 m 的圆盘区域中,并且任意两个小基站之间的距离大于 150 m。

一些重要的仿真参数设置如下:宏基站到用户之间、小基站到用户之间以及小基站到宏基站之间的路径损耗模型分别为 $L_m=33.3+39.1\lg(d),L_s=40.8+36.7\lg(d),L_{sm}=30.6+39.1\lg(d)$ 。其中, d 表示信号发射端和接收端之间的距离,单位为 km。同时除了路径损耗,所有基站的信号传播模型还包含标准差为 8 dB 的对数正态阴影效应^[5]。另外宏基站和小基站的发射功率分别设置为 40 dBm 和 17 dBm,用户设备接收到的噪声功率为 3.981×10^{-14} W。如无特别说明,设定单位带宽条件下的用户最小需求速率 $R_i^*=0.01$ b/s,用户数 $N=40。$

本小节将所提算法与两种基于固定回传单位带宽配置因子的双连接方法的性能进行比较。这两种对比方法分别简称为“DC- α_1 ”和“DC- α_2 ”,其中 $\alpha_1=0.4,\alpha_2=0.7$ 。此外,需要强调的是,所有的仿真结果都是在超过 1 000 次蒙特卡洛平均中得到的。

5.1 不同用户数下性能对比

图 2~4 分别比较了三种关联机制在不同用户数下的系统吞吐量效用、系统吞吐量和无线回传单位带宽配置因子值,网络所有户数的最小单位带宽

需求速率设置为 0.01 b/s。

由图 2 和图 3 可知,与 $DC-\alpha_1$ 方案和 $DC-\alpha_2$ 方案相比,本文所提 JDCBA 方案拥有最好的网络吞吐量效用和性能,同时在网络吞吐量性能方面拥有显著的优势。

在图 2 中,随着网络中用户总数的逐渐增加,三种方案的网络吞吐量效用和性能呈现快速降低的趋势,同时不同方案的网络吞吐量效用和性能之间的差值变大。数值计算表明,本文所提 JDCBA 方案的网络吞吐量效用和性能平均比 $DC-\alpha_1$ 方案和 $DC-\alpha_2$ 方案的网络效用性能高出 7.85% 和 27.70%。

在图 3 中,随着网络中用户总数的逐渐增加,本文所提 JDCBA 方案的网络吞吐量性能呈现缓慢增长的趋势,其他两个方案的网络吞吐量性能保持不变。数值计算表明,在网络吞吐量性能方面,本文所提 JDCBA 方案平均比 $DC-\alpha_1$ 方案和 $DC-\alpha_2$ 方案的性能分别高出 22.03% 和 144.06%。

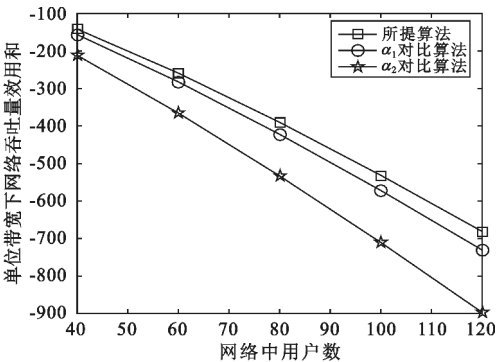


图 2 不同用户数下三种机制的网络吞吐量效用和

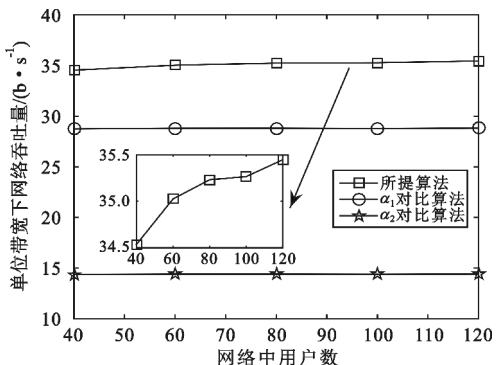


图 3 不同用户数下三种机制的网络吞吐量

通过观察图 4 可知,与 $DC-\alpha_1$ 方案和 $DC-\alpha_2$ 方案相比,本文所提 JDCBA 方案拥有最小的回传单位带宽配置因子值。在图 4 中,随着网络中用户总数的逐渐增加,所提 JDCBA 方案的回传单位带宽配置因子值呈现缓慢降低的趋势。

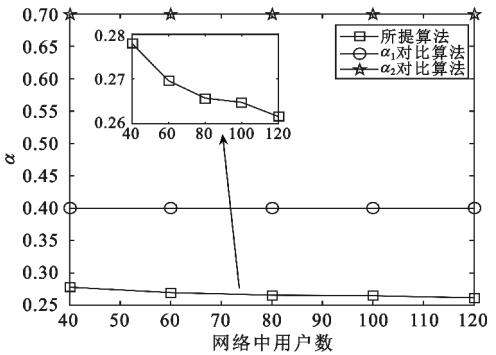


图 4 不同用户数下三种机制的回传单位带宽配置因子

5.2 不同用户最小需求速率下性能对比

图 5~7 分别比较了三种不同关联机制在不同用户最小单位带宽速率需求下的系统吞吐量效用、系统吞吐量和无线回传单位带宽配置因子值,网络所总用户数设置为 40。

由图 5 可知,本文所提 JDCBA 方案系统吞吐量效用性能最好, $DC-\alpha_1$ 方案次之, $DC-\alpha_2$ 方案最差。数值计算表明,本文所提 JDCBA 方案的系统吞吐量效用性能平均比 $DC-\alpha_1$ 方案和 $DC-\alpha_2$ 方案的系统吞吐量效用性能高出 9.51% 和 33.21%。另外,在图 5 中,三条曲线呈现水平且平行的状态。这说明随着网络中用户速率需求的逐渐提高,所提 JDCBA 方案和两种基于固定回传单位带宽配置因子的方案一样,三者的系统吞吐量效用和性能未发生可观察到的变化。这是因为从式(12)和(13)可知,在可行的用户速率约束条件下,网络中用户速率需求与回传单位带宽配置因子的取值无关。因此,网络中用户速率需求的变化不影响回传单位带宽配置因子的取值,这也能通过后面的图 7 得到验证。

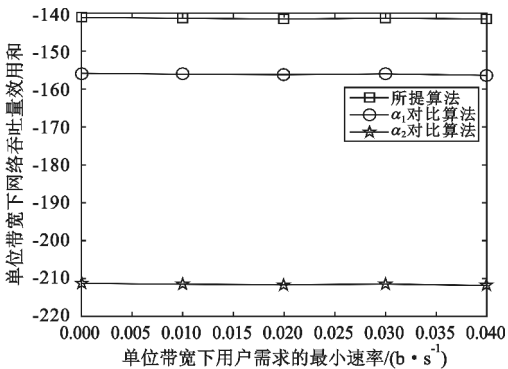


图 5 不同用户最小速率需求下三种机制的网络吞吐量效用和

由图 6 可知,本文所提 JDCBA 方案系统吞吐量性能最好, $DC-\alpha_1$ 方案次之, $DC-\alpha_2$ 方案最差。数值计算表明,本文所提 JDCBA 方案的系统吞吐量性

能平均比 DC- α_1 方案和 DC- α_2 方案的系统吞吐量效用性能高出 20. 62% 和 140. 20%。而且,在图 6 中,三条曲线呈现水平且平行的状态。这说明随着网络中用户速率需求的逐渐提高,所提 JDCBA 方案和两种基于固定回传单位带宽配置因子的方案一样,三者的系统吞吐量效用和性能未发生可观察到的变化。

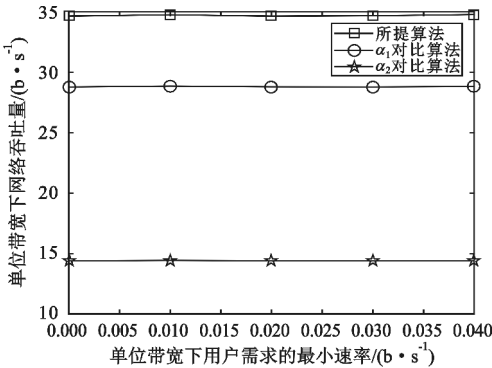


图 6 不同用户最小速率需求下三种机制的网络吞吐量

图 7 表明,与 DC- α_1 方案和 DC- α_2 方案相比,本文所提 JDCBA 方案拥有最小的回传单位带宽配置因子值,即 α 值。而且,同图 5 和图 6 一样,随着网络中用户速率需求的逐渐提高,所提 JDCBA 方案的 α 值未发生可观察到的变化。

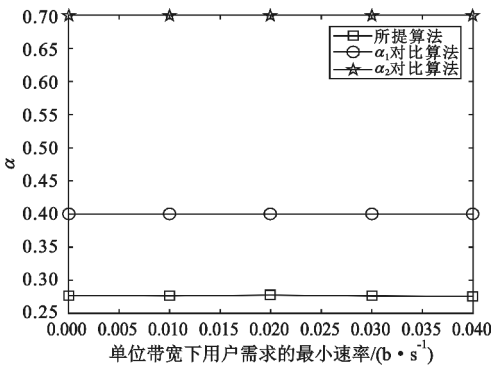


图 7 不同用户最小速率需求下三种机制的回传单位带宽配置因子

6 结 论

本文针对双连接可行的异构无线网络中基于用户关联和回传带宽配置的联合优化问题,将其建模为系统吞吐量效用和最大化问题。由于所建模问题是一个非凸的混合整数分式优化问题,属于复杂的 NP-hard 问题,本文首先将其去分式转换,然后进一步分解为两个优化子问题,即基于固定用户关联的回传单位带宽配置优化子问题和基于固定回传带宽配置因子的双连接可行的用户关联优化子问题。最

终基于交替求解这两个子优化问题,本文提出了一种有效的迭代优化算法。数学仿真验证了所提算法的有效性和优越性。

参考文献:

[1] LIU Y,DERAKHSHANI M,LAMBOTHARAN S. Dual connectivity in backhaul-limited massive-MIMO HetNets:user association and power allocation [C]// Proceedings of 2017 IEEE Global Communications Conference. Singapore ;IEEE,2017:1-6.

[2] SHI Y W,QU H,ZHAO J H. Dual connectivity enabled user association approach for max-throughput in the downlink heterogeneous network [J]. Wireless Personal Communications,2017,96(1):529-542.

[3] HAN Q,YANG B,CHEN C,et al. Matching-based cell selection for proportional fair throughput boosting via dual-connectivity [C] //Proceedings of 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). San Francisco:IEEE,2017:1-6.

[4] SHI Y W,QU H,ZHAO J H. Dual-connectivity enabled resource allocation approach with eICIC for throughput maximization in HetNets with backhaul constraint [J]. IEEE Wireless Communications Letters,2019,8(4):1297-1300.

[5] WU Y,GUO K,HUANG J,et al. Secrecy-based energy-efficient data offloading via dual connectivity over unlicensed spectrums [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2016,34(12):3252-3270.

[6] AHMAD S A,DATLA D. Distributed power allocations in heterogeneous networks with dual connectivity using backhaul state information [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2015,14(8):4574-4581.

[7] WU Y,QIAN L P. Energy-efficient NOMA-enabled traffic offloading via dual-connectivity in small-cell networks [J]. IEEE Communications Letters,2017,21(7):1605-1608.

作者简介:

张佳庚 男,1990 年生于陕西韩城,2015 年获硕士学位,现为西安交通大学工程师,主要从事下一代互联网、5G 网络、网络舆情监测。

杜 丰 男,1982 年生于陕西西安,2012 年获硕士学位,现为西安交通大学工程师,主要从事智慧教育开发研究工作。

师有为 男,1989 年生于陕西西安,2020 年获博士学位,现为国防科技大学西安通信学院讲师,主要从事无线网络研究。

王 齐 女,1982 年生于陕西杨凌,2009 年获硕士学位,主要从事高校信息化工作。

刘 俊 男,1984 年生于甘肃庆阳,2009 年获硕士学位,主要从事网络舆情监测。

锁志海 男,1971 年生于陕西西安,2004 年获硕士学位,主要从事高校信息化、网络舆情监测等。