光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021082504

宏微协同组网下基于小区分簇的联合传输与无线资源分配

施加轮[1*]，卓秀者[2]，李　杰[2]，邓　舒[2]

（1. 国网福建省电力有限公司信息通信分公司，福州 350003；2. 福建永福电力设计股份有限公司，福州 350108）

摘　要： 针对宏微协同组网下小区间无线资源管理问题，文章提出一种大规模多入多出系统下基于微小区分簇的联合传输和动态频谱分配策略，该策略分两步执行以优化网络加权和速率。首先，所提算法根据各用户当前的信道状态执行微小区分簇，以尽可能地降低小区间干扰，提升系统容量。接着，宏基站和各微小区簇根据所服务用户当前的业务请求信息分别为其动态分配子载波，以最大化网络加权和速率，并提升资源利用率。仿真结果显示，该文提出的微小区分簇和动态频谱分配策略能在尽可能降低宏微协同组网中用户间干扰的同时，有效地提升系统吞吐量。

关键词： 宏微协同组网；小区分簇；无线资源分配；大规模 MIMO

中图分类号： TN929.11　**文章编号：** 1001－5868(2021)06－0909－10

Cell Clustering-based Joint Transmission and Radio Resource Allocation in Macro-micro Collaborative Networking

SHI Jialun[1], ZHUO Xiuzhe[2], LI Jie[2], DEND Shu[2]

(1. State Grid Fujian Electric Power Co. Ltd., Fuzhou 350003, CHN;
2. Fujian Yongfu Power Engin. Co. Ltd., Fuzhou 350108, CHN)

Abstract: For the inter-cell wireless resource management in macro-micro co-networking, proposed is a joint transmission and dynamic spectrum allocation strategy based on micro cell clustering in massive MIMO system. The strategy is implemented in two steps to optimize the network weighted sum rate. First, the proposed algorithm performs micro-cell clustering according to the current channel state information (CSI) of users, so as to reduce the inter-cell interference as much as possible and improve the system capacity. Then, the macro base station (MBS) and each micro-cell cluster dynamically allocate sub-carriers to its service users according to the current traffic request information to maximize the network weighted sum rate and improve the resource utilization. The simulation results show that the proposed micro-cell clustering and dynamic spectrum allocation strategy can not only effectively improve the system throughput but also reduce the interference among users in macro-micro collaborative networking.

Key words: macro-micro collaborative networking; cell clustering; wireless resource allocation; massive MIMO

0　引言

能源互联网是国家能源战略的重要组成部分，而通信是能源互联网的主要环节。随着新能源的不断接入，电力移动数据业务激增，电力用户对高数据速率以及服务质量(Quality of Service，QoS)提出了更高的要求，因此对下一代蜂窝无线通信网络带来了巨大挑战[1]。为了更好地处理电力不断增长的业

收稿日期：2021－08－25.

*通信作者：施加轮

务需求，同时降低投资和运维成本，宏微协同组网技术受到了各界的广泛关注，也被预期为实现下一代无线通信系统宏伟目标的关键技术之一。

宏微同频组网通过宏微基站间复用全部可用的频谱资源，能显著提高资源利用率，提升网络容量。但是，宏微基站同频传输会带来较为严重的同层和跨层干扰，进而影响系统整体性能提升和微站的业务分流效果[2]。因此，如何抑制宏微协同组网下的小区和用户间干扰尤为关键。针对超密集网络(Ultra Dense Network，UDN)中的上行干扰问题，文献[3]提出了一种基于多点协作联合接收(JR-CoMP)的分簇与资源分配方法。文献[4]在两层单天线异构网络模型场景下提出了一种新的用户分类方法和对应的增强型小区间干扰协调(enhanced Inter-cell Interference Coordination，eICIC)方案，并探究分析了几乎空白子帧(Almost Blank Subframe，ABS)数量与基站发射功率、低功率小基站分布密度和小区范围扩展偏置值之间的关系。文献[5]提出了一种基于用户划分的资源分配和功率控制方案。文献[6]提出了一种基于非完全着色的干扰协调方案，根据设定的小基站干扰阈值构建无向干扰图，接着利用图论中的着色算法对小基站进行分簇，最后根据小基站的负载状态动态地分配子信道。

基于上述讨论，本文联合考虑宏基站多天线预编码技术，微小区间分簇、微小区簇内联合传输和动态频谱分配，建立了一个以最大化网络加权和速率为目标的混合整数非线性规划(Mixed Integer Nonlinear Program，MINLP)问题，进而提出了一种半分布式的基于微小区分簇的联合传输和动态频谱分配策略。

1 系统模型和问题描述

1.1 符号说明

令 $\mathbb{R}$ 表示实数集，$\mathbb{R}^{N\times N}$ 表示 $N\times N$ 实矩阵集合，且 $\mathbb{R}_{+}^{N\times N}$ 表示 $N\times N$ 非负实矩阵集合。$\mathbb{R}$ 表示 N 维实值列向量，且 $\mathbb{R}_{+}^{N}$ 表示 N 维实值非负列向量。非负对称实数矩阵集合用 $S_{+}^{n\times n}$ 表示。$[x]^{+}=\max(x,0)$，$\lfloor x\rfloor$ 表示对 x 向下取整。令 $|Y|$ 表示矩阵(向量)或集合的基数。$[\cdot]^{\mathrm{T}}$ 表示转置操作，$[\cdot]_{i,j}$ 表示一个矩阵位于第 i 行和第 j 列的元素。

1.2 系统模型

图 1 所示为本文所考虑的宏微协同组网下行传输场景。网络由一个配备有 M 根天线的宏基站(Macro Base Station，MBS)和一组单天线微基站(Micro Radio Base Station，mRBS)组成，并分别用 m 和集合 $\mathcal{F}=\{1,2,\cdots,F\}$ 表示。采用小区扩展技术(Cell Range Extension，CRE)分流 MBS 的负载，以尽可能多地接入用户。令 $\mathcal{K}=\{1,2,\cdots,K\}$ 和 $\mathcal{U}_f=\{u_f\in\mathcal{U}_f\}$ 分别表示 MBS 和任意 mRBS$f\in\mathcal{F}$ 的服务用户集合，进而网络中所有用户的集合为 $\mathcal{U}=\bigcup_{f\in\mathcal{F}}\mathcal{U}_f\cup\mathcal{K}$ 且有 $u\in\mathcal{U}$。特别地，本文考虑的是一个大规模 MIMO 系统，宏基站配备的天线数 $M\gg K$，为了获得 MIMO 系统多天线的增益，信道状态信息(Channel State Information，CSI)必须在宏基站发射端是已知的。因此，本文假设网络采用 TDD 协议，根据信道互异性原理，MBS 可以利用其服务用户发送的上行导频信号来估计其下行信道。进一步，网络中所有可用子载波用 $\mathcal{N}=\{1,2,\cdots,N\}$ 表示，且对任意子载波 $n\in\mathcal{N}$，其带宽为 W。

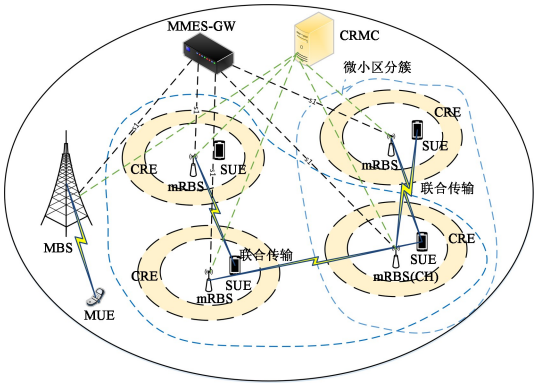


图 1 宏微协同组网下行传输场景

在大规模 MIMO 系统中，通过使用波束赋形或虚拟 MIMO 技术，MBS 能够使用相同频谱资源同时给多个用户发送数据。为了充分利用有限的无线资源，本文考虑宏微基站间同频组网，即 MBS 和所有 mRBSs 全频率复用所有可用的子载波。进一步，我们假设 MBS 同时同频地为其用户传输数据，并采用迫零(Zero-Forcing)波束赋形以几近完美地消除宏用户(Macro-cell User Equipment，MUE)间的同层干扰。此外，我们假设 mRBSs 间利用小区分簇技术被划分为有限个互斥集合，各微小区簇内正交分配子载波，且同一簇内的所有 mRBSs 为簇内用户(Small-cell User Equipment，SUE)联合传输数据。令 g_k^m 和 $g_{u_f}^f$ 分别表示 MUE k 和 SUE u_f

与其服务基站(MBS,mRBS f)间的信道增益,其主要包括了由路径损耗和阴影衰落构成的大尺度衰落和瑞丽平坦快衰落。进一步,令 $\boldsymbol{G}^m=[g_1^m,g_2^m,\cdots,g_K^m]^{\mathrm{T}}\in\mathscr{C}^{K\times M}$ 表示 MUE 信道增益矩阵,MBS 下行链路预编码矩阵为 $\mathscr{W}=[\boldsymbol{\omega}_1^m,\boldsymbol{\omega}_2^m,\cdots,\boldsymbol{\omega}_K^m]\in\mathscr{C}^{M\times K}$。由于在 mRBSs 密集组网下,SUE u_f 和其服务基站 mRBS f 间的距离很小,因而其他 mRBS f'和 SUE u_f 间的信道增益可以近似等效为两个 mRBSs f 和 f'间的信道增益,即 $g_{f',u_f}=g_{f',f}=g_{f,f'}$,进而可知信道增益是对称的,即 $g_{f',u_f}=g_{f,u_{f'}}$。此外,令 p^m 和 p^f 分别表示 MBS 和 mRBS f 的最大发射功率,MBS 和 mRBS f 在任一子载波上的平均发送功率分别为 $p_{\mathrm{avg}}^m=p^m/N$ 和 $p_{\mathrm{avg}}^f=p^f/N$。

1.3　用户速率

对于任一 MUE $k\in\mathscr{K}$,其会受到来自微小区的跨层干扰,因此,其信干噪比(Signal to Interference Plus Noise Ration,SINR)可计算如下:

$$\gamma_k=\frac{p_{\mathrm{avg}}^m\mid g_k^m\boldsymbol{\omega}_k^m\mid^2}{\sum_{f\in\mathscr{F}}p_{\mathrm{avg}}^f\mid g_{f,k}\mid^2+\sigma^2}\tag{1}$$

其中,$g_{f,k}$ 表示 mRBS f 对 MUE k 的干扰信号增益。σ^2 为加性高斯白噪声的功率。进一步,MUE k 的瞬时传输速率为

$$R_k=NW\log_2(1+\gamma_k)\tag{2}$$

在 mRBSs 未进行小区分簇前,任一 mRBS $f\in\mathscr{F}$ 的服务用户 u_f 会受到来自 MBS 的跨层干扰和来自其他 mRBSs 的同层干扰。因此,SUE u_f 在任一子载波上的信干噪比可表示为

$$\gamma_{u_f}^f=\frac{p_{\mathrm{avg}}^f\mid g_{u_f}^f\mid^2}{\sum_{f'\in\mathscr{F},f'\neq f}p_{\mathrm{avg}}^{f'}\mid g_{f',u_f}\mid^2+p_{\mathrm{avg}}^m\mid g_{m,u_f}\mid^2+\sigma^2}\tag{3}$$

其中,g_{f',u_f} 和 g_{m,u_f} 分别表示 mRBS f'和 MBS 对 SUE u_f 的干扰信号增益。

当微小区间考虑小区分簇时,所有 mRBSs 被划分成有限个数互斥集合。定义 $\mathscr{C}$ 为所有微基站簇的集合,$c_l\in\mathscr{C}$ 表示第 l 个微基站簇且满足 $c_l\subseteq\mathscr{F},\forall l\in\{1,2,\cdots,|\mathscr{C}|\}$,$\bigcup_{l=1}^{|\mathscr{C}|}c_l=\mathscr{F}$ 和 $\bigcap_{l=1}^{|\mathscr{C}|}c_l=\varnothing$。进一步,对任意 $f\in\mathscr{F}$,其所在的微小区簇中的微基站用集合 c^f 表示。如前所述,本文假设各微基站簇和宏基站复用所有可用子载波,而各微基站簇内正交分配子载波,且同一簇内所有 mRBSs 为其用户联合传输。微小区分簇实际上是微基站以牺牲部分频谱为代价以减弱其用户所受到的干扰,进而提升小区覆盖性能和网络吞吐量。因此,分簇大小是一个影响系统性能(数据速率)的重要待优化参量。当微小区分簇后,对任意 mRBS $f\in\mathscr{F}$ 的用户 u_f 来说,其会受到来自其他微小区簇的同层干扰和来自 MBS 的跨层干扰,避免了同一簇内其他 mRBSs 的信号干扰。因此,SUE u_f 在任一子载波上的信干噪比计算如下:

$$\gamma_{u_f}^f=\frac{\sum_{f'\in c^f}p_{\mathrm{avg}}^{f'}\mid g_{u_f}^{f'}\mid^2}{\sum_{f'\in\mathscr{F}\setminus c^f}p_{\mathrm{avg}}^{f'}\mid g_{f',u_f}\mid^2+p_{\mathrm{avg}}^m\mid g_{m,u_f}\mid^2+\sigma^2}\tag{4}$$

对任意微小区簇,令 $\Gamma_{u_f}^n\in\{0,1\}$ 表示子载波 n 的分配指示变量,其取值为 1 表示子载波 n 分配给 SUE u_f,反之,则不分配。

1.4　问题描述

本文联合考虑宏基站多天线预编码技术,微小区间分簇、微小区簇内联合传输和动态频谱分配,以探究宏微协同组网下基于小区分簇的无线资源优化问题,预期实现在降低网络干扰的同时提高系统吞吐量和频谱资源利用率。本文所探究的问题具体建模如下:

$$\begin{aligned}&\max_{\Gamma_{u_f}^n,c_l,\forall l\in\{1,2,\cdots,|C|\}}\sum_{c_l\in C}\sum_{n\in\mathscr{N}}\sum_{f\in c_l}\sum_{u_f\in\mathscr{U}_f}\Gamma_{u_f}^nW\log_2(1+\gamma_{u_f}^f)\cdot T_{u_f}\\&\text{s.t.}\\&\quad\text{C1.}\ \Gamma_{u_f}^n\in\{0,1\},\forall n,f\in\mathscr{F},u_f\in\mathscr{U}_f\\&\quad\sum_{f\in c_l}\sum_{u_f\in\mathscr{U}_f}\Gamma_{u_f}^n=1,\forall n,c_l\in\mathscr{C},l\in\{1,2,\cdots,|\mathscr{C}|\}\\&\quad\text{C2.}\ \sum_{n\in\mathscr{N}}\sum_{f\in c_l}\sum_{u_f\in\mathscr{U}_f}\Gamma_{u_f}^n\leqslant N,\forall c_l\in\mathscr{C},l\in\{1,2,\cdots,|\mathscr{C}|\}\\&\quad\text{C3.}\ \bigcup_{l=1}^{|\mathscr{C}|}c_l=\mathscr{F},\ \bigcap_{l=1}^{|\mathscr{C}|}c_l=\varnothing\\&\quad\text{C4.}\ |c_l|\leqslant\mathscr{C}_{\mathrm{size}},\forall l\in\{1,2,\cdots,|\mathscr{C}|\}\end{aligned}\tag{5}$$

其中,T_{u_f} 为 SUE u_f 当前请求业务数据量。

优化问题(5)中,其目标函数为最大化微小区加权和速率,其中,权重为各 SUE 当前的业务请求量。这是为了更公平地在用户间分配无线资源,业务请求量较大的用户应倾向于优先获得子载波,以降低时延,防止网络拥塞,相反,当前业务请求量较小或无数据包待传的用户应获得较少的子载波或将其从子载波分配进程中排除,以防止其无端占用资源,降

低系统容量。进一步,约束条件 C1 和 C2 说明,微小区簇内正交分配子载波资源,任一子载波在同一时刻只能被一个用户占用,且所分配的子载波个数不能超过网络总的可用子载波数。约束条件 C3 说明各微小区簇的并集构成微基站集合 $\mathcal{F}$,且各簇间是互斥的。约束条件 C4 限制了各微小区簇的大小最大为 C_{size},在本文中,我们假设最大的簇尺寸受限于网络中可用子载波数,即令 $C_{\text{size}}=N$。

优化问题(5)是一个混合整数非线性规划(MINLP)问题,要获得其最优解是棘手的且需要集中式的计算操作,因而对于实际解决应用来说过于复杂。因此,我们将上述问题分解成两个分布执行的子问题,即小区分簇子问题和各微小区簇内子载波分配子问题。具体地,CRMC 收集所有微小区的 CSI 信息,并根据预先定义的惩罚项的范围执行小区分簇,获得一组候选分簇配置并将该配置信息发送给各个微小区簇。接着,在每种微小区分簇配置下,每个微小区簇内选择一个微基站作为簇头,执行该分簇配置下的最优子载波分配,并将计算出的用户加权和速率转发给 CRMC。最后,CRMC 比较所有可能微小区分簇配置下的网络加权和速率,选择最大的一项所对应的微小区分簇配置作为最终的微小区分簇策略。图 2 总结了微小区分簇和簇内子载波动态分配的整体运算流程。

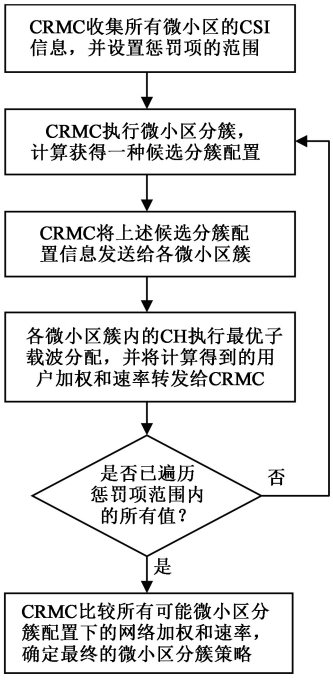


图 2 微小区分簇和子载波分配整体运算流程

2 宏微协同组网下基于微小区分簇的动态频谱分配策略

2.1 微小区分簇子问题

文献[7]利用相关聚类的概念和原则建模微小区分簇子问题。在原始的相关聚类问题中,给定一个无向图 $G=(V,E)$,其中,V 为节点集合,$(i,j)\in E$ 为边集且每条边(i,j)都被赋予两个非负权重 $w_{i,j}^{+}$ 和 $w_{i,j}^{-}$。相关聚类问题的目标是将节点根据相似度划分成几个相似节点集,其中,节点间的相似程度由权重 $w_{i,j}^{+}$ 反映,节点间的相异(不同)程度则由权重 $w_{i,j}^{-}$ 体现。换句话说,目标是找到节点集 V 的一种划分,使得划分集内边的 $w_{i,j}^{+}$ 权重和以及划分集间边的 $w_{i,j}^{-}$ 权重和最大。

在本文所考虑的宏微协同组网场景下,若微基站 $i,j\in\mathcal{F}$ 间相互严重干扰,则 mRBSs i 和 j 高度相似,即有较高的 $w_{i,j}^{+}$ 值。进一步,如果两个微基站 i 和 j 间有较好的信道增益,则 mRBSs i 和 j 在相同频带上发送数据时会彼此产生严重干扰。因此,可以使 $w_{i,j}^{+}$ 正比于两个 mRBS i 和 j 间的信道增益,即令 $w_{i,j}^{+}=g_{i,j}$。当两个彼此严重干扰的微基站被划分进同一个簇时,由于子载波正交分配,会明显降低所受到的同层干扰,提高它们的和速率。但当同一簇内的微基站数量增加时,虽然它们会受到更低的同层干扰,但由于此时会存在更多的 SUEs 竞争有限的子载波,导致各 mRBS 获得的子载波数量也会相应减少,从而降低微小区和速率。因此,为了与优化问题(5)的目标函数(最大化微小区加权和速率)保持一致,还需要另一个变量用以指示为什么两个 mRBSs 不宜被划分进同一个簇内,即 $w_{i,j}^{-}$,也称作惩罚项。本文中,我们令 $w_{i,j}^{-}$ 对所有微基站 $i,j\in\mathcal{F}$ 是相同的,即为一常量 $w_{i,j}^{-}=w_{n}^{-}$。这样一来,w_{n}^{-} 则为一个用来反映同层干扰水平和可用带宽间权衡的参数,因此,通过在范围 $(\min\limits_{i,j\in\mathcal{F}}w_{i,j}^{+}+\Delta\leqslant w_{n}^{-}\leqslant\max\limits_{i,j\in\mathcal{F}}w_{i,j}^{+}+\Delta)$ 内改变惩罚项 w_{n}^{-} 的取值,CRMC 能够获得不同的微小区分簇配置。其中,$\Delta>0$ 是一个非常小的正数。

当 $w_{n}^{-}=\min\limits_{i,j\in\mathcal{F}}w_{i,j}^{+}+\Delta$,对应的微小区分簇配置会倾向于将所有 mRBSs 划分到同一个簇内,若 $w_{n}^{-}=\max\limits_{i,j\in\mathcal{F}}w_{i,j}^{+}+\Delta$,微小区分簇配置将会令每个 mRBS 单独成为一个簇。定义 $W^{+}\in S_{+}^{n\times n}$,其中,$[W^{+}]_{i,j}=w_{i,j}^{+}$。此外,有 $w_{n}^{-}=w_{i,j}^{+}+\Delta,1\leqslant i<$

$j \leqslant \mathcal{F}$ 定义 $\boldsymbol{W}^- \in \mathbb{R}_+^{\frac{F^2-F}{2}}$，其中，$(\boldsymbol{W}^-)^{\mathrm{T}}=(w_1^-,\cdots,w_n^-,\cdots,w_{\frac{F^2-F}{2}}^-)$。向量 $\boldsymbol{W}^-$ 中的元素构成了惩罚项 w_n^- 的范围。因此，通过在 $\boldsymbol{W}^-$ 内选择不同的 w_n^- 取值，可以获得不同的微小区分簇策略。具体地，对任意 $w_n^- \in \boldsymbol{W}^-$，对应的微小区分簇问题可建模如下：

$$\max_{x_{i,j}} \sum_{i\in\mathcal{F}}\sum_{j\in\mathcal{F}} w_{i,j}^+ x_{i,j} + w_n^-(1-x_{i,j})$$

s. t.

$$\mathrm{C1}.\ x_{i,j}=1,\forall i \in \mathcal{F}$$

$$\mathrm{C2}.\ x_{i,j}=x_{j,i},\forall i,j \in \mathcal{F}$$

$$\mathrm{C3}.\ x_{i,j}+x_{j,f}-x_{i,f}\leqslant 1,\forall i,j,f \in \mathcal{F},\ f>i,j\neq i,f$$

$$\mathrm{C4}.\ \sum_{j\in\mathcal{F}} x_{i,j} \leqslant C_{\mathrm{size}},\forall i \in \mathcal{F}$$

$$\mathrm{C5}.\ x_{i,j} \in \{0,1\},\forall i,j \in \mathcal{F} \qquad (6)$$

其中，$x_{i,j}\in\{0,1\}$ 为微小区分簇指示变量，取值为 1 时说明微基站 i 和 j 被划分到同一微小区内，否则取值为 0。

在优化问题(6)中，约束条件 C1 说明了一个微基站和它本身属于同一个簇；约束条件 C2 表示两个微基站间的小区分簇关系是对称的，mRBSs i 和 j 在同一个簇内与 mRBSs j 和 i 在同一个簇内是一样的；约束条件 C3 是一个三角条件，其表明若 mRBSs i 和 j 在同一个簇内，mRBSs j 和 f 也在同一个簇内，那么 mRBSs i 和 f 一定也在同一个簇内。约束条件 C4 限制了各微小区簇的最大值为 C_{size}。

优化问题(6)是一个整数线性规划(ILP)问题，它是 NP-hard 的，虽然它可以通过分支定界法(Branch and Bound，BnB)获得最优解。然而，其所对应的计算复杂度是指数型的，因而不适合实际应用。因此，本文提出一种复杂度较低的微小区分簇算法。首先，将问题(6)松弛为一个半定规划(SDP)问题。半定规划是带有额外半定约束的线性规划的一种泛化，该方法的好处是，尽管它是原始 NP-hard 问题(6)的一种松弛，但它可以在多项式时间内以较小的附加误差被解决[7]。优化问题(6)松弛后的半定规划问题具体描述如下：

$$\max_{x_{i,j}} \sum_{i\in\mathcal{F}}\sum_{j\in\mathcal{F}} w_{i,j}^+ x_{i,j} + w_n^-(1-x_{i,j})$$

s. t.

$$\mathrm{C1}.\ x_{i,i}=1,\forall i \in \mathcal{F}$$

$$\mathrm{C2}.\ x_{i,j}+x_{j,f}-x_{i,f}\leqslant 1,\forall i,j,f \in \mathcal{F},\ f>i,j\neq i,f$$

$$\mathrm{C3}.\ \sum_{j\in\mathcal{F}} x_{i,j} \leqslant C_{\mathrm{size}},\forall i \in \mathcal{F}$$

$$\mathrm{C4}.\ x_{i,j} \geqslant 0,\forall i,j \in \mathcal{F}$$

$$\mathrm{C5}.\ X=(x_{i,j}) \succeq 0 \qquad (7)$$

优化问题(7)中，约束条件 C4 将二进制变量 $x_{i,j}$ 松弛为非负实数；约束条件 C5 是一个半定约束，其限制了矩阵 $\boldsymbol{X} \in S_+^{F\times F}$ 是半正定(Positive Semi-Definite，PSD)的。对于半正定的对称矩阵 $\boldsymbol{X}$，其可被拆写成 $\boldsymbol{X}=\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}=\boldsymbol{Q}\boldsymbol{D}^{1/2}(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{D}^{1/2})^{\mathrm{T}}$，其中，$\boldsymbol{V}=[v_1,v_2,\cdots,v_{\mathrm{F}}]\in\mathbb{R}^{F\times F}$ 且 $v_i\in\mathbb{R}^F$。$\boldsymbol{Q}$ 是由 $\boldsymbol{X}$ 的特征向量构成的矩阵，$\boldsymbol{D}$ 是 $\boldsymbol{X}$ 的特征值构成的对角矩阵。值得说明地是，矩阵 $\boldsymbol{X}$ 的元素 $[\boldsymbol{X}]_{i,j}=v_i\cdot v_j$，每个向量 v_i 对应一个 mRBS $i\in\mathcal{F}$。进一步，对于优化问题(7)，可以利用成熟的 CVX 工具箱求解。

优化问题(7)求得的解 $\boldsymbol{X}=\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}$ 是原始优化问题(6)的一个上界松弛解。接下来，利用随机舍入(Randomized Rounding)的方法对所得的松弛解取整，从而获得问题(6)的一个可行整数解[7]。具体地，首先产生 L 个单位范数随机向量 $r_i^{\mathrm{T}}=(r_{i1},\cdots,r_{iF})$，$r_i\in\mathbb{R}^F$，$i=1,2,\cdots,L$ 其中，r_i 中的每个元素都服从 $\mathcal{N}(0,1)$ 的正态分布。随机向量的数量 L 必须满足 $2^L\geqslant F$。L 个随机向量一共产生 2^L 个分簇 $c_1,c_2,\cdots,c_{2^L}$，将微小区映射到各簇内的具体操作如下：

$$\begin{aligned}
c_1&=\{i\in\mathcal{F}:r_1\cdot v_i\geqslant 0,\cdots,r_{L-1}\cdot v_i\geqslant 0,\ r_L\cdot v_i\geqslant 0\}\\
c_2&=\{i\in\mathcal{F}:r_1\cdot v_i\geqslant 0,\cdots,r_{L-1}\cdot v_i\geqslant 0,\ r_L\cdot v_i< 0\}\\
c_3&=\{i\in\mathcal{F}:r_1\cdot v_i\geqslant 0,\cdots,r_{L-1}\cdot v_i< 0,\ r_L\cdot v_i\geqslant 0\}\\
&\cdots\\
c_{2^L}&=\{i\in\mathcal{F}:r_1\cdot v_i< 0,\cdots,r_{L-1}\cdot v_i< 0,\ r_L\cdot v_i< 0\}
\end{aligned} \qquad (8)$$

通过上述操作，mRBSs 被划分为多个微小区簇。定义优化问题(6)的目标函数值为 Z_{opt}，执行随机舍入操作后的优化问题(7)的目标函数值为 Z_{RR}。基于随机向量的个数 L 给定一个常数 $\alpha<1$，可以证明[7]，$Z_{RR}\geqslant\alpha Z_{\mathrm{opt}}$。换句话说，如果求解了优化问题(7)，并利用随机舍入方法获得优化问题(6)的一个可行解，得到的则是一种 α-近似微小区分簇算

法,其中,所述获得的整数可行解 Z_{RR} 是在最优解 Z_{opt} 的 α 倍内。进一步,当上述整个计算步骤独立重复执行多次时,优化问题(7)的解 Z_{RR} 接近于最优解 Z_{opt} 的几率也会增大。综上,本文提出的基于相关聚类的微小区分簇算法具体如算法 1 所示:

算法 1: 基于相关聚类的微小区分簇算法

1. 输入:W^+ 和 w_n^-
2. 输出:给定 w_n^- 下的候选微小区分簇配置
3. 求解 SDP 问题(7)→$\boldsymbol{X}$
4. 重写 $\boldsymbol{X}=\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V},\boldsymbol{V}=[v_1,v_2,\cdots,v_F]$
5. for ind=1∶t do
6. 产生 L 个随机向量 $r_1,r_2,\cdots,r_L$ 使得 $2^L\geqslant F$
7. 根据式(8)将 mRBSs 映射到微小区簇
8. 将上述映射关系转译为优化问题(6)的解 $\boldsymbol{X}_{\text{int}}$
9. 利用 $\boldsymbol{X}_{\text{int}}$ 计算问题(6)的目标函数值
10. end for
11. 选择使问题(6)的目标函数值最大的小区分簇配置→w_n^- 下的候选微小区分簇策略

2.2 微小区簇内子载波动态分配子问题

如前所述,在 CRMC 每计算出一个特定惩罚项 w_n^- 取值下的候选微小区分簇配置后,每个微小区簇要选择一个 mRBS 作为簇头,负责在簇内为各服务用户正交分配子载波。具体地,对任意微小区分簇 $c_l\in\mathscr{C},l\in\{1,2,\cdots,|\mathscr{C}|\}$,其所对应的子载波动态分配子问题描述如下:

$$\max_{\Gamma^n_{u_f}}\sum_{n\in\mathscr{N}}\sum_{f\in c_l}\sum_{u_f\in\mathscr{U}_f}\Gamma^n_{u_f}W\log_2(1+\gamma^f_{u_f})T_{u_f}$$

s. t.

$$\text{C1.}\ \Gamma^n_{u_f}\in\{0,1\},\forall n,f\in c_l,u_f\in\mathscr{U}_f$$

$$\sum_{f\in c_l}\sum_{u_f\in\mathscr{U}_f}\Gamma^n_{u_f}=1,\forall n$$

$$\text{C2.}\ \sum_{n\in\mathscr{N}}\sum_{f\in c_l}\sum_{u_f\in U_f}\Gamma^n_{u_f}\leqslant N \tag{9}$$

对于优化问题(9),由约束条件 C1 和 C2 可知,微小区簇内的子载波资源在服务用户间是正交分配的,任一子载波在同一时刻只能被一个用户占用,且所分配的子载波个数不能超过微小区簇内的可用子载波总量。进一步,本文假设无线信道为非频率选择性信道,且各子载波间是相互独立的。因此,优化问题(9)可根据可用子载波数量进一步分解为 N 个独立的子问题。具体地,对于任一子载波 $n\in\mathscr{N}$,所对应的子问题即为找出加权瞬时传输速率最大的 SUE u_f^*,并确定将子载波 n 分配给该用户,即令 $\Gamma^n_{u_f^*}=1$,具体操作如下:

$$u_f^*=\underset{f\in c_l,u_f\in\mathscr{U}_f}{\arg\max}\ W\log_2(1+\gamma^f_{u_f})T_{u_f}$$

$$\Gamma^n_{u_f}=\begin{cases}1,u_f=u_f^*\\0,\text{otherwise}\end{cases} \tag{10}$$

根据式(10),可以得到各微小区簇内的最优子载波分配策略,具体步骤如算法 2 所示:

算法 2: 微小区簇内最优动态子载波分配策略

1. 输入:微小区簇内服务用户的业务请求信息 T_{u_f} 和网络中所有 SUE 的 CSI(信道增益)
2. for $n\in\mathscr{N}$
3. 根据式(10)计算子载波 n 的最优分配,即确定得到子载波 n 的用户 u_f^*
4. 判断 SUE u_f^* 是否已经获得了足够的子载波资源(即已无数据可传),具体操作如下:

if $T_{u_f^*}=0$

则将 SUE u_f^* 从接下来的子载波分配进程中排除,即 $\Gamma^n_{u_f^*}=0,\forall n\in\bar{\mathscr{N}}$,其中,$\bar{\mathscr{N}}$ 表示还未分配的子载波集合

else

按下式更新 SUE u_f^* 当前的待传业务数据量:

$$T_{u_f^*}=T_{u_f^*}-W\log_2(1+\gamma^f_{u_f^*})\tau \tag{11}$$

end if

5. 若所有用户均分配到足够的子载波数量,则 break
6. end for
7. 输出:微小区簇最优子载波分配策略 $\Gamma^n_{u_f},\forall n\in\mathscr{N},f\in c_l,u_f\in\mathscr{U}_f$

算法 2 中,在每分配一个子载波后,需要判断得到该子载波的用户是否已经获得了足够的频谱资源用以传输其业务请求数据,若是,则将其从后续的子载波分配过程中排除,避免资源浪费,即步骤 4~5,其中,τ 为每个资源调度时隙的长度。

2.3 宏微协同组网下基于微小区分簇的联合传输与无线资源分配

在 CRMC 计算出惩罚项 w_n^- 取值范围内所有候选微小区分簇配置并得到每一种小区分簇配置下

算法 3: 宏微协同组网下基于微小区分簇的联合传输与无线资源分配算法

1. 输入:各微小区服务用户当前的 CSI(信道增益)和业务请求信息 $T_{u_f},\forall f\in\mathscr{F},u_f\in\mathscr{U}_f$ 设定惩罚项 w_n^- 的取值范围 W^-
2. for $w_n^-\in W^-$
3. CRMC 根据算法 1 计算 w_n^- 下的候选微小区分簇配置
4. 各微小区簇内 CH 根据算法 2 计算簇内最优子载波分配策略,并将计算出的簇内用户加权和速率信息转发给 CRMC
5. end for
6. CRMC 比较所有可能微小区分簇配置下的网络加权和速率,确定最终的微小区分簇策略
7. 输出:微小区分簇策略和对应的各微小区簇内最优子载波分配策略

相应的各微小区簇内最优子载波分配策略后，如图 2 所述，CRMC 会比较所有可能微小区分簇配置下的网络加权和速率，选择最大的一项所对应的微小区分簇配置作为最终的微小区分簇策略。结合图 2、算法 1 和算法 2，本文提出的宏微协同组网下基于微小区分簇的联合传输与无线资源分配算法具体总结如算法 3 所示。

3　仿真结果和讨论

3.1　仿真部署

为了验证本文提出的宏微协同组网下基于微小区分簇的联合传输与无线资源分配算法的正确性，基于表 1 给出的仿真场景参数搭建系统级仿真平台，考虑一个 0.5 km×0.5 km 的宏微协同组网下行传输场景，宏微基站间全频率复用所有可用子载波。MBS 位于网络中心，多个单天线 mRBSs 在 MBS 覆盖范围内随机部署，且其覆盖半径为 100 m。此外，假设网络中所有用户受到的快衰均服从瑞丽平坦衰落模型。

进一步，将算法 3 同文献[3]中基于多点协作联合接收的分簇与资源分配方法和文献[6]中的基于非完全着色的干扰协调方案作对比（分别用 Proposed，Coloring Clustering Based 和 JR-CoMP 表示），并对仿真结果进行讨论分析，以评估本文提出的算法所能带来的系统性能增益。

表 1　仿真参数

仿真参数	值
MBS 最大发射功率/dBm	46
mRBS 最大发射功率/dBm	27
MBS 发射天线数/(Omni)	128
可用子载波个数	100
单个子载波带宽/kHz	15
路径损耗模型/(d[km])	157.4+32×log10(d)
噪声功率谱密度/(dBm·Hz^{-1})	−174
时隙长度/ms	10
用户业务请求数据量	服从均值为 λkbits 的泊松分布
任一惩罚项 w_n^- 取值下微小区分簇迭代次数 t	20

3.2　仿真结果分析

图 3 描述了网络场景部署和任一惩罚项 w_n^- 取值下的微小区分簇示意图，其中，服务用户的平均业务请求量为 λ＝2 kbits。由图可以看出，此次仿真中共考虑了 10 个 mRBSs，执行本文所提出的基于相关聚类的微小区分簇算法后（算法 1），mRBS1 和 mRBS4 分为一个簇、mRBS2 和 mRBS10 分为一个簇、mRBS5 和 mRBS7 分为一个簇并且 mRBS3 和 mRBS6 分为了一个簇，其余 mRBSs 则单独成簇。进一步，图 4 表示了微小区分簇前后所有 SUE 的 SINR 分布的变化情况。可以看出，微小区分簇后，由于各簇内 SUE 受到的小区间同层干扰降低，且簇内所有 mRBSs 对其服务用户进行联合传输，用户的信干噪比可因此得到改善增强。对于终端来说，微小区分簇可以达到无缝地扩大小区覆盖范围，提升小区内覆盖信号强度。

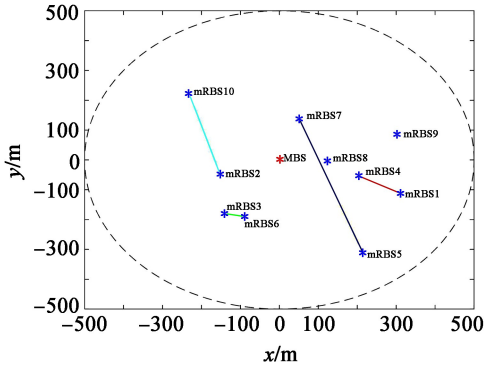


图 3　网络场景部署和任一惩罚项 w_n^- 取值下的微小区分簇示意图

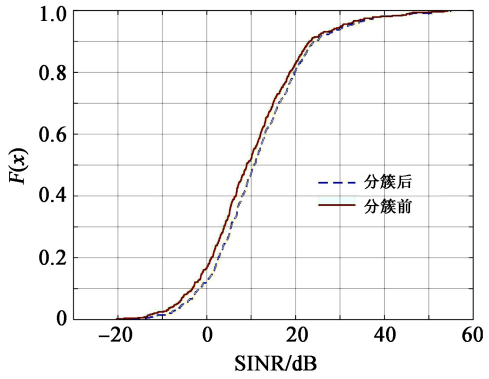


图 4　微小区分簇前后 SINR 分布

针对图 3 所示的网络场景部署和微小区分簇结果，更为直观地，图 5 和图 6 分别展示了微小区分簇前后所考虑的网络场景的覆盖强度（SINR）示意图。从图 5 和图 6 中可以清晰地看到，在本文所考虑的大规模 MIMO 系统宏微同频组网场景中，引入低功

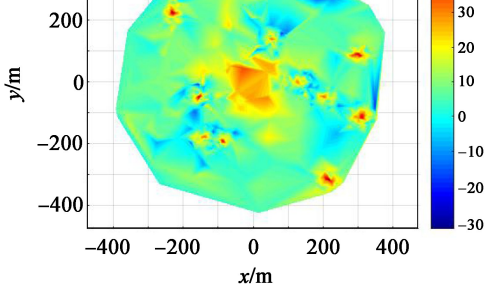


图 5　微小区分簇前网络场景覆盖强度示意图

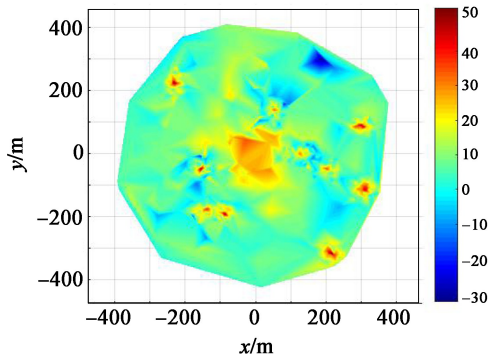


图 6 微小区分簇后网络场景覆盖强度示意图

率且部署灵活简便的微基站，能够在不引入强干扰的前提下，很好地对网络覆盖盲点、盲区进行补盲，并提升话务热点地区的容量。进一步，微小区分簇前后 MBS 的覆盖强度没有受到什么影响，但微小区分簇可以明显提高微小区覆盖范围内的信号强度，提升网络整体的覆盖性能，促进实现网络的连续深度覆盖，更好地满足服务用户的 QoS 需求。

图 7 描述了本文提出的宏微协同组网下基于微小区分簇的联合传输与无线资源分配算法的系统性能（微小区实际和吞吐量、微小区加权和速率和微小区平均加权和速率）随 mRBS 数量的变化情况。其中，微小区实际和吞吐量是指从网络中所有 SUE 的当前请求业务数据量 $T_{u_f}, \forall f \in \mathcal{F}, u_f \in \mathcal{U}_f$ 中实际发送出去的数据量，其由各 SUE 当前时隙的信道质量和所分配到的子载波数量决定，且最大值不会超过各 SUE 当前请求业务数据量的总和，即 $\sum_{f\in\mathcal{F}}\sum_{u_f\in\mathcal{U}_f} T_{u_f}$。此外，微小区加权和速率即为优化问题(5)中的目标函数。在此仿真实验中，假设网络中所有用户的业务请求数据量服从均值 $\lambda=2$ kbits 的泊松分布。从图 7 可以看出，微小区实际和吞吐量与微小区加权和速率均随着 mRBS 的增多不断变大，但增长速率却随着 mRBS 的数量越大逐渐降低。另一方面，微小区平均加权和速率随着 mRBS 数量的增多逐渐减小。这是因为，所考虑的宏微协同组网场景中，宏微基站间全频率复用所有可用子载波，因此，mRBS 的数量越多，频谱资源的复用因子越大，资源利用率也就越高，系统在一个时隙内所能传输的数据量和总的吞吐量也就越大。但是，当 mRBS 数量越多，微小区间的同层干扰也就越大，虽然微小区分簇和簇内 mRBSs 联合传输可以降低用户所受到的同层干扰，但是如前所述，小区分簇实际上是微基站以牺牲部分频谱为代价以换取小区间干扰抑制的好处，因而小区分簇所带来的干扰部分抑制/消除增益小于 mRBS 数量增多时引入的严重同层干扰和带宽牺牲所带来的负面影响。因此，微小区实际和吞吐量和微小区加权和速率的增长速率会降低，微小区平均加权和速率会随着 mRBS 数量的增多而逐渐减小。

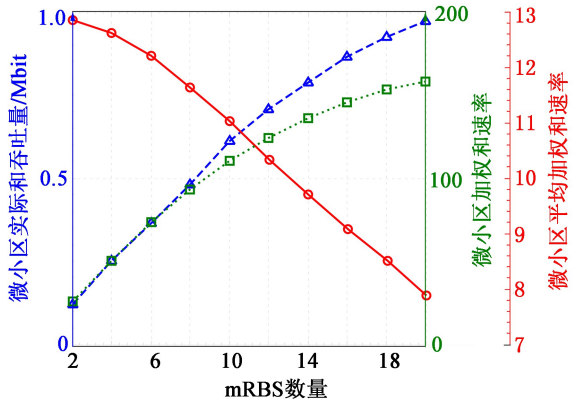


图 7 基于微小区分簇的联合传输与无线资源分配算法系统性能

图 8 比较了不同算法下系统平均和频谱效率（Spectral Efficiency，SE）随 mRBS 数量的变化情况，其中，网络服务用户的平均业务请求量为 $\lambda=2$ kbits。从图中可以看出，三种算法下的系统平均和谱效均随着 mRBS 数量的增多逐渐增大，但增长速率是逐渐减小的。此外，本文所提出的基于小区分簇的联合传输与无线资源分配算法下的系统平均和谱效要优于其他两种算法（Coloring Clustering Based 和 JR-CoMP）。这是因为，mRBS 的数量越多，频谱资源的复用因子越大，频谱效率也就越大。相反，mRBS 的数量越多，网络中微小区间的同层干扰和宏微基站间的跨层干扰也就越严重，因而会影响系统平均和谱效的增加。对于 Coloring Clustering Based 算法，文献[6]没有考虑小基站簇内联合传输和 MBS 配备多天线波束赋形所具有的传输性能优势，因而其系统平均和谱效会低于本文所提算法。进一步，在 JR-CoMP 中，文献[3]对用户簇进行多重子频段分配，为包含同一小小区用户的多个簇分配不同子频段，并且尽量为每个用户簇多分配子频段，这相当于在各用户簇间正交分配（或部分复用）频谱资源，频谱资源复用程度不高，资源利用率不大。在网络中的频率资源够用的情况下，mRBS 数量的增多会提高 JR-CoMP 算法下的系统平均和谱效，但随着 mRBS 数量的持续增加，网络中的服务用户也越来越多，此时频谱资源不够用，系

统平均和谱效也相应地到达了瓶颈。

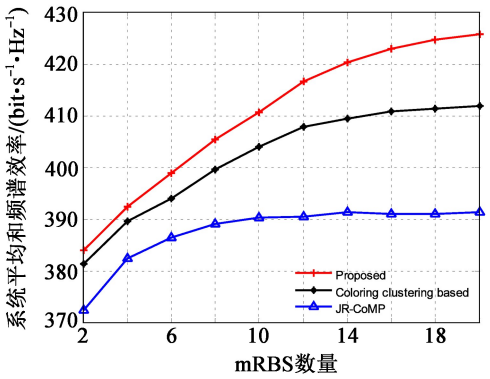


图 8　系统平均和频谱效率 vs. mRBS 数量

图 9 展示了不同算法下微小区平均频谱资源利用率随平均业务请求量 λ 的变化情况，其中，网络中共有 10 个 mRBSs。可以看出，随着用户的平均业务请求量越大，三种算法下的微小区平均频谱资源利用率也越来越大，且资源利用率的增长幅度也逐渐变大。此外，Coloring Clustering Based 和 JR-CoMP 下的平均频谱资源利用率均高于本文提出的基于小区分簇的联合传输与无线资源分配算法下的平均频谱资源利用率。这是因为，随着 SUE 的平均业务请求量 λ 逐渐变大，各微小区（簇）内待传的业务数据量也就越多，相应的会消耗更多的子载波，同时系统将子载波分配给待传业务量大但信道条件不好的 SUE 的情况也会更大概率地发生，因而对子载波资源的需求量也会逐渐提升。进一步，文献[6]没有考虑小基站簇内联合传输和 MBS 配备多天线波束赋形所具有的传输性能优势，文献[3]在各个用户簇间正交分配（或部分复用）频谱资源，频谱资源复用程度不高，且也没有考虑 MBS 多天线波束赋形所具有的传输性能增益。因此，同一平均业务请求量 λ 下，Coloring Clustering Based 和 JR-CoMP 算法会消耗更多的子载波资源。

图 10 比较了不同算法下 SUE 平均业务请求队列随时间的变化情况，其中，网络中共有 10 个 mRBSs，且设各 SUE 在每一时隙内的平均业务请求量为 λ＝3 kbits。从图 10 可以看出，三种算法下的 SUE 平均业务请求队列（数据积压量）均随着时间的推移逐渐增多，且本文提出的基于小区分簇的联合传输与无线资源分配算法下的业务请求数据积压量累积得最为缓慢，JR-CoMP 算法下的业务请求数据积累的最快。这是因为，由于系统可用的子载波数量是有限的，当各 SUE 当前时隙请求的业务数据量发送不完时，会将来不及发送出去的数据暂存下来，等待下一时隙再发送。因为本文所考虑的网络场景中联合考虑了 MBS 多天线预编码技术、微小区间分簇、微小区簇内联合传输，而文献[6]没有考虑小基站簇内联合传输，文献[6,3]均没有考虑 MBS 多天线波束赋形所能带来的传输性能增益，因此，由图 8 和图 9 均可以看出，同一平均业务请求量 λ 下，Coloring Clustering Based 和 JR-CoMP 算法会消耗更多的子载波资源，因而在子载波资源不充足时，本文所提算法能在有限的频谱资源下传输相对更多的业务请求数据，业务请求队列中积压的数据量同其他两种算法相比也相对较少，累积速度也相对较低。

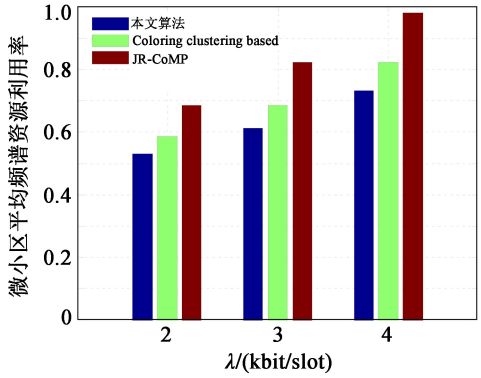


图 9　微小区平均频谱资源利用率 vs. 平均业务请求量 λ

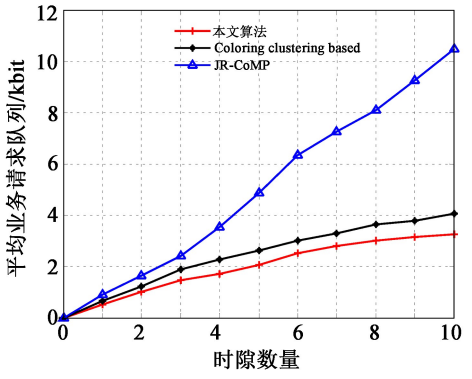


图 10　平均业务请求队列 vs. 时隙数量

4　结束语

针对宏微协同组网下无线资源管理问题，本文联合考虑宏基站多天线波束赋形、微小区间分簇、微小区簇内联合传输和动态频谱分配，建立了一个以最大化微小区加权和速率为目标的混合整数非线性规划问题，进而提出一种基于微小区分簇的联合传输与无线资源分配算法，实现了在降低网络干扰的同时提高了系统吞吐量和频谱资源利用率。

参考文献：

[1] Cisco System. Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update(2016-2021)[R]. Cisco System, White Paper, 2017.

[2] 邱 勇，乌云霄，张 勃，等. LTE宏微协同组网性能评估[J]. 移动通信，2017，41(3)：81-86.
Qiu Yong, Wu Yunxiao, Zhang Qing, et al. Performance evaluation of LTE macro-micro co-networking[J]. Mobile Commun., 2017, 41(3): 81-86.

[3] 田心记，张浩天，李晓静，等. UDN中基于JR-CoMP的分簇和资源分配方案[J]. 北京邮电大学学报，2019，42(3)：72-78.
Tian Xinji, Zhang Haotian, Li Xiaojing, et al. JR-CoMP-based clustering and resource allocation scheme in UDN[J]. J. of Beijing University of Posts and Telecommun., 2019, 42(3): 72-78.

[4] 乌日罕. 基于eICIC的异构网络干扰管理研究[D]. 北京：北京邮电大学，2019.
Wu Rihan. Interference management of heterogeneous networks based on eICIC[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommun., 2019.

[5] 刘 辉，宋家旺，代云霞，等. 异构网络中基于用户划分的资源分配与功率控制方案[J]. 计算机工程与科学，2019，41(8)：1398-1405.
Liu Hui, Song Jiawang, Dai Yunxia, et al. A resource allocation and power control strategy based on user partitioning in heterogeneous networks[J]. Computer Engin. & Science, 2019, 41(8): 1398-1405.

[6] Liu Tingting, Zhang Jianming. A coloring-based dynamic channel allocation algorithm for ultra-dense network[EB/OL]. Beijing: Sciencepaper Online[2019-03-19]. http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201903-237.

[7] Abdelnasser A, Hossain E, Kim D I. Clustering and resource allocation for dense femtocells in a two-tier cellular OFDMA network[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2014, 13(3): 1628-1641.

[8] 唐 伦，魏延南，马润琳，等. 虚拟化云无线接入网络下基于在线学习的网络切片虚拟资源分配算法[J]. 电子与信息学报，2019，41(7)：1533-1539.
Tang Lun, Wei Yannan, Ma Runlin, et al. Online learning-based virtual resource allocation for network slicing in virtualized cloud radio access network[J]. J. of Electronics & Information Technol., 2019, 41(7): 1533-1539.

[9] Tang L, Wei Y, He L, et al. Queue-aware dynamic resource reuse and joint allocation algorithm in self-backhaul small cell networks[J]. IEEE Access, 2018, 6: 61077-61090.

[10] Tang L, Wei Y, Chen W, et al. Delay-aware dynamic resource allocation and ABS configuration algorithm in HetNets based on lyapunov optimization[J]. IEEE Access, 2017, 5: 23764-23775.

[11] 秦 彩. 面向下一代无线通信网络的干扰管理技术研究[D]. 北京：北京邮电大学，2019.
Qin Cai. Research on interference management technology for next generation wireless communication network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommun., 2019.

[12] Hao W, Zeng M, Chu Z, et al. Energy-efficient resource allocation for mm wave massive MIMO HetNets with wireless backhaul[J]. IEEE Access, 2018, 6: 2457-2471.

[13] Chen L, Yu F R, Ji H, et al. Dynamic resource allocation in next generation cellular networks with full-duplex self-backhauls[J]. Wireless Networks, 2016.

[14] Lai W K, Hsu C, Kuo Y. QoS-guaranteed user association and resource allocation with CoMP JT in ultra-dense networks[C]//Proc. of 20th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium, 2019: 1-6.

[15] Lee C, Kobayashi M, Wei H, et al. Adaptive resource allocation for ICIC in downlink NOMA systems[C]// Proc. of IEEE 90th Vehicular Technol. Conf., 2019: 1-6.

[16] 郑创明，刘龙伟，张海林，等. 超密集网络中宏微协作的干扰最小化资源分配[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版)，2019，46(2)：6-11.
Zheng Chuangming, Liu Longwei, Zhang Hailin, et al. Cross-tier cooperation resource allocation for interference minimization in ultra-dense networks[J]. J. of Xidian University (Natural Science Edition), 2019, 46(2): 6-11.

[17] Zhang H, Yang K, Zhang S. Resource allocation based on interference alignment with clustering for data stream maximization in dense small cell networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 161831-161848.

[18] Sun P, Zhang H, Ji H, et al. Small cells clustering and resource allocation in dense network with mobile edge computing[C]// Proc. 2019 IEEE Wireless Commun. and Networking Conf., 2019: 1-6.

[19] Yang L, Wu D, Cai Y, et al. Learning-based user clustering and link allocation for content recommendation based on D2D multicast communications[J]. IEEE Trans. on Multimedia, 2019, 99: 1-1.

作者简介：

施加轮(1977—)，男，高级工程师，主要研究方向为电力光纤通信网和物联网应用技术。