

小蜂窝网络中不活跃用户的最优能量效率资源分配方案

黄晓舸* 樊伟伟 曹春燕 陈前斌

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

摘要: 针对5G网络中因小区重叠覆盖区域的干扰问题,为缓解密集小蜂窝网络中移动用户的业务连续性,提高频谱资源利用率,进而最大化整个网络平均能量效率问题。该文提出一种基于不活跃用户的最优能量效率资源分配方案(EEI)。首先,该方案依据不活跃用户通知区域,建立以用户为中心的虚拟小区,小区内小蜂窝基站可协作为用户提供通信服务,提高用户通信质量,缓解小蜂窝同层干扰,减少切换信令开销。其次,基于Lyapunov优化理论,该方案将整体网络平均能量效率优化问题,转换为用户最优传输资源分配和最优功率分配两个子问题,在最大化系统平均能量效率同时保证系统队列稳定性。由于该文将原优化问题进行了松弛,所得结果是局部最优解,而不是全局最优解。仿真结果表明,该文提出的基于不活跃用户的最优能量效率资源分配算法,其系统能量效率优于对比算法而计算复杂度较高。

关键词: 无线通信; 能量效率; 用户移动性; 小区虚拟化技术; Lyapunov优化; 不活跃用户

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)03-0637-08

DOI: [10.11999/JEIT190303](https://doi.org/10.11999/JEIT190303)

Energy Efficient Resource Allocation Scheme Based on Inactive Users in Small Cell Networks

HUANG Xiaoge FAN Weiwei CAO Chunyan CHEN Qianbin

(College of Communication and Information Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Considering the interference problem of overlapping areas of cells, the service continuity of mobile users and the utilization of spectrum resources in the 5G network, an Energy Efficient resource allocation scheme for the Inactive user(EEI) is proposed. Firstly, a user-centered virtual cell is generated based on the notification area of the inactive users, and the intra-cell next-generation NodeBs (gNBs) could cooperatively provide communication services for users to improve the communication quality, lower the inter-cell interference, and reduce the handover signaling overhead. Secondly, Lyapunov optimization method is used to maximize the energy efficiency of the network, while ensuring the stability of the data queue. To make the optimization problem tractable, the scheme is decomposed into two sub-problems: the optimal transmission resource allocation and optimal transmission power allocation. Notice that, the optimal solutions are local optimal, which are based on the relaxed optimization problem. The simulation results show that the proposed energy efficiency resource allocation scheme based on the inactive users could achieve a better performance than the comparison algorithms, in the price of higher computational complexity.

Key words: Wireless communication; Energy efficiency; User mobility; Cell virtualization technology; Lyapunov optimization; Inactive user

1 引言

随着物联网和大规模机器通信的快速发展,网

络中因智能终端和各种用户设备数量激增产生日益严峻的数据业务,小蜂窝网络应运而生^[1]。然而,在密集部署小蜂窝时,将面临小区重叠覆盖,小区间干扰严重,切换信令开销大,乒乓效应等问题^[2]。为了应对挑战,提出以用户为中心的小区虚拟化技术^[3]。文献^[4]和文献^[5]研究了以用户为中心的小区虚拟化资源分配方式,将围绕用户的多个实体小区组成一个虚拟小区,小区内节点通过协作为用户服务,改善通信质量,提升用户体验。

5G中提出一种新的不活跃(Inactive)用户状

收稿日期: 2019-04-30; 改回日期: 2019-10-25; 网络出版: 2019-11-07

*通信作者: 黄晓舸 huangxg@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61831002), 重庆市科委重庆市基础研究及前沿探索项目(cstc2018jcyjAx0383)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61831002), The Innovation Project of the Common Key Technology of Chongqing Science and Technology Industry (cstc2018jcyjAx0383)

态, 该状态能在空闲(Idle)和连接(Connected)状态之间实现快速状态转换, 降低频繁状态转换时的信令开销, 减少系统接入时间, 减少用户在不活跃状态期间能耗, 最小化用户传输时第1个分组延迟^[6]。由于不活跃状态下用户可实现低功耗, 低延迟, 低信令开销以及接入网(Radio wireless Network, RAN)和下一代核心网络(Next Generation Core network, NGC)功能分离, 因此成为5G中最主要的用户状态^[7]。

为进一步提高用户定位的精准性, 并有效减少寻呼用户开销, 不活跃用户需要配置合适的通知区域(RAN Notification Area, RNA)。文献^[8]和文献^[9]描述了一个高效的跟踪区域列表管理框架, 旨在找到最优的跟踪区域划分, 然后再分配给用户。当前, 3GPP为不活跃用户提出了3种不同粒度的通知区域配置方法, 即: 小区列表配置方案、RAN区域标识列表配置方案以及跟踪区域标识列表配置方案。

能量效率是5G网络中的一个重要性能指标。文献^[10]研究了多天线多载波小蜂窝网络的能量效率最大化问题。在最小平均传输速率和比例公平的约束条件下, 通过优化基站和用户匹配、子载波分配和基站关闭方案, 最大化网络中的能量效率。在文献^[11]中, 作者根据流量负载在网络中随空间和时间发生变化, 引入了小区变焦技术达到网络负载均衡, 提升网络能效。然而, 目前的研究方案中, 同时考虑用户移动性, 系统能效, 系统稳定性并结合5G网络新用户状态的研究尚不完善。

为解决密集小蜂窝网络中移动用户的业务连续性和干扰问题, 提升通信服务质量和用户体验, 本文提出一种基于不活跃用户移动性的最优能效资源分配方案(Energy Efficient resource allocation scheme for the Inactive user, EEI)。

首先, 基于不活跃用户通知区域, 建立以用户为中心的虚拟小区, 小区内节点间以协作方式为提供服务。

其次, 为提高资源利用率, 进而最大化网络平均能效, 提出一种基于不活跃用户移动性的资源分配方案。根据用户数据包队列长度和信道质量, 基于Lyapunov优化, 求解网络最优能效。

最后, 将最大化网络的平均能效问题分解为用户最优传输资源分配(Optimal Transmission Resource Allocation, OTRA)和最优功率分配(Optimal Transmission Power Allocation, OTPA)两个子问题。通过软件仿真, 验证所提算法在最大化系统时间的平均能量效率的同时, 能够保证系统队列的

稳定性。由于本文将原优化问题进行了松弛, 所得结果是局部最优解, 不是全局最优解。

2 系统建模及分析

5G小蜂窝网络场景如图1所示, 网络由 M 个gNBs和 K 个用户构成, 并且用户和gNB随机分布在网络中, 位于RAN侧。NGC由接入与移动管理功能(Access and Mobile management Functions, AMF), 用户平面功能(User Plane Function, UPF)和策略控制功能(Policy Control Function, PCF)组成, RAN和NGC通过NG-C/U接口连接。假设一个资源块(Resource Block, RB)仅分配给一个gNB, 且只分配给该gNB中的一个用户使用。系统的总带宽被划分为 N 个相等带宽的RB, 每个RB的带宽为 $B=W/N$ 。在下行链路中, 用户可接受来自虚拟小区内多个gNB传输信号, 即虚拟小区内gNB采用多点协作传输技术(Coordinated Multiple Point, CoMP)方式为用户提供服务, 且协作的gNB之间使用不同RB传输用户数据。

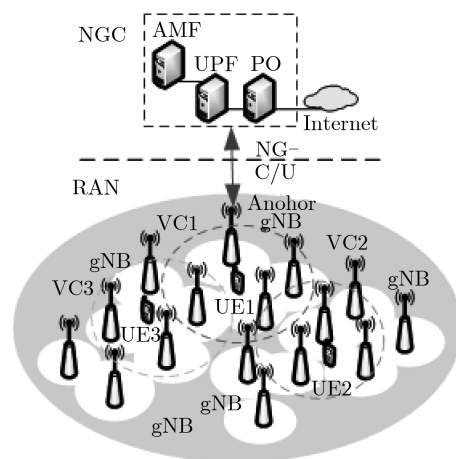


图1 以用户为中心的虚拟小区5G网络场景

虚拟小区建立模型 5G网络中, 若不活跃用户有数据传输需求时, 通过当前驻留的gNB转换为连接状态, 将用户当前通知区域作为候选虚拟小区列表, 用户检测通知区域中所有gNB信号强度, 经过锚点gNB筛选后建立以用户 k 为中心的虚拟小区。具体建立过程如下:

步骤1 不活跃用户 k 的数据包到达时, 用户 k 通过当前驻留的gNB m 接入网络, 转换为连接状态;

步骤2 用户 k 测量RNA中所有gNB参考信号(Reference Signal, RS)并将测量结果上报gNB m 。gNB m 根据测量结果将RS大于阈值的gNB上报锚点gNB;

步骤3 锚点gNB根据负载信息库，确定组建的gNB并将结果及小区配置信息下发gNB m ；

步骤4 gNB m 将虚拟小区配置信息分别发送给用户 k 和相应gNB构建以用户 k 为中心的虚拟小区，虚拟小区内传输节点以协作方式为用户提供服务。

由于用户的移动性，以用户为中心的虚拟小区包含的gNB将发生动态变化。随着用户移动，将添加满足条件的新gNB进入虚拟小区，移除不满足条件的gNB。由于用户在移动过程中没有发生切换，虚拟小区识别号不变。网络中锚点gNB控制用户虚拟小区动态调整，可减少密集小蜂窝基站网络中频繁的信令交互。

3 基于不活跃用户资源分配方案

3.1 优化问题建模

本模型中，每个RB只能分配给1个基站的1个用户使用，即用户之间不存在传输干扰。RB n 从第gNB m 到用户 k 的信噪比 (Signal Noise Ratio, SNR)表示为

$$\text{SNR}_{k,n,m} = \frac{p_{k,n,m}|h_{k,n,m}|^2}{\sigma_z^2} \quad (1)$$

其中， $p_{k,n,m}$ 为gNB m 在RB n 上到用户 k 发送功率， $h_{k,n,m}$ 是信道衰落复合增益， $h_{k,n,m}(t) = l_{k,m} \cdot g_{k,n,m} \circ l_{k,m}$ 为大尺度衰落因子，包含路径损耗 $d_{k,m}^{-\alpha}$ 和阴影衰落 $s_{k,m}$ 两部分，即 $l_{k,m} = \sqrt{cs_{k,m}d_{k,m}^{-\alpha}}$ ， c 为参考距离为1 km处的平均路径增益的中值， $s_{k,m}$ 是均值为零、标准差为 σ_{sh} 的对数阴影衰落变量， $d_{k,m}$ 是用户 k 到gNB m 的距离， α 是路径损耗指数。 $g_{k,n,m}$ 为小尺度衰落因子，它是零均值单位方差的独立同分布复高斯随机变量， σ_z^2 为加性高斯白噪声。

gNB m 在RB n 上用户 k 的传输速率为

$$r_{k,n,m}(t) = B \log_2(1 + \text{SNR}_{k,n,m}(t)) \quad (2)$$

系统在 t 时刻总的用户速率为

$$R_{\text{tot}}(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{k,m} b_{n,m} r_{k,n,m}(t) \quad (3)$$

其中， $a_{k,m} \in \{0, 1\}$ 是用户 k 与虚拟小区内gNB m 连接指示变量， $a_{k,m} = 1$ 表示用户 k 与gNB m 连接，反之 $a_{k,m} = 0$ 。 $b_{n,m} \in \{0, 1\}$ 是RB n 与gNB m 之间分配指示变量， $b_{n,m}$ 表示RB n 分配给gNB m ，否则 $b_{n,m} = 0$ 。

进一步，可得系统时间平均总速率为

$$\bar{R}_{\text{tot}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \sup \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E[R_{\text{tot}}(t)] \quad (4)$$

$E[\cdot]$ 表示 $R_{\text{tot}}(t)$ 的数学期望。

gNB为用户传输数据包产生的传输功率消耗为

$$P_t(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{k,m} b_{n,m} p_{k,n,m}(t) / \tau \quad (5)$$

其中， τ 为gNB功率放大效率。

同时，处于空闲状态时gNB会产生电路功率消耗，即

$$P_c(t) = M p_{\text{cir}} \quad (6)$$

因此，系统中所有gNB的功率消耗表示为

$$P_{\text{tot}}(t) = P_t(t) + P_c(t) \quad (7)$$

系统时间平均总功率消耗可表示为

$$\bar{P}_{\text{tot}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \sup \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} E[P_{\text{tot}}(t)] \quad (8)$$

设 t 时刻用户 k 下行链路队列长度为 $Q_k(t)$ ，队列更新过程可表示为

$$Q_k(t+1) = \max\{Q_k(t) - D_k(t), 0\} + A_k(t) \quad (9)$$

其中， $Q_k(0) = 0$ ， $A_k(t)$ 为用户 k 在时间 t 内数据包的到达数，服从泊松分布。 $D_k(t)$ 为用户 k 在时间 t 数据包的发包数，数据包大小 L ，单位为bit，由此可得

$$D_k(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{k,m} b_{n,m} r_{k,n,m}(t) / L \quad (10)$$

以最大化时间平均能量效率为目标的资源分配优化问题构建为

$$\left. \begin{aligned} \max_{\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{p}} \quad & \bar{\eta}_{\text{EE}} = \frac{\bar{R}_{\text{tot}}}{\bar{P}_{\text{tot}}} \\ \text{s.t.} \quad & C_1: \bar{Q}_k < \infty, \forall k \\ & C_2: \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{k,n,m}(t) \geq R_{\text{min}}, \forall k \\ & C_3: \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N a_{k,m} b_{n,m} p_{k,n,m}(t) \leq P^{\text{max}}, \forall m \\ & C_4: p_{k,n,m}(t) \geq 0, \forall k, n, m \\ & C_5: 1 \leq \sum_{m=1}^M a_{k,m} \leq M_k, \forall k; \sum_{k=1}^K a_{k,m} \geq 1, \forall m \\ & C_6: \sum_{m=1}^M b_{n,m} \leq 1, \forall n; \sum_{n=1}^N b_{n,m} \geq 1, \forall n \\ & C_7: a_{k,m}, b_{n,m} \in \{0, 1\}, \forall n, m \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中， C_1 为在最大化系统时间平均能量效率的同时保证每个用户的队列稳定的需求约束； C_2 为单个用户的最小传输速率需求约束； C_3 为单个gNB的最大传输功率约束； C_4 为单个用户的传输功率约束； C_5 表示多个gNB可以协同为一个用户服务，同时一个gNB可以分配给多个用户； C_6 表示一个RB只能

分配给一个gNB, 但每个gNB可以被分配多个不同的RB。

该优化目标函数是非凸性的分数形式, 其闭式解难以求得。因此根据Dinkelbach方法, 把式(11)中的目标函数转化为同等的线性形式求解, 式(12)所示

$$\begin{aligned} \max_{a,b,p} \quad & \bar{U} = \bar{R}_{\text{tot}} - q\bar{P}_{\text{tot}} \\ \text{s.t.} \quad & C_1 \sim C_7 \end{aligned} \quad (12)$$

其中, q 是引入的一个变量, 表示系统的时间平均能效值, 且 $q^{\text{opt}} = \max_{a,b,p} \frac{R_{\text{tot}}}{P_{\text{tot}}}$, q^{opt} 是系统能量效率的最大值。

3.2 Lyapunov优化问题建模

利用Lyapunov优化理论可以将原优化目标转换为在每一个时隙内的优化问题^[12]。通过最小化Lyapunov偏移函数与惩罚项之和的上界来进行最优资源和功率分配, 从而在系统队列稳定性和时间平均能效之间实现了平衡。

首先, 将所有的gNB的队列向量 $\mathbf{Q}(t) = (Q_k(t))$ 作为网络状态向量。基于Lyapunov优化理论, 系统的Lyapunov函数可以表示为

$$L(\mathbf{Q}(t)) = \frac{1}{2} \sum_{k \in K} (Q_k(t))^2 \quad (13)$$

进一步, 定义Lyapunov转移函数为

$$\Delta \mathbf{Q}(t) = \mathbb{E} \{ L(\mathbf{Q}(t+1)) - L(\mathbf{Q}(t)) | \mathbf{Q}(t) \} \quad (14)$$

根据队列的状态更新方程可得

$$(Q_k(t+1))^2 \leq (Q_k(t) - D_k(t) + A_k(t))^2 \quad (15)$$

进一步, 可得

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{Q}(t) = \mathbb{E} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sum_{k \in K} (Q_k(t+1))^2 - \sum_{k \in K} (Q_k(t))^2 \right] | \mathbf{Q}(t) \right\} \leq B + \mathbb{E} \left\{ \sum_{k \in K} Q_k(t) [A_k(t) - D_k(t)] | \mathbf{Q}(t) \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{其中, } B = \mathbb{E} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{k \in K} [A_k(t) - D_k(t)]^2 | \mathbf{Q}(t) \right\}.$$

Lyapunov 1阶转移惩罚项为

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{Q}(t) - \mathbb{E} \{ U(t) | \mathbf{Q}(t) \} \leq B \\ + \mathbb{E} \left\{ \sum_{k \in K} Q_k(t) [A_k(t) - D_k(t)] | \mathbf{Q}(t) \right\} \\ - \mathbb{E} \{ R_{\text{tot}}(t) - qP_{\text{tot}}(t) | \mathbf{Q}(t) \} \end{aligned} \quad (17)$$

控制参数 $V > 0$ 是用于平衡队列的稳定性和目标函数的权重因子。据此, 可将原优化问题表示为

$$\begin{aligned} \min_{a,b,p} \quad & \mathbb{E} \left\{ \sum_{k \in K} Q_k(t) [A_k(t) - D_k(t)] | \mathbf{Q}(t) \right\} \\ & - V \mathbb{E} \{ R_{\text{tot}}(t) - qP_{\text{tot}}(t) | \mathbf{Q}(t) \}, \\ \text{s.t.} \quad & C_2 - C_6 \end{aligned} \quad (18)$$

为降低问题的求解复杂度, 将该优化问题分解成两个等价的子优化问题: 最优传输资源分配优化和最优功率分配优化进行求解。

3.3 最优传输资源分配方案

以用户为中心的虚拟小区进行最优传输资源分配, 网络根据用户的信道状况动态选择虚拟小区内最优gNB进行数据传输, 并将传输质量最好的RB分配给对应gNB, 使每个用户都能获得传输质量最好的gNB和RB为之服务。设系统中有 K 个用户, N 个RB, M 个gNB, 可构成 K 个 $N \times M$ 的3维信道增益矩阵。若 $M \leq K \leq N$, 最优传输资源分配方案可分为以下3个步骤执行:

遍历信道增益矩阵 \mathbf{H} , 将信道增益最大的 $h_{k,n,m}$ 以及对应的gNB m , 分配给相应的用户 k , 并且将RB n 分配给gNB m 。删除RB n 所对应的信道增益矩阵的行, 删除用户 k 对应的整个信道增益矩阵。若此RB所关联的gNB不在用户的虚拟小区内, 则放弃此次资源分配, 重新选择合适的传输资源。继续遍历剩余的信道增益值, 重复上述步骤直到所有用户都有1个gNB和1个RB为之服务。

1个gNB可为多个用户服务, 即可被重复选择, 因此存在 $M - x$ ($1 \leq x \leq M$)个gNB未分配RB资源, 且剩余 $N - K$ 个RB待分配。基于此, 生成新的3维信道增益矩阵 $\mathbf{H}'(K, N - K, M - x)$ 。将信道增益最大的 $h_{k',n',m'}$ 以及对应的gNB m' , 分配给相应的用户 k' , 并将RB n' 分配给gNB m' 。删除RB n' 和gNB m' 对应的信道增益矩阵的行和列, 判断该gNB是否属于用户的虚拟小区, 如果不属于, 则放弃此次资源分配。重复上述步骤, 直到每个gNB至少都分配有RB, 由此可得每个用户所属的gNB集合 G_k , $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 。

通过以上步骤, 剩余 $N - K - M + x$ 个RB未分配, 由于gNB可以分配给多个用户, 所以仍然有 M 个gNB可分配RB。基于此, 生成3维矩阵 $\mathbf{H}''(K, N - K - M + x, M)$ 。同样基于矩阵 \mathbf{H}'' , 将最大增益值 $h_{k'',n'',m''}$ 及其对应的gNB m'' 分配给相应的用户 k'' , 并将RB n'' 分配给gNB m'' , 删除已分配的RB n'' , 直到所有RB分配完毕, 可得每个gNB的RB集合 R_m 。

综上所述, 最优传输资源分配算法流程如算法1。

3.4 最优功率分配方案

通过最优资源分配算法可得到虚拟小区内实际

算法1：最优传输资源分配算法(OTRA)

1. 初始化 G_k, R_m , 令 $k = \{1, 2, \dots, K\}, N = \{1, 2, \dots, N\}, s = \{1, 2, \dots, M\}, i = K$ 。
2. 每个用户分配一个RB, 为用户构造一个3维信道增益矩阵 $\mathbf{H}'(K, N, M)$
 - (1). 遍历信道增益矩阵 \mathbf{H} , 找到最大值 $h_{k,n,m}, G_k = G_k + \{m\}, R_m = R_m + \{n\}$, 更新 $k = k - \{k\}, N = N - \{n\}$;
 - (2). 删除 $\mathbf{H}(k, N, M), \mathbf{H}(:, n, :)$, 更新 $i = i - 1$, 返回(1);
 - (3). 直到 $|N|_{\text{re}} = N - K, |S|_{\text{re}} = M - x (1 \leq x \leq M), i = 0$ 。
3. 分配RB给剩余的gNB, 基于步骤1, 构造一个新的3维信道增益矩阵 $\mathbf{H}'(K, N - K, M - x)$
 - (1). 遍历矩阵 \mathbf{H}' , 找到最大值 $h'_{k',n',m'}, G_{k'} = G_{k'} + \{m'\}, R_{m'} = R_{m'} + \{n'\}$, 更新 $N_{\text{re}} = N_{\text{re}} - \{n'\}, S_{\text{re}} = S_{\text{re}} - \{m'\}$;
 - (2). 删除 $\mathbf{H}'(:, n', :), \mathbf{H}'(:, :, m')$, 更新 $|S|_{\text{re}} = M - x - 1$, 返回(1);
 - (3). 直到 $|N|_{\text{re}} = N - K - M + x, |S|_{\text{re}} = 0$ 。
4. 分配剩余的RB给用户, 构造3维信道增益矩阵 $\mathbf{H}''(K, N - K - M + x, M)$
 - (1). 遍历矩阵 \mathbf{H}'' , 找到最大值 $h''_{k'',n'',m''}, R_{m''} = R_{m''} + \{n''\}$, 更新 $N_{\text{re}} = N_{\text{re}} - \{n''\}$;
 - (2). 删除 $\mathbf{H}''(:, n'', :)$, 更新 $|N|_{\text{re}} = N - K - M + x - 1$;
 - (3). 直到 $|N|_{\text{re}} = 0$ 。
5. 算法结束

为用户传输数据的gNB和RB集合, 则优化问题式(18)中的约束条件 C_4, C_5, C_6 已满足, 因此原优化问题可转为式(19)的等价优化问题

$$\min_p \left\{ \begin{array}{l} E \left\{ \sum_{k \in K} Q_k(t) [A_k(t) - D_k(t)] | \mathbf{Q}(t) \right\} \\ - VE \{ R_{\text{tot}}(t) - qP_{\text{tot}}(t) | \mathbf{Q}(t) \}, \\ \text{s.t. } C_2 \sim C_4 \end{array} \right\} \quad (19)$$

在给定初始能效值 q 下, 为求得最优功率分配, 采用拉格朗日对偶法^[13], 拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L(p, a_k, b_m) = & \left\{ \sum_{k=1}^K Q_k(t) \left[A_k(t) - r_{k,n,m} \frac{(t)}{L} \right] \right\} \\ & - V \left(\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M r_{k,n,m}(t) \right. \\ & \left. - q \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M p_{k,n,m}(t) / t - qM p_{\text{cir}} \right) \\ & + \sum_{k=1}^K a_k \left(R_{\text{min}} - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M r_{k,n,m}(t) \right) \\ & + \sum_{m=1}^M b_m \left(\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{k,n,m}(t) - P^{\text{max}} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

其中, α_k 和 β_m 分别是约束条件 C_1 和 C_2 对应的拉格朗日乘子, 对 $\forall k, m$ 均满足 $\alpha_k \geq 0$ 和 $\beta_m \geq 0$ 。通过拉格朗日对偶分解法, 式(20)可以转化为关于主变量 p 的极小值问题, 以及拉格朗日为最优变量的对偶问题

$$\begin{aligned} G(\alpha_k, \beta_m) = & \min_p \tilde{L}(p, \alpha_k, \beta_m) \\ & + \sum_{k=1}^K Q_k(t) A_k(t) + VqM p_{\text{cir}} \\ & + \sum_{k=1}^K \alpha_k R_{\text{min}} - \sum_{m=1}^M \beta_m P^{\text{max}} \end{aligned} \quad (21)$$

其中,

$$\begin{aligned} \tilde{L}(p, \alpha_k, \beta_m) = & - \sum_{k=1}^K Q_k(t) r_{k,n,m}(t) / L \\ & - V \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M r_{k,n,m}(t) \\ & + Vq \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{p_{k,n,m}(t)}{t} \\ & - \sum_{k=1}^K \alpha_k r_{k,n,m}(t) \\ & + \sum_{m=1}^M \beta_m \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{k,n,m}(t) \end{aligned} \quad (22)$$

则式(21)的拉格朗日对偶函数可以定义为

$$\left. \begin{array}{l} \max G(a, b), \\ \text{s.t. } \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \end{array} \right\} \quad (23)$$

假设存在最优解 $p_{k,n,m}^*(t)$ 使得式(19)目标函数最优, 且满足所有约束条件。根据KKT条件^[14], 通过 $\tilde{L}(p, \alpha_k, \beta_m)$ 对 $p_{k,n,m}(t)$ 求导方程求解最优功率分配

$$p_{k,n,m}^*(t) = \left[\frac{B [\alpha_k + V + Q_k(t) / L]}{\left(\beta_m + \frac{Vq}{t} \right) \ln 2} - \frac{\sigma_z^2}{|h_{k,n,m}(t)|^2} \right]^+ \quad (24)$$

其中, $[X]^+ = \max\{0, X\}$ 。在拉格朗日求解过程中, 首先利用KKT条件得到拉格朗日乘子, 从而求得局部最优的功率分配后, 接着通过次梯度方法更新拉格朗日乘子^[15], 当迭代过程满足收敛条件时可求得式(24)的近似最优解。

拉格朗日乘子 α_k 和 β_m 更新方程如式(25)和式(26)

$$\alpha_k^{n+1} = \left[\alpha_k^n + \delta_1^n \left(R_{\min} - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M r_{k,n,m}(t) \right) \right]^+ \quad (25)$$

$$\beta_m^{n+1} = \left[\beta_m^n + \delta_2^n \left(\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{k,n,m}(t) - P^{\max} \right) \right]^+ \quad (26)$$

其中, n 代表迭代次数, $\delta_1^n \geq 0$ 和 $\delta_2^n \geq 0$ 为迭代更新步长。通过选择合适步长, 可保证算法收敛性。

4 仿真结果及分析

4.1 仿真场景及参数设置

本节对本文提出基于不活跃用户的最优能效资源分配算法(EEI), 在密集部署的小蜂窝场景下, 用MATLAB软件进行仿真分析, 并与以下3个算法在各方面进行性能对比: 最优功率分配算法(Optimal Power Allocation, OPA)^[16], 该算法优化传输功率、随机分配传输资源; 最优资源分配算法(Optimal Resource Allocation, ORA)^[12], 该算法优化资源分配, 随机分配传输功率; 随机资源等功率分配算法(Random Resource Allocation with Equal Power, EPA)^[17], 该算法随机分配传输资源, 等分传输功率。

本算法由最优传输资源分配算法、最优功率分配算法和基于最优传输功率的队列更新算法组成, 其计算复杂度为 $O(K \times M \times (N^2 - K \times (M+N))) + O(K^2 \times \text{tmax})$, tmax 为最大迭代次数, OPA计算复杂度为 $O(K+N+M) + O(K^2 \times \text{tmax})$, ORA计算复杂度为 $O(K \times M \times (N^2 - K \times (M+N))) + O(K)$, EPA计算复杂度为 $O(K+N+M) + O(K)$ 。

在仿真场景中, 路径损耗指数 $\alpha=3.7$, 阴影衰落标准差 $\sigma_{\text{sh}} = 8$ dB, 功率放大器效应 $\tau = 0.38$, $R_{\min} = 20$ kbps, $P^{\max} = 0.3$ W, 每个RB带宽为15 kHz, $\sigma_z^2 = -140$ dBm, $P_{\text{cir}} = 0.03$ W, 数据包到达模型为 $\lambda=4, 5, 6, 7$ packet/ms的泊松过程, $L = 500$ bit。

4.2 仿真结果分析

图2可知, EEI算法相比其他3种算法系统能量效率有显著提高。由于本文所提算法优化了资源块和用户的分配, 将传输质量最好的资源块和其对应

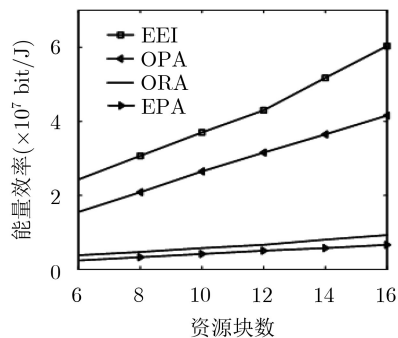


图2 不同方案的系统能效与资源块数的关系

的基站分配给对应的用户, 从而提升系统的传输速率, 进而优化整个系统的能量效率。从仿真结果可得, EEI算法, 当资源块数量从8增加到16时, 系统的能量效率增加近50%。

图3表示系统在资源块数和基站数固定时, 能量效率随用户数变化的关系。随着系统总用户数量增加, 4种算法的系统能量效率都逐步增加。由于随着用户数的增加, 系统总速率也随之增加, 从而系统的能量效率得到进一步提升。

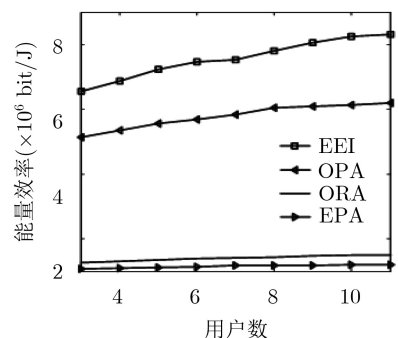


图3 不同方案的系统能效与用户数的关系

图4验证了系统能量效率随基站数变化的关系。当资源块数和用户数固定, 用户的分级集增益相同, 系统总速率不变。随着基站数增加, 消耗的电路功率增加, 而能量效率值的大小与总消耗功率成反比, 因此, 4种算法的能量效率均随着基站数的增加而呈降低趋势。尽管如此, EEI算法通过动态开关基站节约能耗, 其能量效率仍高于其他3种对比算法。

图5和图6为系统基站资源和资源块的匹配图。图5展示了以用户为中心的虚拟小区最优传输资源分配情况, 即用户和基站的关联关系。图6展示了系统中各个基站分配的资源块情况。当虚拟小区进行最优传输资源分配时, 网络根据用户信道状况动态选择当前虚拟小区内最优的基站为用户提供传输服务, 并将传输质量最好的资源块分配给基站, 使每个用户都能获得当前传输质量最好的基站和块。

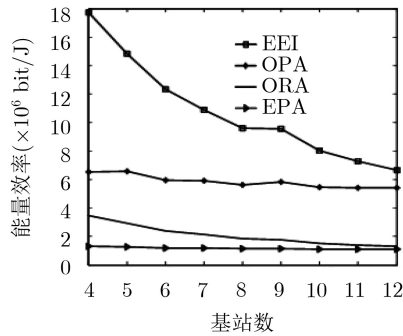


图4 不同方案的系统能效与基站数的关系

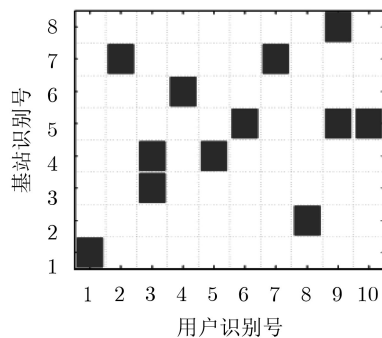


图5 系统中用户和基站匹配关系图

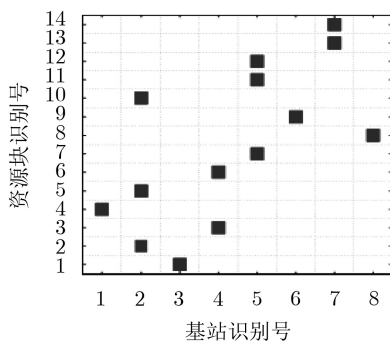


图6 系统中基站和资源块匹配关系图

图7中用户数据包服从到达率为 $\lambda=4, 5, 6, 7$ 的泊松分布。从仿真结果可知，系统的平均队列长度随着时间先快速增长，然后缓慢趋近于平稳，最后队列达到稳定状态。此外，随着数据包到达率增加，系统达到稳定时的平均队列长度越长。由此可得，本文所提算法能满足系统队列稳定性要求。

5 结束语

本文研究了5G小蜂窝网络中基于不活跃用户的最优能效资源分配方案，以提高资源利用率，减少小区间干扰，进而最大化网络的平均能量效率。首先，为缓解由用户移动性产生的干扰问题，基于不活跃用户通知区域，构造以用户为中心的虚拟小区。其次，基于Lyapunov优化理论，考虑用户数据队列稳定性，将整体网络平均能量效率优化问题

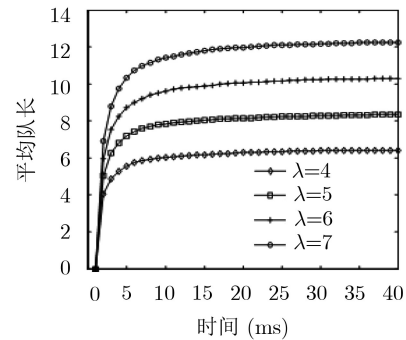


图7 系统平均队列长度与时间的关系

转换为最优传输资源分配和最优功率分配两个子问题。最后，通过仿真验证了本文所提方案有效性。

参考文献

- [1] ALLAL I, MONGAZON-CAZAVET B, AL AGHA K, *et al.* A green small cells deployment in 5G — switch ON/OFF via IoT networks & energy efficient mesh backhauling[C]. 2017 IFIP Networking Conference (IFIP Networking) and Workshops, Stockholm, Sweden, 2017: 1–2.
- [2] LAGEN S, AGUSTIN A, VIDAL J, *et al.* Distributed user-centric clustering and precoding design for CoMP joint transmission[C]. 2015 IEEE Global Communications Conference, San Diego, USA, 2015: 1–7. doi: [10.1109/GLOCOM.2015.7417090](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2015.7417090).
- [3] ZARIFI K, BALIGH H, MA Jianglei, *et al.* Radio access virtualization: Cell follows user[C]. The 25th IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication, Washington, USA, 2014: 1381–1385. doi: [10.1109/PIMRC.2014.7136384](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2014.7136384).
- [4] HUAWEI and HISILICON. Tdoc R2-1712576 RAN-based notification area configuration[S]. Reno, Nevada, USA: 3GPP, 2017.
- [5] MENG Na, ZHANG Hongtao, and LU Haitao. Virtual cell-based mobility enhancement and performance evaluation in ultra-dense networks[C]. 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Doha, Qatar, 2016: 1–6. doi: [10.1109/WCNC.2016.7564915](https://doi.org/10.1109/WCNC.2016.7564915).
- [6] DA SILVA I L, MILDH G, SÄILY M, *et al.* A novel state model for 5G Radio Access Networks[C]. 2016 IEEE International Conference on Communications Workshops, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016: 632–637. doi: [10.1109/ICCW.2016.7503858](https://doi.org/10.1109/ICCW.2016.7503858).
- [7] CATT. Tdoc R2-1710287 RAN-based notification area configuration[S]. Prague, Czech Republic: 3GPP, 2017.
- [8] BAGAA M, TALEB T, and KSENTINI A. Efficient tracking area management in carrier cloud[C]. Proc IEEE Global Communications Conference, San Diego, USA, 2015: 1–6. doi: [10.1109/GLOCOM.2015.7417110](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2015.7417110).

- [9] BAGAA M, TALEB T, and KSENTINI A. Efficient tracking area management framework for 5G networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(6): 4117–4131. doi: [10.1109/TWC.2016.2535217](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2535217).
- [10] RAO J B and FAPOJUWO A O. An analytical framework for evaluating spectrum/energy efficiency of heterogeneous cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(5): 3568–3584. doi: [10.1109/TVT.2015.2448593](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2448593).
- [11] WANG Feng, CHEN Wen, TANG Hongying, *et al.* Joint optimization of user association, subchannel allocation, and power allocation in multi-cell multi-association OFDMA heterogeneous networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(6): 2672–2684. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2678986](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2678986).
- [12] LI Yuzhou, SHI Yan, SHENG Min, *et al.* Energy-efficient transmission in heterogeneous wireless networks: A delay-aware approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(9): 7488–7500. doi: [10.1109/TVT.2015.2472578](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2472578).
- [13] BOYD S, VANDENBERGHE L, and FAYBUSOVICH L. Convex optimization[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(11): 1859. doi: [10.1109/TAC.2006.884922](https://doi.org/10.1109/TAC.2006.884922).
- [14] PALOMAR D P and CHIANG M. A tutorial on decomposition methods for network utility maximization[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(8): 1439–1451. doi: [10.1109/JSAC.2006.879350](https://doi.org/10.1109/JSAC.2006.879350).
- [15] LI Yuzhou, SHENG Min, ZHANG Yan, *et al.* Energy-efficient antenna selection and power allocation in downlink distributed antenna systems: A stochastic optimization approach[C]. 2014 IEEE International Conference on Communications, Sydney, Australia, 2014: 4963–4968. doi: [10.1109/ICC.2014.6884107](https://doi.org/10.1109/ICC.2014.6884107).
- [16] HE Chunlong, LI G Y, ZHENG Fuchun, *et al.* Energy-efficient resource allocation in OFDM systems with distributed antennas[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(3): 1223–1231. doi: [10.1109/TVT.2013.2282373](https://doi.org/10.1109/TVT.2013.2282373).
- [17] XU Guozhen, LIU An, JIANG Wei, *et al.* Joint user scheduling and antenna selection in distributed massive MIMO systems with limited backhaul capacity[J]. *China Communications*, 2014, 11(5): 17–30. doi: [10.1109/CC.2014.6880457](https://doi.org/10.1109/CC.2014.6880457).
- 黄晓舸: 女, 1982年生, 副教授, 研究方向为移动通信技术、认知无线电动态频谱分配。
- 樊伟伟: 男, 1996年生, 硕士生, 研究方向为移动通信技术、雾计算卸载方案。
- 曹春燕: 女, 1992年生, 硕士生, 研究方向为移动通信技术、LTE-U和Wi-Fi共存方案等。
- 陈前斌: 男, 1967年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为新一代移动通信网络、未来网络、LTE-Advanced异构小蜂窝网络。