

文章编号: 2095-4980(2022)02-0188-06

## 5G 异构超密度网络中吞吐量与覆盖的联合优化

吴 鹏

(淄博职业学院 信息工程系, 山东 淄博 255000)

**摘要:** 为了权衡 5G 异构超密度网络(Heterogeneous Ultra-Dense Networks, HUDN)中系统吞吐量最大化与覆盖优化间的冲突, 提出基于功率控制的吞吐量和覆盖的联合优化(CJTC)算法。首先, 推导系统吞吐量最大化的目标函数, 再通过凸优等式转换, 求解实现吞吐量最大化的基站发射功率; 然后, 推导切换失败率最小化的覆盖优化的目标函数, 再利用扩展技术, 并通过迭代联合求解最优的基站发射功率。仿真结果表明, 提出的 CJTC 算法的吞吐量和覆盖方面的性能优于同类算法。

**关键词:** 异构超密度网络; 吞吐量最大化; 覆盖优化; 功率控制; 切换

**中图分类号:** TN393

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2020180

## Power Control-based joint optimal for throughput and coverage in Heterogeneous Ultra-Dense Networks

WU Peng

(Department of Information Engineering, Zibo Vocational Institute, Zibo Shandong 255000, China)

**Abstract:** A power Control-based Joint optimal for Throughput and Coverage(CJTC) algorithm is proposed in order to balance the conflict between system throughput maximization and coverage optimization in 5G Heterogeneous Ultra-Dense Networks(HUDN). Firstly, the objective function of throughput maximization is derived, and the transmission power of the base station to achieve throughput maximization is solved by convex optimal equation conversion. Then, the objective function of coverage optimization with minimum switching failure rate is derived, and the optimal transmission power of the base station is obtained by iterative joint solution with extension technique. Experimental results show that the proposed CJTC algorithm is superior to other CJTC algorithms in throughput and coverage.

**Keywords:** Heterogeneous Ultra-Dense Networks; throughput maximization; coverage optimization; Power Control(PC); handover

随着智能设备爆炸式增长, 用户对移动数据的需求日益增大。基站致密化是满足 5G 网络需求的有效策略之一<sup>[1-2]</sup>。多个异构的用户设备形成了异构超密度网络(HUDN)。相比于宏基站, 微基站的密度很高。与传统超密度蜂窝网络不同, HUDN 内的微基站密度甚高, 达到每平方公里 1 000 个小基站。因此, 吞吐量的最大化以及基站覆盖的优化成为 HUDN 研究热点<sup>[3]</sup>之一。通过协调区间干扰(Inter-cell interference Coordination, IC)可最大化吞吐量; 通过移动性管理(Mobility Management, MM)可优化覆盖。

通过功率控制(PC)和扩展技术(Range Expansion, RE)可实施 IC 和 MM, 进而降低区切换(Handover, HO)的失败率。PC 就是控制微基站的发射功率, 是最大化吞吐量的有效方法。利用 PC 缓解信道间干扰, 降低网络内所有用户间的信号干扰噪声比(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR)<sup>[4-5]</sup>。然而, 基于吞吐量最大化的发射功率通常大于基于覆盖优化的发射功率<sup>[6]</sup>。为此, 引用 RE 策略解决它们的矛盾。选择一个最优的发射功率实现吞吐量最大化和覆盖优化的双重目标<sup>[7]</sup>。研究表明, RE 策略可用于空闲模式和连通模式环境下的覆盖管理。例如, 文献[8-9]通过寻找最优服务基站(Base Station, BS), 优化空闲模式的覆盖。文献[10]采用基于学习

收稿日期: 2020-04-29; 修回日期: 2020-05-28

基金项目: 2019 年淄博市重点研发计划资助项目(2019ZBXC207); 2020 年周村区第一批校城融合发展项目(2020ZCXCZH04)

或统计 HO 数据的 MM 策略。尽管文献[11]提出对用户协同和 PC 技术的联合优化，但是并没有讨论如何实现用户协同间的切换。作为 5G 网络的新兴网络，HUDN 可优化系统吞吐量和覆盖性能<sup>[3]</sup>。既可单使用 PC 或 RE，也可联合 PC 和 RE 提高系统性能。

为此，提出基于功率控制的吞吐量和覆盖的联合优化(CJTC)算法。先单独地推导实现吞吐量最大化和覆盖优化的微基站发射功率，再利用 RE，并通过迭代联合获取最优的微基站发射功率。仿真结果表明，提出的 CJTC 算法有效地提高了系统吞吐量。

## 1 系统模型

在  $\ell \times \ell$  区域内部署  $M$  个宏基站和  $N$  个微基站，如图 1 所示。 $M$  个宏基站构成宏基站集  $\Psi_M = \{BS_1, BS_2, \dots, BS_M\}$ ； $N$  个微基站构成微基站集  $\Psi_N = \{bs_1, bs_2, \dots, bs_N\}$ 。

系统内存在  $K$  个用户，这些用户构成用户集  $\Pi_K = \{u_1, u_2, \dots, u_K\}$ 。一个基站能够覆盖多个用户。基站给用户均匀分配资源，包括频率和发射功率。令  $h(k)$  表示第  $i$  个微基站  $bs_i$  服务于第  $k$  个用户  $u_k$ ，即用户  $u_k$  的源基站。

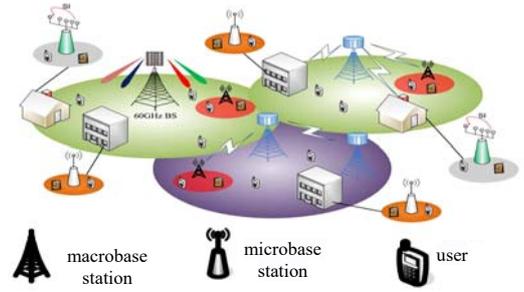


Fig.1 System model  
图 1 系统模型

$$\hat{h}(k) = \arg \max_{i \in \Psi_N} (\text{RSRP}_{k,i} + \Delta_i) \quad (1)$$

式中： $\text{RSRP}_{k,i}$  表示用户  $u_k$  从微基站  $bs_i$  所接收的参考信号接收功率(Reference Signal Received Power, RSRP)。 $\Delta_i$  表示微基站  $bs_i$  的 RE 偏差量(RE Bias, REB)，其定义如式(2)所示：

$$\Delta_i = p_i^C - p_i^T, \forall i \in \Psi_N \quad (2)$$

式中： $p_i^C$  表示微基站  $bs_i$  的最优覆盖的发射功率； $p_i^T$  表示微基站  $bs_i$  的最大化吞吐量的发射功率。

令  $\gamma_k$  表示用户  $u_k$  从源基站  $h(k)$  所接收的 SINR，其定义如式(3)所示：

$$\gamma_k = \frac{p_{h(k)} g_{k,h(k)}}{n_k + \sum_{i \neq h(k)} p_i g_{k,i}} \quad (3)$$

式中： $p_{h(k)}$  表示基站服务于用户  $u_k$  时的发射功率； $g_{k,h(k)}$  表示用户  $u_k$  与源基站间的信道增益； $p_i$  表示微基站  $bs_i$  的发射功率； $g_{k,i}$  表示用户  $u_k$  与微基站  $bs_i$  间信道增益； $n_k$  表示用户  $u_k$  处的噪声功率。

最后，利用效用函数之和表述系统吞吐量：

$$S(\mathbf{p}) = \sum_{k=1}^K U_k(\gamma_k) \quad (4)$$

式中： $\mathbf{p} = \{p_i\}, \forall i \in N$  表示所有微基站的发射功率集； $U_k(\gamma_k)$  表示用户  $u_k$  的效用函数。

## 2 CJTC 算法

### 2.1 最大化吞吐量的发射功率

CJTC 算法的目的在于优化微基站的发射功率，进而最大化系统吞吐量。为此，建立式(5)的优化函数：

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{p}} \quad & S(\mathbf{p}) = \sum_{k=1}^K U_k(\gamma_k) \\ \text{s.t.} \quad & p_i^{\min} \leq p_i \leq p_i^{\max}, \forall i \in \Psi_N \\ & \gamma_k^{\min} \leq \gamma_k, \forall k \in K \end{aligned} \quad (5)$$

式中，利用  $p_i^{\min}$  和  $p_i^{\max}$  对微基站的发射功率进行限定，将微基站的发射功率限定在一定的范围之内。为了防止通信中断，所有用户的发射功率均大于  $\gamma_k^{\min}$ 。

假定宏基站的发射功率为常数。利用香农公式，建立香农效用函数：

$$U_k(\gamma_k) \equiv B_k \log_2(1 + \gamma_k) \quad (6)$$

式中： $B_k$  表示分配给用户  $u_k$  的带宽。

由于式(5)为非凸的优化问题，通过近似处理将其转化为凸优等式形式。近似处理过程如下：在多数通信环

境下  $\gamma_k \gg 1$ 。因此, 可将  $B_k \log_2(1+\gamma_k)$  近似为  $B_k \log_2(\gamma_k)$ 。再引用辅助参数  $q_k$ , 使其大于式(3)中的分母, 即  $q_k \geq n_k + \sum_{i \neq h(k)}^N p_i g_{k,i}$ 。

定义集  $\mathbf{q} = \{q_k\}$ , 且  $\forall k \in K$ 。并令  $p_i = e^{x_i}$ ,  $q_k = e^{y_k}$ 。将式(5)改写成凸优等式形式:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{p}, \mathbf{q}} \quad & \sum_{k=1}^K U_k \left( p_{h(k)} g_{k,h(k)} q_k^{-1} \right) \\ \text{s.t.} \quad & p^{\min} \leq p_i \leq p^{\max}, \forall i \in \Psi_N \\ & \gamma^{\min} \leq p_{h(k)} g_{k,h(k)} q_k^{-1}, \forall k \in K \\ & q_k \geq n_k + \sum_{i \neq h(k)}^N p_i g_{k,i}, \forall k \in K \end{aligned} \quad (7)$$

利用拉格朗日对偶法(Lagrangian Duality Theory, LDT), 并采用对偶乘子  $\lambda_k$  和  $\mu_k$ , 它们分别对应于变量  $q_k$  和  $\gamma^{\min}$ 。再采用次梯度算法求解式(7)。引用参数  $\boldsymbol{\omega} = \{\mathbf{x}, \mathbf{y}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}\}$ , 其中  $\mathbf{x} = \{x_i\}, \forall i \in M+N$ ;  $\mathbf{y} = \{y_k\}, \forall k \in K$ ;  $\boldsymbol{\lambda} = \{\lambda_i\}, \forall i \in M+N$ ;  $\boldsymbol{\mu} = \{\mu_k\}, \forall k \in K$ 。最后, 可获取式(7)的解:

$$x_k(t+1) = \left[ x_k(t) - \beta \frac{\partial L(\mathbf{w})}{\partial x_k} \Big|_{\mathbf{w}(t)} \right]_{x^{\min}}^{x^{\max}} \quad (8)$$

$$y_k(t+1) = y_k(t) - \beta \frac{\partial L(\mathbf{w})}{\partial y_k} \Big|_{\mathbf{w}(t)} \quad (9)$$

$$\lambda_k(t+1) = \left[ \lambda_k(t) + n_k e^{-y_k} + \sum_{i \in N \setminus \{h(k)\}} e^{x_i - y_k} g_{k,i} - 1 \right]^+ \quad (10)$$

$$\mu_k(t+1) = \left[ \mu_k(t) + \left( \gamma^{\min} e^{-y_k - x_{h(k)}} g_{k,h(k)}^{-1} - 1 \right) \right]^+ \quad (11)$$

式中:  $\beta$  为步长;  $x^{\min} = \ln(p^{\min})$ ;  $x^{\max} = \ln(p^{\max})$ ;  $[\cdot]_{x^{\min}}^{x^{\max}}$  表示超出  $[x^{\min}, x^{\max}]$  范围的值;  $[\cdot]^+$  表示非负的实数。

通过对式(8)和式(11)的迭代, 获取微基站  $bs_i$  的最优发射功率  $x_i^*$ , 即  $p_i^T = e^{x_i^*}$ 。因此, 所有微基站的最优发射功率为:

$$\mathbf{P}^T = \{p_i^T\}, \forall i \in N \quad (12)$$

## 2.2 最大化吞吐量的发射功率

优化覆盖的发射功率旨在减少切换失败的次数。过早切换会形成覆盖重叠, 而过晚切换又会产生覆盖空洞。如图 2(a)所示, 用户  $u_k$  与源基站的  $RSRP_{k,h(k)}$  仍大于阈值  $th_{A1}$ , 此时已将用户  $u_k$  切换至目标基站  $j$ 。这就形成覆盖重叠, 并且导致严重干扰; 将此事件称为 A1 事件。若用户  $u_k$  与源基站的  $RSRP_{k,h(k)}$  已小于阈值  $th_{A2}$ , 还未将用户  $u_k$  切换至目标基站  $j$ , 这就形成覆盖空洞, 如图 2(b)所示。将此事件称为 A2 事件。

为缓解覆盖空洞和覆盖重叠问题, 构建新的效用函数:

$$f(p_i) = C_{ov}(p_i) + C_{hol}(p_i), \forall i \in \Psi_N \quad (13)$$

式中  $C_{ov}(\cdot)$ ,  $C_{hol}(\cdot)$  分别表示微基站的覆盖重叠、覆盖空洞区域。

CJTC 算法旨在同时减少覆盖空洞和覆盖重叠区域, 即优化覆盖功率。优化覆盖功率等价于最小化效用函数  $f(p_i)$ 。因此, 可建立式(14)的优化等式:

$$\begin{aligned} \arg \max_{\mathbf{p}} \quad & f(\mathbf{p}) \\ \text{s.t.} \quad & p^{\min} \leq p_i \leq p^{\max}, \forall i \in \Psi_N \\ & 0 \leq C_{ov}(p_i), \forall i \in \Psi_N \\ & 0 \leq C_{hol}(p_i), \forall i \in \Psi_N \end{aligned} \quad (14)$$

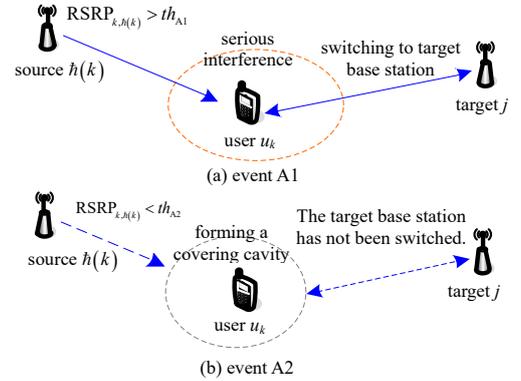


Fig.2 Covering voids and covering overlap  
图 2 覆盖空洞和覆盖重叠

### 2.3 优化覆盖的发射功率的解

利用迭代求解优化覆盖的发射功率  $\mathbf{P}^C = \{p_i^C\}, \forall i \in N$ 。令  $\Theta$  表示最大的迭代次数， $t$  为当前迭代次数。最初 ( $t=1$ )，将  $\mathbf{P}^T$  值作为  $\mathbf{P}^C$  的初始值，即  $\mathbf{P}^C = \mathbf{P}^T$ 。

对于任意用户  $u_k$ ，先依据式(15)式计算其从源基站所接收的 RSRP:

$$\text{RSRP}_{h(k)}^C = p_{h(k)}^C - g_{k,h(k)} \quad (15)$$

然后，将  $\text{RSRP}_{h(k)}^C$  与用户  $u_k$  从其他基站  $j$  所接收的 RSRP ( $\text{RSRP}_j^C = p_j^C - g_{k,j}$ ) 进行比较。

如果  $\text{RSRP}_{h(k)}^C$  小于  $\text{RSRP}_j^C$ ，则表明用户  $u_k$  从源基站接收的 RSRP 小于其从其他基站接收的 RSRP。在这种情况下，继续判断  $\text{RSRP}_{h(k)}^C$  是否大于阈值  $th_{A1}$ ，并且  $p_{h(k)}^C$  大于  $p^{\min}$ ，就降低源基站的发射功率，如式(16)所示:

$$\begin{aligned} &\text{if } \text{RSRP}_{h(k)}^C > th_{A1} \text{ and } p_{h(k)}^C > p^{\min} \text{ then} \\ &\quad p_{h(k)}^C \leftarrow p_{h(k)}^C - \alpha \end{aligned} \quad (16)$$

式中  $\alpha$  为功率调整的步长。

若  $\text{RSRP}_{h(k)}^C$  大于  $\text{RSRP}_j^C$ ，就继续判断  $\text{RSRP}_{h(k)}^C$  小于阈值  $th_{A2}$ ， $p_{h(k)}^C$  小于  $p^{\min}$ ，就增加源基站的发射功率，如式(17)所示:

$$\begin{aligned} &\text{if } \text{RSRP}_{h(k)}^C < th_{A1} \text{ and } p_{h(k)}^C < p^{\min} \text{ then} \\ &\quad p_{h(k)}^C \leftarrow p_{h(k)}^C + \alpha \end{aligned} \quad (17)$$

每一次迭代完，就更新  $\Delta_i$ ，再完成第二次迭代，直到满足迭代最大的迭代次数  $\Theta$ ，最终获取最优覆盖的发射功率。整个迭代过程如算法 1 所示。

#### 算法 1

初始化:  $\mathbf{P}^C = \mathbf{P}^T, t \leftarrow 1$

**repeat**

**for** 所有用户  $k \in K$  **do**

**for** 所有小基站  $i \in \psi_N$  **do**

$$\text{RSRP}_{h(k)}^C = p_{h(k)}^C - g_{k,h(k)}$$

**if**  $\text{RSRP}_{h(k)}^C < p_{h(k)}^C - g_{k,j}$  **then**

**if**  $\text{RSRP}_{h(k)}^C > th_{A1}$  and  $p_{h(k)}^C > p^{\min}$  **then**

$$\quad p_{h(k)}^C \leftarrow p_{h(k)}^C - \alpha$$

**end if**

**else**

**if**  $\text{RSRP}_{h(k)}^C < th_{A1}$  and  $p_{h(k)}^C < p^{\min}$  **then**

$$\quad p_{h(k)}^C \leftarrow p_{h(k)}^C + \alpha$$

**end if**

**end if**

**end for**

**end for**

  根据式(2)更新  $\Delta_i$

$t = t + 1$

**until**  $t = \Theta$

## 3 性能分析

### 3.1 仿真参数

通过 MATLAB R2016a 软件建立仿真平台，分析 CJTC 算法的性能。在 500 m×500 m 区域内部署一个宏基站和 25~200 个微基站，仿真参数如表 1 所示。引用

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

simulation parameter	value
simulation area/m <sup>2</sup>	500×500
macrobase station transmitting power/dBm	46
microbase station transmitting power range /dBm	[0,30]
transmitting power to adjust the step size $\alpha$ /dB	0.4
system bandwidth/MHz	100
range of the user's movement /(km/h)	[0,30]

路径衰落模型<sup>[7]</sup>:  $146.95+36.7\lg d+\vartheta$ , 其中  $d$  表示信号传输距离;  $\vartheta$  表示衰落因子, 其标准差  $\sigma=8 \text{ dB}$ <sup>[6]</sup>。

### 3.2 阈值 $th_{A1}$ 和 $th_{A2}$ 的设定

阈值  $th_{A1}$  和  $th_{A2}$  与基站的切换密切相关, 它们也影响了用户与基站间的无线链路失败(Radio Link Failure, RLF)率。为此,  $th_{A1}$  和  $th_{A2}$  取不同值, 并将得到的 RLF(仿真-RLF)与文献[12]的实际 RLF(实际-RLF)进行比较, 得到仿真-RLF 与实际-RLF 间的绝对差值。绝对差值越小, 所设定的  $th_{A1}$  和  $th_{A2}$  值越优。图 3 显示了在不同范围内  $th_{A1}$  和  $th_{A2}$  值所对应的绝对值, 其中图(b)是对图(a)中部分数据的放大。当  $th_{A1}=-62 \text{ dBm}$ ,  $th_{A2}=-94 \text{ dBm}$  时绝对差值最小。因此, 在后续仿真中, 设定  $th_{A1}=-62 \text{ dBm}$ ,  $th_{A2}=-94 \text{ dBm}$ 。

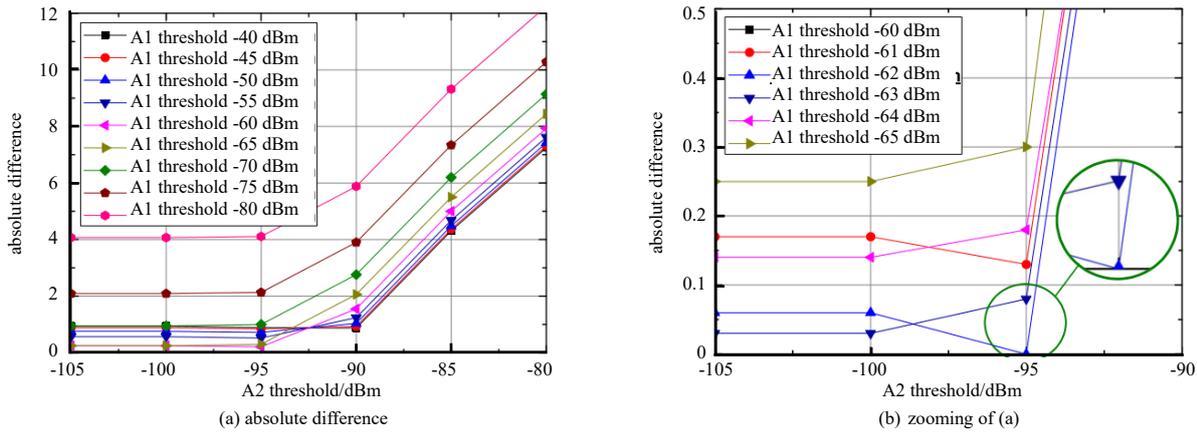


Fig.3 Absolute difference varying with  $th_{A1}$  and  $th_{A2}$   
图 3 RLF 绝对差值随  $th_{A1}$  和  $th_{A2}$  的变化情况

### 3.3 CJTC 算法的性能

利用 RLF 率反映 CJTC 算法的覆盖性能, RLF 率越低, 覆盖性能越优; 利用微基站吞吐量平均值的累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)表述 CJTC 算法的吞吐量性能。此外, 选择最大功率且无 RE 的策略(记为 max-power w/o RE)与 CJTC 算法进行比较。图 4 给出 RLF 率和微基站吞吐量的 CDF。

图 4(a)给出 max-power w/o RE 和 CJTC 算法在不同的微基站密度情况下的 RLF, 其中微基站密度分别取 25,100,200。从图 4(a)可知, 微基站密度越高, RLF 率越高。原因在于: 密度越高, 彼此干扰越严重, 导致通信链路质量下降。此外, 相比于 max-power w/o RE, CJTC 算法的 RLF 能够收敛于零, 通过不断地优化, 降低 RLF。图 4(b)显示了吞吐量的 CDF 曲线。相比于 max-power w/o RE, CJTC 算法的吞吐量得到一定的提升。此外, 基站密度越低, 吞吐量越高。原因在于: 基站密度越低, RLF 率越低, 这有利于系统吞吐量的提升。

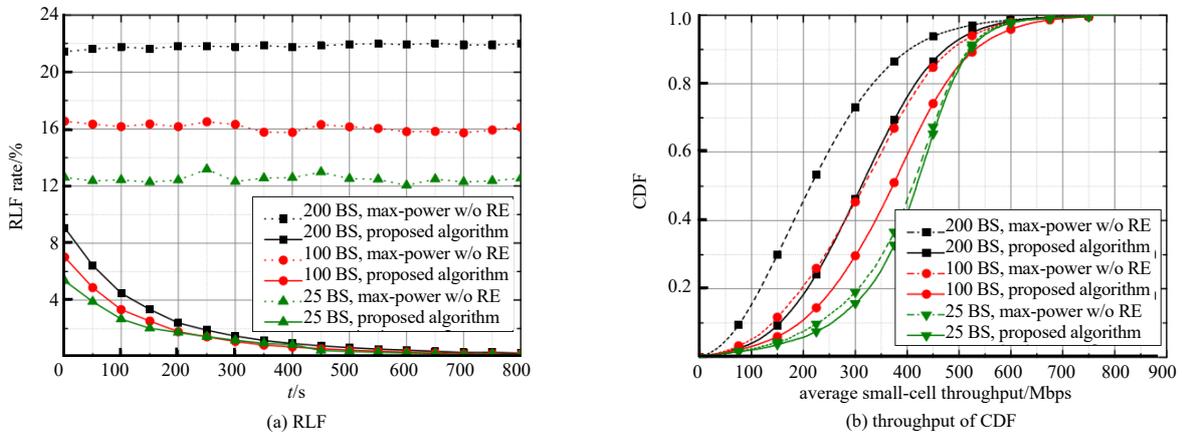


Fig.4 RLF and throughput of CJTC  
图 4 CJTC 算法的 RLF 率和吞吐量性能

## 4 结论

针对异构超密度网络 HUDN 的吞吐量及覆盖问题, 提出基于功率控制的吞吐量和覆盖的联合优化 CJTC 算法。通过功率控制和 RE 策略联合优化系统吞吐量和覆盖, 使系统在降低 RLF 率时, 提升吞吐量。仿真数据证实, 提出的 CJTC 算法提升了系统吞吐量, 并降低了 RLF 率。此外, 本文只通过仿真实验分析了 CJTC 算法的性能, 并与 max-power w/o RE 策略进行对比分析, 后期将进行理论分析, 并应用于实际场景。

### 参考文献:

- [ 1 ] 甄岩,史江盼,刘乔寿. 异构超密度网络中联合资源划分和卸载分析[J]. 系统仿真学报, 2019,31(8):1653-1664. (ZHEN Yan,SHI Jiangpan,LIU Qiaoshou. Joint resource partitioning and offloading analysis in heterogeneous ultra-dense networks[J]. Journal of System Simulation, 2019,31(8):1653-1664.)
- [ 2 ] 万菁晶,陆怡琪,田梦倩,等. 面向 5G 无线通信系统中若干物理层技术探讨[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(6):962-969. (WAN Jingjing,LU Yiqi,TIAN Mengqian, et al. On some physical layer technology in 5G wireless communication system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(6):962-969.)
- [ 3 ] LIU D. User association in 5G networks:a survey and an outlook[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2016,18(2): 1018-1044.
- [ 4 ] ZHANG H,LIU N,CHU X,et al. Network slicing based 5G and future mobile networks: mobility resource management and challenges[J]. IEEE Communication Magazine, 2017,55(8):138-145.
- [ 5 ] SUN R,HONG M,LUO Z Q. Joint downlink base station association and power control for max-min fairness:computation and complexity[J]. IEEE Journal Selected Areas Communication, 2015,33(6):1040-1054.
- [ 6 ] CLAUSSEN H,SAMUEL G. Self-optimization of coverage for femtocell deployments[C]// Wireless Telecommunications Symposium. Pomona,CA,USA:[s.n.], 2008:278-285.
- [ 7 ] PEREZ D L,CHU X,GUVENC I. On the expanded region of picocells in heterogeneous networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2012,6(3):281-294.
- [ 8 ] HATTAB G,CABRIC D. Rate-based cell range expansion for downlink massive MIMO heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2018,7(3):296-299.
- [ 9 ] JIANG H,PAN Z,LIU N,et al. Gibbs-sampling-based CRE bias optimization algorithm for ultradense networks[J]. IEEE Transactions on Vehicle Technology, 2017,66(2):1334-1350.
- [10] SIMSEK M,BENNIS M,GUVENC I. Mobility management in HetNets:a learning-based perspective[J]. EURASIP Journal on Wireless Communication and Network, 2015,4(26):45-53.
- [11] HUANG X,XU W,SHEN H,et al. Utility-energy efficiency oriented user association with power control in heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2018,7(4):526-529.
- [12] NGUYEN M T,KWON S,KIM H. Mobility robustness optimization for handover failure reduction in LTE small-cell networks[J]. IEEE Transaction on Vehicle Technology, 2018,67(5):4672-4676.

### 作者简介:

吴 鹏(1971-), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为 Web 信息化技术、电子政务、大数据与人工智能等.email:wupeng139139@sina.com.

-----  
(上接第 187 页)

### 作者简介:

周全兴(1986-), 男, 贵州省遵义市人, 学士, 讲师, 主要研究方向为网络信息安全、区块链技术等.email:aqxgzs@163.com.