



超密集网中一种基于人工蜂群的节能分簇算法

周朋光, 黄俊伟, 张仁迟, 徐浩

(重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 超密集网络中, 密集部署的低功率基站将会加大系统的能耗, 并且造成紧缺频谱资源的浪费。探寻干扰协调和系统节能的可行性方法在超密集网络架构下提出基站的休眠—唤醒—活跃机制, 减小了休眠基站直接转为活跃状态的开启时间; 另外, 提出一种基于人工蜂群染色分簇算法, 尽可能使用最少的颜色给拓扑图中的小区染色, 并对簇内活跃基站进行优化功率分配。经仿真表明, 休眠—唤醒—活跃机制能够提升系统的能源效率, 染色分簇算法也可以改善用户的频谱效率和吞吐量。

关键词: 超密集网络; 人工蜂群算法; 分簇; 节能

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017038

An energy saving clustering algorithm based on artificial bee colony in ultra dense network

ZHOU Pengguang, HUANG Junwei, ZHANG Renchi, XU Hao

School of Communication and Information Engineering, Chongqing

University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: In ultra dense network (UDN), the dense deployment of low power base station (BS) will increase the system's energy consumption and cause the waste of the scarce spectrum resources. Aiming to explore the feasible method of energy saving system and interference coordination, BS sleeping-waking-active mechanism in UDN was proposed, which would reduce the opening time of the sleeping BS. Also an adjusted artificial bee colony algorithm was proposed which used the least colors to dye the BS in topology, then power allocation of active BS in different cluster was optimized. Simulations show that the sleeping-waking-active mechanism can improve the energy efficiency of the system, and the clustering algorithm can promote the spectrum efficiency and throughput.

Key words: ultra dense network, artificial bee colony algorithm, clustering, energy saving

1 引言

超密集网络 (ultra dense network, UDN) 是 5G 的关键技术之一, UDN 中通过大量部署低功率的基站来达到改善系统容量和实现无缝覆盖的目的^[1]。但是部署密集的基

站将会带来巨大的能源损耗和频谱资源的浪费^[2], 使得提升系统的能源效率和频率效率成为一个亟待解决的问题。

现阶段国内外学者和专家对超密集网络中节能、干扰协调等专题进行了研究探索^[4-13]。在随机部署小区的场景下, 参考文献[3]研究了具有睡眠模式的基站能量和频谱效

收稿日期: 2016-12-20; 修回日期: 2017-02-07

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (No.2016ZX03002010-003)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project of China (No.2016ZX03002010-003)

率的频率复用因子,频率复用因子在给定基站和用户密度比的情况下,能够最大化频谱和能量效率至网络的上限。参考文献[4]提出一种超密集网络中基于分簇的分布式节能资源分配方案,该方案首先提出一种改进的 K -means 算法;其次以最小化每一个基站簇内部的干扰为依据划分用户群;然后提出一种资源块分配算法为用户群分配资源块;最后设计一种基于非协作博弈的迭代节能功率分配算法。参考文献[5]摒弃了传统以用户为中心的链路级频谱效率分析方法,利用随机几何的方法分析研究了部署超密集网络的平均小区的总体频谱利用率,并发现了能够达到高频谱和能源效率的最佳小区密集度和相应最佳的价值传输功率。参考文献[6]提出一种基于图论的低复杂度动态分簇算法。该算法的关键思路是将整个网络系统根据最大簇内干扰和最小簇间干扰划分成一定数量的簇,其中最大簇内干扰可由每个簇之间的协调进行有效的控制。参考文献[7]在超密集网络 and 全网络负载的情况之下,以小区的频谱效率、网络频谱效率以及网络的能源效率为准则来研究和证明不同策略的性能。参考文献[8]在 CoMP 节点传输系统中提出一种基于图论的新型动态分簇算法,该算法根据干扰建立拓扑图,然后将拓扑图分割成多个子图,每一个子图代表 CoMP 簇。每个基站寻找它的最佳协作基站需要用到一个贪心算法进行解决。参考文献[9]提出一种平衡归一化可调整利用函数和一种新型合作式竞价结构来获得协作增益,以此应对减小干扰和节省能源的挑战。参考文献[10]将逻辑信道的跳频传输的限制归纳成图论染色问题,并将顶点的选择、颜色的选择以及染色图谱的调整等策略集合到经典的回溯算法中,并以此提出一种新型染色方法。参考文献[11]提出一个基于能源节省的可在实际场景中运用的基站开/关算法,该算法关键的设计在于能够一个接一个地关闭基站但同时整体网络有最低程度的影响。参考文献[12]在有睡眠模式的宏-微基站双层场景下,研究了在小区分簇方案中节省能源的优化方案,该方案旨在通过协调下行跨层干扰和层间干扰,优化微基站的传输功率来获取更高的信干噪比。参考文献[13]提出一种基于图论分簇的资源分配(graph-based clustering resource allocation, GCRA)方案,该方案基于完全染色算法将所有的基站划分入相互独立的簇中,然后再通过为不同的簇分配相互正交的频带资源来解决干扰的问题。

对比参考文献[13]的系统模型,将 FAP(femtocell access

point,毫微微蜂窝基站访问点)的休眠—唤醒—活跃机制加入系统中,其中唤醒状态相当于对基站进行预开启操作,减少了 FAP 长时间的运作对系统能源的大量消耗,同时也避免了 FAP 长期占用频谱资源,相对提升了系统的能源效率;用改进的人工蜂群算法代替参考文献[13]中的 GCRA 算法,该染色分簇算法在尽可能地使用最少颜色的情况下,为相邻的小区分配不同的颜色,然后对相同的颜色分簇;最后对活跃 FAP 进行功率优化,动态分配资源,最大化能效和频谱效率。该算法并没有对系统中的小区按顺序染色,符合实际场景的应用,另外对平均用户频谱效率和吞吐量的提升都有所帮助。

2 系统模型

2.1 系统描述

本文设计了一种超密集网络架构,如图 1 所示。

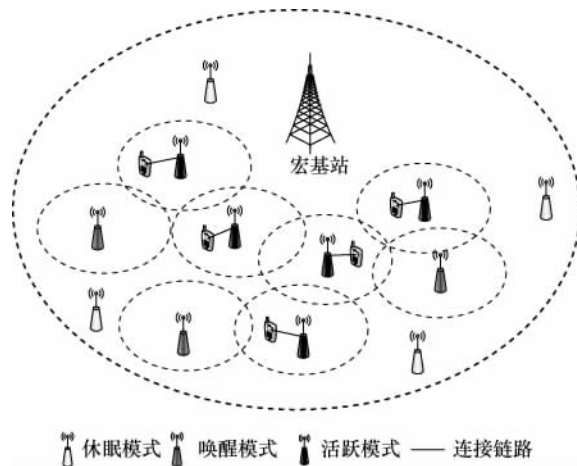


图 1 系统模型

假设毫微微基站和用户终端 (user equipment, UE) 在宏基站覆盖范围内随机部署,并且二者服从相互独立的泊松点过程 (PPP), 设 FAP 集合 ΦF 和 UE 集合 ΦU 密度分别为 λ_{BS} 和 λ_{UE} ($\lambda_{BS} > \lambda_{UE}$)。UE_i 在其活跃服务 FAP_j 上子载波 n 的信干噪比 (signal to interference and noise ratio, SINR) $\gamma_{i,j,n}$ 为:

$$\gamma_{i,j,n} = \frac{P_{j,n} h r^{-\alpha}}{I + \sigma^2} \quad (1)$$

活跃 FAP_j 在子载波 n 上的干扰增益比 $H_{j,n}$ 为:

$$H_{j,n} = \frac{h r^{-\alpha}}{I + \sigma^2} \quad (2)$$

假设此时活跃 FAP 的固定传输功率为 P_{FAP} , 对于唤醒和休眠 FAP 的传输功率设置为 0, $P_{j,n}$ 是活跃服务 FAP_j 在子



载波 n 上的传输功率。其中, r 为 FAP 与 UE 之间的距离, α 为路损系数, h 为活跃 FAP 的瑞利衰落。 $I = \sum_{i \in \Phi F \setminus bs} P_{j,n} h_i r_i^{-\alpha}$

表示其他活跃 FAP 带来的干扰, 其中 h_i 为第 i 个活跃 FAP 的瑞利衰落, r_i 表示与第 i 个活跃 FAP 的距离, bs 为服务基站, $P_{j,n}$ 表示每个子载波的噪声功率, B_{sub} 为子载波带宽。那么活跃服务 FAP _{j} 在子载波 n 为 UE _{i} 提供的数据速率可以表示为:

$$R = N_{sub} B_{sub} \log(1 + \gamma_i) = N_{sub} B_{sub} \log(1 + P_{j,n} H_{j,n}) \quad (3)$$

2.2 节能系统详解

以提升系统的能源效率以及频谱效率为目的, 提出一种新型节能基站模型, 如图 2 所示。

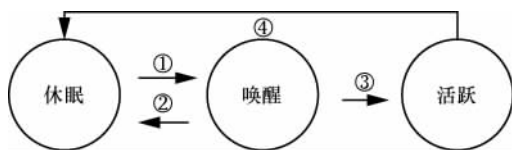


图 2 节能基站模型

该模型主要思想是将 FAP 分为休眠(sleeping)、唤醒(waking)和活跃(active)这 3 种运作状态。其中, 休眠状态下 FAP 不进行任何业务的处理, 仅需极小的功率维护其计时器等设备使用即可, 图 2 中①代表一个计时器 Timer1, 表示 FAP 在休眠状态下需转为唤醒状态进行业务预判的时间长短。系统忙时, 需将 Timer1 调小。当 FAP 由休眠状态转为唤醒状态时, 需根据系统忙闲程度重置 Timer1, 并在下次转为休眠状态再开启; 唤醒状态下 FAP 进行业务的监听, 收到业务请求, 立即转为活跃状态为用户提供业务服务, 如图 2 中③, 若在一定时间内无业务请求, 即转为休眠状态, 如图 2 中②, ②代表一个计时器 Timer2, 表示唤醒状态下的 FAP 无业务请求的时间长短。系统忙时, 需将 Timer2 调大。当 FAP 由唤醒状态转为休眠状态时, 需根据系统忙闲程度重置 Timer2, 并在下次转为唤醒状态再开启。活跃状态下, FAP 为用户提供正常的业务服务, 也可以处理正常的业务请求, 若此时系统内无业务处理, 则转为休眠状态, 如图 2 中④。

2.3 能效分析

休眠 FAP 的分布概率^[14]可以表示为:

$$P_{sleep} = (1 + 3.5^{-1} (\lambda_{UE} / \lambda_{BS}))^{-3.5} \quad (4)$$

那么处于非休眠 FAP 的分布概率为:

$$P_{nosleep} = 1 - (1 + 3.5^{-1} (\lambda_{UE} / \lambda_{BS}))^{-3.5} \quad (5)$$

假设非休眠 FAP 中处于活跃状态的概率为 ρ , 则处于

唤醒状态的 FAP 概率为 $1 - \rho$, 所以活跃 FAP 和唤醒 FAP 的分布概率可以分别表示为:

$$P_{active} = \rho \cdot (1 - (1 + 3.5^{-1} (\lambda_{UE} / \lambda_{BS}))^{-3.5}) \quad (6)$$

$$P_{waking} = (1 - \rho) \cdot (1 - (1 + 3.5^{-1} (\lambda_{UE} / \lambda_{BS}))^{-3.5}) \quad (7)$$

由此休眠 FAP、活跃 FAP 和唤醒 FAP 的密度分别为:

$$\lambda_{BS_sleep} = \lambda_{BS} P_{sleep} = \lambda_{BS} (1 + 3.5^{-1} (\lambda_{UE} / \lambda_{BS}))^{-3.5} \quad (8)$$

$$\lambda_{BS_active} = \lambda_{BS} P_{active} = \lambda_{BS} \rho (1 + 3.5^{-1} (\lambda_{UE} / \lambda_{BS}))^{-3.5} \quad (9)$$

$$\lambda_{BS_waking} = \lambda_{BS} P_{waking} = \lambda_{BS} (1 - \rho) (1 + 3.5^{-1} (\lambda_{UE} / \lambda_{BS}))^{-3.5} \quad (10)$$

现假设一个线性 FAP 的功率模型 P_{fap} ^[15]为:

$$P_{fap} = \begin{cases} P_a = P_0 + \Delta p P_{FAP}, & \text{活跃} \\ P_w, & \text{唤醒} \\ P_s, & \text{休眠} \end{cases} \quad (11)$$

其中, P_a 为活跃状态 FAP 总传输功率, P_0 为系统回路功率, Δp 为传输功率的增量, P_{FAP} 为 FAP 最大固定功率, P_w 和 P_s 分别为唤醒状态和休眠状态的系统维持功率。

定义系统的能源效率 η_{EE} 是网络的吞吐总量与 FAP 功率之比, 经由分析可以得到以下结论。

(1) 未有休眠和唤醒状态 FAP 下的 $\eta_{EE,1}$ 为:

$$\eta_{EE,1} = \frac{\lambda_{BS_active} R}{\lambda_{BS_active} P_a + \lambda_{BS_sleep} P_0 + \lambda_{BS_waking} P_0} \quad (12)$$

(2) 有休眠、唤醒和活跃状态 FAP 下的 $\eta_{EE,2}$ 为:

$$\eta_{EE,2} = \frac{\lambda_{BS_active} R}{\lambda_{BS_active} P_a + \lambda_{BS_sleep} P_s + \lambda_{BS_waking} P_w} \quad (13)$$

(3) 只有休眠和活跃状态 FAP 下的 $\eta_{EE,3}$ 为:

$$\eta_{EE,3} = \frac{\lambda_{BS_active} R}{\lambda_{BS_active} P_a + \lambda_{BS_sleep} P_s + \lambda_{BS_waking} P_0} \quad (14)$$

3 染色分簇

算法的提出建立在著名的人工蜂群^[16](artificial bee colony, ABC)算法的基础上, 将其应用于 FAP 的染色分簇算法中, 形成调整的人工蜂群染色 (adjusted artificial bee colony coloring, AABCC) 算法。算法的思想是先从无向图中有最大度的顶点 (即从干扰拓扑图中受最强干扰的小区) 入手, 首先对该最强干扰的小区染色, 然后再逐步染色较弱干扰的小区, 直到所有小区染色完毕, 并且使得有干扰的小区之间不存在相同的颜色, 最后按相同颜色进行分簇。

3.1 ABC 算法

人工蜂群算法中有 3 种蜂种: 雇佣蜂、观察蜂和侦察

蜂,还有一定数量的食物来源,一个雇佣蜂只能用一个花蜜源,即蜂巢中的花蜜源与雇佣蜂的数量相同。整个蜂群的目标是寻找花蜜量最多的蜜源,在标准的 ABC 算法中,雇佣蜂利用先前的蜜源信息寻找新的蜜源并与观察蜂分享蜜源信息;观察蜂在蜂房中等待并依据采蜜蜂分享的信息寻找新的蜜源;侦查蜂的任务是寻找一个新的有价值的蜜源,它们在蜂房附近随机地寻找蜜源。

算法 1 ABC 算法

初始化。

重复以下过程:

(1)每一个雇佣蜂离开蜂巢去寻找蜜源,找到后记录食物源位置信息并计算花蜜量,然后返回蜂巢周边开始跳舞;

(2)每一个观察蜂会盯住雇佣蜂的行为,并根据雇佣蜂的舞蹈信息前往蜜源,到达后更新蜜源信息,同时确定蜜源的花蜜量;

(3)确定侦查蜂,并再次寻找新的蜜源;

(4)记忆迄今为止最好的蜜源。

判断终止条件是否成立。

3.2 AABCC 算法

将宏小区覆盖区域内的小区间干扰简化为一个干扰拓扑,如图 3 所示,每一个顶点代表一个由活跃 FAP 覆盖的小区,顶点间的连接线代表小区间的干扰。首先将干扰拓扑图划分为几个子图,并从较大的子图开始着手染色,然后再依次对较小的图染色,这样减少了迭代的次数,节省了计算的时间,并且能够尽可能地使用最少的颜色。

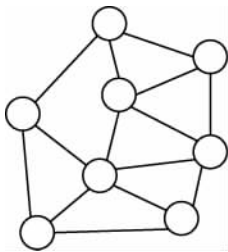


图 3 简化小区干扰拓扑

图 3 中的无向图中包含了很多节点和边,在 AABCC 算法中,将无向图中的顶点当做 ABC 算法中的食物源,用每一个顶点的度代替 ABC 算法中的花蜜数量,并由此得出算法。

算法 2 AABCC 算法

每个雇佣蜂随机选择一个顶点(花蜜源),雇佣蜂计算

各自顶点的度 D (花蜜量),随后返回蜂巢并跳舞传播信息,其中 D 代表无向干扰拓扑图中顶点的度;

观察蜂收集雇佣蜂带回的信息(花蜜位置和花蜜量),并将所有的度 D 按照从大到小的顺序依次排列,形成 $List_d$ 。

(1)观察蜂前往 $List_d$ 中的最大值所对应的主顶点位置:

- 从调色板中选取黑色(特殊颜色,只为观察蜂首次到达主顶点染色)进行顶点染色;
- 建立已用颜色列表 $List_c$;
- 将 $List_d$ 中的该主顶点对应的度删除。

(2)位于该主顶点的各相邻顶点将会随机从调色板中选取颜色。

- 未染色的各相邻顶点对主顶点大致呈现环绕状。

①依次对有邻居关系的顶点每隔一个顶点染相同的颜色;

②无邻居关系的顶点之间可染相同颜色;顶点选择某种颜色,将颜色加入 $List_c$ 中;

③染色后的相邻顶点将对应的度从 $List_d$ 中删除。

- 该主顶点从调色板或者中选取颜色进行染色。

(3)主顶点包括各相邻顶点全部染色完毕。

观察蜂前往此时 $List_d$ 中的最大值所对应的主顶点,并执行算法 2 中步骤(1)和步骤(2),直至全部顶点染色。

(4)根据染色的情况进行分簇,染相同颜色的顶点分到相同的簇内。

FAP 由活跃状态转为休眠状态或唤醒状态删除所染颜色及对应的度、簇中顶点。

FAP 由休眠状态或唤醒状态转为活跃状态。

观察蜂立即前往该顶点位置,与周边邻居对比,从调色板或者 $List_c$ 中选取颜色进行染色,并将其加入相应的簇内。

3.3 举例分析

AABCC 算法 2 第(1)步如图 4(a)所示,观察蜂到达度最高的位置,即受干扰最强的位置,并染黑色,加粗的圈为与主顶点有邻居关系的顶点,可以看出相邻的顶点对主顶点大致呈环绕状。

AABCC 算法 2 第(2)①步如图 4(b)所示,对环绕的有邻居关系的顶点隔点染相同的染色,无邻居关系的两个顶点染相同颜色,假如从左上角的顶点开始,依次染蓝、红、蓝、红、蓝。

AABCC 算法 2 第(2)②步如图 4(c)所示,观察蜂所在主顶点在调色板中选取黄色进行染色。

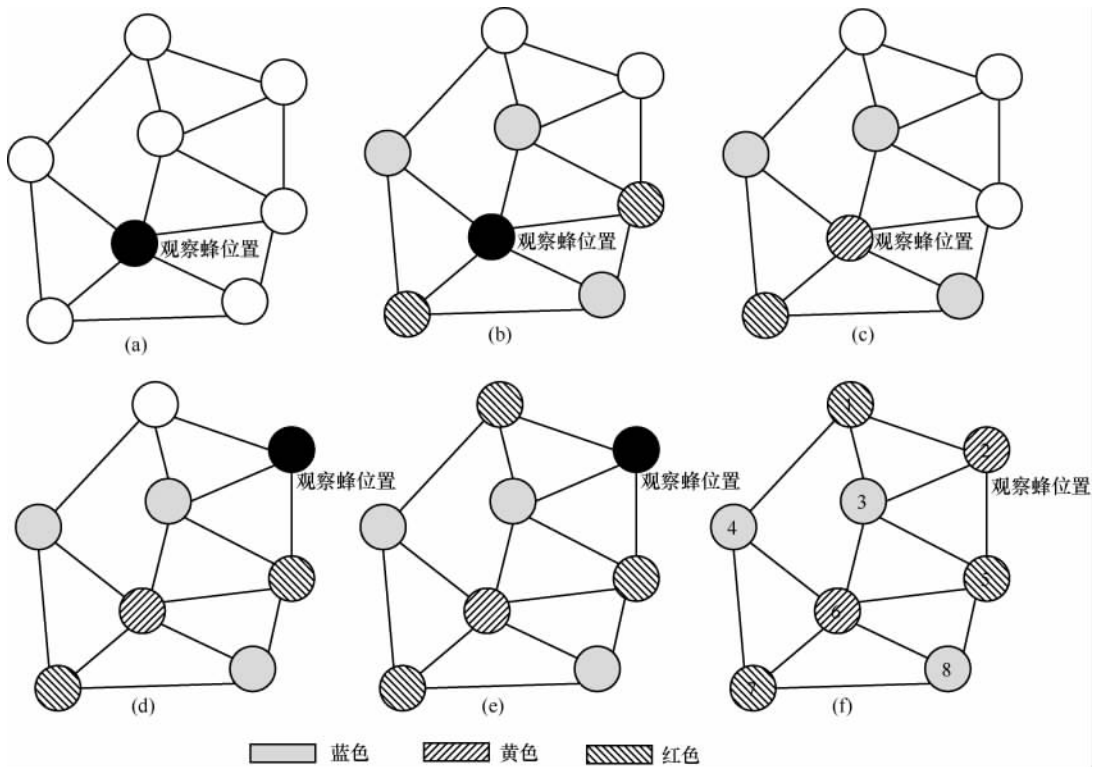


图 4 AABCC 染色算法举例

AABCC 算法 2 第(3)步如图 4(d)、图 4(e)、图 4(f)所示,观察蜂现到达此时 $List_d$ 中的最大值所对应的主顶点,并染黑色。此时与主顶点有邻居关系的顶点有 3 个,染色的有 2 个,所以此时只需染最上部的顶点即可,对比后从 $List_c$ 中选择红色进行染色,观察蜂此时也从 $List_c$ 中选取黄色进行染色。

至此,染色完毕,染色可分簇为:簇 1={1,5,7},簇 2={2,6},簇 3={3,4,8}。

3.4 功率优化

假设根据第 3.3 节的分簇结果,假定共分簇 C 个, C_m 代表第 m 个簇内的 FAP 集合, E_j 代表 FAP_j 服务的 FUE 的集合,系统中有 N_{sub} 个子载波。优化目标是活跃 FAP 在满足低于最大发射功率和高于最小数据速率的条件下,可以使 FUE 的总吞吐量达到最大,为:

$$\max \sum_{m=1}^C \sum_{j \in C_m} \sum_{i \in E_j} \sum_{n=1}^{N_{sub}} \Delta f \lg(1 + P_{j,n} H_{j,n}) \quad (15)$$

$$\text{s.t. C1: } \sum_{n=1}^{N_{sub}} \sum_{i \in E_j} P_{j,n} \leq P_{\max}, \forall j \in C_m$$

$$\text{C2: } \sum_{n=1}^{N_{sub}} \sum_{i \in E_j} \Delta f \lg(1 + P_{j,n} H_{j,n}) \geq R_{\min}, \forall j \in C_m \quad (16)$$

其中, $\Delta f = N_{sub} \cdot B_{sub}$ 代表系统带宽, $P_{\max}$ 代表 FAP 的最大发射功率, $R_{\min}$ 代表 FAP 最低数据速率要求。

根据目标函数(14)和约束条件(15),可以运用注水算法为 FAP 进行功率优化。设拉格朗日乘子为 α, β ,由 KKT^[17] 定量可知:

$$\begin{aligned} L(P, \alpha, \beta) = & \sum_{m=1}^C \sum_{j \in C_m} \sum_{i \in E_j} \sum_{n=1}^{N_{sub}} \Delta f \lg(1 + P_{j,n} H_{j,n}) - \\ & \alpha \left(\sum_{n=1}^{N_{sub}} \sum_{i \in E_j} P_{j,n} - P_{\max} \right) - \beta \left(R_{\min} - \sum_{n=1}^{N_{sub}} \sum_{i \in E_j} \Delta f \lg(1 + P_{j,n} H_{j,n}) \right) \end{aligned} \quad (17)$$

计算 $\frac{\partial L(P, \alpha, \beta)}{\partial P_{j,n}} = 0$, 可以得到功率分配的最优解:

$$P_{j,n} = \left[\frac{(1 + \beta) \Delta f H_{j,n}}{\alpha \ln 2} - \frac{1}{H_{j,n}} \right]^+ \quad (18)$$

其中, $[x]^+ = \max\{x, 0\}$ 。

4 仿真分析

本文采用的系统模型如图 1 所示,有一个覆盖半径为 500 m 的宏基站小区,其中 FAP 和 UE 随机部署。为了更

公平地估计 AABCC 算法的性能，运用正比公平 (proportional fair, PF) 和轮询 (round robin, RR) 调度算法与本文的 AABCC 算法进行对比,参与对比的性能包括:用户平均吞吐量、频谱效率、能效以及掉线概率,其中掉线概率定义为 FUE 的信干噪比低于门限值^[18],即 $P(\gamma_{i,j,n} \leq \gamma_{th})$ 。仿真参数^[13,19]总结见表 1。

表 1 仿真参数

仿真参数	参数内容
FAP 最大固定功率 P_{FN}/W	0.05
系统回路功率 P_0/W	4.5
传输功率增量 $\Delta p/W$	7.8
FAP 唤醒功率 P_w/W	3.3
FAP 休眠功率 P_d/W	2.9
子载波数 $N_{sub}/\text{个}$	600
小区半径/m	10
系统带宽/MHz	20
子载波带宽/kHz	15
FAP 密度 λ_{BS}/m^2	0.2
FAP 活跃状态概率 ρ	3/9, 5/9, 7/9

平均用户吞吐量对比如图 5 所示。由图 5 可知,随着 UE 密度的增加,平均用户的吞吐量在逐步降低,为了服务更多的 UE,那么每个 UE 就只能享有较低的数据传输速率。当 FAP 活跃状态概率 $\rho=7/9$ 时,其平均用户的吞吐量相比 GCRA 算法得到了较为明显的提升,这是由于 AABCC 算法在系统内 UE 增加的情况下,通过休眠—唤醒—活跃机制和分簇算法能够较好地减小小区间干扰,提升平均用户的吞吐量。但是当 $\rho=3/9$ 时,由于系统内提供业务服务的活跃基站较少,平均用户的吞吐量得不到很好的提升。

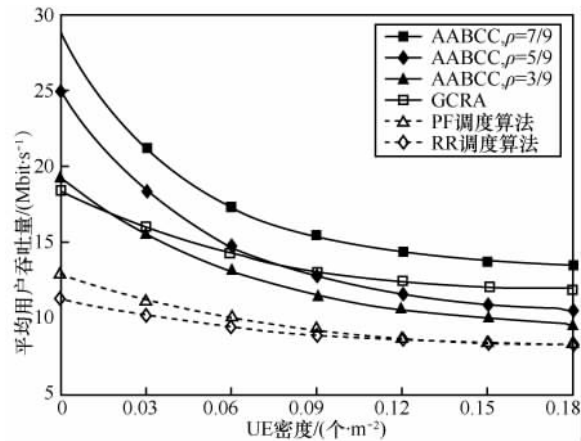


图 5 平均用户吞吐量对比

平均用户的频谱效率的对比如图 6 所示。由图 6 可知,随着 UE 密度的增加,平均用户的频谱效率也缓慢降低,AABCC 算法下降幅度较大,而 GCRA 算法下降趋势较为平缓。但是当 $\rho=7/9$ 或 $5/9$ 时,系统中平均用户的频谱效率要优于 GCRA 算法,这是由于 AABCC 算法能够有效地给小区之间分配不同的颜色,并且使用最少的颜色进行染色分簇,还可以根据小区间干扰的改变动态地改变干扰拓扑图,通过休眠—唤醒—活跃机制对基站进行不同的操作,能够为系统节省频谱资源,相对提升平均用户频谱效率。

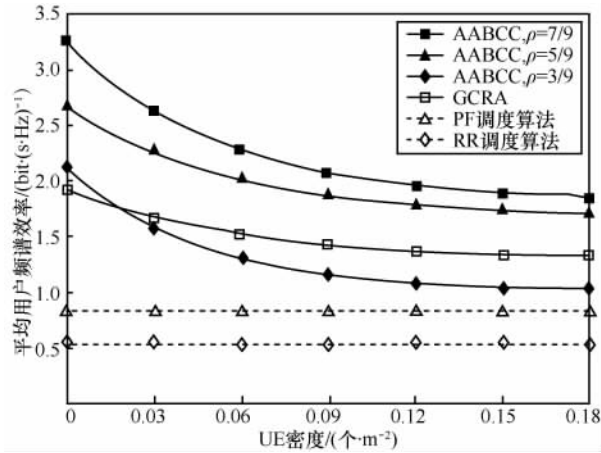


图 6 平均用户频谱效率对比

FAP 的能效随 UE 密度的变化仿真如图 7 所示。由图 7 可知,本文的 AABCC 算法在能效方面得到了较大幅度的提升,GCRA、PF、RR 算法中并未提及休眠基站的概念,基站长时间运转会造成大量的频谱资源的浪费,更会造成巨大能源的损耗,所以本文在节能的基础上,为 FAP 提出一种休眠—唤醒—活跃机制,并对活跃基站进行深度优化功率,进一步提升其节能性能。当系统中有休眠、唤醒和活跃状态的 FAP,即 $\eta_{EE,2}$,在 UE 密度为 0~0.07 时,能效最高,随后与系统中只有休眠和活跃 FAP 的 $\eta_{EE,1}$ 几乎持平,能效都保持在较高水平上。 $\eta_{EE,1}$ 为系统中未有休眠和唤醒的 FAP,但是由于该系统中休眠和唤醒状态下 FAP 的功率损耗为 P_0 ,所以 $\eta_{EE,1}$ 会是一条下降趋势较为明显的曲线。

用户掉线率随着 UE 密度的增加在 2%~16% 之内的变化仿真如图 8 所示。当用户密度为 0.03 m^2 左右时,AABCC 算法中 $\rho=3/9$ 和 $5/9$ 与 GCRA 算法的掉线率相差不大,但随着 UE 密度的增加, $\rho=3/9$ 和 $5/9$ 的掉线率却明显高于 GCRA 算法,这是由于当 AABCC 算法中的休眠—唤醒—活跃机制在系统内业务量激增时,活跃基站较少,无法满足



需求,而且 Timer1 和 Timer2 需设置得较为合理,所以会造成一定数量的用户掉线。当 $\rho=7/9$, 用户掉线率在 UE 密度为 0~0.08 时, AABCC 算法要优于 GCRA 算法。

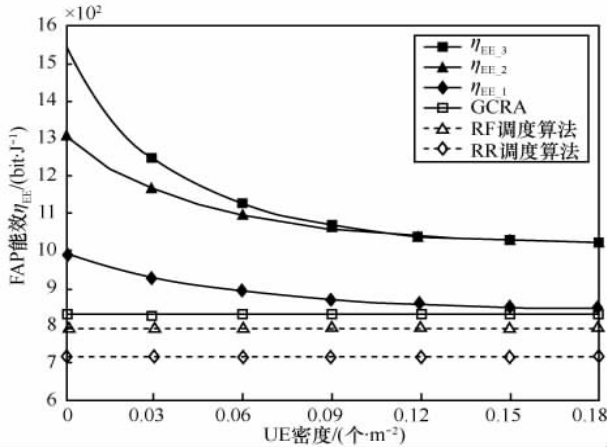


图7 FAP 能源效率对比

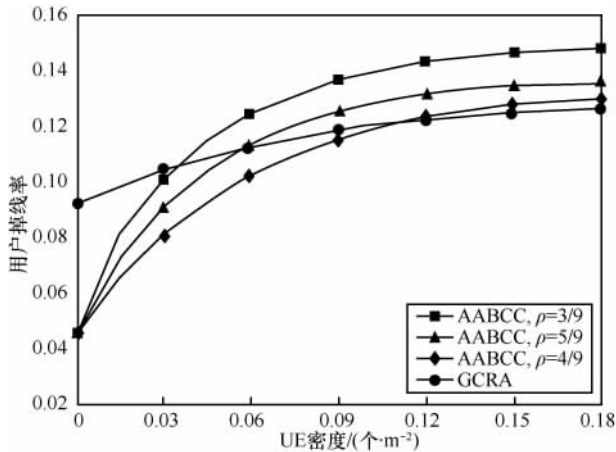


图8 用户掉线率对比

5 结束语

针对 GCRA 算法中存在的不足进行相应的分析和改良,考虑到节省系统的能源消耗问题,创新性地提出一种休眠—唤醒—活跃机制,对无业务服务的活跃基站转为唤醒状态,对长时间无业务请求的唤醒状态基站转为休眠状态,从而避免了基站长时间运作对能源的大量消耗和对频谱资源的长时间占用。另外将 ABC 算法应用于对小区间的干扰拓扑图染色的问题中,减少了染色的迭代次数,且更适用于实际场景。通过仿真表明,有休眠—唤醒—活跃基站的 AABCC 算法在用户掉线率上略逊于 GCRA 算法,但在平均用户的吞吐量、频谱效率以及 FAP 的能效方面都比 GCRA 算法在一定程度上有所提升。

参考文献:

- [1] BHUSHAN N, LI J, MALLADI D, et al. Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 82-89.
- [2] OLSSON M, CAVDAR C, FRENGER P, et al. 5GrEn: towards green 5G mobile networks[C]// 2013 IEEE 9th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), October 7-9, 2013, Lyon, France. New Jersey: IEEE Press, 2013: 212-216.
- [3] SU L, YANG C, CHIH-LIN I. Energy and spectral efficient frequency reuse of ultra dense networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(8): 5384-5398.
- [4] LIANG L, WANG W, JIA Y, et al. A cluster-based energy-efficient resource management scheme for ultra-dense networks[J]. IEEE Access, 2016(4): 6823-6832.
- [5] LI Q, WU G, HU R Q. Analytical study on network spectrum efficiency of ultra dense networks[C]// 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), September 8-11, 2013, London, UK. New Jersey: IEEE Press, 2013: 2764-2768.
- [6] CHEN S, XING C, FEI Z, et al. Dynamic clustering algorithm design for ultra dense small cell networks in 5G[C]// 10th International Conference on Communications and Networking in China, August 15-17, 2015, Shanghai, China. New Jersey: IEEE Press, 2015: 836-840.
- [7] YUNAS S F, VALKAMA M, NIEMELA J. Spectral and energy efficiency of ultra-dense networks under different deployment strategies[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(1): 90-100.
- [8] QIN C, TIAN H. A greedy dynamic clustering algorithm of joint transmission in dense small cell deployment[C]// 2014 IEEE 11th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), January 10-13, 2014, Las Vegas, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: 629-634.
- [9] YANG C, LI J, GUIZANI M. Cooperation for spectral and energy efficiency in ultra-dense small cell networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(1): 64-71.
- [10] QU F, TIAN J, LI M, et al. Vertex coloring based logical channel mapping for frequency hopping transmission in next generation broadcasting wireless systems[C]// 10th International Conference on Communications and Networking in China, August 15-17, 2015, Shanghai, China. New Jersey: IEEE Press, 2015: 670-674.
- [11] OH E, SON K, KRISHNAMACHARI B. Dynamic base station switching-on/off strategies for green cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5): 2126-2136.

- [12] PAN Z, SHIMAMOTO S. Cell sizing based energy optimization in joint macro-femto deployments via sleep activation[C]//2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), April 7-10, 2013, Shanghai, China. New Jersey: IEEE Press, 2013: 4765-4770.
- [13] ZHANG Q, ZHU X, WU L, et al. A coloring-based resource allocation for OFDMA femtocell networks[C]//2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), April 7-10, 2013, Shanghai, China. New Jersey: IEEE Press, 2013: 673-678.
- [14] LI C, ZHANG J, LETAIEF K B. Throughput and energy efficiency analysis of small cell networks with multi-antenna base stations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(5): 2505-2517.
- [15] AUER G, GIANNINI V, DESSET C, et al. How much energy is needed to run a wireless network[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(5): 40-49.
- [16] KARABOGA D, AKAY B. Artificial bee colony (ABC) algorithm on training artificial neural networks[C]// 15th Signal Processing and Communications Applications, June 11-13, 2007, New York, USA. New Jersey: IEEE Press, 2007: 1-4.
- [17] 解可新, 韩健, 林友联. 最优化方法[M]. 天津: 天津大学出版社, 1997: 125-135.
- XIE K X, HAN J, LIN Y L. Optimization methods [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1997: 125-135.
- [18] KANDUKURI S, BOYD S. Optimal power control in interference-limited fading wireless channels with outage-probability specifications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(1): 46-55.
- [19] GE X, TU S, MAO G, et al. 5G ultra-dense cellular networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 23(1): 72-79.

[作者简介]



周朋光(1992-),男,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为 5G 关键技术、超密集网络中的干扰协调技术。



黄俊伟(1969-),男,重庆邮电大学高级工程师、硕士生导师,主要研究方向为新一代宽带移动通信核心芯片、协议及系统应用、宽带无线通信。



张仁迟(1991-),男,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为 LTE/5G 相关关键技术。



徐浩(1992-),男,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为 5G 关键技术、毫米波 MIMO 系统混合波束成形技术。