



5G 网络中基于覆盖区域优先级的微基站休眠算法

王子韧¹, 李毅^{1,2}

(1. 湘潭大学, 湖南 湘潭 411105;

2. 湖南省邮电规划设计院有限公司, 湖南 长沙 410010)

摘要: 随着 5G 移动通信技术日渐成熟, 移动终端数量快速增长, 5G 无线通信系统基站密集能耗问题突出, 提出一种微基站区域分级休眠算法。考虑微基站负载、站间距离、层间配合对微基站休眠的影响, 宏基站与宏基站之间重叠覆盖区域中微基站状态转换次数少, 优先休眠操作节能效果好。仿真结果表明, 节能率为 23%, 能适应不同的网络规模, 在大规模网络中节能效果更优越。

关键词: 5G 无线网络; 基站休眠; 重叠覆盖; 系统能耗

中图分类号: TN011

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022160

Micro-station sleeping algorithm based on coverage area priority in 5G network

WANG Ziren¹, LI Yi^{1,2}

1. Xiangtan University, Xiangtan 411105, China

2. Hunan Post and Telecommunications Planning and Design Institute Co., Ltd., Changsha 410010, China

Abstract: With the maturity of 5G mobile communication technology and the rapid growth of the number of mobile terminals, the problem of intensive energy consumption of 5G wireless communication system base stations is prominent. A micro base station area hierarchical sleep algorithm was proposed. Considering the impact of micro base station load, inter station distance and inter layer cooperation on micro base station sleep, the transitions number of the micro base station in the overlapping coverage area between macro base stations is less, and the priority sleep operation has a good energy-saving effect. The simulation result shows that the energy-saving rate is 23%, which can adapt to different network sizes, and the energy-saving effect is better in large-scale networks.

Key words: 5G wireless network, base station sleeping, overlapping coverage, system energy consumption

0 引言

5G 无线通信系统在为用户提供高速率服务的同时带来了巨大能耗, 流量业务的潮汐式变化使基站休眠成为可能, 3GPP Rel-10 引入了小区休

眠机制, 在保障用户服务质量的同时实现节能。

文献[1]采用干扰权重图分簇减少算法运行时间, 不同场景节能率为 16.5%~22.7%。文献[2]使用马尔可夫模型, 在有限状态集中使用迭代导出满足约束的最优策略。在完全获得终端微基站

信息时能获得 5% 节能率, 但状态转移矩阵的维度会随着基站数目增加, 使大规模网络中复杂度增加。文献[3-4]根据基站吞吐量的值对每个微基站进行循环休眠判决, 在小规模网络中节能效果很好且运行时间短。在仿真中设置微基站数量为 40 个的情况, 节能效果可达 30%, 但只考虑了信号强度与信噪比对吞吐量的影响, 忽略了用户自身流量需求的影响。

本文提出了一种宏微二层无线网络微基站分级休眠算法, 该算法对宏基站间重叠覆盖区域或单宏基站覆盖区域内的微基站进行分类。在宏基站负载较小时, 分级逐序关闭各类微基站。仿真结果表明, 在小规模网络和较大规模网络中, 本文的微基站休眠算法节能率分别约为 12% 和 23%, 而文献[7]中的微基站休眠算法分别为 3.7% 和 12.6%, 文献[6]中的宏基站休眠算法分别约为 7.2% 和 17.5%。本文算法与文献[5-7]算法仅在小网络规模时算法运行时间略长, 网络规模越大, 在大规模网络中节能效果越好。

1 场景描述

宏微二层无线网络系统内部署 M 个宏基站和 F 个微基站, 在其覆盖范围内分布 N 个用户, 场景示意图如图 1 所示。

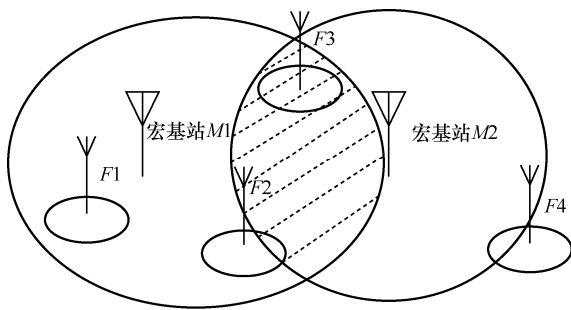


图 1 场景示意图

宏基站间重叠覆盖区域如图 1 中虚线阴影部分所示, 将微基站分为 3 种类型, 第一类微基站被一个宏基站完全覆盖, 如图 1 中微基站 $F1$ 。根据信号环境不同, 将处在宏基站与宏基站重叠覆

盖区域的微基站分为两类。如果该微基站使用的资源块 (resource block, RB) 数量, 大于该微基站覆盖范围用户关联到最强参考信号接收功率宏基站时使用的总 RB 数量, 则其为第二类微基站, 否则为第三类微基站。对第二类微基站不采取休眠策略, 第三类微基站状态转换次数低于第一类微基站。根据式 (1) 计算用户 i 与基站 j 关联信干比 (signal to interference ratio, SIR), 其中, P_j 表示基站 j 的发射功率, G_{ij} 表示基站 j 到用户 i 的信道增益。

$$\text{SIR}_{i,j} = \frac{P_j \times G_{i,j}}{\sum_{k \in F \cup M, k \neq j}^f s_k (P_k \times G_{i,k})} \quad (1)$$

由于基站密集部署带来的干扰问题, 将参数信干比取代参考信号接收功率 (reference signal receiving power, RSRP) 作为基站覆盖范围的判决值。用户确定信道质量指数后, 使它对应最高调制和编码方案, 在低信号质量时进行解码, 用户的误码率不得超过 10%^[13-14]。当信号质量指示为 1 或 2 时, 采用正交移相键控调制方式, 根据信干噪比与误码率的对应关系, 信干噪比阈值分别为 -6.71 dB 与 -5.11 dB, 在仿真中取信干比阈值为 -5 dB。当 $\text{SIR}_{i,j}$ 值大于阈值 T_{sir} 时, 表示用户 i 在基站 j 覆盖范围内, 基站 j 为用户 i 的候选基站。以微基站 j 为候选基站的用户有多个候选宏基站时, 微基站 j 被视为位于宏基站之间重叠覆盖区域。如图 1 中微基站 $F2$ 、 $F3$ 。假设用户在同个基站的所有 RB 上具有相同的 SIR 值, 且基站的每个 RB 具有相同的传输功率。用户关联成功后, 系统根据用户信干比大小选择调制解调方式, 假设误码率为 0, 根据调制解调方式判断用户 i 在关联到基站 j 时所需的 RB 个数 $O_{i,j}$, 以满足每个用户的下行流量需求 R_i 。

每个用户只与一个基站保持关联, 用维度为 $N \times (F+M)$ 的矩阵 C 表示用户与基站的关联情况, 矩阵 C 中 $c_{ij}=1$ 表示用户 i 与基站 j 关联, $c_{ij}=0$ 表



示用户 i 与基站 j 不关联。每个基站拥有相同的最大连接的用户数量限制 T_{uc} 和 RB 调度限制 T_{rb} ，各微基站的状态用集合 $S=[s_1, s_2, \dots, s_f]$ 表示。

$s_j=1$ 表示微基站 j 为工作状态， $s_j=0$ 表示微基站处于休眠状态。宏基站与微基站之间采用异频部署。文献[8]研究了流量负载在不同类型基站分布对系统能效的影响，流量业务集中在更小类型基站能实现更高的系统能效。在本文系统模型中设置微基站的接入频段优先级高于宏基站。

2 能耗模型

基站由射频、功放、基带处理、电源与冷却系统构成。冷却系统仅适用于宏基站，占总功耗的 8%，基站的总功耗可以表示为式 (2)。

$$P = P_{RF} + P_{PA} + P_{BB} + P_C \quad (2)$$

其中， P_{RF} 为动态功能受业务负载动态影响，在宏基站和微基站中分别占总功耗的 7% 和 12%，是次要的消耗者，业务负载对总能耗的影响很小。 P_{PA} 、 P_{BB} 、 P_C 相对稳定，为静态功耗，3 种功耗在微基站中分别占到 47%、29%、5%^[9]。功放是基站的主要能耗者，单个微基站休眠可节省自身 P_{RF} 与 P_{PA} 所需约 59% 的能耗。本文只讨论基站工作状态与休眠状态。当基站状态为关闭时，基站功耗表示为式 (3)。

$$P_{s,j} = \begin{cases} P_{s,f} \\ P_{s,m} \end{cases} \quad (3)$$

其中， $P_{s,f}$ 为微基站休眠时功耗， $P_{s,m}$ 为宏基站休眠时功耗，此时式 (2) 中 P_{PA} 与 P_{RF} 功耗几乎为零， P_{BB} 与 P_C 低功耗运行以准备短时间唤醒反应。基站开启时功耗为式 (4)。

$$P_{a,j} = \begin{cases} P_{a,f} + \mu_j \times P_{t,f} \\ P_{a,m} + \mu_j \times P_{t,m} \end{cases} \quad (4)$$

其中， μ_j 为基站 j 的当前负载比率， $P_{a,f}$ 为微基站开启时的静态功耗， $P_{t,f}$ 为微基站的静态传输功耗。 $P_{a,m}$ 为宏基站开启时的静态功耗， $P_{t,m}$ 为宏基站的静态传输功耗。系统的总能耗可以表示为：

$$P_{total} = \sum_{j=1}^F s_j (P_{a,f} + \mu_j P_{t,f}) + \sum_{j=1}^F \bar{s}_j P_{s,f} + \sum_{k=1}^M (P_{a,m} + \mu_k P_{t,m}) \quad (5)$$

文献[10]提出网络能效总随着小基站密度的增大呈先增大后减小的变化规律。文献[11]中的理论分析表明在无噪环境的宏基站覆盖率与密度无关，且无论噪声大小如何，覆盖率会随着宏基站密度增加而收敛到一个相同值。这也印证了文献[12]中宏基站保证基本覆盖，微基站用于扩容的标准。为了保证无线通信的连续性，本文模型中宏基站不采取休眠操作。本文需要转移微基站的流量至宏基站，或者开启微基站均衡宏基站的负载，以调节宏基站的负载率保持在一个不空闲也不超忙的状态。

对式 (5) 增加部分约束确定用户关联机制和保证用户服务质量。

$$\begin{aligned} & \text{MIN} : P_{total} \\ & \text{s.t. (1)} \text{SIR}_{i,U} \geq T_{SIR} \\ & \quad (2) R_{i,j} \geq R_i \\ & \quad (3) \sum_{i=1}^n c_{i,j} \leq T_{uc} \\ & \quad (4) \sum_{i=1}^n c_{i,j} O_{i,j} \leq T_{rb} \\ & \quad (5) \sum_{j=1}^{m+f} c_{i,j} = 1, \forall i \end{aligned} \quad (6)$$

其中，约束 (1) 表示用户与所关联的基站的 SIR 应大于 SIR 阈值。 $R_{i,j}$ 表示基站 j 提供给用户 i 的下行速率，约束 (2) 表示各基站提供的 RB 资源需要满足其服务的所有用户的下行需求。约束 (3)、约束 (4) 设置基站服务的用户数不能超过允许关联的最大用户数，使用的 RB 资源不可超过带宽提供的 RB 资源限制。约束 (5) 表示每个用户只能同时被一个基站服务。由式 (6) 可知，系统规模直接影响系统总功耗，影响微基站休眠效果的因素为传输所需带宽和邻站负载。

3 场景因素

微基站流量转移需要由覆盖更广的宏基站承

担, 假设用户流量负载在如图 1 所示覆盖区域均匀分布, 微基站 F2 与微基站 F4 已经关闭, 采用微基站休眠策略时, 微基站 F1 的休眠概率可以表示为式 (7)。

$$P_{\text{off},F1} = P\left\{\left(S_{m,1} - S' + (S' - S_{f,3}) \cdot \mu_{m,1}\right) \cdot \lambda \leq L_{m,1}\right\} \quad (7)$$

微基站 F3 的休眠概率表示为式 (8)。

$$P_{\text{off},F3} \geq P\left\{\left(S_{m,1} - S_{f,1} - S' + (S' - S_{f,3}) \cdot \mu_{m,1} + S_{f,3}\right) \cdot \lambda \leq L_{m,1} + \right. \\ \left. P\left\{\left(S_{m,2} - S' + (S' - S_{f,3}) \cdot \mu_{m,2} + S_{f,3}\right) \cdot \lambda \leq L_{m,2}\right\}\right\} \quad (8)$$

式 (7) 和式 (8) 中 $S_{m,j}$ 表示宏基站 j 的面积, $S_{f,j}$ 表示微基站 j 的面积, $\mu_{m,j}$ 表示宏基站 j 在宏基站重叠覆盖区域的负载占比, λ 表示流量负载与覆盖面积的比值, $L_{m,j}$ 为承载用户数和 RB 资源负载限制。当各微基站覆盖面积相等时, 即 $S_{f,1} = S_{f,3}$, 则:

$$P_{\text{off},F1} = P\left\{\left(S_{m,1} - S' + (S' - S_{f,3}) \cdot \mu_{m,1}\right) \cdot \lambda \leq L_{m,1}\right\} = \\ P\left\{\left(S_{m,1} - S_{f,1} - S' + (S' - S_{f,3}) \cdot \mu_{m,1} + S_{f,3}\right) \cdot \lambda \leq L_{m,1}\right\} \quad (9)$$

$$P_{\text{off},F3} > P\left\{\left(S_{m,1} - S_{f,1} - S' + (S' - S_{f,3}) \cdot \mu_{m,1} + S_{f,3}\right) \cdot \lambda \leq L_{m,1}\right\} = P_{\text{off},F1} \quad (10)$$

即处在宏基站与宏基站之间重叠覆盖区域内的微基站具有更高的休眠概率, 同理, 多宏基站重叠覆盖区域的微基站重启概率更低, 基站状态的转换次数会更少。

宏基站拥有更高的发射功率获得更广的覆盖范围, 能承载更多的用户终端。而基站的频带资源有限, 宏基站相比微基站单个用户获得的 RB 资源较少。不考虑仅将低流量需求的业务转移到宏基站, 在微基站关闭后, 新用户根据频带优先级和 RSRP 接入网络。占用 RB 资源少的微基站用户群转移到宏基站, 能发挥宏基站容量优势。将微基站所有用户流量转移到宏基站时所需带宽表示为:

$$B_m = \sum_{i=1}^n \frac{c_{i,j} R_i}{\ln(1 + \text{SINR}_{i,m})} \quad (11)$$

$$\text{SIR}_{i,m} = \frac{P_{t,m} (d_{i,m})^{-\alpha}}{\sigma^2} \quad (12)$$

微基站的负载率和微基站、宏基站的站间距离影响宏基站射频功耗, 用单宏基站和微基站随机休眠策略分析其优先级, 将单个微基站流量转移到单个宏基站时的总功耗表示为式 (13)。

$$\text{EC} = T \left(P_{a,m} + \frac{B_m}{B_0} P_{t,m} \right) + T_1 (P_{a,f} + \eta P_{t,f}) + T_2 (P_{s,f}) \quad (13)$$

其中, T 为总时间段, T_1 、 T_2 分别为在时间段 T 内的微基站工作和休眠时长。采用随机休眠策略后, 将式 (13) 转换为式 (14)。

$$\text{EC} = T \left[\left(P_{a,m} + \frac{B_m}{B_0} P_{t,m} \right) + P_{\text{off}} P_{s,f} + (1 - P_{\text{off}}) \right. \\ \left. (P_{a,f} + \eta P_{t,f}) \right] = T \left[\left(P_{a,m} + \frac{N_j R^0 P_{t,m}}{B_0 \cdot \ln \left(1 + \frac{P_{t,m} (d_0)^{-\alpha}}{\sigma^2} \right)} \right) + \right. \\ \left. P_{\text{off}} P_{s,f} + (1 - P_{\text{off}}) (P_{a,f} + \eta P_{t,f}) \right] \quad (14)$$

分别对休眠概率 P_{off} 和距离 d_0 求偏导:

$$\left| \frac{\partial \text{EC}}{\partial P_{\text{off}}} \right| = \left| T \left[P_{s,f} - (P_{a,f} + P_{t,f}) \right] \right| = \\ T \left[(P_{a,f} + P_{t,f}) - P_{s,f} \right] \quad (15)$$

$$\left| \frac{\partial \text{EC}}{\partial d_0} \right| = \frac{T \cdot \alpha B_m \text{SIR}_{i,m} P_{t,m}}{B_0 (1 + \text{SIR}_{i,m}) \ln 2 \cdot \ln(1 + \text{SIR}_{i,m}) d_0} > \\ \frac{T \alpha P_{t,m}}{0.7 \cdot \ln(1 + \text{SIR}_{i,m}) d_0} \quad (16)$$

式 (13) 中 B_m/B_0 为负载比例, B_m/B_0 的值小于 1。 α 为路损指数, $\alpha \in [2, 5]$ 。在郊区无遮挡信号环境较好的情况, d_0 的值可以取到 10 km。

将式 (15) 与式 (16) 右边同时除以 T 得:

$$P_{a,f} + P_{t,f} - P_{s,f} \quad (17)$$

$$\frac{\alpha \cdot P_{t,m}}{0.7 \ln(1 + \text{SIR}_{i,m}) d_0} \quad (18)$$

式 (17) 表示为微基站工作功耗与休眠功耗



的差值, 微基站休眠概率对系统总功耗的影响表示为微站休眠的能耗减少量。在式 (18) 中, 仅在 $SIR_{i,m}$ 极小时满足式 (19)。

$$\frac{\alpha}{0.7 \cdot \ln(1 + SIR_{i,m}) d_0} > 1 \quad (19)$$

式 (18) 的值小于 1, 可将式 (18) 看作微基站休眠后宏基站负载提高而引起的宏基站传输功耗的增加。在现实网络中, 微基站休眠节省的系统功耗大于宏基站负载增加而增加的系统功耗。

休眠离宏基站距离近的基站, 能节省宏基站更多 RB 资源, 获得节能率。而微基站的工作功耗远大于休眠功耗, 在大部分情况 EC 对 d_0 的偏导小于 EC 对 P_{off} 的偏导, 即微基站休眠概率 P_{off} 对系统能耗的影响更大。较大的休眠概率和较小的重启概率能在较长的时间段获得更长的休眠时长, 更长休眠时长节省的能耗远大于宏基站负载增加的额外能耗。第三类微基站休眠时会消耗更多的宏基站资源,

但其拥有更长的休眠时长, 节能效果更好。设置第三类微基站休眠优先级高于第一类微基站。

4 基站休眠算法

将 $SIR_{i,j}$ 作为覆盖判决依据, 微基站内存在多候选宏基站的, 该微基站被视为多宏基站重叠覆盖区域的微基站, 否则为第一类微基站。再根据 RB 使用情况将多宏基站重叠覆盖区域的微基站分为第二类或第三类微基站。完成微基站分类后, 在每个宏基站覆盖范围内执行休眠判决机制的具体步骤如下, 算法流程如图 2 所示。

步骤 1 采用频段优先级的最强 RSRP 关联方法对各用户进行初始关联, 计算各个基站的负载情况。

步骤 2 根据负载率加权值逐个判断第三类微基站是否能进行休眠操作, 重新关联休眠微基站的, 更新基站状态和用户关联状态。

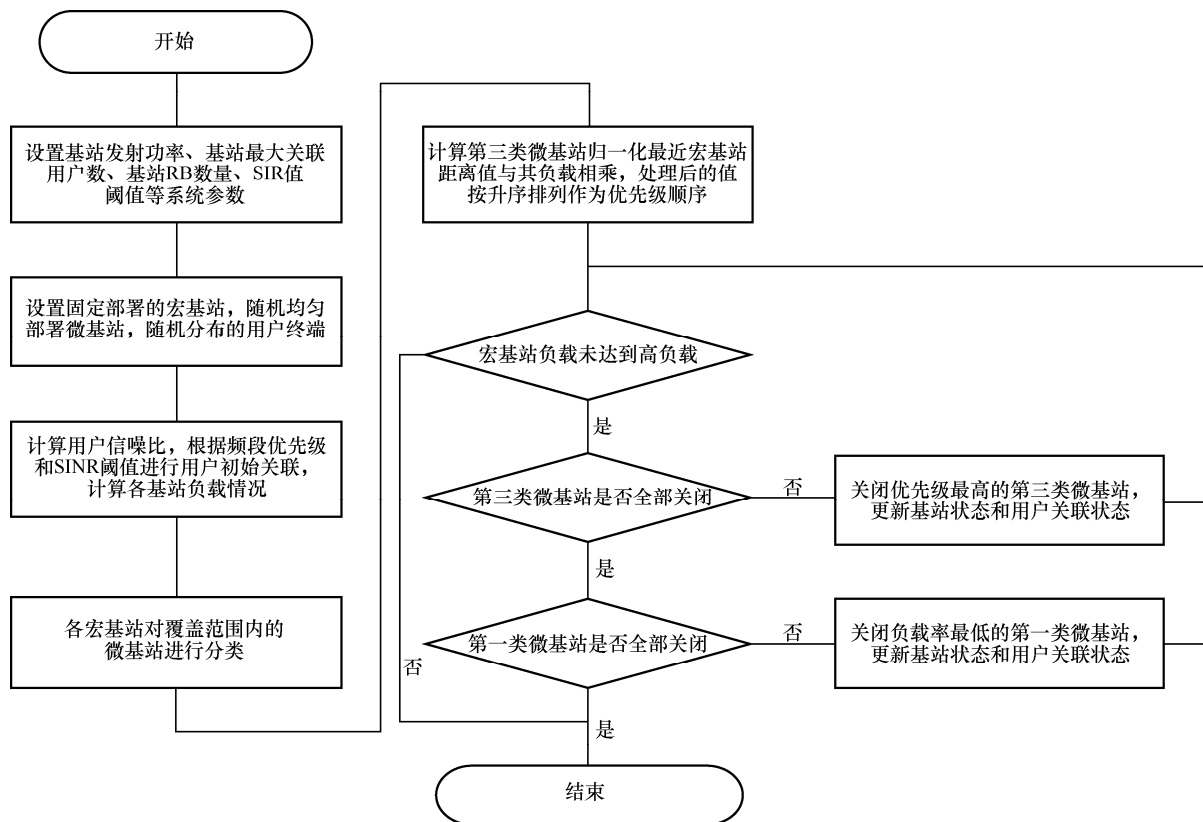


图2 算法流程

步骤 3 检查各个宏基站是否未超忙时, 根据负载大小逐个关闭第一类微基站, 直到宏基站超忙或该宏基站覆盖范围内所有微基站都休眠。

5 仿真结果分析

本文的系统模型建立在宏微双层网络下行链路, 考虑 $4\text{ km} \times 4\text{ km}$ 的自由空间衰落的覆盖区域分布了 N 个用户, 该覆盖区域内部署 5 个宏基站。微基站采用随机分布, 宏基站采用固定部署, 用户流量采用均匀分布。仿真实验运行环境为 MATLAB 2016a, AMD Ryzen 7 3800X 8-Core processor @ 3.89 GHz, 16.00 GB RAM。

将文献[5]阈值迭代算法、文献[6]邻区投票法、文献[7]ICR 算法与本文提出的区域分级休眠算法对比, 具体仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数

参数	值
宏基站数量	5
宏基站发射功率	46 dBm
微基站发射功率	40 dBm
宏基站/微基站资源块数量	100/100
宏基站/微基站最大用户数量	80/30
宏基站路损模型	$128.1+37.6 \times \lg d$
微基站路损模型	$140.7+36.7 \times \lg d$
信干比阈值	-5 dB

用户一天下行流量分布如图 3 所示, 本文图中出现的 24:00 均为次日 0:00。图 3 可观察到用户流量需求的潮汐性, 凌晨 2:00–7:00 用户下行流量低至谷底, 晚上 8:00–11:00 流量需求达到最高。

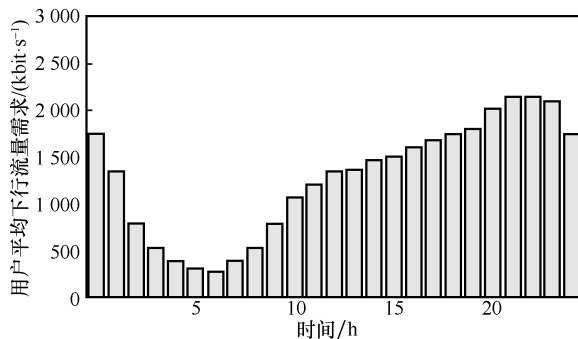


图 3 用户一天下行流量分布

一天内不同时间点的系统功耗如图 4 所示, 系统内部署 40 个微基站, 用户数为 400 个。采用休眠策略的无线网络系统的总功耗在上午 6:00 最小, 晚上 9:00 最大, 随用户流量大小的趋势起伏。

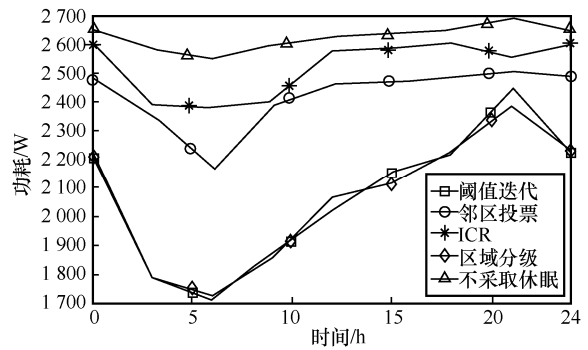


图 4 不同时间点的系统功耗

4 种算法在不同时间的运行时间如图 5 所示, 区域分级算法需进行微基站分类, 在微基站分类后无须遍历所有基站, 算法复杂度为 $O(F^2N+2FMN)$, 迭代算法^[5]复杂度为 $O(2F^2N+F^2+2FMN)$, 区域分级算法相比迭代算法牺牲不超过 1.7% 的节能率, 节省超过 50% 的运行时间。在高用户需求时, 本文算法节能率高于迭代算法 2.4%。

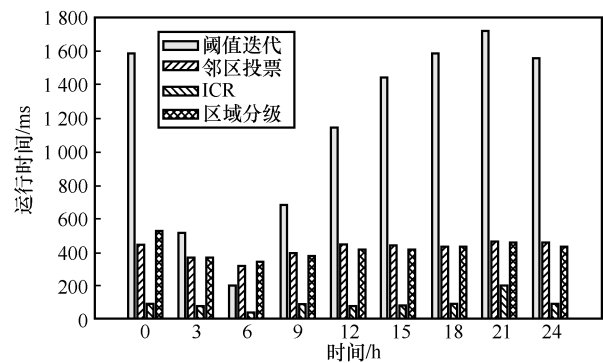


图 5 4 种算法在不同时间的运行时间

邻区投票^[6]的算法复杂度为 $O(2M^2N+2FMN-2MN-2FN)$, 由于微基站数比宏基站数大一个数量级, 区域分级算法相比于邻区投票算法与 ICR 算法在负载度上没有优势, 但节能率能提高 4.5% 以上。

系统总功耗随用户数量变化如图 6 所示, 文



献[5-7]使用最强 RSRP 关联方法使大量用户关联到宏基站,宏基站负载升高,没有足够资源承载由微基站关闭的新用户,降低了周围微基站的休眠概率。文献[6]中采用偏好列表的关联方法,具有很好的负载均衡性,同时微基站距离终端更近,具有更好的信干比,但更集中用户流量才能使微基站拥有更大的休眠机会。

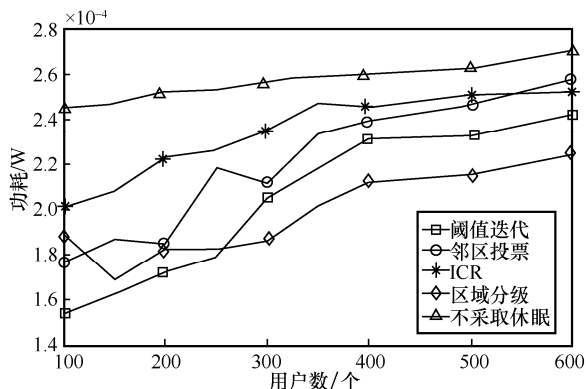


图6 系统总功耗随用户数量变化

采用基站休眠算法节能的前提是无线资源冗余,冗余资源越少,基站休眠概率越低。随着系统内用户数量的提高,各类休眠算法的节能效率逐渐下降,符合无线资源冗余越少,节能越差的现象。

采用本文区域分级休眠算法后,平均能节省约 23.47% 的功耗。文献[5]中的阈值迭代算法只考虑了基站承载用户数对基站休眠的影响,微基站承载用户数低于预设阈值时进入迭代判断。在系统规模较小时,单个微基站承载用户数少,算法遍历了所有微基站,节能效果优越。当用户数与基站比增大时,进入休眠判决的微基站数目少,节能效果较差。文献[6]中的邻区投票算法关闭了保证基础覆盖的宏基站,在微基站覆盖率较大时效果很好,该算法的节能效果在很大程度上取决于对用户中断率的容忍。文献[7]中的 ICR (interference contribution rate) 算法将最大基站的干扰贡献值与迭代的干扰贡献值阈值比较并判断为关闭,该算法能很好地解决密集部署的同频干扰问题,但冗余基站休眠不彻底。本文区域分级

算法的第二类微基站未采取休眠操作,在系统低负载情况,可休眠的第二类微基站未能进行休眠判决,宏基站存在时频资源冗余,休眠效果比阈值迭代算法效果差。系统负载升高时,与宏基站距离近的微基站优先休眠节省了宏基站的 RB。

系统总功耗随微基站数量变化如图 7 所示,随着微基站数量增加,采取不同休眠算法后的功耗都有不同程度的增长。在微基站数为 20 时,本文算法节能率约为 12%,文献[5-7]中的微基站休眠算法为 3.7%,文献[6]中的宏基站休眠算法约为 7.2%。在微基站数为 50 时,本文算法节能率约为 23%,文献[5]和文献[7]中的算法约为 12.6%,文献[6]中的宏基站休眠算法约为 17.5%。本文算法在能源节省上具有优势,网络规模越大,优势更强。本文的休眠算法充分使用了常开宏基站的 RB,随着系统内微基站数目增加,该算法的节能效果与其他算法相比更有效,更适用于大规模网络。

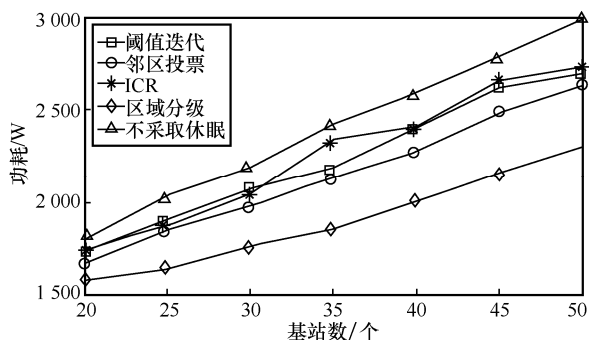


图7 系统总功耗随微基站数量变化

6 结束语

本文针对 5G 无线网络能耗问题,在宏微二层密集网络中分析了不同区域微基站的休眠对系统总能耗的影响,提出了一种设置不同区域优先级的微基站休眠算法。本文区域分级算法在潮汐式用户流量需求下,相比迭代算法牺牲不超过 1.7% 节能率以节省超过 50% 运行时间。随着网络规模增大,本文算法相较迭代算法的节能效果更优。

区域分级算法与 ICR 算法相比, 以相近的算法复杂度提高超过 4.5% 节能率。区域分级算法运用在大规模网络中节能率能达到 23%, 能应对不同网络负载需求的能耗问题, 在密集网络中效果更好。

参考文献:

- [1] 李君, 王浩, 王秀敏, 等. 超密集异构网络中基于分簇的休眠优化策略[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(5): 845-849.
LI J, WANG H, WANG X M, et al. Optimized clustering-based sleep strategy in hyperdense heterogeneous networks[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(5): 845-849.
- [2] 马晓彤, 金顺福, 刘建平, 等. 认知无线网络中的基站节能策略及纳什均衡研究[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 172-181.
MA X T, JIN S F, LIU J P, et al. Study on energy saving strategy and Nash equilibrium of base station in cognitive radio network[J]. Journal on Communications, 2016, 37(7): 172-181.
- [3] PHAIWITTHAYAPHORN P, BOONSRIMUANG P, REANG-SUNTEA P, et al. Cell throughput based sleep control scheme for heterogeneous cellular networks[C]//Proceedings of 2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). Piscataway: IEEE Press, 2017: 584-587.
- [4] DATAESATU A, BOONSRIMUANG P, MORI K Z, et al. Energy efficiency enhancement in 5G heterogeneous cellular networks using system throughput based sleep control scheme[C]//Proceedings of 2020 22nd International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 549-553.
- [5] DATAESATU A, BOONSRIMUANG P, MORI K Z, et al. Energy efficiency enhancement in 5G heterogeneous cellular networks using system throughput based sleep control scheme[C]//Proceedings of 2020 22nd International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). Piscataway: IEEE Press, 2020.
- [6] REN P, TAO M X. A decentralized sleep mechanism in heterogeneous cellular networks with QoS constraints[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(5): 509-512.
- [7] SHEN B, LEI Z Z, HUANG X G, et al. An interference contribution rate based small cells on/off switching algorithm for 5G dense heterogeneous networks[J]. IEEE Access, 2018, (6): 29757-29769.
- [8] ABDULKAFI A A, KIONG T S, CHIENG D, et al. Energy efficiency improvements in heterogeneous network through traffic load balancing and sleep mode mechanisms[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 75(4): 2151-2164.
- [9] DEBAILLIE B, GIRY A, GONZALEZ M J, et al. Opportunities for energy savings in pico/femto-cell base-stations[J]. 2011 Future Network & Mobile Summit, 2011: 1-8.
- [10] 潘子宇, 杨洁, 郭楠. 基于三维随机几何的小基站蜂窝网络能效分析[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2019, 17(2): 29-32.
PAN Z Y, YANG J, GUO N. Energy efficiency analysis of small cell networks based on 3-D stochastic geometry[J]. Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2019, 17(2): 29-32.
- [11] QUEK T Q S, CHEUNG W C, KOUNTOURIS M. Energy efficiency analysis of two-tier heterogeneous networks[C]//Proceedings of 17th European Wireless 2011 - Sustainable Wireless Technologies. [S.l.:s.n.], 2011: 1-5.
- [12] 3GPP. Potential solutions for energy saving for E-UTRAN (Release 10): TS 36.92V2.0.0[S]. 2011.
- [13] KAWSER M. Downlink SNR to CQI mapping for different multiple antenna techniques in LTE[J]. International Journal of Information and Electronics Engineering, 2012, (3): 21-29.
- [14] 3GPP. Physical layer procedures(Release 17): 36.213[S]. 2011.

[作者简介]



王子韧(1998-), 男, 湘潭大学自动化与电子信息工程学院硕士生, 主要研究方向为无线网络优化。



李毅(1975-), 男, 博士, 湘潭大学硕士生导师, 湖南省邮电规划设计院有限公司高级工程师、副总工程师, 主要研究方向为移动通信网络规划优化。