



# 基于指派模型的 LTE-A 异构网节能负载均衡算法

刘 凯, 赵建业, 刘志敏

(北京大学信息科学技术学院 北京 100871)

**摘 要:** 无线通信能耗问题受到越来越多重视, 能量效率成为下一代无线通信(5G)三大效率特性之一。当前异构网络(heterogeneous network, HetNet)负载均衡的研究缺少对网络整体功耗的优化考量, 根据异构网重叠覆盖的特性建立了面向指派模型的用户负载功率模型, 并针对有限的用户负载问题提出一种扩增指派算法求解宏扇区内所有基站功率最小化问题, 在 LTE 系统级仿真平台中仿真表明, 无论基站是否支持休眠功能, 此算法都能在保证用户速率的条件下有明显的节能效果。

**关键词:** 异构网; 负载均衡; 节能; 扩增指派模型

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2015046

## Power Efficient Load Balancing Algorithm in LTE-A Heterogeneous Network Based on Assignment Model

Liu Kai, Zhao Jianye, Liu Zhimin

(School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Energy consumption of wireless network is receiving more and more attention and has become one of key aspects of 5G while few researches on heterogeneous network (HetNet) load balancing focused in power consumption. User power model was built towards assignment model, based on which the augmented assign algorithm was proposed to minimize power of HetNet on condition of limited user data load. Simulation on system level platform show that power is effectively saved no matter base stations support sleep mode or not, meanwhile, ensure data rate of users.

**Key words:** heterogeneous network, load balancing, saving power, augmented assignment mode

### 1 引言

无线通信 3GPP 在 LTE-A (LTE-advanced) 中引入了异构网络<sup>[1]</sup>, 混合部署了常规的宏基站(macro BS)与低功率节点, 包括微基站(micro BS)、微微基站(pico BS)等, 部署在宏蜂窝热点区域可以提高系统容量。由于用户位置、业务需求的随机性、时变性, 宏扇区与低功率基站重叠覆盖,

用户负载可接入不同类型基站; 引入负载均衡方法<sup>[2]</sup>可使宏基站与低功率基站合理承载异构网中的负载, 避免过载或拥塞, 提高资源配置效率。

随着无线通信网络的流量指数形式增长, 无线通信网功耗越来越受到重视与研究, 能量效率成为下一代无线通信(5G)三大效率特性之一<sup>[3,4]</sup>, 而基站功耗又占据了大部分网络总能耗<sup>[5]</sup>, 但已有的负载均衡研究较少面向异构网功

收稿日期: 2014-11-18; 修回时间: 2015-01-14

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2012AA011401)

Foundation Item: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No.2012AA011401)

耗。典型异构蜂窝网络拓扑如图 1 所示,宏扇区与低功率基站重叠覆盖,用户可接入不同类型基站。

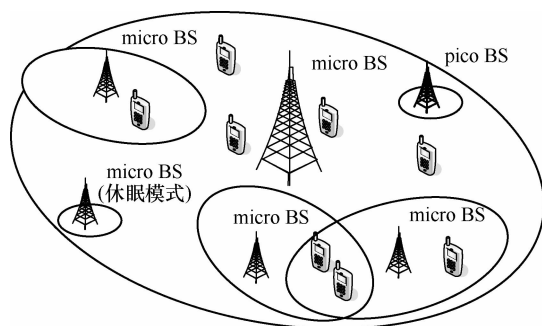


图 1 典型异构蜂窝网络拓扑

参考文献[6,7]在多天线中继问题中构造凸优化模型,给出一种联合功率分配算法提升能效,未针对多小区均衡。参考文献[8]在六边形的小区场景中给出一种高效的小区半径扩展类的负载均衡算法,但没有涉及网络功耗;参考文献[9]给出了一种用户协同选择基站角度提高链路质量来提升用户吞吐量,仍没有涉及基站的能耗。参考文献[10]根据用户密度查找异构小区最优间隔使单位面积功耗最低,研究没有具体的用户负载均衡的切换或选择,在异构网实际小区模型方面有所欠缺。参考文献[11]将异构网络中提高速率的负载均衡算法分为 3 类:触发负载均衡操作因子算法、网络效用函数均衡算法和小区范围扩展的算法。

## 2 基站功率模型与用户功率代价模型

### 2.1 基站功率模型

异构网基站能耗包含宏基站和一种或多种低功率基站,基站功率不是指射频发射功率而是指基站系统包含基带、射频、功放、制冷、电源模块功耗的所有电路功耗<sup>[12,13]</sup>。欧洲 Earth 项目的论文<sup>[13,14]</sup>结合实测数据与理论推导给出了 LTE 线性基站功率模型,如式(1)所示,并提供了具体参数,包含有 macro BS、micro BS、pico BS 等类型。 $N_{\text{rx}}$ 表示天线个数, $P_{\text{max}}$ 表示天线最大辐射功率, $P_0$ 表示基站工作的最小功率, $\Delta p$ 表示功率曲线的斜率, $P_{\text{sleep}}$ 表示基站处于睡眠状态消耗的功率。

$$P_{\text{in}} = \begin{cases} N_{\text{rx}}(P_0 + \Delta p P_{\text{out}}), & 0 < P_{\text{out}} \leq P_{\text{max}} \\ N_{\text{rx}} P_{\text{sleep}}, & P_{\text{out}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

3 种类型基站的输入输出功率模型见表 1。本文讨论的问题只使用其中两类基站,即宏基站与微基站。

其中,宏基站的  $N_{\text{rx}}$  指 3 个扇区共 6 根天线,每扇区

表 1 不同类型基站的输入输出功率模型

| BS 类型 | $N_{\text{rx}}$ | $P_{\text{max}}/\text{W}$ | $P_0/\text{W}$ | $\Delta p$ | $P_{\text{sleep}}/\text{W}$ |
|-------|-----------------|---------------------------|----------------|------------|-----------------------------|
| macro | 6               | 20                        | 130            | 4.7        | 75                          |
| micro | 2               | 6.3                       | 56             | 2.6        | 39                          |
| pico  | 2               | 0.13                      | 6.8            | 4          | 4.3                         |

2 根天线。根据运营商的一般做法,考虑到信号覆盖范围与延迟,宏基站不会进入休眠(sleep)态,这里的负载均衡算法中没有将宏基站休眠。而低负载或无负载时异构微基站可以进入休眠,本文讨论了微基站可否支持休眠两种情况下的节能算法效果。

### 2.2 功率优化问题模型

#### 2.2.1 信号模型

在 LTE 及 LTE-A 中,宏小区为六边形同构网络结构,在宏基站每个扇区的范围考虑用户负载均衡问题,将用户负载合理地分配到宏扇区或微小区。

考虑包含相邻扇区干扰的模型,所有扇区集合为  $S$ ,每个扇区中,包含宏扇区在内,加上所有微基站的集合为  $M$ ,扇区内用户集合为  $U$ ,推导信号模型。扇区内用户信噪比  $\gamma_{sij}^k$  表示为:

$$\begin{aligned} \gamma_{sij}^k &= \frac{P_{sij}^k \cdot H_{sij}^k}{I_{sij}^k + \sum_{t \in S, t \neq s} I_{tij}^k + N_0} \\ &= \frac{P_{sij}^k \cdot H_{sij}^k}{\sum_{m \in M, m \neq i} P_{smn}^k \cdot H_{smn}^k + \sum_{t \in S, t \neq s} P_{tmn}^k \cdot H_{tmn}^k + N_0}, s \in S, i \in M, j \in U \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $i=0$ 代表  $s$  扇区基站号,0 表示宏扇区, $P_{sij}^k$  为扇区  $s$  内基站  $i$  (宏扇区或微基站)在子载波  $k$  上给第  $j$  个 UE 的发送功率, $H_{sij}^k$  为扇区  $s$  的基站  $i$  在子载波  $k$  上到第  $j$  个 UE 的信道增益。 $I_{sij}^k$  为第  $j$  个 UE 在子载波  $k$  上接收信号时收到的干扰信号,它来自于  $s$  内干扰基站  $m$  中与该 UE 占用相同子载波  $k$  的用户  $n$ 。 $I_{tij}^k$  为第  $j$  个 UE 在子载波  $k$  上接收的相邻扇区  $t$  的宏基站的干扰信号,认为异构微基站功率较低,它对相邻小区的干扰忽略不计。 $N_0$  为子载波的平均噪声功率。

在 LTE 系统中将固定数目子载波组成资源块(resource block, RB),作为时频资源调度的最小单位,将链路质量向上层映射需要做信噪比合并。

$$\bar{\gamma}_{sij}^b = -\beta \ln \left( \frac{1}{N_k} \sum_k \exp \left\{ -\frac{1}{\beta} \gamma_{sij}^k \right\} \right) \quad (3)$$

$\bar{\gamma}_{sij}^b$  为  $s$  扇区内基站  $i$  的第  $j$  个 UE 在第  $b$  个 RB 的等



效信噪比(SNR),可以由RB内包含的所有子载波的信干噪比(SINR) $\gamma_{sj}^k$ 经过指数有效 SINR 映射(exponential effective SINR mapping, EESM)算法计算得到,其中 $\beta$ 值与 $\gamma_{sj}^k$ 有确定的映射关系, $N_k$ 为RB含有的子载波数目。

在RB总数为 $N_{RB}$ 的LTE系统中根据香农公式可以计算用户 $j$ 的信道速率上限为:

$$R_j = \sum_b^{N_{RB}} B_{sj}^b \eta_{sj}^b \ln(1 + \tilde{\gamma}_{sj}^b) \quad (4)$$

其中, $B_{sj}^b$ 为 $s$ 扇区的基站 $i$ 的第 $b$ 个RB的带宽; $\eta_{sj}^b$ 是一个取值为0或1的指示变量,如果扇区 $i$ 的第 $j$ 个UE占用第 $b$ 个RB, $\eta_{sj}^b$ 就为1,否则为0。

综合上述推导,可以将第 $s$ 个扇区的用户速率表示为:

$$R_{sj} = \sum_b^{N_{RB}} B_{sj}^b \eta_{sj}^b \ln \left( 1 + (-\beta) \ln \left( \frac{1}{N_k} \sum_{k_i} \exp \left\{ -\frac{1}{\beta} \left( \frac{P_{sj}^k \cdot H_{sj}^k}{\sum_{m \in M} P_{sm}^k \cdot H_{sm}^k + \sum_{l \in S} P_{lm}^k \cdot H_{lm}^k + N_0} \right)} \right\} \right) \right) \quad (5)$$

经过信道估计或反馈测量得到用户信噪比 $\gamma_{sj}^k$ 后,MCS等级有直接对应关系,用户接收到信号之后将信噪比映射为MCS等级,根据LTE标准36.213<sup>[15]</sup>可以依据MCS等级与用户使用的RB数目 $N_{PRB}$ 得到可传输的传输块(transmission block, TB)对应的数据量。 $TBs$ 的单位为bit。

$$f_{TBs}(MCS, N^{PRB}) = TBs \quad (6)$$

扇区的总负载比例定义为为用户负载分配完成后,本扇区宏微基站已占用的RB数与扇区内所提供的RB总数的比值。

$$load_s = \frac{\sum_i^M \sum_b^{N_{RB,i}} \sum_j^U \eta_{sj}^b}{\sum_i^M N_{RB,i}} \quad (7)$$

负载均衡算法是在总负载不太高时才会有优化分配资源的空问,所以本问题设定的背景为有限的用户速率请求,实际速率由仿真平台产生。用户负载的有限数据速率请求表示为:

$$R_U = [R_j]; j \in U \quad (8)$$

依据用户MCS等级找到满足该速率请求最小的RB个数作为用户接入 $i$ 站点占用的RB个数。

$$\begin{cases} \frac{f_{TBs}(MCS_{i,j}, N_{i,j}^{RB})}{T_{RB}} \geq R_j; \\ \frac{f_{TBs}(MCS_{i,j}, N_{i,j}^{RB} - 1)}{T_{RB}} < R_j; \end{cases} \quad \forall i \in M, \forall j \in U \quad (9)$$

根据上述映射流程计算得到用户 $j$ 如果接入所有宏、微基站 $i$ 中消耗RB个数的矩阵 $N_U^{RB}$ , $T_{RB}$ 为LTE标准中每个RB的时域长度。

$$\begin{aligned} N_U^{RB} &= f_{TBs}^{-1}(MCS_j, R^U \cdot T_{RB}) \\ &= \begin{bmatrix} N_{1,1}^{RB} & \cdots & N_{1,U}^{RB} \\ \vdots & & \\ N_{M,1}^{RB} & & \end{bmatrix}_{M \times U} \end{aligned} \quad (10)$$

至此得到了有限用户速率到占用系统RB数的映射关系。

### 2.2.2 用户功率代价与问题模型

本文优化算法目的是在满足用户速率的条件下求解扇区中多基站承载多用户的分配方案,使基站总功率达到最低。还需要建立从用户占用基站时频资源RB映射到基站功率的用户功率模型。

由于用户只能接入宏基站或微基站中的1个,则将用户 $j$ 接入基站 $i$ 的状态用 $\{0, 1\}$ 选择矩阵表示, $\alpha_{ij}=1$ 表示用户 $i$ 接入了基站 $j$ 。用户有限的速率请求需要得到满足,并且只能接入1个基站,则矩阵每1列之和为1。每个基站可服务多个用户,则每一行的不做限制。

$$\alpha_{M \times U} = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \cdots & \alpha_{1,U} \\ \vdots & & \\ \alpha_{M,1} & & \end{bmatrix}_{M \times U};$$

$$\sum_{i \in M} \alpha_{i,j} = 1; \alpha_{i,j} \in \{0, 1\}, \forall i \in M, j \in U \quad (11)$$

根据上述简化的线性基站能耗模型,用户占用的RB数与发射功率增量有线性关系,则也与消耗基站的功率的增量有线性关系。RB分配矩阵可以转化为消耗基站的功率增量矩阵,并不是最终的功率,在第3节会有进一步变换。

$$P_U = f_{Pm}(N_U^{RB}) = \begin{bmatrix} P_{1,1} & \cdots & P_{1,U} \\ \vdots & & \\ P_{M,1} & & \end{bmatrix}_{M \times U} \quad (12)$$

问题转化为已知 $P_{M \times U}$ 矩阵条件下求解 $\alpha_{M \times U}$ 矩阵,矩阵每行可以有多个元素1,表示扇区内每个基站可接入多个用户,矩阵每列只有一个元素为1,表示每个用户只能接

入 1 个基站。

$$\begin{aligned} \min Z &= \sum_{i \in M} \sum_{j \in U} \alpha_{i,j} P_{i,j} \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} \sum_{i \in M} \alpha_{i,j} = 1; \forall j \in U \\ \alpha_{i,j} = \{0, 1\}; \forall i \in M, j \in U \\ \sum_{j \in U} \alpha_{i,j} \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

### 3 扩增指派算法

基于以上功率模型, 尝试用标准指派问题求解此问题。标准指派问题<sup>[6]</sup>形式: 有  $n$  个人和  $n$  件事, 已知第  $i$  个人做第  $j$  件事的费用矩阵为  $C_{ij} (i, j=1, 2, \dots, n)$ , 求确定人和事之间的一一对应的指派方案使这  $n$  件事的总代价最小。其中, 矩阵  $C_{ij}$  称为效率矩阵或系数矩阵。匈牙利算法<sup>[6]</sup>提出了解决指派问题的一种算法, 理论基础是在代价矩阵的任何行或列中, 加上或减去一个常数后不会改变最优分配; 其基本思想是矩阵行列变换使得每行或每列至少有一个零, 直至在不同行不同列中至少有一个零元素, 从而得到与这些零元素相对应的一个完全分配方案时间复杂度为  $O(n \times n)$ 。其解的形式用分配矩阵  $(X_{ij})_{n \times n}$  描述, 每行每列有且只有一个 1。

本问题中扇区中有一个宏基站, 多个微基站。与标准指派问题相比在该矩阵中每行元素不止一个等于 1, 而且对应的代价矩阵  $P_{M \times U}$  维度也是  $M \times U$ , 不能使用匈牙利算法, 此问题可以通过矩阵扩增解决, 将原来的代价矩阵每行复制为  $U$  行, 表示每个基站都虚拟成了  $U$  个基站, 用户和基站可一一对应。为将矩阵变成方阵运用匈牙利算法, 再将矩阵右侧补充  $(M \cdot U) \times (M \cdot U - U)$  的 0 矩阵, 表示增补的用户无效, 不影响总的功率代价。

$$P_{M \times U} \rightarrow \bar{P}_{M \cdot U \times U} \rightarrow \bar{P}_{(M \cdot U) \times (M \cdot U)} = \bar{P}_{(M \cdot U) \times (M \cdot U)} =$$

$$\left[ \begin{array}{c|c} \begin{matrix} \begin{bmatrix} P_{1,1} & \cdots & P_{1,U} \\ \vdots & & P_{i,j} \\ P_{U,1} & & P_{U,U} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \\ \hline \begin{bmatrix} P_{M \cdot (U-1),1} & \cdots & P_{M \cdot (U-1),U} \\ \vdots & & \vdots \\ P_{M \cdot U,1} & & P_{M \cdot U,U} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \end{array} \right]_{(M \cdot U) \times (M \cdot U)} \quad (14)$$

经过代价矩阵扩增, 问题(13)转换为问题(15):

$$\begin{aligned} \min Z &= \sum_{i=1}^{M \cdot U} \sum_{j=1}^{M \cdot U} \alpha_{i,j} P_{i,j} \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} \sum_{i=1}^{M \cdot U} \alpha_{i,j} = 1 \\ \sum_{j=1}^{M \cdot U} \alpha_{i,j} = 1 \\ \alpha_{i,j} = \{0, 1\}; \forall i \in M \cdot U, j \in M \cdot U \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

可使用常用的匈牙利算法对  $C$  矩阵进行行列变换, 求解最优分配矩阵  $\bar{\alpha}$ 。可以根据匈牙利算法复杂度的值扩增后求解, 时间复杂度为  $O(M^2 \cdot U^2)$ 。

另一个关键问题在于功率模型式(1)中  $P_0$  拆分到多用户能耗代价时用户间有相关性, 即  $P_{M \times U}$  是由相互关联的选择矩阵  $\alpha_{M \times U}$  决定的, 并不像标准指派模型中  $C_{ij}$  是先确定的。与参考文献[9]所述全网吞吐率优化是 NP-hard 问题同类, 全网功率优化也是 NP-hard 问题, 目前尚无多项式复杂度的解法, 本文提出了一种逼近最优解的多项式复杂度算法, 整体上包含以下 5 步。

(1) 依据基站休眠与否指定搜索空间, 增加静态功耗代价。

(2) 扩增功率代价模型  $P_{M \times U}$  为  $\bar{P}$ 。

(3) 运用匈牙利算法求解固定功率代价矩阵的最优功率的分配  $\bar{\alpha}$ 。

(4) 将分配矩阵  $\bar{\alpha}$  收缩为  $\bar{\alpha}_{M \times U}$ 。

(5) 校验分配结果与约束, 迭代回退分配矩阵。输出满足约束的分配结果  $\alpha_{M \times U}$ , 作为功率最低结果。

前文已提到, 异构网中微基站不一定支持低功率休眠模式, 则下文中两种情况下的具体算法的步骤与复杂度取决于基站是否休眠。

#### 3.1 微基站无休眠模式的算法

微基站无休眠模式时, 功率代价增加一项静态功耗  $P_0$  的均值, 主要步骤在于矩阵扩增与匈牙利算法的矩阵行列变换, 复杂度为  $O(M^2 \cdot U^2)$ , 算法步骤如下。

(1)  $N_U^{\text{RB}} = f^{-1}_{\text{RB}}(MCS_j, R^U \cdot T_{\text{RB}})$ ,  $P_U = f_{\text{RB}}(N_U^{\text{RB}})$ , 计算占用的 RB 数目, 代入功率模型计算功率增量矩阵  $P_U$ 。

(2)  $P_U = P_U + P_0/U$ , 依功率模型中宏基站与微基站  $P_0$ , 功率增量矩阵  $P_U$  增加静态功耗  $P_0$  均值。

(3)  $P_{M \times U} \rightarrow \bar{P}_{M \cdot U \times U} \rightarrow \bar{P}_{(M \cdot U) \times (M \cdot U)}$ , 每行复制为  $U$  行, 矩阵右侧补充零矩阵  $0_{(M \cdot U) \times (M \cdot U - U)}$ 。



(4)将扩增的  $\bar{P}_{(M \cdot U) \times (M \cdot U)}$  代入标准匈牙利算法,求出  $\bar{\alpha}_{(M \cdot U) \times (M \cdot U)}$  矩阵。

(5) $\bar{\alpha}_{(M \cdot U) \times (M \cdot U)} \rightarrow \bar{\alpha}_{M \cdot U \times U} \rightarrow \alpha_{M \times U}$ , 删除右侧  $(M \cdot U) \times (M \cdot U - U)$  的子矩阵,  $U$  行相加合为一行, 收缩为  $\alpha_{M \times U}$ 。

(6)检验分配结果, 如存在基站  $i$  负载超过最大 RB 数, 将超载基站的最小负载用户  $j$  的功率代价  $P_j$  设定为大值 *BigValue* (每 RB 功率代价的  $10^6$  倍) 返回步骤(3); 如不存在超载基站则输出分配。

### 3.2 微基站有休眠模式的算法

当微基站有休眠模式时, 问题将变得更加复杂, 除了用户间相关会造成功率代价矩阵不准确, 从而造成偏离最优解, 基站的功率曲线不连续也使功率代价矩阵不准确, 造成偏离最优解。考虑到无线通信网络每个扇区中微基站数目一般不超 10 个, 相比第 3.1 节无休眠算法增加一层搜索基站睡眠与否的集合。eNBs 是微基站开关状态组合的集合。

$$eNBs = \{S_{bs1}, S_{bs2}, \dots, S_{bsN}\}, S_{bsi} = \{0, 1\} \quad (16)$$

$S_{bsi}=0$  表示扇区内第  $i$  个微基站处于休眠状态。可确定能耗代价矩阵, 再运用匈牙利算法计算最优分配结果, 将此结果中基站开关状态与搜索条件校验, 选出二者匹配的负载分配矩阵, 算法步骤如下。

(1) for *Micros* = 1:eNBs, 选取微基站睡眠组合。

(2)  $N_U^{RB} = f_{TB}^{-1}(MCS_j, R^U \cdot T_{RB}), P_U = f_{P_m}(N_U^{RB})$ , 计算占用的 RB 数目, 代入功率模型计算功率增量矩阵  $P_U$ 。

(3)  $P_U = P_U + P_0/U$ , 依功率模型中宏基站与微基站  $P_0$ , 增加静态功耗  $P_0$  均值, *Micros* 中关闭的微基站代价置为 *BigValue*。

(4) $P_{M \times U} \rightarrow \bar{P}_{M \cdot U \times U} \rightarrow \bar{P}_{(M \cdot U) \times (M \cdot U)}$ , 每行复制为  $U$  行, 矩阵右侧补充零矩阵  $0_{(M \cdot U) \times (M \cdot U - U)}$ 。

(5)将扩增的  $\bar{P}_{(M \cdot U) \times (M \cdot U)}$  代入标准匈牙利算法, 求出  $\bar{\alpha}_{(M \cdot U) \times (M \cdot U)}$  矩阵。

(6) $\bar{\alpha}_{(M \cdot U) \times (M \cdot U)} \rightarrow \bar{\alpha}_{M \cdot U \times U} \rightarrow \alpha_{M \times U}$ , 删除右侧  $(M \cdot U) \times (M \cdot U - U)$  的子矩阵,  $U$  行相加合为一行, 收缩为  $\alpha_{M \times U}$ 。

(7)检验分配结果。如存在基站  $i$  负载超过最大 RB 数, 将超载基站的最小负载用户  $j$  的代价  $P_j$  设为 *BigValue*, 返回步骤(3); 如不存在超载基站, 则取遍历 eNBs 得到最小代价的分配结果输出。

### 3.3 算法复杂度

为了评估提出的扩增指派算法节能效果时间复杂度, 还选取了用户最大接收功率基站算法 (RSRP (reference

signal receiving power, 参考信号接收功率) 算法)、穷举法作为对比, 穷举法要遍历基站和用户的所有组合, 复杂度非常高, 只是为了得到全局功耗最优解作为算法节能的上界。

RSRP 算法只需要选取每个用户的最大接收功率基站, 时间复杂度为  $O(M \cdot U)$ , 全局遍历的穷举算法要枚举用户接入基站的所有组合数, 在一个扇区中共有  $M^U$  种组合, 每一种组合的时间复杂度归一化为 1, 则时间复杂度为  $O(M^U)$ , 远大于本文的扩增指派算法  $O(M^2 \cdot U^2)$ 。在第 4.3 节将会实际计算对比 3 种算法的时间复杂度。

## 4 仿真与结果

### 4.1 仿真平台与参数

维也纳 LTE 仿真平台<sup>[17]</sup>是由维也纳科技大学 (Vienna University of Technology) 发布, 并已更新发布 LTE-A 的仿真平台, 在国内外众多涉及无线通信的科研院所比较广泛的使用、认可与借鉴, 将本算法添加到仿真平台中, 设置仿真参数, 见表 2, 进行仿真分析。

表 2 仿真平台参数设置

| 仿真参数       | 参数值                                        |
|------------|--------------------------------------------|
| 载频/带宽      | macro: 2 600/10 MHz<br>micro: 2 600/10 MHz |
| 大尺度衰落      | COST231 (macro, micro)                     |
| 小尺度衰落      | Winner II                                  |
| 宏小区结构      | 7 小区×3 扇区                                  |
| 宏小区间距离     | 500 m                                      |
| micro 个数   | 9 micro/1 macro                            |
| 每扇区的 UE 数  | 10, 随机撒点                                   |
| 子帧长度 (TTI) | 1 ms                                       |
| 仿真信道场景     | UE 速率 30 km/h                              |
| 传输模式       | 2Tx·1Rx 发送分集                               |
| 发射功率       | macro: 46 dBm, micro: 38 dBm               |

### 4.2 节能效果

#### 4.2.1 微基站无休眠模式节能效果

仿真结果如图 2 所示, 表示微基站无休眠模式条件下运用第 3.1 节提出的扩增指派算法, 并根据基站负载的分配结果运用功率模型计算宏扇区和内部微基站总功率, 得到功率负载关系, 图示的功率是 21 扇区平均功率。RSRP 算法使用户接入扇区内参考信号接收功率最大的基站, 随着负载的增加, 扇区内的基站总功率大体上呈线性增长关

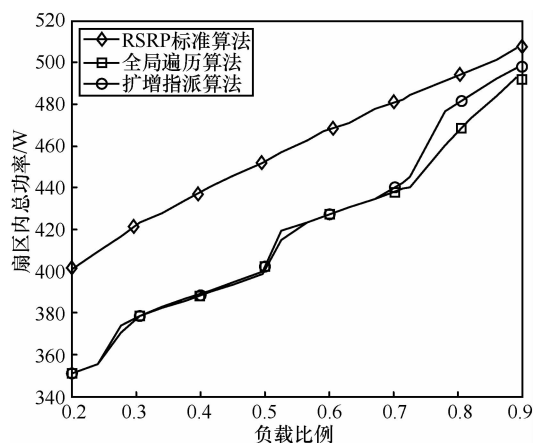


图 2 无休眠模式—扇区内基站总功率随负载变化关系

系,原因在于两种基站类型的功率模型是线性的。可以看到扩增指派算法在负载 60%以下时比较接近全局最优解,而 70%以上负载时扇区内总功耗靠近 RSRP 算法。

根据图 2 计算 3 种算法相对于 RSRP 算法的节能比例得到图 3,扩增指派算法在 70%以下的负载水平可以得到 9%的功率节省,且已经接近全局遍历算法的最优功率解,是有效的节能负载均衡算法。

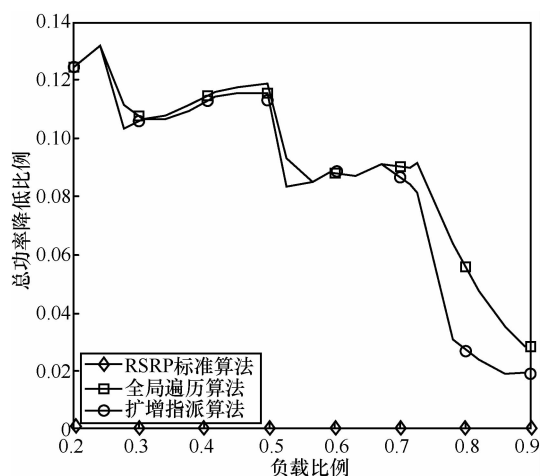


图 3 无休眠模式—相对 RSRP 算法扇区内总功率降低比例

#### 4.2.2 微基站有休眠模式节能效果

仿真图 4 得到了微基站有休眠模式条件下运用第 3.2 节提出的扩增指派算法时,宏扇区和内部微基站总功率随负载变化的关系,RSRP 算法的功耗随负载线性增加规律与微基站无休眠模式相同,原因在于 RSRP 接入基站时并不会考虑负载高低,导致很少有微基站无负载而休眠。和图 2 相比,扩增指派算法总功率偏离遍历最优解更多,原因在于休眠模式造成功率模型出现离散点,能耗代价矩

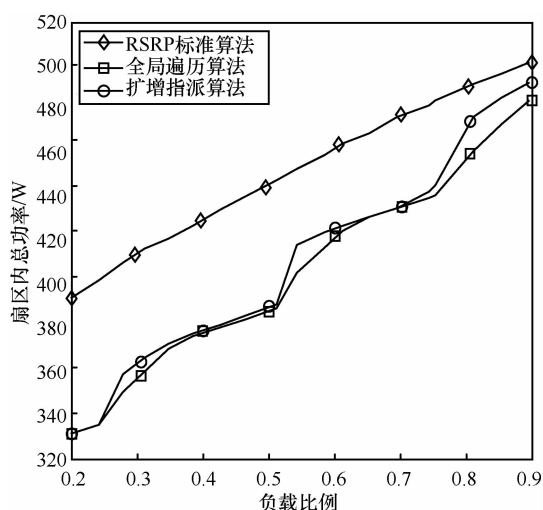


图 4 微基站可休眠—扇区内基站总功率随负载变化关系

阵的估计不准确。

根据图 4 计算 3 种算法相对于 RSRP 算法的节能比例得到图 5,与微基站不休眠时不同负载下最高 12% 的节能比例相比,最大节能比例达到 16%,节能比例曲线整体在图 3 之上,这也是微基站支持睡眠模式带来的收益。同样,由于休眠模式能耗代价矩阵的估计不准,导致有休眠模式时偏离最优解较多,仍然是有效的节能负载均衡算法。

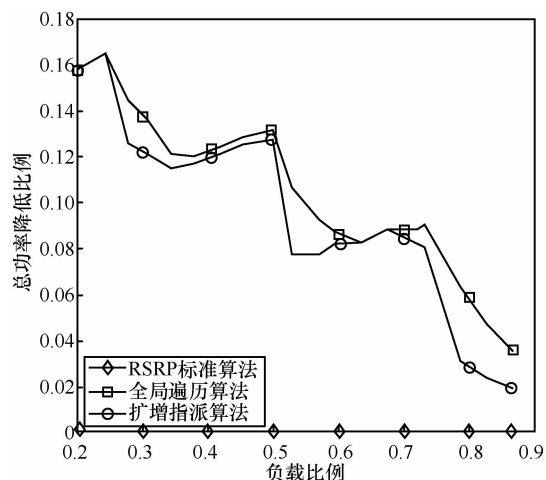


图 5 微基站可休眠—相对 RSRP 算法扇区内总功率降低比例

#### 4.2.3 算法复杂度对比

在第 3.3 节中对 3 种算法的复杂度做了估计,为了更准确地刻画算法的复杂度,在仿真过程中统计了 3 种均衡算法运行耗时。本文仿真每小区 9 个微基站对应每扇区 3 个微基站,如图 6 所示。可以看到时间复杂度受基



站负载水平的影响较小,微基站支持休眠模式时算法复杂度会有所提升。本算法时间复杂度和 RSRP 算法量级相差不大,且远小于全局遍历算法,而节能效果接近全局遍历算法。

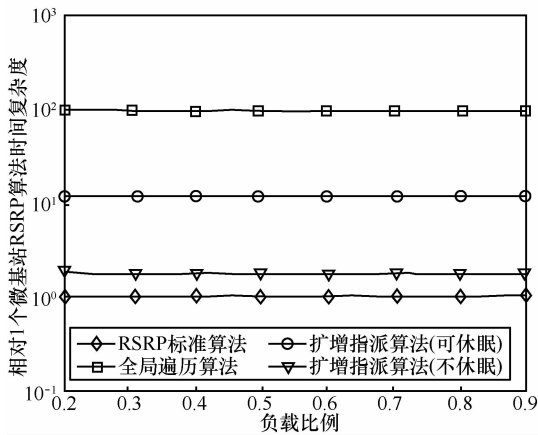


图6 4种算法复杂度相对关系及随负载变化关系

## 5 结束语

本文在异构网负载均衡问题中,提出了一种扩增指派的旨在节能的复杂均衡算法,同时满足用户有限的速率负载,给出了求解扇区中多基站承载多用户的分配方案的流程。结果表明,相比 RSRP 算法的节能效果,本文提出的算法在不同负载下都接近遍历最优解,同时复杂度远小于全局遍历。

## 参考文献

- 1 Damjanovic A, Montojo J, Wei Y B, *et al.* A survey on 3GPP heterogeneous networks. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(3)
- 2 Sung-rae Cho, Wan Choi. Coverage and load balancing in heterogeneous cellular networks with minimum cell. *IEEE Transactions on Separation Mobile Computing*, 2014, 13(9)
- 3 Vereecken W, Heddeghem W V, Deruyck M, *et al.* Power consumption in telecommunication networks: overview and reduction strategies. *IEEE Commun Mag*, 2011, 49(6)
- 4 IMT-2020(5G)推进组. 5G 愿景与需求白皮书, 2014
- 5 IMT-2020(5G)PG. White Paper on 5G Vision and Requirements, 2014
- 5 Chen T, Yang Y, Zhang H G, *et al.* Network energy saving technologies for green wireless access networks. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(5)
- 6 Li C G, Sun F, Cioffi J M, *et al.* Energy efficient MIMO relay transmissions via joint power allocations. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-II*, 2014, 61(7):531~535

- 7 Li C G, Cioffi J M, Yang L X. Optimal energy efficient joint power allocation for two-hop single-antenna relaying systems. *European Transactions on Telecommunications*, 2014(6)
- 8 Li P F, Chen X H, Wang W D. A high-efficient algorithm of mobile load balancing in LTE system. *Proceedings of IEEE VTC Fall*, Quebec City, Canada, 2012:1~5
- 9 Ye Q Y, Rong B Y, Chen Y D, *et al.* User association for load balancing in heterogeneous cellular networks *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(6)
- 10 Sung-rae Cho, Wan Choi. Energy-efficient repulsive cell activation for heterogeneous cellular networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(5)
- 11 许娟雄,刘伊莎,唐伦等. LTE-Advanced 异构网络中负载均衡研究进展及展望. *电信科学*, 2014, 30(10)
- Xu J X, Liu Y S, Tang L, *et al.* Survey on research progress of load balancing in LTE-advanced heterogeneous network. *Telecommunications Science*, 2014, 30(10)
- 12 Auer G, Giannini V, Desset C, *et al.* How much energy is needed to run a wireless network. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(5)
- 13 Earth Deliverables 2.3. Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown, 2012
- 14 Desset C, Debaillie B, Giannini V, *et al.* Flexible power modeling of LTE base stations. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Shanghai, China, 2012: 2858~2862
- 15 3GPP TS 36.213 V9.3.0-2010. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Physical layer procedures, Sept 2010
- 16 云俊. 运筹学:原理及应用. 北京:北京大学出版社, 2012
- Yun J. *Operations Research: Principles and Application*. Beijing: Peking University Press, 2012
- 17 Ikuno J C, Wrulich M, Rupp M. System level simulation of LTE networks. *Proceedings of IEEE VTC*, Taipei, China, 2010:1~5

## [作者简介]



刘凯,男,北京大学硕士生,主要研究方向为无线通信系统性能优化、绿色无线通信节能技术。

赵建业,男,博士,北京大学信息科学技术学院教授,主要研究方向为电路与系统、无线通信系统。

刘志敏,女,博士,北京大学信息科学技术学院副教授,主要研究方向为移动通信、无线资源管理、绿色无线通信节能技术。