

doi: 10.12052/gdutxb.170089

# 具有能量获取基站的相邻多蜂窝小区的能与频谱分配研究

童辉志<sup>1</sup>, 张广驰<sup>1</sup>, 周绪龙<sup>1</sup>, 崔苗<sup>1</sup>, 刘怡俊<sup>1</sup>, 林凡<sup>2</sup>

(1. 广东工业大学 信息工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广州杰赛科技股份有限公司, 广东 广州 510310)

**摘要:** 研究在基站具有能量获取功能的条件下, 相邻多蜂窝小区下行链路的能与频谱的协作分配, 主要考虑用户效用和相邻多蜂窝小区基站收益的联合最大化. 在该问题中, 用户对小区的选择是资源分配过程中的关键步骤. 其中, 它的最优方法是穷搜索, 但计算复杂度过高. 本文提出一种优化用户小区选择的次优方法——信道增益比选择法, 解决用户快速选择小区的问题. 当用户选择小区后, 本文用广义的Stackelberg博弈建模来解决每个蜂窝小区的能与频谱分配问题. 同时基于信道增益比选择法提出两种基准方法——最大信道增益选择法和最短距离选择法. 仿真结果表明, 信道增益比选择法相对于最大信道增益选择法和最短距离选择法具有更好的用户公平性和基站收益.

**关键词:** 能量获取; 资源分配; Stackelberg博弈; 信道增益比

中图分类号: TN929.5      文献标志码: A      文章编号: 1007-7162(2018)04-0068-07

## Joint Energy and Spectrum Allocation in Multiple Adjacent Cells with Energy Harvesting Base Stations

Tong Hui-zhi<sup>1</sup>, Zhang Guang-chi<sup>1</sup>, Zhou Xun-long<sup>1</sup>, Cui Miao<sup>1</sup>, Liu Yi-jun<sup>1</sup>, Lin Fan<sup>2</sup>

(1. School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;  
2. Guangzhou GCI Science-Technology Co., Ltd., Guangzhou 510310, China)

**Abstract:** Joint energy and spectrum cooperative allocation in the downlink is investigated for multiple adjacent cells equipped with energy harvesting base stations. In particular, the joint maximization of the users' utilities and the base stations' revenues in multiple adjacent cells is considered. The users' choice of cells is a key step in the resource allocation process. Since each user has multiple options to join adjacent cells, the optimal method of solving the sum-utility maximizing energy and spectrum allocation problem is the exhaustive search, which finds the best solution among all possible sets of user choices and has high complexity. A computation-efficient suboptimal method of deciding which user can choose the appropriate cell to join is proposed based on the channel gain ratio selection. When the users' choices are fixed, the energy and spectrum allocation problems can be matched with the framework of a generalized Stackelberg game, and can be solved. At the same time, two kinds of reference methods, the maximum channel gain selection method and shortest distance selection method, are proposed based on the channel gain ratio selection. Simulation results have shown that the proposed method has better utility and revenue performances than maximum channel gain selection and shortest distance selection method.

**Key words:** energy harvesting; resource allocation; Stackelberg game; channel gain ratio

收稿日期: 2017-04-25  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61571138); 广东省自然科学基金资助项目(2015A030313481); 广东省学科建设专项资金科技创新项目(2013KJ CX0060); 广东省科技计划项目(2016A050503044, 2016KZ010101, 2016KZ010107, 2016B090904001, 2014B090901061, 2015B090901060, 2015B090908001); 广州市科技计划项目(201604020127, 2014Y2-00211); 广东工业大学培英育才计划资助项目(220411321)  
作者简介: 童辉志(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为能量获取通信的资源调度.  
通信作者: 张广驰(1982-), 副教授, 主要研究方向为信号处理、无线通信和信息安全. E-mail: gc Zhang@gdut.edu.cn

由于农村地区拥有丰富的绿色可再生能源资源,如太阳能、风能等<sup>[1]</sup>,目前在国内外的一些农村地区正逐步部署一种获取可再生能源的基站.例如,世界上最大的太阳能基站集群已经由中国移动在西藏建立.因此,能量获取主要用以减少蜂窝网络的不可再生能源消耗<sup>[2]</sup>,并满足他们的部分能源需求<sup>[3-4]</sup>,具有十分广阔的应用前景.高速无线回程技术的出现,使小基站消除有线连接技术得以实现<sup>[5]</sup>.因此,高速无线回程对于能量获取基站打开了全新局面,特别是对于微小区<sup>[6]</sup>或中继站<sup>[7]</sup>.文献[8]提供了能量获取基站在两个相邻蜂窝小区中最大化用户满意度水平和基站收益的最佳解决方案,其中基站仅由能量获取来供电.然而,相邻多蜂窝小区是如何实现最大化用户满意度水平和基站收益还没被研究.因为相邻多蜂窝小区之间存在更多共同的边缘用户,由于文献[8]中仅解决两个相邻小区之间的相邻用户调度问题,在这种情况下,相邻多蜂窝小区之间如何实现最大化用户的满意度水平和基站收益有待研究.因此,研究相邻多蜂窝小区如何进行能量与频谱协同分配能更好地实现连片组网应用.

在本文中,研究相邻多蜂窝小区之间的用户公平性和基站收益.在该系统中,每个用户只能与一个基站通信,因此每个用户需要选择一个小区接入,并每个用户需为所传输的数据资源(能量和频谱)支付费用.本文定义了每个用户的效用函数,反映用户的体验和满意度.同时,还定义了每个基站的效用函数,反映了基站的收益.用户的目标是选择最优小区来最大化自己的效用函数.而基站的目标是通过合理分配有限的能量和频谱资源最大化自己的效用.因此,为了保证用户和基站的公平性,资源的分配使用Stackelberg博弈方法来解决.但是,由于最优用户小区选择方法穷搜索具有高计算复杂度<sup>[8]</sup>.因此,本文提出了一种基于信道增益比的用户选择小区的次优方法——信道增益比选择法,进而缩短用户选择小区带来高复杂计算度,用户将根据信道增益比来选择合适的小区进行通信.同时,基于信道增益比选择法提出两种基准方法——最大信道增益选择法和最短距离选择法.最大信道增益选择法是根据用户到基站距离大小进行小区选择.仿真结果表明,信道增益比选择法相对于最大信道增益选择法和最短距离选择法具有更好的用户公平性和基站收益,是一种更有效的小区选择方法.

本文的贡献在3个方面:(1)解决了相邻多蜂窝

小区的资源和能量分配问题,其中基站仅由能源获取供电;(2)提出了信道增益比选择法,降低选择小区相对于穷搜索法带来的计算复杂度;(3)相对于最大信道增益法和最短距离选择法,信道增益比选择法提供更好的服务质量和更高的用户满意度.

## 1 系统模型

如图1所示,本文主要考虑7个相邻的能量获取基站和 $K$ 个用户的相邻蜂窝小区无线网络系统,其中 $G_{i,k}$ 表示第 $i$ 个基站到第 $k$ 用户之间的信道增益,其中 $\forall i \in I, I=7$ .如图2所示,通信系统被分成时帧,并且每帧持续时间 $T$ . $W_i$ 表示第 $i$ 个基站的总带宽.为了避免用户之间的干扰,在一个帧期间,假设每个用户只选择一个小区加入进行通信,同时用户在这个基站占用不同的频率和时间片.参数 $\eta_{i,k}$ 表示第 $k$ 用户是否加入第 $i$ 个基站,其中 $\eta_{i,k} \in \{0, 1\}$ .当用户选择第 $i$ 个基站加入时 $\eta_{i,k}=1$ ,否则不加入.集合 $\beta_i = \{\eta_{i,1}, \eta_{i,2}, \dots, \eta_{i,K}\}$ ,  $\eta_{i,k} \in \{0, 1\}$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 表示 $K$ 个用户的小区选择.其中,用 $|\cdot|$ 表示集合的基数,有 $K = \sum_{i=1}^7 |\beta_i|$ .

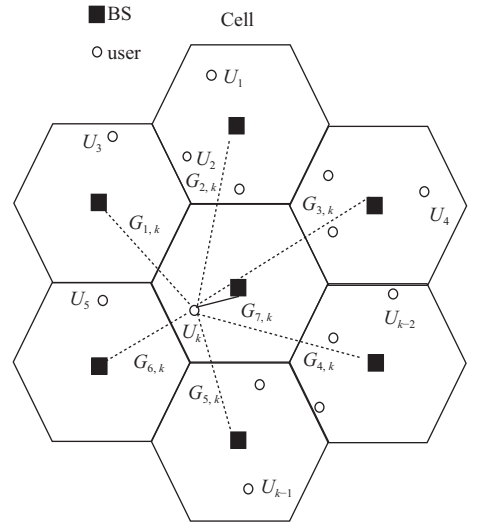


图1 相邻蜂窝小区系统模型

Fig.1 Adjacent-cell wireless system mode

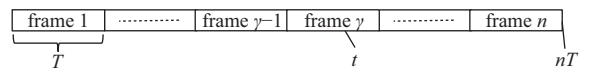


图2 时帧结构

Fig.2 Time frames

在时帧 $\gamma$ 内,如果 $\eta_{i,k} = 1$ ,第 $i$ 个基站以功率 $\rho_{i,k}$ 和带宽 $w_{i,k}$ 向第 $k$ 用户发送信息,同时分配时间片 $\zeta_{i,k}$ 给第 $k$ 用户.否则,第 $i$ 个基站将不会分配资源给第 $k$ 用户.同时分别定义 $L_{i,k}$ 和 $h_{i,k}$ 表示第

$i^{th}$ 个基站和第 $k^{th}$ 个用户之间的大尺度衰落系数和小尺度衰落系数。

在该系统中,假设每个基站使用在时帧 $\gamma-1$ 内获取的能量给基站用户提供服务.那么,在 $\gamma-1$ 时间范围内所获取的能量将是有限的.同时假设第 $i^{th}$ 个基站在时帧 $\gamma$ 内消耗能量 $E_i$ 仅用于传输,第 $i^{th}$ 个基站分配给第 $k^{th}$ 用户的能量可以表示为 $\eta_{i,k}E_{i,k}$ ,而每个基站的能量约束应满足

$$\sum_{k=1}^K \eta_{i,k}E_{i,k} \leq E_i. \quad (1)$$

假设信道的相干时间和相干带宽分别大于 $T$ 和 $W_i$ <sup>[9-10]</sup>,这样每个基站向每个用户发送的功率将是恒定的.同时第 $i^{th}$ 个基站向第 $k^{th}$ 用户发射功率可以表示为 $\rho_{i,k} = \eta_{i,k} \frac{E_{i,k}}{S_{i,k}}$ .因此,信道在每个时帧内可以看成平坦衰落.在时帧 $\gamma$ 中,第 $i^{th}$ 个基站到第 $k^{th}$ 用户信道容量可以给出<sup>[11]</sup>:

$$R_{i,k} = \eta_{i,k} \tau_{i,k} W_{i,k} \log_2 \left( 1 + \frac{\rho_{i,k} H_{i,k}}{w_{i,k}} \right), \quad (2)$$

其中 $H_{i,k} = \frac{G_{i,k}}{N_o}$ ,  $N_o$ 是噪声功率谱密度,  $G_{i,k}(t) = |h_{i,k}|^2 L_{i,k}$ 是信道增益.  $d_{i,k}$ 表示从第 $i^{th}$ 个基站到第 $k^{th}$ 用户的距离,并且 $L_{i,k}$ 所得到的路径损耗被建模如下:

$$L_{i,k}(t) = \begin{cases} \frac{\ell}{d_{i,k}^\alpha}, & \text{if } d_{i,k} > \gamma_o, \\ \chi_o^\alpha, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

其中 $\alpha$ 表示路径损耗指数,当距离太小时, $\gamma_o$ 是为避免奇点, $\sigma$ 表示大尺度衰落的补偿因子.

为了符号简单,第 $i^{th}$ 个基站到第 $k^{th}$ 用户的频谱可表示为 $\phi_{i,k} = w_{i,k} S_{i,k}$ .同时定义第 $i^{th}$ 个基站时间带宽乘积为 $Q_i = TW_i$ ,那么第 $i^{th}$ 个基站频谱约束有

$$\sum_{k=1}^K \eta_{i,k} \phi_{i,k} \leq Q_i, \quad (3)$$

而信道容量式(2)可以简化为

$$R_{i,k} = \eta_{i,k} \phi_{i,k} \log_2 \left( 1 + \frac{E_{i,k} H_{i,k}}{\phi_{i,k}} \right). \quad (4)$$

## 2 问题形成

### 2.1 基站的效用函数

多个相邻基站的目标是通过使用有限的能量和可用频谱来最大化其总收入.每个基站可以控制能量和频谱价格以最大化它们的效用函数,而第 $i^{th}$ 个基站可以控制每单位能量价格 $p_{i,1}$ (例如\$/J)和每单位频谱的价格 $p_{i,2}$ (例如\$).这样7个相邻基站的总收入

可以表达成

$$\Omega = \sum_{i=1}^7 \Omega_i, \quad (5)$$

其中 $\Omega_i$ 表示的是第 $i^{th}$ 个基站的效用函数,公式表达为

$$\Omega_i = p_{i,1} \sum_{k=1}^K \eta_{i,k} E_{i,k} + p_{i,2} \sum_{k=1}^K \eta_{i,k} \phi_{i,k}. \quad (6)$$

### 2.2 用户的效用功能

当所有用户都选定加入的小区时,相应小区的用户将通过频谱和能量的需求量来响应相应基站的价格.第 $k^{th}$ 用户的效用函数可以定义为

$$u_k = \sum_{i=1}^7 \eta_{i,k} u_{i,k}, \quad (7)$$

其中 $\eta_{i,k} u_{i,k}$ 表示第 $i^{th}$ 个基站第 $k^{th}$ 用户的效用函数,当第 $k^{th}$ 用户选择第 $i^{th}$ 个基站服务时, $u_{i,k}$ 应该是关于信道容量 $R_{i,k}$ 的递增函数,因为具有较高传输速率的用户将具有较高的满意度水平.然后, $u_{i,k}$ 应该是关于能量和频谱的支付值的递减函数.能量和频谱的支付值可以表示为 $(p_{i,1} E_{i,k} + p_{i,2} \phi_{i,k})$ .最后,不同类型的设备对通道容量有自己的要求,例如智能手机和笔记本电脑.所以,定义参数 $v_k$ 来表示第 $k^{th}$ 用户的设备对信道容量的需求. $u_{i,k}$ 定义为

$$u_{i,k} = v_k \log_2(1 + R_{i,k}) - p_{i,1} E_{i,k} - p_{i,2} \phi_{i,k}, \quad (8)$$

每个用户的目标是最大化其效用函数<sup>[12]</sup>.

$$\begin{cases} \max_{\eta_{i,k}, \phi_{i,k}, E_{i,k}} u_k = \sum_{i=1}^7 \eta_{i,k} u_{i,k}(p_{i,1}, p_{i,2}, E_{i,k}, \bar{E}_{i,-k}, \phi_{i,k}, \bar{\phi}_{i,-k}). \\ \text{s.t. (1)(3)} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\bar{E}_i = \{\eta_{i,1} E_{i,1}, \dots, \eta_{i,K} E_{i,K}\}$ ,  $\bar{\phi}_i = \{\eta_{i,1} \phi_{i,1}, \dots, \eta_{i,K} \phi_{i,K}\}$ 表示在时帧 $\gamma$ 内第 $i^{th}$ 个基站中的用户之间的能量和频谱分配的值的集合.让 $\bar{E}_{i,-k}$ 和 $\bar{\phi}_{i,-k}$ 分别表示第 $i^{th}$ 个基站能量和频谱分配的值的集合中没第 $k^{th}$ 用户能量和频谱的值.

## 3 能量和频谱分配方法

在本节中,为了保证用户和基站的公平性,本文使用广义的Stackelberg博弈方法来分配能量和频谱<sup>[13]</sup>.在文献[8]中,用户的最优小区选择集合可以用穷举搜索方法来找出,但该方案具有高复杂计算度.在本系统模型有 $7^K$ 种可能选择.所以,本文提出一种基于信道增益比的用户选择小区的次优方法——信道增益比选择法.

### 3.1 纳什均衡的存在和唯一性

当所有用户已确定加入某个小区时,广义的纳什均衡问题可以有很多解或者无限解,但广义的纳什均衡问题可以通过变化不等式问题重构,转化为求解该问题的变化均衡<sup>[9,14]</sup>.

对于第 $i$ 个基站,由于 $F_i = (\nabla_{E_{i,1}} \eta_{i,1} u_{i,1}, \nabla_{\phi_{i,1}} \eta_{i,1} u_{i,1}, \dots, \nabla_{E_{i,K}} \eta_{i,K} u_{i,K}, \nabla_{\phi_{i,K}} \eta_{i,K} u_{i,K})$ 是标量函数的梯度,相当于 $F_i = \nabla f_i(\bar{\phi}_i, \bar{E}_i)$ ,其中 $f_i(\bar{\phi}_i, \bar{E}_i) = \sum_{k=1}^K u_{i,k}$ . 在文献[10]中的定理1证明可知,第 $i$ 个基站目标函数 $f_i$ 是关于优化变量 $E_{i,k}$ 和 $\phi_{i,k}$ 的严格凹函数,当第 $i$ 个基站的价格 $p_{i,1}$ 和 $p_{i,1}$ 确定时, $f_i$ 的变化均衡存在且唯一. 同时,约束条件(1)(3)是线性的,7个目标函数 $f_i$ 的和也是保凸的,那么目标公式(10)也是凸的,所以7个相邻蜂窝小区的变化均衡的解可以表示成以下优化问题<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} \max_{\bar{\phi}_i, \bar{E}_i} \sum_{i=1}^7 f_i(\bar{\phi}_i, \bar{E}_i). \\ \text{s.t. (1)(3)}. \end{cases} \quad (10)$$

### 3.2 Stackelberg博弈的解

(1) 求解变化不等式:优化问题(10)的拉格朗日可以表示为

$$L = \sum_{i=1}^7 \left[ f_i(\bar{\phi}_i, \bar{E}_i) - \lambda_{i,1} \left( \sum_{k=1}^K \eta_{i,k} E_{i,k} - E_i \right) - \lambda_{i,2} \left( \sum_{k=1}^K \eta_{i,k} \phi_{i,k} - Q_i \right) \right], \quad (11)$$

其中 $\lambda_{i,1}, \lambda_{i,2} \geq 0$ 分别是与式(1)和(3)相关的拉格朗日乘子.  $\bar{\phi}_i^*, \bar{E}_i^*, \lambda_{i,1}^*$ 和 $\lambda_{i,2}^*$ 的值满足Karush-Kuhn-Tucker (KKT)条件,可以通过如下迭代获得:在步骤1中,各个基站的用户可以获取在步骤2中由基站更新的需求的 $\lambda_{i,1}^*$ 和 $\lambda_{i,2}^*$ 的值,计算迭代,找到最优的解,具体步骤如下:

步骤1(由用户解决):从KKT条件可得,  $\frac{\partial L}{\partial E_{i,k}} = 0$  和  $\frac{\partial L}{\partial \phi_{i,k}} = 0$ . 因此,可以根据下面的公式通过分布式直接计算方法获得每个用户最优的值 $E_{i,k}^*, \phi_{i,k}^*$ ,

$$E_{i,k}^* = \left[ \eta_{i,k} \left( \frac{(e^{D_{i,k}} - 1) \left( \frac{\nu_k H_{i,k} e^{-D_{i,k}}}{l_{i,1}} - (\ln 2)^2 \right)}{D_{i,k} H_{i,k} \ln 2} \right) \right]_{\xi_1}, \quad (12)$$

$$\phi_{i,k}^* = \left[ \eta_{i,k} \left( \frac{\left( \frac{\nu_k H_{i,k} e^{-D_{i,k}}}{l_{i,1}} - (\ln 2)^2 \right)}{D_{i,k} \ln 2} \right) \right]_{\xi_1}, \quad (13)$$

其中 $[\cdot]_{\xi_1} = \max(\cdot, \xi_1), D_{i,k}$ 为

$$D_{i,k} = 1 + W\left(\frac{-l_{i,1} + l_{i,2} H_{i,k}}{e l_{i,1}}\right), \quad (14)$$

其中 $l_{i,1} = \lambda_{i,1} + p_{i,1}, l_{i,2} = \lambda_{i,2} + p_{i,2}$ .  $W(x)$ 表示Lambert W函数.

步骤2(由基站解决):使用对偶域和子梯度方法,可以获得

$$\lambda_{i,1}(j+1) = \left[ \lambda_{i,1}(j) - \varsigma_{i,1}(j) \left( E_i - \sum_{k=1}^K \eta_{i,k} E_{i,k}(j) \right) \right]_0, \quad (15)$$

$$\lambda_{i,2}(j+1) = \left[ \lambda_{i,2}(j) - \varsigma_{i,2}(j) \left( Q_i - \sum_{k=1}^K \eta_{i,k} \phi_{i,k}(j) \right) \right]_0, \quad (16)$$

其中,  $\varsigma_{i,m}(j), i, m \in \{1, 2\}$ 是正迭代步长,  $j > 0$ 是迭代指数. 由于优化问题(10)是凹的,保证两个步骤之间的迭代收敛到(10)的最优解<sup>[15-16]</sup>.

(2) 优化价格:从KKT条件,可得  $\frac{\partial u_{i,k}}{\partial E_{i,k}} - \lambda_{i,1}^* = 0$ ,

$\frac{\partial u_{i,k}}{\partial \phi_{i,k}} - \lambda_{i,2}^* = 0$ , 因为 $\lambda_{i,1}^*, \lambda_{i,2}^* \geq 0$ , 那么价格 $p_{i,1}, p_{i,2}$ 必须满足不等式:

$$\begin{aligned} p_{i,1}^* &\leq \frac{\nu_k H_{i,k} \phi_{i,k}^*}{(H_{i,k} E_{i,k}^* + \phi_{i,k}^*) (\ln 2 + \phi_{i,k}^* \ln(1 + \frac{H_{i,k} E_{i,k}^*}{\phi_{i,k}^*})) \ln 2}, \quad (17) \\ p_{i,2}^* &\leq \frac{\nu_k (-H_{i,k} E_{i,k}^* + (H_{i,k} E_{i,k}^* + \phi_{i,k}^*) \ln(1 + \frac{H_{i,k} E_{i,k}^*}{\phi_{i,k}^*}))}{(H_{i,k} E_{i,k}^* + \phi_{i,k}^*) (\ln 2 + \phi_{i,k}^* \ln(1 + \frac{H_{i,k} E_{i,k}^*}{\phi_{i,k}^*})) \ln 2}. \end{aligned} \quad (18)$$

收益最大化的价格,由式(17)和(18)给出,当式(17)、(18)取得相等时收益最大.

### 3.3 用户小区选择解决方案

使用穷搜索方法来找到最优的用户基站选择集是一种复杂的方式,有 $7^K$ 种可能选择. 为了降低计算复杂度,在该系统中研究一种基于信道增益比的用户选择小区的次优方法——信道增益比选择法,同时基于该方法的特性提出了最大信道增益选择法和最短距离选择法作为基准方法.

其中,信道增益比选择法具体的推导如下:

(1) 从式(12)、(13),可以知道效用函数 $u_{i,k}$ 是关于 $H_{i,k}$ 的增函数. 因此,用户选择更高的信道增益 $H_{i,k}$ 将有更高的满意度.

(2) 当一个基站中的能量和频谱资源给定时,随着用户数量的增加,用户可以分配的资源降低,平均用户的满意度将减少. 同时该基站的收入将增加. 在文献[8]中已证明,当两个基站获取能量相同且满足一定的服务质量 $\sigma$ 时,随着两个小区中的用户数量接近,基站的总收入和用户的平均满意度将增加. 当两

个小区中用户的数量近似相等时,用户的平均满意度和基站的收益之间将达到更好的平衡. 因为随着两个小区中的用户数量接近,两个基站中用户的竞争得到平衡,用户和两个基站都可以最大化自己的效用函数.

根据上述推导和证明,信道增益比选择法如下:

第1步:比较第 $k^{th}$ 用户不同基站信道增益值 $H_{i,k}$ ,并选择较大的值作为用户选择要加入的小区的标准,用户的选择由下式给出:

$$\begin{cases} \eta_{j,k} = 1, & \text{if } j = \operatorname{argmax}_i H_{i,k}, \\ \eta_{i,k} = 0, & \forall i \in I, i \neq j. \end{cases} \quad (19)$$

第2步:根据上述推导,每个基站用户数量相对接近,对基站的收益和用户的总体满意度会更好. 因为效用函数 $u_{i,k}$ 是关于 $H_{i,k}$ 的增函数. 因此,同一用户到不同基站信道增益相差越小,交换的用户的公平性越好. 在这里,可以推导出一个标准:

1) 在考虑用户的公平性和基站的收益情况下进行基站之间用户的交换,那么一个基站中用户信道增益相同情况下,用户相对少的基站,平均用户的满意度最高,但平均基站的收益最低,而用户相对多的基站情况则相反. 所以,在考虑所有用户的公平性和兼顾基站效用的条件下,先确保用户满足一定服务质量条件下,用户数最少的基站作为待交换基站.

2) 接下来将确定具体的待交换用户. 确定原则为:同一用户到待交换基站和服务基站信道增益相差越小,该用户交换优先级越高. 所以,这里定义信道增益比 $\omega_k = \frac{H_{j,k}}{H_{z,k}}$ 作为交换优先级,其中 $k$ 表示第 $k$ 个待交换用户, $j$ 表示第 $j$ 个待交换基站, $z$ 表示待交换基站的服务基站. 若 $\omega_k$ 越接近1,则信道增益相差越小. 因此,在这里只要找 $\omega_k$ 最大的即可.

3) 初步选定待交换基站和待交换用户之后,再结合相应的约束条件进行再判定. 其中,这里的约束条件包括:(1) 待交换用户到交换基站信道增益需满足一定的服务质量 $\sigma$ ;(2) 待交换用户到交换基站和待交换基站信道增益比需满足常数 $\varphi$ ;(3) 待交换基站和交换基站之间的用户数量差需满足常数 $s$ . 具体的用户调度如算法1.

算法1的主要步骤:

步骤1:用式(19)初步生成每个基站的用户小区选择集 $\beta_i$ .

步骤2: $f_i \in \{1,0\}$ 定义基站 $i$ 是否能进行用户的调度,令所有基站 $f_i=1$ ,基站用户可调度集为 $F$ .

步骤3:如果第 $i$ 基站 $f_i=1$ ,计算基站 $i$ 的用户数量 $n_i = |\beta_i|$ ,得所有基站用户数量集 $N$ .

步骤4:找出用户数量最少的待交换基站 $j$ 和数量最多的基站 $l$ ,用户数量分别为 $n_j$ 和 $n_l$ .

步骤5:如果 $(n_l - n_j) \geq s$ ,进行下一步判断,如果 $H_{j,k} > \sigma$ ,计算该基站中用户 $k$ 信道增益和对应交换基站 $z$ , $k$ 用户的信道增益比 $\omega_k = \frac{H_{j,k}}{H_{z,k}}$ ,否则,用户 $k$ 的信道增益比为 $\omega_k = 0$ , $\omega_k$ 形成的 $k$ 个用户信道增益比集 $W$ . 如果 $(n_l - n_j) \leq (s-1)$ ,步骤1中生成的蜂窝选择集 $\beta_i$ 是最终的用户调度结果,结束整个程序.

步骤6:找出信道增益比 $\omega_k$ 最大的那个用户 $k$ ,记录服务基站 $z$ 中的用户个数 $n_z$ (因为每次交换的服务基站不同,服务基站用户数量也不同).

步骤7:如果 $(n_z - n_j) \geq s$ 且 $\omega_k > \varphi$ ,令 $\eta_{j,k} = 1$ , $\eta_{z,k} = 0$ ,用户 $k$ 进行基站间交换,重新回到步骤3开始执行.

步骤8:否则,不进行交换,令 $\omega_k = 0$ ,计算 $j$ 基站的信道增益比集数 $A = |W|$ ,如果 $A=0$ ,令 $f_j=0$ ,否则重新进行步骤6.

步骤9:计算可调度基站数 $B = |F|$ ,如果 $(B \geq 2)$ 重新回到步骤3开始执行;否则输出此时最终的用户小区选择集 $\beta_i$ ,结束整个程序.

步骤10:生成最后用户小区选择集 $\beta_i$ ,可以用Stackelberg博弈资源分配方法去找到每个基站最优的用户资源分配解.

而基于最大信道增益选择法和最短距离选择法的具体算法如下:

作为信道增益比选择法的基准方法,最大信道增益选择法为用户根据信道增益大小进行的小区选择,由信道增益比中的式(19)给出. 而最短距离选择法是根据用户到基站距离大小进行小区选择,用户的选择由式(20)给出:

$$\begin{cases} \eta_{j,k} = 1 & \text{if } j = \operatorname{argmin}_i d_{i,k}, \\ \eta_{i,k} = 0 & \forall i \in I, i \neq j. \end{cases} \quad (20)$$

其中, $d_{i,k}$ 是第 $k^{th}$ 用户到第 $i^{th}$ 个基站的距离.

## 4 仿真结果与分析

在本节中,本文提供仿真结果来证明信道增益比选择法的性能. 参数 $v_k$ 的范围在 $[1,2]$ 内随机选择,所有 $Q_i=1$ .  $L_{i,k}(t)$ 中的参数 $\ell=1$ , $\alpha=2$ ,基站的覆盖半径为5 km,用户在各自小区范围内随机生成,小区约束参数中服务质量 $\sigma=0.2$ ,常数 $s=2$ 和参数 $\varphi=0.25$ . 所有的统计结果是对随机 $h_{i,k}$ 和 $v_k$ 的值的平均统计结果,其中 $h_{i,k}$ 服从复高斯 $CN(0,1)$ 分布. 仿真结果考虑了不同的用户数量和小区获取的不同能量两个因素

的影响. 由于相邻小区之间环境差异不明显,在这里只考虑所有小区获取的能量相同. 下面绘制的仿真图横坐标是 $\frac{E_i}{Q_i N_o}$ 值,而用户数量为 $K=20,40$ 的情况.

在图3中给出的是平均每个基站的价格 $p_{i,1}^*$ 和 $p_{i,2}^*$ . 显然,平均每个基站的价格随着用户数量的增加而增大. 这意味着需求在增加,而可用的频谱和能量是有限的. 另一方面,当获取的能量增加时,每单位能量的价格降低,因为基站有更多的能量来满足用户的需求. 相比 $p_{i,1}^*$ ,获取的能量增加将导致最佳价格 $p_{i,2}^*$ 的增加. 这个现象表明随着传输功率增加,但用户的效用增加却小. 因此,这时相对于能量增加的要求,增加用户的效用更加需要增加其他的资源.

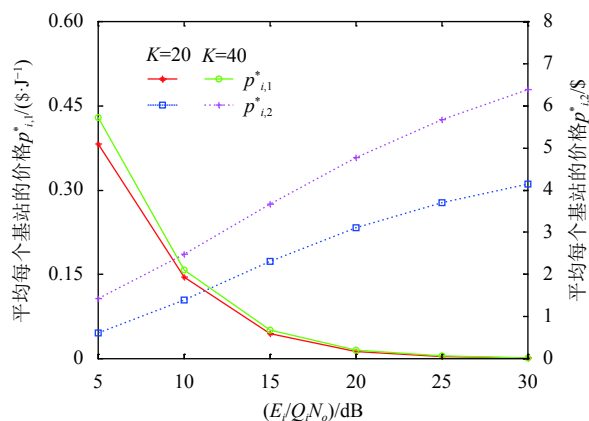


图3 平均每个基站的价格 $p_{i,1}^*$ 和 $p_{i,2}^*$

Fig.3 Average prices  $p_{i,1}^*$  and  $p_{i,2}^*$  per unit of energy and resource in cell i

图4和图5分别表示信道增益比选择法(Channel Gain Ratio Selection, CGRS)、最大信道增益选择法(Maximum Channel Gain Selection, MCGS)和最短距离选择法(Shortest Distance Selection, SDS)的平均每个小区收益 $\Omega^*$ 和平均每个小区每个用户满意度 $u^*$ . 图中结果表明,当每个基站获取能量相同,随着用户数量的增加,每个基站平均收益增加,但每个基站每个用户的平均效用下降. 显然,当基站获取更多的能量时,基站的总收益将增加,每个用户的平均效用增加.

此外,从结果还可以看出,信道增益比选择法与最大信道增益选择法相比,由于多个相邻蜂窝小区之间存在用户分布不均原因,而信道增益比选择法使小区间的用户数量均衡,从而使得基站收益和每个用户的平均效用更优于最大信道增益选择法. 相对最短距离选择法,显然用户信道质量更影响小区

的基站收益和每个用户的平均效用. 结论证明,用于提高基站的收益和每个用户的平均效用,信道增益比选择法相对于最大信道增益选择法和最短距离选择法是一种更有效的方法.

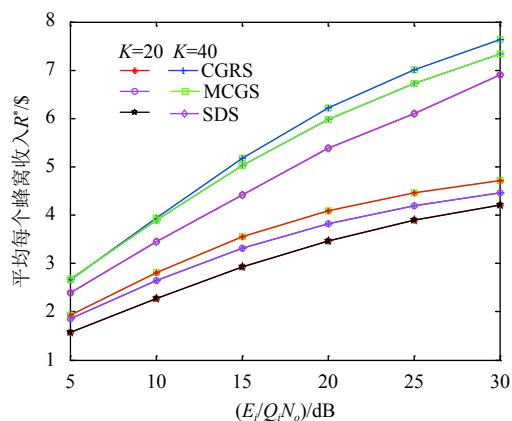


图4 平均每个小区收益 $\Omega^*$

Fig.4 Average revenue  $\Omega^*$  of every cell in different methods

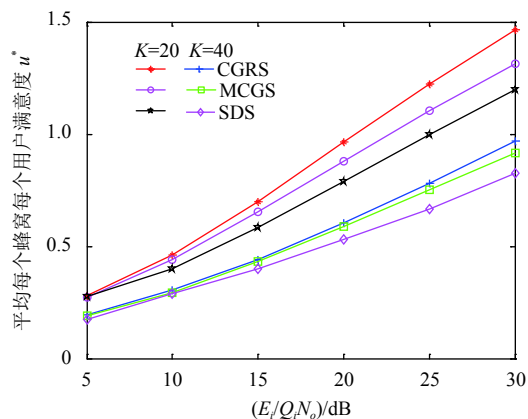


图5 平均每个小区每个用户满意度 $u^*$

Fig.5 Average utility  $u^*$  per user of every cell in different methods

## 5 结束语

在本文中考虑由多个相邻能量获取基站组成的小区系统,主要研究具有能量获取基站的相邻多蜂窝小区网络下行链路的能量和频谱协作分配. 其中,基站的目标是最大化总基站收益,用户则是最大化用户效用函数. 在该问题中,用户对小区的选择是资源分配过程中的关键步骤. 但每个用户选择小区不同,结果将不同,此时虽然可以通过穷搜索方法计算出最优的用户小区选择方案,但是计算复杂度太高. 所以,本文提出一种高效率的用户小区次优选择方法——信道增益比选择法,解决用户快速选择小区问题,仿真结果证明该方法相对于最大信道增益选

择法和最短距离选择法具有更好的用户公平性和基站收益性能。

## 参考文献:

- [1] 陈璟华, 杨宜民. 风力/能发电的发展现状和展望[J]. 广东工业大学学报, 2007, 24(3): 1-5.  
CHEN J H, YANG Y M. Status and trend of wind/solar power generation [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2007, 24(3): 1-5.
- [2] PIRO G, MIOZZO M, FORTE G, *et al.* HetNets powered by renewable energy sources: sustainable next-generation cellular networks [J]. IEEE Internet Computing, 2013, 17(1): 32-39.
- [3] WANG C, NEHRIR M H. Power management of a stand-alone wind/photovoltaic/fuel cell energy system [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(3): 957-967.
- [4] DIAMANTOULAKIS P D, GHASSEMI A, KARAGIAN-NIDIS G K. Smart hybrid power system for base transceiver stations with real-time energy management[C]//Global Communications Conference. Georgia, Atlanta: IEEE, 2013: 2773-2778.
- [5] HUR S, KIM T, LOVE D J, *et al.* Multilevel millimeter wave beam forming for wireless backhaul[C]//GLOBE-COM Workshops. Texas Houston: IEEE, 2011: 253-257.
- [6] DHILLON H S, LI Y, NUGGEHALI P, *et al.* Fundamentals of heterogeneous cellular networks with energy harvesting [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 43(5): 2782-2797.
- [7] SONG Y, ZHAO M, ZHOU W, *et al.* Throughput-optimal user association in energy harvesting relay-assisted cellular networks[C]//Sixth International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Hefei: IEEE, 2014: 1-6.
- [8] TONG H Z, ZHANG G C, WAN L Q, *et al.* Joint resource allocation with energy harvesting base stations in two adjacent cells[C]//2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics-China (ICCE-China). Guangzhou: IEEE, 2016: 1-6.
- [9] DIAMANTOULAKIS P D, PAPPI K N, KARAGIANNIDIS G K, *et al.* Autonomous energy harvesting base stations with minimum storage requirements [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(3): 265-268.
- [10] XU C, SHENG M, YANG C, *et al.* Pricing- based multi-resource allocation in OFDMA cognitive radio networks: an energy efficiency perspective [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(5): 2336-2348.
- [11] NG D W K, LO E S, SCHOBER R. Energy-efficient resource allocation in OFDMA systems with hybrid energy harvesting base station [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7): 3412-3427.
- [12] MESHKATI F, POOR H V, SCHWARTZ S C. Energy-efficient resource allocation in wireless networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(11): 3406-3414.
- [13] LEITMANN G. On generalized stackelberg strategies [J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1978, 26(4): 637-643.
- [14] SCUTARI G, PALOMAR D P, FACCHINE F, *et al.* Convex optimization, game theory, and variational inequality theory [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2010, 27(3): 35-49.
- [15] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex Optimization[M]. New York: Cambridge University Press, 2009.
- [16] BOYD S, XIAO L, MUTAPCIC A. Subgradient Methods[M]. San Francisco: Stanford University Press, 2004.