

双层网络中一种协作博弈的动态资源分配方法

宋婧¹, 丛犁², 葛建华¹, 李靖¹

(1. 西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 710071, 西安;

2. 吉林省电力有限公司信息通信公司, 130021, 长春)

摘要: 针对双层网络模型中宏小区用户层和毫微微小区用户层存在共信道信号互相干扰的问题, 提出了一种协作博弈的动态资源分配(CGDRA)方法. 该方法首先根据宏小区用户的路径损耗和 QoS 需求, 对宏小区用户层的发射功率进行分配, 然后以所有毫微微小区用户的数据速率之积作为效用函数, 以毫微微小区用户的 QoS 需求为约束条件, 构建了毫微微小区用户层总发射功率受限的协作博弈模型, 并采用动态子载波分配算法和自适应功率分配算法得到了该博弈模型的低复杂度近似最优解, 优化分配了毫微微小区用户的频谱资源和发射功率, 提高了系统的传输速率. 仿真结果表明: 在双层网络中, CGDRA 方法在系统数据速率和用户的公平性上获得了较好的折中; 与最大最小公平性算法相比, 系统的数据速率提高了 30%; 与最大速率算法相比更加公平.

关键词: 毫微微小区; 协作博弈; 动态资源分配

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)10-0089-06

A Dynamic Resource Allocation Approach Using Cooperative Game Theory for Two-Tie Networks

SONG Jing¹, CONG Li², GE Jianhua¹, LI Jing¹

(1. State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Jilin Electric Power Company Limited Information Communication Company, Changchun 130021, China)

Abstract: A cooperative game-theoretic dynamic resource allocation (CGDRA) approach is proposed to management the co-channel interference caused by macrocell and femtocells sharing the same spectrum in two-tie networks. The transmit power of the macrocell users is allocated according to the propagation loss and the QoS demands. Then the product of all the femtocells' data rate is formulated as an utility function of the cooperative game-theoretic model with the constraints of the femtocells' QoS demand and the total transmit power. An approximate optimal solution with low complexity is obtained by applying both the dynamic sub-carrier allocation (DSA) algorithm and adaptive power allocation (APA) algorithm. So that the frequency resource and the transmit power of the two-tie network are allocated optimally and the transmit rate can be improved. Simulation results show that the CGDRA approach obtains a good trade-off between the transmit rate and the fairness. The CGDRA approach gets about 30% data rate increase compared with the max-min algorithm, and achieves a better fairness than the max-rate fairness algorithm does.

Keywords: femtocell; cooperative game; dynamic resource allocation

收稿日期: 2012-05-12. 作者简介: 宋婧(1984—), 女, 博士生; 葛建华(通信作者), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家“973 计划”资助项目(2012CB316100); 国家自然科学基金资助项目(61001207, 61101144, 61101145); 国家“111 计划”资助项目(B08038).

网络出版时间: 2012-08-27

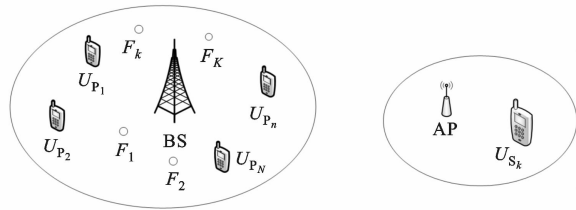
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120827.1110.003.html>

为了满足移动业务中日益增长的数据业务,毫微微小区(femtocell)技术应运而生^[1-2].在已有宏小区内部署毫微微小区改善了3G网络室内覆盖质量,增强了3G网络中数据业务服务.宏小区和毫微微小区共存的双层网络多采用共享信道资源的方法提高系统资源利用率,但由此带来的共信道干扰大大影响了系统的性能.因此,以不同的性能优化为目标,以不同的性能优化为目标的资源分配算法已成为近期研究的焦点^[3-7].这类研究可根据所分析的干扰类型不同分为3种.①从宏小区用户的角度出发,只考虑了其受到毫微微小区的共信道干扰.文献[3]针对这类干扰提出了一种毫微微小区基站自适应的功率配置机制,但是没有考虑对毫微微小区进行频率资源的分配.②从毫微微小区用户的角度出发,只考虑了其受到宏小区用户和其他毫微微小区的共信道干扰.例如文献[4]针对这类干扰构造了一个最优化问题,但是没有考虑优化分配的公平性;文献[5]比较了固定子载波仅分配功率和固定功率仅分配子载波2种算法的性能,没有考虑频率和功率2种资源同时参与分配的结果;文献[6]利用注水定理和等分法,对多小区毫微微小区之间的资源进行了分配,但是没有考虑毫微微小区用户的QoS需求.③考虑了双层网络中所有用户的受到的干扰.文献[7]得到了网络中下行传输中断概率的表达式,但是没有干扰消除算法来降低网络的下行中断概率.本文针对以上问题,在总发射功率受限的条件下,利用协作博弈构造优化模型,结合动态子载波分配(DSA)算法和自适应功率分配(APA)算法,得到一种双层网络中协作博弈的动态资源分配(CGDRA)方法.仿真结果表明,本文的CGDRA方法提高了整个网络的数据传输速率,并在系统的效率性和公平性之间取得很好的折中.

1 系统干扰分析

考虑一个由宏小区和毫微微小区共同组成的双层共存网络模型.在网络中定义宏小区基站(base station,BS)和 N 个接入该基站的主要用户设备(primary user equipment,PUE)为主要用户层, K 个与其共享信道资源的毫微微小区为次要用户层.网络模型组成如图1所示.

该网络模型使用OFDMA技术,可供主要用户层与次要用户层共同使用的频率资源为 $M(N \leq M)$ 个总带宽为 B 的正交子载波.占用子载波 n 的PUE称为第 n 个PUE.为了简化网络模型,假设每个毫微微小区的接入点(access point,AP)只允许接入一



(a)宏小区与毫微微小区共存的双层网络小区
(b)宏小区中任意毫微微 F_k 的模型
BS为宏小区基站; $U_{P_1}, U_{P_2}, \dots, U_{P_n}, \dots, U_{P_N}$ 为随机分布在宏小区内的 N 个PUE; $F_1, F_2, \dots, F_k, \dots, F_K$ 为随机分布在宏小区中的 K 个毫微微小区;AP为毫微微小区的接入点;
 U_{S_k} 为第 k 个毫微微小区 F_k 的SUE

图1 宏小区和毫微微小区共存的双层网络模型

个次要用户设备(secondary user equipment,SUE)且每个SUE只能占用一个子载波. $\mathbf{P}^p = [P_1^p, P_2^p, \dots, P_N^p]^T$ 为主要用户层中基站BS到 N 个PUE的下行发射功率矢量,其中 P_n^p 为BS到第 n 个PUE的发射功率. $\mathbf{P}^s = [P_1^s, P_2^s, \dots, P_K^s]^T$ 为次要用户层中 K 个AP到其SUE的发射功率矢量,其中 P_k^s 为第 k 个毫微微小区中的AP到其SUE的发射功率.

定义 $\mathbf{C}_{K \times M} = \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & C_{1M} \\ \vdots & & \vdots \\ C_{K1} & \dots & C_{KM} \end{bmatrix}$ 为次要用户层毫微微

小区的信道接入矩阵,当 $C_{km}=1$ 时,表示第 k 个毫微微小区占用了第 m 个子载波,当 $C_{km}=0$ 时,表示第 k 个毫微微小区没有占用第 m 个子载波.

接下来分析网络模型中的共信道干扰.本文所考虑的双层网络中的干扰分为以下2种.

(1)主要用户层下行链路中的第 n 个PUE受到的共信道干扰,干扰来自于次要用户层中与该PUE使用同一子载波的所有毫微微小区,即

$$I_n^{\text{SP}} = \sum_{k=1}^K \frac{C_{kn} P_k^s}{L_{kn}^{\text{SP}}} \quad (1)$$

式中: L_{kn}^{SP} 为次要用户层中第 k 个毫微微小区的AP到第 n 个PUE的路径损耗.

(2)次要用户层中第 k 个毫微微小区的SUE受到的共信道干扰.该干扰根据来源分为2种:①次要用户层中使用同一子载波的其他毫微微小区对该SUE的共信到干扰;②主要用户层使用同一子载波的PUE下行链路对该SUE的共信道干扰,即

$$I_k^s = I_k^{\text{SS}} + I_k^{\text{PS}} = \sum_{i=1, i \neq k}^K \frac{P_i^s}{L_{ik}^{\text{SS}}} \sum_{j=1}^M C_{ij} C_{kj} + \sum_{j=1}^N \frac{P_j^p}{L_{jk}^{\text{PS}}} C_{jk} \quad (2)$$

式中: I_k^{SS} 为第 k 个 SUE 受到使用相同子载波的其他毫微微小区的干扰; L_{ik}^{SS} 为第 i 个毫微微小区的 AP 到第 k 个 SUE 的路径损耗 ($i \neq k$); I_k^{PS} 为第 k 个 SUE 受到使用相同子载波的主要用户层中 PUE 下行链路的干扰; L_{jk}^{PS} 为宏小区基站 BS 到第 k 个 SUE 的路径损耗。

文献[4]研究指出,如果不对双层网络中的共信道干扰加以控制,毫微微小区反而会降低宏小区已有容量. 假设毫微微小区的 AP 发射功率之和受限,那么位于室内低发射功率的 AP 对共信道的主要用户层和次要用户层的干扰经过墙壁衰减后可以忽略不计^[5]. 因此,该双层网络模型中的共信道干扰仅为毫微微小区受到使用同一子载波的 PUE 的下行链路的干扰,则式(2)可以化简为

$$I_k^{\text{S}} = I_k^{\text{PS}} = \sum_{j=1}^N \frac{P_j^{\text{P}}}{L_{jk}^{\text{PS}}} C_{kj} \quad (3)$$

为了简化博弈模型,网络中主要用户层的功率分配没有参加博弈,而是利用信道的路径损耗和 PUE 的信干噪比门限,即 QoS 需求,对其进行了简单可行的功率分配^[5],如式(4)所示

$$\frac{P_n^{\text{P}}}{L_n^{\text{PP}} P_N} \geq S_n^{\text{P}} \quad (4)$$

式中: L_n^{PP} 为宏小区基站 BS 到第 n 个 PUE 的路径损耗; P_N 为噪声功率; S_n^{P} 为第 n 个 PUE 接收的信干噪比门限. 为了降低主要用户层对毫微微小区用户层的干扰,宏小区 PUE 的下行发射功率取满足其 QoS 需求时的最小值,即式(4)取等号。

2 协作博弈模型

在 PUE 下行链路发射功率已知的情况下,构造次要用户层资源分配的协作博弈模型 $\mathbf{G} = (K, \mathbf{U}^{\text{S}})$, 矢量 $\mathbf{U}^{\text{S}} = [U_1^{\text{S}}, U_2^{\text{S}}, \dots, U_K^{\text{S}}]$ 为毫微微小区的效用,其中 $U_k^{\text{S}} = \ln(R_k^{\text{S}} - R_k^{\text{min}})$, $R_k^{\text{S}}(x_k)$ 为第 k 个毫微微小区可获取的数据速率, R_k^{min} 为 QoS 需求的最小数据速率. 集合 $x_k = \{C_{kn}, P_k^{\text{S}}\}$ 为分配给该毫微微小区的子载波和功率. 模型 $\mathbf{G}$ 可建模为由式(5)或式(6)所表述的最优化问题^[9]

$$\max_{C, P^{\text{S}}} \prod_{k=1}^K (R_k^{\text{S}} - R_k^{\text{min}}) \quad (5)$$

$$\max_{C, P^{\text{S}}} \sum_{k=1}^K \ln(R_k^{\text{S}} - R_k^{\text{min}}) \quad (6)$$

$$\text{s. t. } P_k^{\text{S}} \geq 0, C_{kn} = \{0, 1\}, \forall k, \forall n;$$

$$\sum_{n=1}^N C_{kn} = 1, \forall k; \sum_{k=1}^K P_k^{\text{S}} = P^{\text{tot}} \quad (7)$$

采用式(6)作为博弈模型 $\mathbf{G}$ 的优化目标函数,

式中 $R_k^{\text{S}} = \frac{B}{M} \ln(1 + \gamma_k^{\text{S}} \Gamma_k^{\text{S}})$ 为第 k 个毫微微小区所获

取的数据速率,其中 $\Gamma_k^{\text{S}} = -\frac{1.6}{\ln(5\epsilon_k^{\text{S}})}$ 为不同误比特率

所要求的信噪比差额,反映了实际传输速率与理想传输速率的差值, ϵ_k^{S} 为第 k 个毫微微小区的误比特率要求, $\gamma_k^{\text{S}} = \frac{P_k^{\text{S}}}{L_{kk}^{\text{SS}} (I_k^{\text{PS}} + P_N)}$ 为第 k 个毫微微小区中

SUE 的接收信干噪比,其中 L_{kk}^{SS} 为第 k 个毫微微小区中的 AP 到其 SUE 的路径损耗. 对于任意毫微微小区中的 SUE 来说,其接收信号的信干噪比越高,此毫微微小区获得的数据速率也就越大,即该毫微微小区 SUE 的 QoS 也就越高. 然而,获取高信干噪比的代价就是毫微微小区的 AP 要采用大发射功率,从而引发较大的能量开销和较强的共信道干扰. 本文构造的协作博弈模型强调了总发射功率受限的条件,以最大化整个次要用户层的效用之和为目标,使得网络资源得到公平、有效的共享. 式(6)、式(7)所表示的优化问题包含 2 个参数即连续变量 P_k^{S} 和离散变量 C_{kn} ,且 $U_k^{\text{S}}(R_k^{\text{S}})$ 在 $R_k^{\text{S}} \in [R_k^{\text{min}} + 1, +\infty)$ 上是连续凸函数,因此属于非线性约束的 $\{0, 1\}$ 组合优化问题^[11]. 借鉴文献[12]中的处理办法,将求解问题最优值的方法依次分解为已知功率的动态子载波分配(dynamic sub-carrier allocation, DSA)算法和已知子载波的自适应功率分配(adaptive power allocation, APA)算法,并通过合理的假设,减少了 DSA 和 APA 算法中的约束参数,得到了该优化问题的低复杂度近似解的求解方法。

2.1 已知功率的 DSA 算法

首先,假设双层网络中的所有毫微微小区的 AP 分配有相同的发射功率 $\frac{P^{\text{tot}}}{K}$, 则式(6)、式(7)的优化问题可以等效为以下优化问题

$$\max_C \sum_{k=1}^K \ln(R_k^{\text{S}} - R_k^{\text{min}}) \quad (8)$$

$$\text{s. t. } C_{kn} = \{0, 1\}, \forall k, \forall n; \sum_{n=1}^N C_{kn} = 1, \forall k \quad (9)$$

可以看出,等效后的优化问题是一个非线性约束的 $\{0, 1\}$ 优化问题. 接下来,用 DSA 算法对该优化问题进行求解. 算法的基本思想是给每一个毫微微小区的 AP 分配一个最优的子载波,使该 AP 为次要用户

户层带来最大的效用增益,算法的步骤如下.

(1) 初始化过程:所有毫微微小区的 AP 子载波分配集合为 $\mathbf{C}$, 令 $\mathbf{C}=\emptyset$;

(2) for $k = 1$ to K

for $m = 1$ to M

$$\Delta u_k = u_k(\mathbf{C} \cup m) - u_k(\mathbf{C}) =$$

$$\sum_{k=1}^K \ln(R_k^S - R_k^{\min}) - \sum_{k=1}^{k-1} \ln(R_k^S - R_k^{\min})$$

$$\text{令 } \hat{c}(m) = \arg \max \Delta u_k.$$

end for

$$\text{令 } \mathbf{C} = \mathbf{C} \cup m$$

end for

其中 $\hat{c}(m)$ 表示把子载波 m 分配给第 k 个 SUE, Δu_k 为此次分配带来的次要用户层的效用增量. 该 DSA 算法的复杂度为 $O(KM)^{[9]}$.

2.2 已知子载波的 APA 算法

利用 DSA 算法所得出的子载波分配矩阵 $\mathbf{C}_{K \times M}$, 式(6)、式(7)可以进一步等效为

$$\max_{P_k^S} \sum_{k=1}^K \ln(R_k^S - R_k^{\min}) \quad (10)$$

$$\text{s. t. } P_k^S \geq 0; \sum_{k=1}^K P_k^S = P^{\text{tot}} \quad (11)$$

目标函数式(10)在 $R_k^S \in [R_k^{\min} + 1, +\infty)$ 上是连续凸函数, 此时, 式(10)、(11)表示的优化问题可以看作是线性约束的凸优化问题^[11], 其 Lagrange 函数为

$$L = \sum_{k=1}^K \ln(R_k^S - R_k^{\min}) - \lambda \left(\sum_{k=1}^K P_k^S - P^{\text{tot}} \right) \quad (12)$$

式中: λ 是 Lagrange 乘子, 且 $\lambda > 0$. 该问题的最优解应满足 $\frac{\partial L}{\partial P_k^S} \Big|_{P_k^S = P_k^{S*}} = 0$, 则第 k 个毫微微小区的 AP 功率分配的最优解为

$$P_k^{S*} = \left[\frac{B}{\lambda M (R_k^S - R_k^{\min}) \ln 2} - \frac{L_{kk}^{\text{SS}} (I_k^{\text{PS}} + P_N)}{I_k^S} \right]^+ \quad (13)$$

式中: $x = (y)^+$ 表示 $x = \max(0, y)$. 与文献[13]中的最大速率频域注水定理相比, 式(13)符合帕累托最优性, 可以看作是一种广义公平性的功率注水定理. 然而, 由注水定理加载到子载波上的比特数必须是连续值, 而在实际通信中由注水定理加载到子载波上的比特数只能是离散值, 即自适应功率分配过程, 可用贪婪算法实现^[12], 该算法的实现过程如下.

定义 ΔR_k^S 为第 k 个毫微微小区的 AP 在同一子

载波上相邻 2 个调制方式之下的可传输比特数之差, 则传输 ΔR_k^S 所需的功率增量 ΔP_k^S 为

$$\Delta P_k^S = \left(\frac{L_{kk}^{\text{SS}}}{I_k^S} \right) (I_k^{\text{PS}} + P_N) \left(2^{\frac{(R_k^S + \Delta R_k^S)M}{B}} - 1 \right) - \left(\frac{L_{kk}^{\text{SS}}}{I_k^S} \right) (I_k^{\text{PS}} + P_N) (2^{R_k^S M/B} - 1) \quad (14)$$

由此带来第 k 个毫微微小区 AP 的单位功率效用增量为

$$\Delta \tilde{U}_k(R_k^S) = \frac{U_k(R_k^S + \Delta R_k^S) - U_k(R_k^S)}{\Delta P_k^S} \quad (15)$$

APA 算法的步骤如下: 首先, 完成初始化过程, 令次要用户层所有的 AP 发射功率、加载的比特数和功率增量均为 0; 然后, 在每次迭代过程中, 计算出所有毫微微小区 AP 的比特增量 ΔR_k^S 、对应的功率增量 ΔP_k^S 和单位效用增量 $\Delta \tilde{U}_k(R_k^S)$; 再将使得 $\Delta \tilde{U}_k(R_k^S)$ 最大的 ΔP_k^S 分配给第 k 个 AP, 即 $\hat{P}(k) = \arg \max_{k \in K} (\Delta \tilde{f}_k)$; 最后迭代至功率 P^{tot} 被分配完为止, 即 $P^{\text{cur}} \geq P^{\text{tot}}$, P^{cur} 为当前已分配的功率. 由文献[13]可知, 该 APA 算法的复杂度为 $O(DM \ln BM)$, 其中 D 表示算法迭代的次数.

3 仿真实验与分析

通过仿真验证本文 CGDRA 方法的公平性和效率性. 在不同条件下比较了最大速率算法、最大最小公平性算法和 CGDRA 方法的性能, 结果如图 2~图 6 所示. 仿真中假设 PUE 数量与子载波数量相同且等于 3, 即 $N=M=3$. PUE 随机分布在半径为 500 m 的宏小区内, 毫微微小区相互不重叠地随机分布在距离 BS 100 m 到 500 m 的区域内, SUE 随机分布在距离其 AP 10 m 的范围内. 子载波带宽为 15 kHz, 所有 PUE 接收的信干噪比门限均等于 10 dB, SUE 的最小数据速率需求 $R_k^{\min} (\forall k)$ 等于 30 kb, SUE 的误比特率要求 $\epsilon_k^S (\forall k)$ 为 10^{-3} , 噪声功率为 10^{-5} W. 信号传输的路径损耗按照 $L = 15.3 + 37.6 \lg d + nL_{\text{wall}}$ 计算^[4], 其中 d 表示发送节点与接收节点之间的距离, n 表示信号传输过程中遇到墙壁的数量, $L_{\text{wall}} = 10$ dB 表示信号传输过程中墙壁引起的损耗.

由图 2、图 3 可以看出, 随着毫微微小区的数量或可分配总功率的增加, 次要用户层的数据速率均有增大. 由最大速率算法得到的次要用户层数据率最大, 原因是该算法总是将资源分配给信道条件最好的 AP, 存在着不公平的问题. 由最大最小公平性

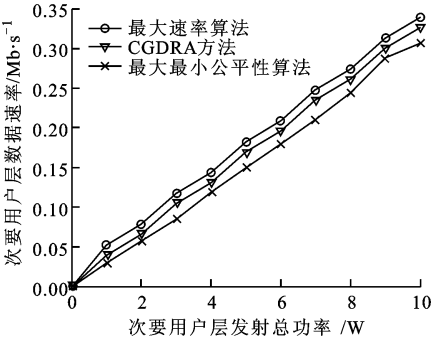


图 2 $K=150$ 时 3 种方法的次要用户层数据速率的比较

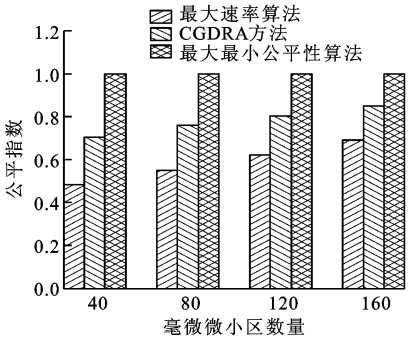


图 4 3 种分配方法的公平指数比较

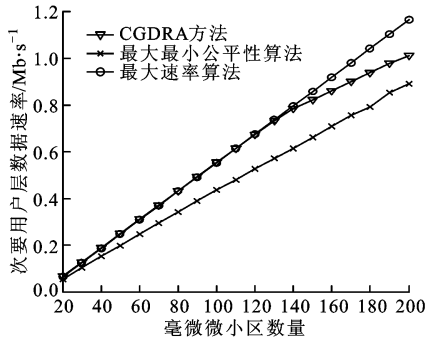


图 3 次要用户层总功率固定时 3 种方法次要用户层数据速率的比较

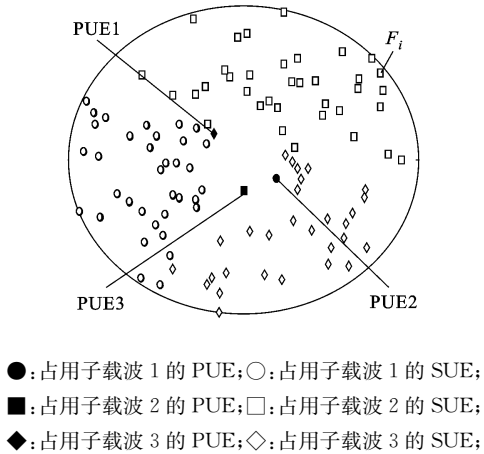


图 5 本文方法下毫微微小区用户的子载波分配

算法得到的次要用户层数据速率最小,原因是该算法侧重绝对公平,总是以最低的 AP 数据速率作为公平的标准速率,从而降低了信道条件好的 AP 的数据速率,降低了系统的资源利用率.本文提出的 CGDRA 方法得到的次要用户层数据速率介于两者之间,且逼近最大速率算法的结果,说明 CGDRA 方法有一定的效率性.

为了比较 3 种算法的公平性,根据文献[15],定义不同算法的公平指数为

$$\beta = \frac{\left(\sum_{k=1}^K R_k^S\right)^2}{K \sum_{k=1}^K (R_k^S)^2} \quad (16)$$

由图 4 可以看出,最大最小公平性算法使网络中的资源分配获取了绝对的公平,而最大速率算法的公平性最差,CGDRA 方法的公平性介于 2 种算法之间.综上所述,CGDRA 方法兼具了效率性和公平性,且在二者之间获得了很好的折中.

由图 5 可以看出,CGDRA 方法令距离远的 PUE 和毫微微小区使用同一子载波,这在最大程度上减轻了用户之间的共信道干扰,也解释了该算法可以兼顾效率和公平的原因.

图 6 比较了在 $N=M=3$ 和 $N=M=100$ 时,本文 CGDRA 方法的性能.由图 6 可以看出,CGDRA 方法对于子载波数量较大的情况依然适用,并且随着次要用户层毫微微小区数量的增加,2 种不同子载波数量得到的次要用户层数据速率的差值逐渐增大.这是因为较大数量的正交子载波可以降低子载波的重复使用率,从而降低了系统的共信道干扰,使得次要用户层获得较高的数据速率.

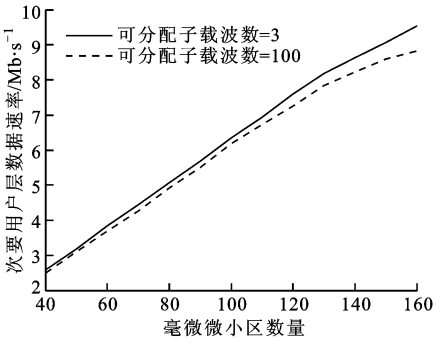


图 6 本文的协作博弈算法下不同正交子载波数量的比较

4 结 论

本文在协作博弈的框架下提出了一种双层网络模型中的动态资源分配方法. 通过线性复杂度的动态子载波分配和可控复杂度的自适应功率分配求得了博弈模型的近似最优解. 仿真结果表明, 在双层网络中, 基于协作博弈的资源分配方法能在毫微微小区用户公平性和次要用户层速率最大化之间取得很好的折中, 并且在有效利用系统资源的同时, 满足了用户的 QoS 需求.

参考文献:

- [1] CHANDRASEKHAR V, ANDREWS J, GATHERER A. Femtocell networks: a survey [J]. IEEE Communication Magazine, 2008, 46(9): 59-67.
- [2] DE LA ROCHE G, VALCARCE A, LOPEZ-PEREZ D, et al. Access control mechanisms for femtocells [J]. IEEE Communication Magazine, 2010, 48(1): 33-39.
- [3] 徐鹏, 方旭明, 向征, 等. 飞小区基站的自配置功率机制[J]. 通信学报, 2012, 33(2): 119-124.
XU Peng, FANG Xuming, XIANG Zheng, et al. Self-configuration power scheme for femtocell base station [J]. Journal on Communications, 2012, 33(2): 119-124.
- [4] SU Qinliang, HUANG Aiping, WU Zhouyun, et al. A distributed dynamic spectrum access and power allocation algorithm for Femtocell networks [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Wireless Communication & Signal Processing. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2009: 1-5.
- [5] LEE B B, YU J H, LEE I H, et al. Resource allocation and power management schemes in an LTE-advanced Femtocell network [J]. IEICE Transactions on Communications, 2012, 95(2): 611-614.
- [6] LEE K, JO O, CHO D H. Cooperative resource allocation for Guaranteeing intercell fairness in Femtocell networks [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(2): 214-216.
- [7] 张文健, 田茂, 何浩, 等. 分层网络下行中断概率的闭式表达[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(12): 59-64.
ZHANG Wenjian, TIAN Mao, HE Hao, et al. Closed expressions of downlink outage probability in tiered networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(12): 59-64.
- [8] ARULSELVAN N, RAMACHANDRAN V, KALY-ANASUNDARAM S, et al. Distributed power control mechanisms for HSDPA Femtocells [C]// Proceedings of 69th IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2009: 1-5.
- [9] 张国鹏. 基于博弈论的无线网络资源竞争与协作机制研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [10] SARAYDAR C U, MANDAYAM N B, GOODMAN D J. Efficient power control via pricing in wireless data networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(2): 291-303.
- [11] 薛毅. 最优化理论与方法[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2001.
- [12] 佟学俭, 罗涛. OFDM 移动通信技术原理与应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [13] YU W, CIOFFI J M. FDMA capacity of Gaussian multiaccess channels with ISI [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(1): 102-111.
- [14] RHEE W, CIOFFI J M. Increase in capacity of multi-user OFDM system using dynamic subchannel allocation [C]// Proceedings of 51st IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2000: 1085-1089.
- [15] FANG Zuyuan, BRAHIM B. Design and implementation of a MAC scheme for wireless Ad Hoc networks based on a cooperative game framework [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2004: 4034-4038.

[本刊相关文献链接]

- 王磊, 陈志刚. 衰落信道中的分布式差分空时编码传输方案. 2012, 46(4): 77-82.
- 陈俊杰, 倪宏, 孙鹏. 采用定价机制的多媒体系统多资源分配算法. 2012, 46(6): 98-103.
- 李濛, 周颖, 赵保华. 正交频分复用系统多播资源分配的动态规划算法. 2011, 45(10): 38-42.
- 张文健, 田茂, 何浩, 等. 分层网络下行中断概率的闭式表达. 2011, 45(12): 59-63.
- 董可, 廖学文, 朱世华. 毫米波通信系统中利用随机逼近的波束赋形算法. 2011, 45(10): 72-76.
- 张正浩, 裴昌幸, 陈南, 等. 宽带认知无线网络分布式协作压缩频谱感知算法. 2011, 45(4): 67-71.
- 任品毅, 魏莉, 廖学文. 一种增强型选择放大转发机会协作分集协议. 2010, 44(8): 53-57.
- 苏佳, 张曜. 询问反馈策略下的门限截断机会波束系统. 2010, 44(8): 72-77.

(编辑 刘杨)