

· 通信与信息工程 ·

# 基于遗传算法的多基站协作通信功率分配方案

肖海林<sup>1</sup>, 王 鹏<sup>1</sup>, 聂在平<sup>2</sup>, 欧阳缮<sup>1</sup>

(1. 桂林电子科技大学信息与通信学院 广西 桂林 541004; 2. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**将多基站协作通信的功率分配问题转换为信干噪比(SINR)均衡问题。通过设置路径损耗门限为各用户判决与其通信的协作基站,并考虑用户间接收SINR的公平性,给出基于遗传算法的多基站协作通信功率分配方案。数值分析表明,相对于传统蜂窝小区等功率分配以及多基站协作通信等功率分配,该功率分配方案使系统中各用户的平均SINR分别提高17.75 dB和2.36 dB。

**关键词** 协作通信; 遗传算法; 路径损耗门限; 功率分配; 信干噪比

中图分类号 TN929.5

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.01.004

## Power Allocation Scheme Based on Genetic Algorithm for Multi-Base Station Cooperative Communication

XIAO Hai-lin<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>1</sup>, NIE Zai-ping<sup>2</sup>, and OUYANG Shan<sup>1</sup>

(1. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology of China Guilin Guangxi 541004;

2. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** Multi-base station cooperative communication can efficiently reduce the inter-cell interference, but its power allocation is a non-convex optimization problem. In this paper, we formulate the power allocation as a signal-to-interference-plus-noise-ratio (SINR) balancing problem and propose a scheme to solve the problem in its equivalent form. Based on genetic algorithm, the proposed power allocation scheme sets the path loss threshold to select the cooperative base stations for each user and considers different users' SINR fairness. Numerical results show that the proposed power allocation scheme will increase each user's average SINR about 17.75dB and 2.36dB in the same conditions of adopting equal power allocation of traditional cellular system and equal power allocation of multi-base cooperative communication system, respectively.

**Key words** cooperative communication; genetic algorithm; path loss threshold; power allocation; signal-to-interference-plus-noise-ratio (SINR)

多基站协作通信可以有效降低小区间干扰对边缘用户的影响,从而获得更大的系统容量和更高的频谱效率<sup>[1-3]</sup>。文献[1]研究了波束赋形技术在多基站协作通信中的应用,通过优化各基站下行发射波束形成,使系统的吞吐量最大化。文献[2]分析了蜂窝网中用户协作、基站协作以及二者联合协作传输的性能,并推导了3种协作传输模式下单小区可达各态历经容量的表达式。文献[3]研究了OFDMA系统中基于部分频率复用技术的多基站协作传输策略,在提高系统吞吐量的同时,兼顾了各用户占用子信道的公平性。以上文献很少对协作基站的发射功率分配方案进行研究。

协作通信系统性能的优劣很大程度上取决于资源分配策略的选择,而功率分配问题又是资源分配的重要内容之一<sup>[4]</sup>。因此,如何有效、合理的对多基站协作通信系统的功率进行配置,有着极为重要的现实意义<sup>[5]</sup>。文献[6]研究了OFDMA系统中两基站互为中继的协作通信策略,并使用注水算法给出以最大系统容量为目标的功率分配方案。文中并未涉及两个以上基站协作通信,且经典注水算法在多基站系统中的应用值得商榷<sup>[7]</sup>。文献[8]和文献[9]分别研究了多基站协作通信中基于最小基站总发射功率和最小系统容量损失的最优功率分配方案,对用户接收信干噪比(SINR)的公平性未做具体讨论。文献

收稿日期: 2012-07-31; 修回日期: 2012-11-08

基金项目: 国家973项目(2008CB317109); 国家自然科学基金(61261018, 61362007); 广西自然科学基金重点项目(2011GXNSFD018028); 广西自然科学基金(桂科自0991241); 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室2012年度主任基金(12111)

作者简介: 肖海林(1976-),男,博士,教授,主要从事MIMO移动通信系统、协同通信技术和智能天线等方面的研究。

[10]给出了传统蜂窝小区中使各用户的信干比(SIR)达到平衡的功率分配算法。由于多基站协作通信中,各用户可以同时与多个基站联合通信,自由度远大于传统蜂窝网络。因此,该算法在多基站协作通信系统中的应用具有一定的局限性。

综合以上考虑,本文首先设置路径损耗门限为各用户判决与其通信的协作基站,其次从保证用户间接收SINR相等的角度出发,给出基于遗传算法的多基站协作通信功率分配方案。

## 1 系统模型

多基站协作通信系统模型<sup>[11-12]</sup>如图1所示,系统有 $M$ 个基站、 $N$ 个移动用户。每个基站和用户只配备单根天线。各基站按一定规则散布在整个覆盖区域内,通过光纤等高速传输介质连接到中央控制单元,各用户可以同时接收多个基站的发射信号。

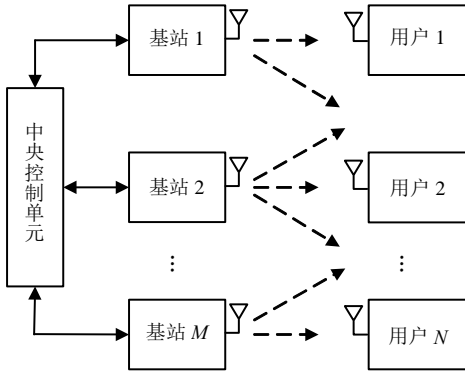


图1 多基站协作通信系统模型

设无线信道服从准静态瑞利平坦衰落,图1中第 $n$ 个用户的接收信号可以表示为:

$$Y_n = \sum_{i \in C_n} H_{i,n} \sqrt{p_{i,n}} X_{i,n} + \sum_{j \in S_n} \sum_{k=1, k \neq n}^N H_{j,n} \sqrt{p_{j,k}} X_{j,k} + n_0 \quad (1)$$

式中,第一项表示有用信号;第二项表示干扰信号;第三项表示均值为0、功率谱密度为 $\sigma^2$ 的加性高斯白噪声(AWGN); $C_n$ 为系统中所有与第 $n$ 个用户进行通信的基站集合; $S_n$ 为系统中除 $C_n$ 以外所有对第 $n$ 个用户造成干扰的基站集合; $H_{m,n}$ 为基站 $m$ 与用户 $n$ 之间的传输信道; $X_{m,n}$ 为基站 $m$ 对用户 $n$ 的发射信号; $p_{m,n}$ 为其功率值。若第 $m$ 个基站不与第 $n$ 个用户通信,则 $p_{m,n} = 0$ 。

假设各基站完全已知所有用户的信道状态信息,用 $G_{m,n}$ 表示基站 $m$ 与用户 $n$ 之间的信道增益,则由式(1)知,第 $n$ 个用户接收信号的SINR可以表示为:

$$\gamma_n = \frac{\sum_{i \in C_n} G_{i,n} p_{i,n}}{\sum_{j \in S_n} \sum_{k=1, k \neq n}^N G_{j,n} p_{j,k} + \sigma^2} \quad (2)$$

式(2)中功率分配是一个非凸优化问题,该问题的求解非常困难。考虑用户公平通信的需求,将多基站协作通信系统的功率分配问题转换为用户间SINR的均衡问题,满足下式要求<sup>[13]</sup>:

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_N = \gamma_0 \quad (3)$$

同时各基站的发射功率应该满足:

$$0 \leq p_{m,n} \leq P_m \quad (4)$$

$$m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N$$

$$\sum_{i=1}^N p_{m,i} \leq P_m \quad (5)$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$

式中, $\gamma_0$ 为系统能够达到的最大SINR时的值; $P_m$ 为第 $m$ 个基站的总发射功率。

平衡各用户的SINR作为优化准则,也难以给出各基站对其服务用户所分配功率的确切表达式。因此,联立式(2)、式(3)两式,优化问题描述为:

$$\gamma_n = \frac{\sum_{i \in C_n} G_{i,n} p_{i,n}}{\sum_{j \in S_n} \sum_{k=1, k \neq n}^N G_{j,n} p_{j,k} + \sigma^2} = \gamma_0 \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

## 2 功率分配方案

为了优化多基站协作通信系统中的功率分配问题,具体方案分为两步:1)为各用户确定与其通信的基站集合;2)通过对各基站的发射功率进行优化分配,以满足各用户接收信号的SINR相等的需求。

### 2.1 基站选择策略

为了确定多基站协作通信系统中各用户的通信基站,将基站选择策略分为两步进行。

1)比较用户 $n$ 与各基站的路径损耗,将所有基站中与用户 $n$ 之间的路径损耗最小的基站作为第 $n$ 个用户的主服务基站,即:

$$BS_{C_n, n}^{\text{master}} = \min(\text{PL}_{m,n}, m = 1, 2, \dots, M) \quad (7)$$

式中, $\text{PL}_{m,n}$ 为基站 $m$ 到用户 $n$ 的路径损耗。

2)设置路径损耗门限 $\Delta$ ,将用户 $n$ 到主服务基站以及到其余各基站的路径损耗的差值与 $\Delta$ 进行比较,为第 $n$ 个用户确定其 $C_n$ 中除 $BS_{C_n, n}^{\text{master}}$ 以外的协作基站集合 $C_n^{\text{relay}}$ <sup>[6]</sup>,即:

$$\begin{cases} m \in C_n^{\text{relay}} & |\text{PL}_{C_n,n}^{\text{master}} - \text{PL}_{m,n}| \leq \Delta \\ m \in S_n & |\text{PL}_{C_n,n}^{\text{master}} - \text{PL}_{m,n}| > \Delta \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\text{PL}_{C_n,n}^{\text{master}}$  为用户  $n$  与其主服务基站之间的路径损耗。

若用  $G_{C_n,n}^{\text{master}}$  表示用户  $n$  与其主服务基站之间的信道增益,  $G_{C_n,n}^{\text{relay}_m}$  表示用户  $n$  与其协作基站  $m$  之间的信道增益,  $p_{C_n,n}^{\text{master}}$  表示第  $n$  个用户的主服务基站对其发射功率,  $p_{C_n,n}^{\text{relay}_m}$  表示第  $n$  个用户的协作基站  $m$  对其发射功率, 则式(2)可以改写为:

$$\gamma_n = \frac{G_{C_n,n}^{\text{master}} p_{C_n,n}^{\text{master}} + \sum_{i \in C_n^{\text{relay}}} G_{C_n,n}^{\text{relay}_i} p_{C_n,n}^{\text{relay}_i}}{\sum_{j \in S_n} \sum_{k=1, k \neq n}^N G_{j,n} p_{j,k} + \sigma^2} \quad (9)$$

将(9)式代入(6)式, 功率优化分配问题可重写为:

$$\gamma_n = \frac{G_{C_n,n}^{\text{master}} p_{C_n,n}^{\text{master}} + \sum_{i \in C_n^{\text{relay}}} G_{C_n,n}^{\text{relay}_i} p_{C_n,n}^{\text{relay}_i}}{\sum_{j \in S_n} \sum_{k=1, k \neq n}^N G_{j,n} p_{j,k} + \sigma^2} = \gamma_0 \quad (10)$$

式中, 共有  $M \times N$  个未知数, 问题过于复杂, 难以求解。为了简化问题, 可以将各用户主服务基站分配的功率作为参考, 对其协作基站进行功率分配, 使未知数的个数减少至  $N$  个。文献[14]指出, 多基站协作通信中, 当用户靠近某个基站时, 其SINR很容易由该基站的发射信号满足, 此时其余基站对该用户的发射功率应尽可能的小, 以降低对其他用户的干扰; 当用户远离系统中各基站时, 每个基站到该用户有相近的信道衰落特性, 此时各基站应以近似的功率对该用户发射信号。可以将第  $n$  个用户的  $p_{C_n,n}^{\text{relay}_m}$  与  $p_{C_n,n}^{\text{master}}$  的关系表示为<sup>[14]</sup>:

$$p_{C_n,n}^{\text{relay}_i} = \frac{G_{C_n,n}^{\text{relay}_i}}{G_{C_n,n}^{\text{master}}} p_{C_n,n}^{\text{master}} \quad i \in C_n^{\text{relay}} \quad (11)$$

将式(11)代入式(9), 第  $n$  个用户的SINR可以表示为:

$$\gamma_n = \frac{p_{C_n,n}^{\text{master}} \left[ G_{C_n,n}^{\text{master}} + \sum_{i \in C_n^{\text{relay}}} \frac{(G_{C_n,n}^{\text{relay}_i})^2}{G_{C_n,n}^{\text{master}}} \right]}{\sum_{j \in S_n} \sum_{k=1, k \neq n}^N p_{C_k,k}^{\text{master}} \left( \frac{G_{j,n} G_{j,k}}{G_{C_k,k}^{\text{master}}} \right) + \sigma^2} \quad (12)$$

将式(12)代入式(10), 多基站协作通信系统的功率优化分配问题可以简化为:

$$\gamma_n = \frac{p_{C_n,n}^{\text{master}} \left[ G_{C_n,n}^{\text{master}} + \sum_{i \in C_n^{\text{relay}}} \frac{(G_{C_n,n}^{\text{relay}_i})^2}{G_{C_n,n}^{\text{master}}} \right]}{\sum_{j \in S_n} \sum_{k=1, k \neq n}^N p_{C_k,k}^{\text{master}} \left( \frac{G_{j,n} G_{j,k}}{G_{C_k,k}^{\text{master}}} \right) + \sigma^2} = \gamma_0 \quad (13)$$

上述功率分配问题是一个非线性优化问题, 且各用户的SINR不仅依赖于自身的通信基站的功率分配, 而且与其他用户的通信基站的功率分配有关, 直接求解较为困难。本文考虑采用现有的智能算法对该问题进行求解。

## 2.2 遗传算法

遗传算法是一种基于自然选择和遗传理论的随机搜索和全局优化算法, 在非线性和规划问题求解方面得到广泛应用<sup>[15]</sup>。因此, 采用遗传算法对式(13)中各基站的发射功率进行求解分配。

### 1) 编码与群体初始化

编码是设计遗传算法首先需要解决的问题, 编码的策略直接影响交叉算子和变异算子的功能, 常见的编码方式有二进制编码和实数编码等。二进制编码具有简单易行的优点, 然而在求解高维优化问题时, 较短的编码串难以达到求解精度的要求, 较长的编码串又降低了算法的搜索效率。而实数编码的解空间和编码空间是一致的, 可以对解直接进行遗传操作, 大大提高了解的精度和算法的效率。本方案采用实数编码方式, 并随机产生初始群体。染色体的结构为  $\{p_{C_1,1}^{\text{master}}, p_{C_2,2}^{\text{master}}, \dots, p_{C_N,N}^{\text{master}}\}$ , 染色体中的基因  $p_{C_n,n}^{\text{master}}$  满足式(4)和式(5)的约束条件。

### 2) 适应度函数

遗传算法在优化搜索中仅使用适应度函数作为寻优依据, 适应度函数的形式直接决定群体的进化行为。优化过程要求适应度值非负, 且目标函数的优化方向与适应度值的生长方向一致。综合考虑式(13)的优化问题, 适应度函数可表示为:

$$F = \frac{1}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}} \quad (14)$$

其中,  $\gamma_{\max}$  和  $\gamma_{\min}$  分别表示系统中各用户SINR的最大值和最小值, 即:

$$\gamma_{\max} = \max \{\gamma_i, i = 1, 2, \dots, N\} \quad (15)$$

$$\gamma_{\min} = \min \{\gamma_i, i = 1, 2, \dots, N\} \quad (16)$$

### 3) 选择算子

选择操作以适应度值的大小为择优依据, 从当前群体中选择适应度值高的染色体遗传到下一代群体中, 并淘汰适应度值低的染色体。采用轮盘赌选

择策略, 设染色体  $a_i$  的适应度值为  $F(a_i)$ , 群体规模为  $S$ , 则染色体  $a_i$  被选择遗传到下一代的概率为:

$$\lambda_s(a_i) = \frac{F(a_i)}{\sum_{j=1}^S F(a_j)} \quad i=1,2,\dots,S \quad (17)$$

#### 4) 交叉算子

交叉操作从群体中随机选取两个染色体做为父代以概率  $\lambda_c$  进行配对, 把父代的优秀特征遗传给子代, 产生新的染色体。交叉概率  $\lambda_c$  决定交叉操作的使用频率, 较大的  $\lambda_c$  可以增强算法开辟新搜索区域的能力, 但算法已有的优良模式也更容易遭破坏, 因此  $\lambda_c$  的取值一般为  $0.4 \sim 0.9$ <sup>[16]</sup>。设  $b$  为区间  $[0,1]$  上的随机数, 则第  $i$  个染色体  $a_i$  和第  $j$  个染色体  $a_j$  交叉后的2个子代染色体为:

$$\begin{cases} a'_i = a_i(1-b) + a_j b \\ a'_j = a_j(1-b) + a_i b \end{cases} \quad (18)$$

#### 5) 变异算子

变异操作将染色体中某些基因座上的基因以概率  $\lambda_m$  进行变异, 从而维持群体的多样性, 防止发生早熟现象。 $\lambda_m$  越大, 群体的多样性越高, 但过大的  $\lambda_m$  将使算法趋于随机搜索, 因此变异概率  $\lambda_m$  的建议取值为  $0.005 \sim 0.1$ <sup>[17]</sup>。第  $i$  个染色体的第  $j$  基因  $a_{i,j}$  进行的变异操作如下:

$$a'_{i,j} = \begin{cases} a_{i,j} + (a_{i,j} - a_{\max}) f(g) & r_1 \geq 0.5 \\ a_{i,j} + (a_{\min} - a_{i,j}) f(g) & r_1 < 0.5 \end{cases} \quad (19)$$

$$f(g) = r_2(1 - g/g_{\max})^2 \quad (20)$$

式中,  $a_{\max}$  和  $a_{\min}$  分别表示  $a_{i,j}$  的最大值和最小值;  $r_1$  和  $r_2$  为  $[0,1]$  区间的随机数;  $g$  和  $g_{\max}$  分别表示当前迭代次数和最大进化次数。

### 3 数值分析

表1 仿真参数及取值

参数	取值
基站距离/km	1
发射功率/dBm	45
噪声功率/dBm	-96
路径损耗/dB	$128.1 + 37.6 \times \lg(d)$ , $d$ 取km
$\Delta$ /dB	3
交叉概率	0.6
变异概率	0.03

首先验证本文提出的功率分配算法的收敛性能; 其次, 通过用户间SINR的平衡性以及用户数量对用户平均SINR的影响, 将本文功率分配方案与传统蜂窝小区等功率分配以及多基站协作通信等功率

分配进行对比分析。参数设置见表1, 传统蜂窝小区采用文献[10]给出的系统模型。

图2分析了  $M=3$ 、 $N=10$  时, 本文提出的功率分配算法的收敛性能。从图中可以看出, 群体规模  $S=30$  时, 由于群体多样性偏低, 算法发生早熟现象。在  $S=60$  和  $S=100$  时, 算法分别迭代30次和25次后收敛, 体现出良好的收敛性能, 且  $\gamma_{\max} - \gamma_{\min}$  分别为0.97 dB和0.85 dB。

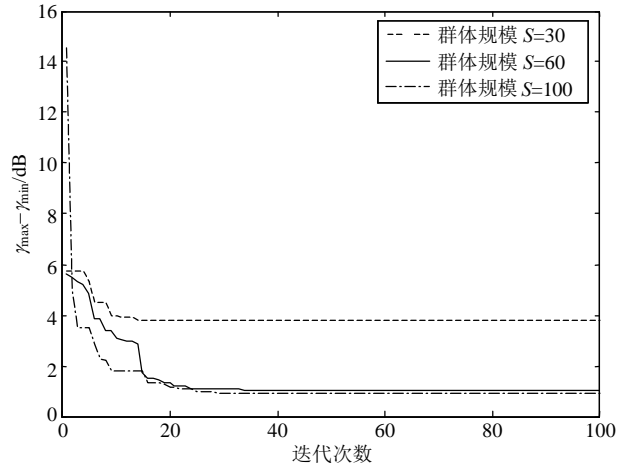


图2  $M=3$ 、 $N=10$  时, 本文算法的收敛曲线

当  $M=5$ 、 $N=100$  时, 本文提出的功率分配算法的收敛性能如图3所示。从图中可以看出, 当基站和用户的规模增大后, 算法依然具有较好的收敛性能。在  $S=60$  和  $S=100$  时, 算法分别迭代60次和50次后收敛, 且  $\gamma_{\max} - \gamma_{\min}$  分别为4.91 dB和4.34 dB。

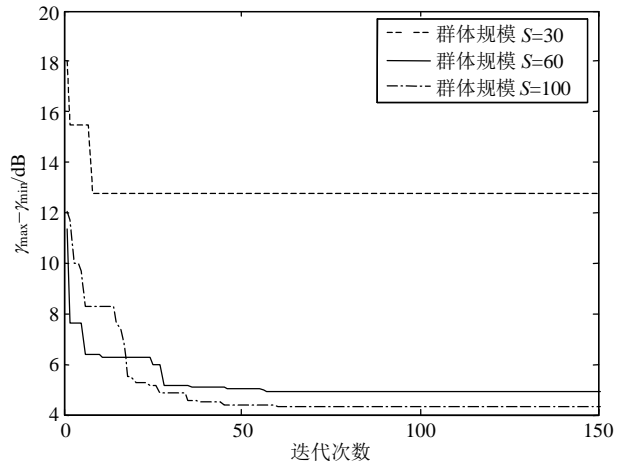


图3  $M=5$ 、 $N=100$  时, 本文算法的收敛曲线

图4对比了本文功率分配方案与传统蜂窝小区等功率分配以及多基站协作通信等功率分配对各用户接收SINR公平性的影响。设定  $M=3$ 、 $N=10$ 。从图中可以看出, 相对于传统蜂窝小区, 多基站协作通信等功率分配可以有效提高边缘用户的SINR, 但是对中心用户的改善并不明显, 用户间SINR的差

值较大。而本文提出的功率分配方案在改善各用户SINR的同时,兼顾了用户通信的公平性,使各用户的SINR趋于平衡。

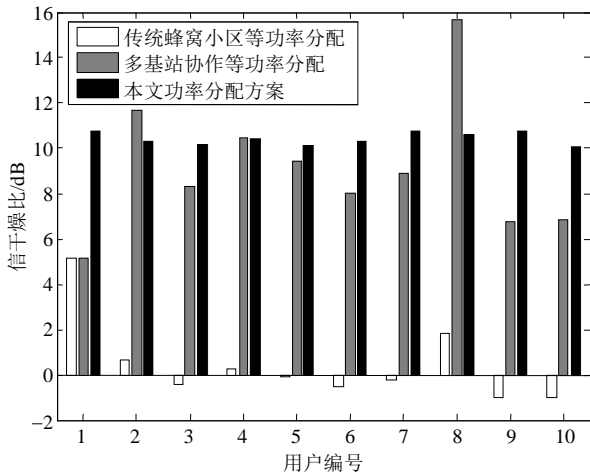


图4 用户间接收SINR的公平性

对比本文功率分配方案与传统蜂窝小区等功率分配以及多基站协作通信等功率分配中,各用户平均SINR与用户数量的关系如图5所示。设定  $M = 5$ 。从图中可以看出,用户数量由10增加到100,本文功率分配方案、多基站协作通信等功率分配、传统蜂窝小区等功率分配,各用户的平均SINR分别降低4.59、5.95、13.79 dB。当用户数量为100时,本文功率分配方案、多基站协作通信等功率分配、传统蜂窝小区等功率分配,各用户的平均SINR分别为9.55、7.19、-8.20 dB。

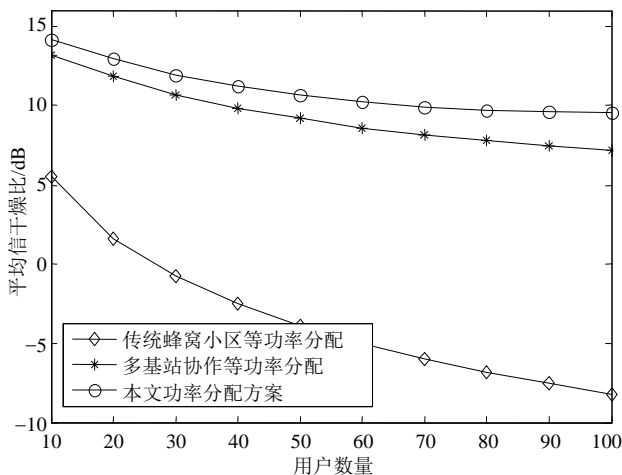


图5 用户数量对用户平均SINR的影响

## 4 结束语

功率分配是实现多基站协作通信的关键技术之一。本文将多基站协作通信系统的功率分配问题转换为用户间SINR均衡问题,给出基于遗传算法的基站发射功率分配方案。数值分析结果表明,该功率

分配方案所使用算法的收敛性能与系统中基站和用户的数目无关。此外,在基站和用户数量较多的情况下,相对于传统蜂窝小区等功率分配以及多基站协作通信等功率分配,本文提出的算法能提高各用户的平均SINR分别为17.75 dB和2.36 dB。且用户间SINR的最大差值仅为4.34 dB,有效地保证了各用户接收SINR的公平性。

## 参考文献

- [1] ILLSOO S, SANG H L, ANDREWS J G. Belief propagation for distributed downlink beamforming in cooperative MIMO cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(12): 4140-4149.
- [2] 寇明延, 王笑一, 甄燕翔, 等. 蜂窝网联合协作MIMO上行容量研究[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(6): 860-864. KOU Ming-yan, WANG Xiao-yi, ZHEN Yan-xing, et al. Uplink capacity of cellular networks with united cooperative in MIMO channel[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(6): 860-864.
- [3] LI Hong-xing, LUO Han-wen, CHEN Wen, et al. Multi-cell cooperation with fairness constraint in the downlink OFDMA cellular networks[J]. IEICE Transactions on Communications, 2010, 93(6): 1653-1656.
- [4] WANG D, LI Z Q, WANG X. Joint optimal subcarrier and power allocation for wireless cooperative networks over OFDM fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(1): 249-257.
- [5] ZAKHOUR R, HANLY S V. Base station cooperation on the downlink large system analysis[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(4): 2079-2106.
- [6] PISCHELLA M, BELFIORE J C. Achieving a frequency reuse factor of 1 in OFDMA cellular networks with cooperative communications[C]//2008 IEEE 67th Vehicular Technology Conference-Spring. Marina Bay, Singapore: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2008: 653-657.
- [7] VISWANATH P, TSE D N C, ANANTHARAM V. Asymptotically optimal water-filling in vector multiple-access channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(1): 241-267.
- [8] PHUYAL U, JHA S C, BHARGAVA V K. Joint zero-forcing based precoder design for QoS-aware power allocation in MIMO cooperative cellular network[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(2): 350-358.
- [9] CHEN Z, PENG M, WANG W, et al. Cooperative base station beamforming in WiMAX systems[J]. IET Communications, 2010, 4(9): 1049-1058.
- [10] GRANDHI S A, VIJAYAN R, GOODMAN D J, et al. Centralized power control in cellular radio systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1993, 42(4): 466-468.

(下转第41页)

- LIU Jian-cheng. Study on accelerating target detection and tracking[D]. Changsha: University of National Defense Technology, 2007.
- [6] 王胜利. 雷达信号处理的新方法—匹配傅里叶变换研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2003.  
WANG Sheng-li. New radar signal processing method—study on matched Fourier transform[D]. Xi'an: Xidian University, 2003.
- [7] GEROLEO F G, BRANDT-PEARCE M. Detection and estimation of LFM CW radar signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(1): 405-418.
- [8] GUAN J, CHEN X L, HUANG Y, et al. Adaptive fractional Fourier transform-based detection algorithm for moving target in heavy sea clutter[J]. IET Radar Sonar Navig, 2012, 6(5): 389-401.
- [9] MOO P W. Multiple-input multiple-output radar search strategies for high-velocity targets[J]. IET Radar Sonar Navig, 2011, 5(3): 256-265.
- [10] HASSANIEN A, VOROBYOV S A, GERSHMAN A B. Moving target parameters estimation in noncoherent MIMO radar systems[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2012, 60(5): 2354-2361.
- [11] CHENG Luo, JUN Li, HONG Ming-liu, et al. Compensation method for envelop migration of MIMO radar high speed moving target based on transmit signal pre-process[C]//International Workshop on Microwave and Millimeter Wave Circuits and System Technology (MMWCST). Chengdu: [s.n.], 2012.
- [12] SUN Hong-bo, LIU Guo-sui, GU Hong, et al. Application of the fractional Fourier transform to moving target detection in airborne SAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(4): 1416-1424.
- [13] DONNET B J, LONGSTAFF I D. MIMO radar, techniques and opportunities[C]//Proceedings of the 3rd European Radar Conference. Manchester, UK: [s.n.], 2006: 112-115.

编辑 税红

-----  
(上接第30页)

- [11] HARDJAWANA W, VUCETIC B, LI Y H. Multi-user cooperative base station systems with joint precoding and beamforming[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2009, 3(6): 1079-1093.
- [12] BOON L N, EVANS J S, HANLY S V, et al. Distributed downlink beamforming with cooperative base stations[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(12): 5491-5499.
- [13] MAHDAVI-DOOST H, EBRAHIMI M, KHANDANI A K. Characterization of SINR region for interfering links with constrained power[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(6): 2816-2828.
- [14] 吕星哉, 王振, 朱近康. 分布式无线通信系统中的主从协同功控[J]. 电路与系统学报, 2010, 15(1): 59-64.  
LÜ Xing-zai, WANG Zhen, ZHU Jin-kang. Primary-subsidary cooperative power control in ordered distributed wireless communication system[J]. Journal of Circuits and Systems, 2010, 15(1): 59-64.
- [15] BINELO M O, de ALMEIDA A L F, CAVALCANTI F R P. MIMO array capacity optimization using a genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(6): 2471-2481.
- [16] SHIU Y Y, CHI K C. A genetic algorithm that adaptively mutates and never revisits[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13(2): 454-472.
- [17] 郑鹏, 何同林, 刘郁林, 等. 基于实数编码遗传算法的盲信源分离方法[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(3): 295-297.  
ZHENG Peng, HE Tong-lin, LIU Yu-lin, et al. Blind source separation method based on real coded genetic algorithm[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2006, 35(3): 295-297.

编辑 税红