

# LTE-A 飞蜂窝系统干扰协调智能优化算法

高潮欣<sup>1</sup> 陈 昕<sup>1</sup> 向旭东<sup>2</sup>

(北京信息科技大学计算机学院 北京 100101)<sup>1</sup> (北京科技大学计算机与通信工程学院 北京 100083)<sup>2</sup>

**摘 要** 在同频组网的 LTE-A 飞蜂窝系统中,飞蜂窝基站的密集部署会造成较为严重的同频干扰,导致网络吞吐量和用户的服务质量(Quality of Service, QoS)降低。部分频率复用(Fractional Frequency Reuse, FFR)作为常用的干扰协调方案,可以有效地提高边缘用户的服务质量。在 FFR 方案的基础上,通过结合遗传算法和基于模拟退火的图着色算法,提出了一种智能优化部分频率复用(Intelligence-FFR, I-FFR)算法。该算法能够动态地调整中心区域所占比例和边缘区域的频率复用因子,以增加宏小区吞吐量,降低小区边缘区域用户的中断概率。仿真结果表明,与 FFR-3 干扰协调算法相比,提出的 I-FFR 算法可使宏小区吞吐量提升 15%,同时边缘区域平均用户的中断概率从 85%降低到 40%。

**关键词** LTE-A 飞蜂窝,部分频率复用,模拟退火,图着色,干扰协调

**中图分类号** TP319 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.8.056

## Intelligent Optimization Algorithm for Interference Coordination in LTE-A Femtocell System

GAO Chao-xin<sup>1</sup> CHEN Xin<sup>1</sup> XIANG Xu-dong<sup>2</sup>

(Computer School, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China)<sup>1</sup>

(School of Computer & Communications Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In LTE-A femtocell systems, the dense deployment of femtocells may cause strong inter-cell interference (ICI), resulting in the degradation of cell throughput and quality of service(QoS) received by femto user equipments (FUEs). Fractional frequency reuse(FFR) has been widely recognized as an efficient solution to this problem. We proposed an intelligent fractional frequency reuse(I-FFR) algorithm for interference coordination in two-tier LTE-A femto-cell systems. In pursuit of high system throughput and low user outage probability, the proposed I-FFR algorithm utilizes a genetic algorithm and a graph-annealing algorithm to achieve adaptive FFR by optimizing proportion of the cell center region(CCR) and clustering of the cell edge region(CER). Simulation results show that, compared to the conventional FFR-3 interference coordination scheme, the proposed I-FFR algorithm improves the system throughput by over 15%, and decreases the outage probability of average CER user from 85% to 40%.

**Keywords** LTE-A femtocell, Fractional frequency reuse, Simulated annealing, Graph coloring problem, Interference coordinate

## 1 引言

研究表明<sup>[1]</sup>,超过 70%的无线数据业务和 50%的语音通话都发生在室内,30%的企业用户和 45%的家庭用户将会面临室内无线信号强度弱和覆盖率低的问题。为了增加室内信号强度,实现信号深度覆盖,第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)提出了 LTE-A 网络架构,以期通过飞蜂窝技术改善室内用户的服务质量。

飞蜂窝基站(Femto Base Station, FBS)是一种低功耗、用户自行部署的无线接入点<sup>[2]</sup>。室内用户可通过 FBS 接入 LTE-A 移动网络。使用 FBS 可以提高室内用户的数据传输速率,增加系统容量,并降低宏蜂窝基站(Macro Base Station,

MBS)的负载<sup>[3]</sup>。

LTE-A 飞蜂窝系统是由宏蜂窝和飞蜂窝构成的双层异构网络,其下行链路采用正交频分多址接入(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)和多人多出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)等物理层技术,旨在提高频谱利用效率,增大网络传输带宽,为用户提供高速、低时延的移动通信服务<sup>[4]</sup>。OFDMA 技术以资源块(Resource Block, RB)作为频域和时域的最小资源分配单位。若宏蜂窝和飞蜂窝同频组网,飞蜂窝的密集部署会导致严重的蜂窝间干扰,降低用户的服务质量。按照干扰源与被干扰对象是否处于同一网络层,可将蜂窝间干扰分为同层干扰和跨层干扰<sup>[1,5]</sup>。

LTE-A 飞蜂窝系统通过协调 MBS 与 FBS 间的频率资源

到稿日期:2014-08-11 返修日期:2014-11-14 本文受国家自然科学基金面上项目(61370065),北京市学术创新团队项目(IDHT20130519)资助。

高潮欣(1988-),男,硕士生,主要研究领域为无线网络与安全,E-mail:gaocx2012@gmail.com;陈 昕(1965-),男,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为计算机网络及其性能评价、网络安全、航电网络,E-mail:chenxin@mail.tsinghua.edu.cn;向旭东(1986-),男,博士生,主要研究领域为网络性能评价与优化控制,E-mail:xudong\_xiang@csnet1.cs.tsinghua.edu.cn。

分配,来降低蜂窝间干扰,这种机制亦称干扰协调技术。部分频率复用方案易于实现,灵活性较强,已成为干扰协调领域的研究热点。

FFR 方案将宏小区分为中心区域(Cell Centre Region, CCR)和边缘区域(Cell Edge Region, CER)。中心区域使用的频率复用因子(Frequency Reuse Factor, FRF)为 1,目的是增大频谱效率。边缘区域的频率复用因子大于 1,常设为 3<sup>[6,10]</sup>,以降低边缘区域重度负载下的蜂窝间干扰。相较全频率复用<sup>[7-9]</sup>和系统频率复用因子-3 方案,FFR 方案可降低蜂窝间干扰,提高系统频谱效率<sup>[17]</sup>。FFR 主要分为静态 FFR 和动态 FFR。静态 FFR<sup>[11,12]</sup>指预先对边缘区域的资源进行配置,并在一段时间内保持资源配置不变。动态 FFR 根据当前的信道干扰情况,自适应地为用户分配资源。

目前,针对动态 FFR 的资源分配<sup>[10,13]</sup>和参数优化<sup>[14-17]</sup>已有一些研究成果。文献[10]提出动态部分频率复用(D-FFR)算法,为宏蜂窝用户(Macro User Equipment, MUE)动态地分配子载波。文献[13]提出自适应部分频率复用(A-daptive-FFR, A-FFR)算法为多个小区协调分配频谱。文献[14,15]根据 SINR 值确定最优的 CCR 和 CER 比例,动态地分配频率,最大化系统吞吐量和用户的满意度。文献[16]提出了一种频谱交换策略,其在克服远近效应的同时,得到了 FFR 中心区域所占的最优比例,并最大化了系统吞吐量。文献[17]利用图论中分簇的方法对蜂窝进行干扰协调,以降低蜂窝间边缘区域的干扰。每一个簇中所有的资源可被簇中用户完全使用,以提升边缘区域频谱效率。

然而,上述动态 FFR 方案的设计存在以下不足<sup>[10-17]</sup>: (1)固定中心区域所占比例;(2)固定边缘区域频率复用因子;(3)将边缘区域资源块平均分配给每一个簇。当飞蜂窝的分布密度动态变化时,其无法自适应调整资源分配策略,可能导致严重的蜂窝间干扰,降低宏小区吞吐量。

本文在研究 LTE-A 飞蜂窝系统架构<sup>[18]</sup>和 FFR 方案的基础上,结合遗传算法和基于模拟退火的图着色算法,提出了一种智能优化部分频率复用算法。该算法可根据 FBS 的部署密度变化,自适应调整中心区域所占比例和边缘区域频率复用因子,并为每一个簇动态分配资源块。仿真表明,相较于 FFR-3 干扰协调算法,IFFR 算法能够在增大宏小区的吞吐量的同时降低边缘区域用户的中断概率。

## 2 系统模型

考查如图 1(a)所示的 LTE-A 飞蜂窝系统下行链路模型。该系统由 7 个宏小区组成,采用 FFR 进行资源块分配。如图 1(b)所示,每个宏小区内均匀分布着若干 FBS,宏小区被划分为中心区域和边缘区域。假设每一个 FBS 仅服务 1 个飞蜂窝用户(Femto User Equipment, FUE),边缘区域的 FBS 均采用开放接入模式<sup>[6]</sup>,该系统模型主要分为 3 个部分。

(1)区域划分。假设 MBS、FBS 的覆盖半径分别为  $R_m$  和  $R_f$  ( $R_m \gg R_f$ ),中心区域半径为  $R_c$ ,可得中心区域和边缘区域的面积分别为  $\pi\omega^2 R_m^2$  和  $(1-\omega^2)\pi R_m^2$ 。其中,  $\omega = R_c/R_m$  表示中心区域所占比例。

(2)用户分布。假设宏小区内的总用户数目为  $U$ , MUE 和 FUE 的数目分别为  $U_m$ 、 $U_f$ 。由于用户均匀分布在 MBS 覆盖范围内,可得中心区域和边缘区域的用户数目分别为  $U_c = \omega^2 U$  和  $U_e = (1-\omega^2)U$ 。其中,中心区域宏用户数目为  $U_m^{(c)}$ ,飞蜂窝用户数目为  $U_f^{(c)}$ 。

(3)资源分配。假设系统总资源块数为  $N$ ,宏蜂窝基站按用户比例为中心区域和边缘区域分别分配  $N_c = \lfloor \omega^2 N \rfloor$  和  $N_e = N - N_c$  个资源块。为降低蜂窝间干扰,将边缘区域用户划分为  $\eta$  个簇,即边缘区域的频率复用因子为  $\eta$ 。宏蜂窝基站为边缘区域各簇分配正交的资源块,设簇  $i$  ( $0 < i \leq \eta$ ) 分得的资源块数为  $N_i$ ,则  $N_e = \sum_{i=1}^{\eta} N_i$ 。簇  $i$  内的所有用户共享  $N_i$  个资源块。假设 MBS 和 FBS 在每个资源块上的发射功率分别为  $P_m$  和  $P_f$ ,  $P_m > P_f$ 。

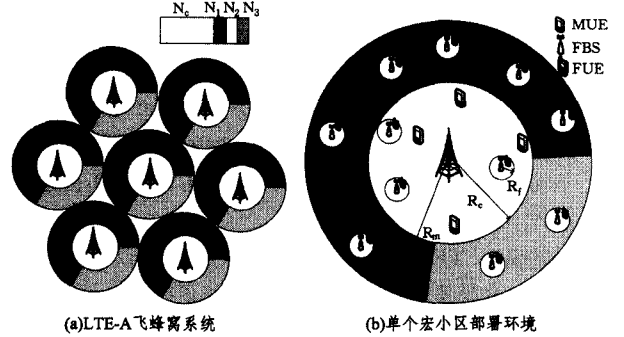


图 1 系统模型

### 2.1 CCR 部分

首先为中心区域的宏用户分配资源块,以优先确保宏用户的服务质量<sup>[19]</sup>。定义与中心区域的 MUE<sub>j</sub> ( $j \in \{1, \dots, U_m^{(c)}\}$ )使用相同资源块  $k$  的所有 FBS 的集合为  $B_{f,j,k}^{(c,m)}$ ,则中心区域的 MUE<sub>j</sub> 在资源块  $k$  接收到的信号与干扰噪声比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)为:

$$SINR_{j,k}^{(c,m)} = \frac{P_m * G_{m,j,k}^{(c)}}{\sum_{i \in B_{f,j,k}^{(c,m)}} P_f * G_{i,j,k}^{(c)} + N_0}, \forall j \in U_m^{(c)} \quad (1)$$

定义与 FUE<sub>j</sub> ( $j \in \{1, \dots, U_f^{(c)}\}$ )使用相同资源块  $k$  的所有 FUE 集合分别为  $B_{f,j,k}^{(c,f)}$ ,则中心区域 FUE<sub>j</sub> 在中心区域所接收到的 SINR 为:

$$SINR_{j,k}^{(c,f)} = \frac{P_f * G_{i,j,k}^{(c)}}{\sum_{n \in B_{f,j,k}^{(c,f)}, n \neq i} P_f * G_{n,j,k}^{(c)} + \partial_k * P_m * G_{m,j,k}^{(c)} + N_0}, \forall j \in U_f^{(c)} \quad (2)$$

式(1)中,  $G_{m,j,k}^{(c)}$  和  $G_{i,j,k}^{(c)}$  分别表示在资源块  $k$  上,宏蜂窝基站  $m$  和飞蜂窝基站  $i$  到 MUE<sub>j</sub> 的信道增益。式(2)中,  $\partial_k = 1$  表示宏用户占用资源块  $k$ ,  $\partial_k = 0$  表示没有宏用户占用,  $G_{i,j,k}^{(c)}$  表示 FUE<sub>j</sub> 到其关联的 FBS<sub>i</sub> 在资源块  $k$  上的信道增益,  $G_{n,j,k}^{(c)}$  和  $G_{m,j,k}^{(c)}$  分别表示飞蜂窝基站  $n$  和宏蜂窝基站  $m$  到 FUE<sub>j</sub> 在资源块  $k$  上的信道增益。  $N_0$  表示噪声功率谱密度。信道增益主要考虑瑞利衰落和路径损耗的影响。

根据香农公式,可分别得到中心区域 MUE 和 FUE 的总吞吐量:

$$T_{om} = \sum_{j=1}^{U_m^{(c)}} \sum_{k=1}^{N_c} B \times \log_2(1 + SINR_{j,k}^{(c,m)}) \quad (3)$$

$$T_{of} = \sum_{j=1}^{U_f^{(c)}} \sum_{k=1}^{N_e} B \times \log_2(1 + SINR_{j,k}^{(c,f)}) \quad (4)$$

其中,  $B$  表示资源块在频域上的带宽。

由式(3)和式(4)可得中心区域的吞吐量为:

$$T_c = T_{om} + T_{of} \quad (5)$$

### 2.2 CER 部分

MUE 位于边缘区域时,由于距离 MBS 较远,路径损耗严重,易受到邻近 FBS 的干扰。因此对于处于边缘区域的

MUE,可由 FBS 为其提供服务<sup>[6]</sup>。将使用资源块  $k$  的所有边缘区域用户的集合记为  $B_{f,k}^e$ ,则用户  $i(i \in B_{f,k}^e)$  在资源块  $k$  上接收到的 SINR 为:

$$SINR_{i,k}^e = \frac{P_f * G_{i,j,k}^e}{\sum_{n \in B_{f,k}^e \setminus \{i\}} P_f * G_{n,j,k}^e + N_0} \quad (6)$$

为保障边缘区域 FUE 的 QoS,定义 SINR 阈值  $SINR_{thr}$ 。若  $FUE_j(j \in U_e)$  接收到的  $SINR_j$  大于  $SINR_{thr}$ ,则  $FUE_i$  能够正常通信。

定义边缘区域平均用户中断概率为:

$$\bar{p} = \frac{\sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{n_{hf}} \varphi_j^h}{U_e} \quad (7)$$

其中,  $n_{hf}$  表示簇  $h$  的用户数目,  $\varphi_j^h$  为指示变量:

$$\varphi_j^h = \begin{cases} 1, & SINR_j > SINR_{thr} \\ 0, & SINR_j \leq SINR_{thr} \end{cases} \quad (8)$$

若  $\varphi_j^h = 1$ ,则簇  $h$  中用户  $j$  能够正常通信;否则簇  $h$  中用户  $j$  出现通话中断。

边缘区域的吞吐量为:

$$T_e = \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{n_{hf}} \sum_{k=1}^N B \times \log_2(1 + SINR_{j,k}^e) \quad (9)$$

由中心区域和边缘区域的吞吐量可得宏小区的总吞吐量为:

$$\max T_m(\rho, \omega) = T_c + T_e \quad (10)$$

### 3 I-FFR 算法

本文结合遗传算法和基于模拟退火的图着色算法,提出了一种智能部分频率复用迭代算法,用于协调蜂窝间的干扰。每次迭代依次执行以下 4 个步骤:(1)利用遗传算法<sup>[20]</sup>对  $\rho$  和  $\omega$  进行编码、选择、交叉和变异;(2)根据生成的参数  $(\rho, \omega)$ ,计算每个用户的 SINR,得到边缘区域的干扰图;(3)使用基于模拟退火的图着色算法对干扰图着色,将边缘用户分簇;(4)为每一个簇动态分配 RB。经过 MAXGENS 次迭代后,得到近优  $T_m(\rho, \omega)$  值。算法 1 描述了 I-FFR 算法的伪代码。

#### 算法 1 I-FFR 算法

Input: 遗传代数  $M$

Output:  $T_m$

1. 初始化遗传算法的相关参数和评价函数;
2. for  $i=0; i < M; i++$  do
3. 利用遗传算法,经过选择、交叉、变异操作,得到当前最优的  $\omega$  和  $\rho$ ,并且调用适应度函数  $T_m(\rho, \omega)$ ;
4. 根据  $\omega$  和  $\rho$ ,计算各基站和用户的位置,并确定各区域用户数目和分配的资源块数目,对 MUE 和 FUE 随机分配 RB;
5. 利用式(3)计算得到吞吐量  $T_{cm}$ ;
6. 利用式(4)得到吞吐量  $T_{cf}$ ;
7. 利用式(11)得到边缘区域的邻接矩阵;
8. 执行基于模拟退火的图着色算法(参见 3.3 节);
9. 为每一个簇分配 RB(参见 3.4 节);
10. 利用式(10)计算总吞吐量  $T_m$ 。
11. end for
12. return  $T_m$

#### 3.1 $(\rho, \omega)$ 种群更新

I-FFR 算法以遗传算法(Genetic Algorithm, GA)<sup>[20]</sup>进行全局搜索,得到最优的中心区域所占比例和边缘区域频率复用因子,以最大化吞吐量。具体的操作步骤包含:(1)初始化种群大小  $P$ 、遗传代数  $M$ 、交叉概率、变异概率参数;(2)随机

产生  $P$  组  $(\rho, \omega)$ ,并计算个体  $(\rho, \omega)$  的适应度函数;(3)依据适应度函数  $T_m(\rho, \omega)$ ,衡量每个个体的优劣程度,  $T_m(\rho, \omega)$  值越大的个体生存的概率越大;(4)按照交叉概率、变异概率得到新个体  $(\rho', \omega')$ ,并调用  $T_m(\rho', \omega')$ ;(5)迭代执行步骤(3)、(4),直到达到 MAXGENS 次,即输出  $T_m(\rho, \omega)$  近优解。

#### 3.2 生成蜂窝间干扰图

在边缘区域的干扰图  $G=(V, E)$  中,顶点集合  $V=\{A, B, C, D, E, F\}$  表示区域中的所有基站,以基站为顶点,若两个使用相同资源块的基站  $(i, j)$  之间的距离小于  $2R_f$ ,则使用边  $E=\{e_{i,j} | i, j \in V\}$  连接这两个顶点,边缘区域的干扰图  $G=(V, E)$ ,  $V$  和  $E$  分别代表顶点集和边集。图 2 是边缘区域的无向干扰图。

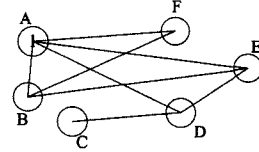


图 2 干扰图

该场景中  $V=\{A, B, C, D, E, F\}$  为基站的集合,  $E=\{e_{i,j} | i, j \in V\}$  表示两个基站所在蜂窝之间存在干扰,该干扰图的邻接矩阵为:

$$A(u, v) = (a_{u,v})_{p \times p}, u \neq v \quad (11)$$

$$a_{uv} = \begin{cases} 1, & V_{uv} \in E \\ 0, & V_{uv} \notin E \end{cases} \quad (12)$$

#### 3.3 基于模拟退火的边缘分簇算法

通过干扰图得到邻接矩阵后,使用模拟退火算法,以最少的颜色数目对所有的节点(基站)进行着色。互不干扰的两节点着上相同的颜色,使用同一颜色着色的所有节点组成一个簇,同一簇内的所有节点可使用相同的 RB,不同的簇中的节点使用正交的 RB。

$p$  着色问题<sup>[21]</sup>:图  $G$  有  $P$  个节点,使用最少的颜色数目  $p(p \leq P)$ ,对  $P$  个顶点进行着色,且使相邻的节点使用不同的颜色。若  $p$  着色问题使用的最少颜色数目为  $K$ ,则每个节点的着色问题可定义为映射  $\varphi: V \rightarrow \{1, 2, \dots, K\}$ 。  $\forall u, v \in V$ , 若  $\{u, v\} \in E$ ,则  $\varphi(u) \neq \varphi(v)$ 。

图着色问题(Graph Coloring Problem, GCP)是一个带约束的优化问题<sup>[21]</sup>,可以转换为求所有顶点的最大独立集。在模拟退火算法中,使用罚函数  $\lambda$  将该约束问题转化为无约束问题。算法 2 描述了基于模拟退火的图着色算法的伪代码,具体步骤描述如下:

步骤 1(初始化解空间) 若干扰图中所有基站度的最大值是  $d$ ,则称  $d$  是图  $G$  的度,即最多使用  $d+1$  种颜色就能对所有的基站着色。基站集合  $V$  的一个  $d+1$  分划  $\tau$  对应一种着色方案,可以表示为:

$$\tau = \{V_1, V_2, \dots, V_{d+1}\}, \bigcup_{d=1}^{d+1} V_i = V, \text{ 且 } V_i \cap V_j = \emptyset, i \neq j \quad (13)$$

所求的解空间  $S$  记为:

$$S = \{\tau | \tau \text{ 是 } V \text{ 的一个分划}\} \quad (14)$$

在着色过程中,设初始解空间为  $\tau = \{V, \emptyset, \dots, \emptyset\}$ 。

步骤 2(计算权集) 由递推公式可得颜色  $i$  的权集  $\theta_i$ :

$$\begin{cases} \theta_{i+1} = 2\theta_i - \theta_1 - 1, i \in \{1, 2, \dots, d\} \\ \theta_1 = 2^d \end{cases} \quad (15)$$

步骤 4—13(计算目标函数差值) 使用正权集  $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{d+1}\}$  将 GCP 转化为求解无约束优化问题:

$$\max f(\tau) = \sum_{i=1}^{d+1} \theta_i (|V_i| - \lambda |E_i|) \quad (16)$$

其中,  $\lambda > 1$  是罚函数因子。

$$E_i = \{\{u, v\} | u, v \in V_i, \{u, v\} \in E\} \quad (17)$$

每次迭代时,在基站集合  $B_E$  中随机选取基站  $u$ ,  $u$  的当前颜色记为  $i$ , 随机选择颜色  $j (j \neq i)$  并预估使用  $j$  为  $u$  着色的收益:

$$\Delta f = \theta_j - \theta_i - \lambda (\theta_j \sum_{v \in V_i} a_{u,v} - \theta_i \sum_{u \in V_j} a_{u,v}) \quad (18)$$

即着色前后目标函数的差值。

步骤 14—17(产生新的着色方案) 根据着色收益  $\Delta f$  与当前温度  $t$ , 决定是否用颜色  $j$  为基站  $u$  着色, 见步骤 15。通过将基站  $u$  从子集  $V_i$  移动到子集  $V_j$ , 产生新的着色方案:

$$V_i = V_i \setminus \{u\}, V_j = V_j \cup \{u\}, i \neq j \quad (19)$$

#### 算法 2 基于模拟退火的图着色算法

Input:  $A(u, v), \lambda, t, e(u), \sigma$  (降温因子),  $L$  (迭代次数)

Output:  $S$

1. 初始化: 初始化解空间  $\tau = \{V, \emptyset, \dots, \emptyset\}$ ,
2. 利用式(15)得到  $\theta_i$ ;
3. for  $t=2; t>0; t=\sigma * t$  do ▷ 降温过程
  - a=0 ▷ 指示变量
  4. for  $k=1; k \leq L; k++$  do ▷ 迭代次数
  5. 随机选择节点  $u$ ,
  - $i=e(u)$ ;
  - $j=(\text{int})\text{rand}(1, d+1), j \neq i$
  6. for  $v=1; v \leq U_e; v++$  do
  7. if  $e(v)=i$  then
  - $\Delta f = \Delta f - a_{u,v} * \theta_i$ ;
  8. end if
  9. if  $e(v)=j$  then
  - $\Delta f = \Delta f + a_{u,v} * \theta_j$ ;
  11. end if
  12. end for
  13.  $\Delta f = \theta_j - \theta_i - \lambda * \Delta f$ ; (参见式(18))
  14.  $p = e^{-\frac{\Delta f}{t}}$
  15. if  $(\Delta f > 0) \parallel (\frac{\Delta f}{t} > 88) \& (p > \text{random}(0, 1))$
  16.  $e(u)=j$ ;
  - $a=1$ ;
  17. end if
  18. end for  $L$
  20. if  $a=0$
  - break;
  21. end for  $t$
  22. return  $S$

#### 3.4 动态资源分配

当每个节点所着的颜色确定之后, 根据每个簇中用户数目占边缘区域总用户数目的比例, 为簇  $k (k \leq \eta)$  分配  $N_f^k$  个资源块:

$$N_f^k = \left\lfloor \frac{U_{kf}}{U_e} * N_e \right\rfloor, k \in \{1, 2, \dots, \eta-1\} \quad (20)$$

其中,  $U_{kf}$  表示簇  $k$  中的用户数。为簇  $\eta$  分配  $N_f^\eta$  个资源块:

$$N_f^\eta = N_e - \sum_{k=1}^{\eta-1} N_f^k \quad (21)$$

#### 3.5 I-FFR 算法复杂度分析

I-FFR 算法主要由初始化种群和遗传-模拟退火图着色过程两部分组成。初始化种群算法的复杂度为  $O(P)$ , 由种群的大小  $P$  决定。遗传-模拟退火图着色算法主要由遗传算

法和基于模拟退火的图着色算法两部分组成。因为遗传算法的时间复杂度由种群大小  $P$ 、遗传代数  $M$ 、用户数目  $N$  和资源块总数  $F$  决定, 最坏情况下的算法时间复杂度为  $O(PMFN)$ ; 而基于模拟退火的图着色算法由计算邻接矩阵适应度函数和对每个节点基站进行着色决定, 最坏情况下的算法时间复杂度为  $O(PMFN^2 + PMNL)$ 。因此 I-FFR 算法在最坏情况下的时间复杂度为  $O(P + \max(PMFN^2 + PMNL))$ , 即  $\max(O(PMFN^2), O(PMNL))$ 。遗传-模拟退火图着色算法具体各个步骤的复杂度如表 1 所列。

表 1 I-FFR 算法时间复杂度分析

| 步骤      | 内容           | 时间复杂度                             |
|---------|--------------|-----------------------------------|
| 初始化     | 算法 1, 步骤 1   | 初始化算法参数和评价函数 $O(P)$               |
|         | 算法 1 步骤 3    | 获取当前最优的 $\omega$ 和 $\rho$ $O(PM)$ |
|         | 算法 1 步骤 4    | 初始化基站用户 $O(PMN^2)$                |
| 算法 1    | 算法 1 步骤 5—6  | 计算决策前吞吐量 $O(PMFN)$                |
| 步骤 2—12 | 算法 1 步骤 7    | 得到邻接矩阵 $O(PMN^2)$                 |
|         | 算法 2         | 基于模拟退火边缘分簇算法 $O(PMNL)$            |
|         | 算法 1 步骤 9—12 | 计算决策后的吞吐量 $O(PMFN)$               |

## 4 仿真与分析

### 4.1 仿真环境与参数设置

假设在单个宏小区内均匀分布着 100 个 FBS 和 50 个 MUE, 每个 FBS 仅服务 1 个 FUE。在中心区域, I-FFR 算法和 FFR-3 算法的频率复用因子均为 1。在边缘区域, 随着 FBS 部署密度的变化, I-FFR 算法可动态调整频率复用因子, 而 FFR-3 算法采用固定频率复用因子 3。仿真参数设置如表 2 所列<sup>[6, 10]</sup>。

表 2 LTE-A 飞蜂窝系统仿真参数设置

| 仿真参数          | MBS                                                             | FBS       |
|---------------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| 半径(m)         | 300                                                             | 10        |
| 系统带宽(MHz)     | 10                                                              |           |
| RB 数目         | 50(180kHz/RB)                                                   |           |
| 传输功率(dBm)     | 46                                                              | 20        |
| 噪声功率谱密度 $N_0$ | -174dBm/Hz                                                      |           |
| 用户分布方式        | 均匀分布                                                            |           |
| 最大用户密度        | 50 MUEs/MBS                                                     | 1 FUE/FBS |
| SINR 门限值(dB)  | 8                                                               |           |
| 路径损耗模型        | $PL_{\text{outdoor}} = 28 + 35 \log_{10} d$                     |           |
|               | $PL_{\text{indoor}} = 38.5 + 20 \log_{10} d + L_{\text{walls}}$ |           |
|               | $L_{\text{walls}} = 7\text{dB}, 0 < d \leq 10$                  |           |
|               | $L_{\text{walls}} = 10\text{dB}, 10 < d \leq 20$                |           |
|               | $L_{\text{walls}} = 15\text{dB}, 20 < d \leq 30$                |           |

### 4.2 仿真分析

图 3 显示了中心区域半径比例对宏小区吞吐量的影响。可以看出, 宏小区吞吐量呈现先增加后减小的趋势。原因在于, 中心区域的频率复用因子为 1, 系统的频谱效率将随着中心区域所占比例的增加而增加。但是, 当中心区域半径比例继续增大时, 原来由 FBS 提供服务的宏用户将由 MBS 为其提供服务, 由于这些宏用户距 MBS 较远, 信号衰减比较严重, 易受到相邻 FBS 的干扰, 因此降低了蜂窝的总吞吐量。I-FFR 算法中, 当激活概率取 0.4、0.6、0.8、1.0 时, 宏小区吞吐量分别在中心区域比例为 0.55、0.58、0.64 和 0.66 处达到最大。然而, FFR-3 算法的中心区域比例一般固定为 0.63, 不

能适应 FBS 部署密度的变化。

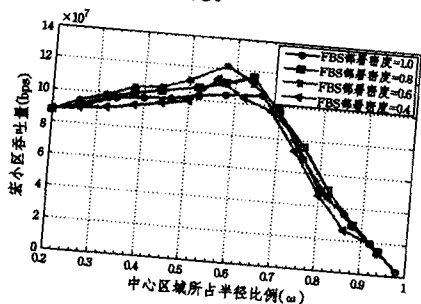


图3 中心区域所占比例( $\omega$ )对宏小区吞吐量的影响

由图3看出,在不同的部署密度下,要使吞吐量达到最大值,中心区域所占最优比例一般在0.5到0.7之间。依据图3可知,中心区域比例 $\omega=0.65$ 时,蜂窝吞吐量达到近优值。

图4显示了边缘区域FBS部署密度 $\rho$ 对边缘区域簇数的影响。可以看出,边缘区域簇数随 $\rho$ 的增大而增加。当 $\rho=0.2$ 时,边缘区域使用的簇数为1,即宏小区采用全频率复用方案时,频谱效率达到最大。随着 $\rho$ 的增加,I-FFR算法通过动态调整边缘区域簇数,降低了边缘区域簇间用户的干扰。

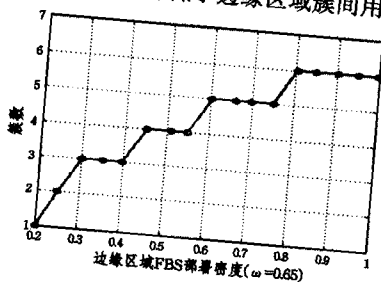


图4 边缘区域FBS部署密度( $\omega=0.65$ )对边缘区域簇数的影响

图5、图6分别显示了边缘区域FBS部署密度 $\rho$ 对宏小区吞吐量和边缘用户平均吞吐量的影响。可以看出,相较于FFR-3算法,I-FFR算法能将宏小区吞吐量提升15%。对比不同 $\rho$ 下的边缘用户平均吞吐量可知,I-FFR算法优于FFR-3算法。原因在于,I-FFR算法能根据 $\rho$ 的变化动态调整边缘簇数,将用户分配到不同的簇,降低了蜂窝间干扰。

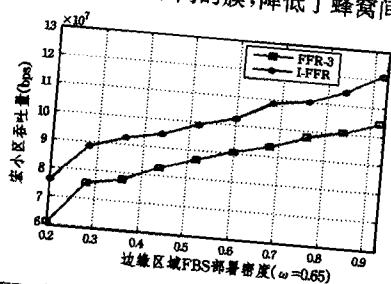
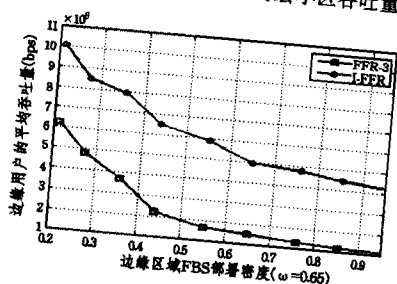


图5 FBS部署密度( $\omega=0.65$ )对宏小区吞吐量的影响



边缘区域FBS部署密度( $\omega=0.65$ )对边缘用户的平均吞吐量的影响

率的影响。可以看出,不同 $\rho$ 下,I-FFR算法的边缘用户中断概率均低于FFR-3的边缘用户中断概率。当 $\rho=0.95$ 时,FFR-3算法的边缘用户中断概率高达85%,而I-FFR算法的边缘用户中断概率仅为40%。

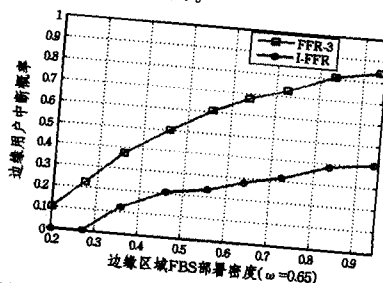


图7 边缘区域FBS部署密度( $\omega=0.65$ )对边缘用户中断概率的影响

**结束语** 本文针对LTE-A飞蜂窝系统的干扰协调问题,提出了一种智能部分频率复用算法(I-FFR)。该算法结合遗传算法和基于模拟退火的图着色算法,根据FBS部署密度,自适应调整中心区域所占比例和边缘频率复用因子,增加系统吞吐量,降低边缘区域用户的平均中断概率。仿真实验表明,与FFR-3算法相比,I-FFR算法明显提升了边缘用户平均吞吐量,降低了用户平均中断概率。

## 参考文献

- [1] Zahir T, Arshad K, Nakata A, et al. Interference management in femtocells[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(1): 293-311
- [2] Andrews J G, Claussen H, Dohler M, et al. Femtocells: Past, present, and future [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3): 497-508
- [3] Aijaz A, Aghvami H, Amani M. A survey on mobile data off-loading: technical and business perspectives[J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 20(2): 104-112
- [4] 司远, 陈昕, 刘宗奇. LTE-A飞蜂窝网络自相似业务流的端到端时延边界分析[J]. 计算机科学, 2015, 42(2): 70-75
- [5] Si Yuan, Chen Xin, Liu Zong-qi. Bounding end to end delay for Self-Similar Traffic in LTE-A Femtocell Networks[J]. Computer Science, 2015, 42(2): 70-75
- [6] Saquib N, Hossain E, Le L B, et al. Interference management in OFDMA femtocell networks: issues and approaches [J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(3): 86-95
- [7] Ning G, Yang Q, Kwak K S, et al. Macro- and femtocell interference mitigation in OFDMA wireless systems[C]//Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2012: 5068-5073
- [8] Uygungelen S, Auer G, Bharucha Z. Graph-based dynamic frequency reuse in femtocell networks[C]//IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2011: 1-6
- [9] Xu P, Fang X, Chen M, et al. A stackelberg game-based spectrum allocation scheme in macro/femtocell hierarchical networks [J]. Computer Communications, 2013, 36(14): 1552-1558
- [10] Xiang X, Wan J, Lin C, et al. A dynamic programming approximation for downlink channel allocation in cognitive femtocell networks[J]. Computer Networks, 2013, 57(15): 2976-2991
- [11] Lee T, Kim H, Park J, et al. Dynamic fractional-frequency reuse for femtocells[C]//Proceedings of the 5th ICUIMC. 2011: 80
- [12] Lee T, Yoon J, Shin J. Resource allocation analysis in OFDMA femtocells using fractional frequency reuse[C]//2010 IEEE International Symposium on

- Communications(PIMRC). IEEE,2010;1224-1229
- [12] Juang R T, Ting P, Lin H P, et al. Interference management of femtocell in macro-cellular networks[C]// Proceedings of the 9th Conference on Wireless Telecommunications Symposium. IEEE,2010;132-135
- [13] Chhorn S, Seo S, Mohsini M H, et al. Co-channel Interference Mitigation Based on Location Information in LTE Femtocell Systems[C]//2014 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA). IEEE,2014;322-327
- [14] Bilios D, Bouras C, Kokkinos V, et al. Optimization of fractional frequency reuse in long term evolution networks[C]// 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE,2012;1853-1857
- [15] Ali S M, Kiani A K. Cell edge detection based interference avoidance scheme for closed mode LTE femtocells[C]// Wireless Telecommunications Symposium(WTS),2013. IEEE,2013;1-7
- [16] Jin F, Zhang R, Hanzo L. Fractional frequency reuse aided twin-layer femtocell networks: Analysis, design and optimization[J]. IEEE Transactions on Communications,2013,61(5):2074-2085
- [17] Lee H C, Oh D C, Lee Y H. Mitigation of inter-femtocell interference with adaptive fractional frequency reuse[C]// 2010 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE,2010;1-5
- [18] Kishiyama Y, Benjebbour A, Nakamura T, et al. Future steps of LTE-A: evolution toward integration of local area and wide area systems[J]. IEEE Wireless Communications,2013,20(1):12-18
- [19] Lee T, Yoon J, Lee T, et al. Resource allocation analysis in OFDMA femtocells using fractional frequency reuse[C]// 2010 IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC). 2010;1224-1229
- [20] 史娇娇,姜淑娟. 基于遗传算法的动态可变参数的测试数据自动生成工具[J]. 计算机科学,2012,39(5):124-127
- Shi Jiao-jiao, Jiang Shu-juan. Automatic Test Generation Tool of Dynamic Variable Parameters Based on Genetic Algorithm[J]. Computer Science,2012,39(5):124-127
- [21] Titiloye O, Crispin A. Quantum annealing of the graph coloring problem[J]. Discrete Optimization,2011,8(2):376-384

(上接第252页)

## 参考文献

- [1] 戚玉涛,刘芳,常伟远,等. 求解多目标问题的 Memetic 免疫优化算法[J]. 软件学报,2013,24(7):1529-1544
- Qi Y T, Liu F, Chang W Y, et al. Memetic immune algorithm for multiobjective optimization[J]. Journal of Software, 2013, 24(7):1529-1544
- [2] Zhou A M, Qu B Y, Li H, et al. Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art [J]. Swarm and Evolutionary Computation,2011,1:32-49
- [3] Hu X, Eberhart R. Multiobjective optimization using dynamic neighborhood particle swarm optimization [C]// Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. New York: IEEE Press,2002;1677-1681
- [4] Salazar-Lechuga M, Rowe J E. Particle swarm optimization and fitness sharing to solve multi-objective optimization problems [C]// Congress on Evolutionary Computation (CEC' 2005). 2005;1204-1211
- [5] Coello C, Pulido G T, Lechuga M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2004,8(3):256-279
- [6] Agrawal S, Dashora Y, Tiwari M K, et al. Interactive particle swarm: A Pareto-adaptive metaheuristic to multiobjective optimization[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans,2008,38(2):258-277
- [7] Gandomi A H, Yun G J, Yang X S, et al. Chaos-enhanced accelerated particle swarm optimization[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation,2013,18(1007-5704):327-340
- [8] 任子晖,王坚. 加速收敛的微粒群优化算法[J]. 控制与决策,2011,26(2):201-206
- Ren Zi-hui, Wang Jian. Accelerate convergence particle swarm optimization algorithm [J]. Control and Decision,2011,26(2):201-206
- [9] 丁雷,吴敏,余锦华,等. 基于多目标粒子群协同算法的状态参数优化[J]. 中国工程科学,2010,12(2):101-107
- Ding Lei, Wu Min, She Jin-hua, et al. Multi-objective particle swarm cooperative optimization algorithm for state parameters [J]. China Engineering Science,2010,12(2):101-107
- [10] Zhang Y, Gong D W, Ding Z H. A bare-bones multi-objective particle swarm optimization algorithm for environmental economic dispatch [J]. Information Sciences,2009,192(4):213-227
- [11] 伍大清,郑建国. 基于混合策略自适应学习的并行微粒群优化算法研究[J]. 控制与决策,2013,28(7):1086-1094
- Wu Da-qing, Zheng Jiang-guo. Improved parallel particle swarm optimization algorithm with hybrid strategy and self-adaptive learning [J]. Control and Decision,2013,28(7):1086-1094
- [12] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6(2):182-197
- [13] Carlos A C C, Cortes N C. Solving multiobjective optimization problems using an artificial immune system[J]. Genetic Programming and Evolvable Machines,2005,6(2):163-190
- [14] Yoo J, Hajela P. Immune network simulations in multicriterion design [J]. Structural Optimization,1999,18:85-94
- [15] Zou Wen-ping, Zhu Yun-long, Chen Han-ning, et al. Solving multi-objective optimization problems using artificial bee colony algorithm[J]. Discrete dynamics in Nature and Society,2011;1-37
- [16] Huang V L, Suganthan P N, Liang J J. Comprehensive learning particle swarm optimizer for solving multi-objective optimization problems[J]. International Journal of Intelligent Systems,2006,21(2):209-226
- [17] 公茂果,焦李成,杨咚咚,等. 进化多目标优化算法研究 [J]. 软件学报,2009,20(2):271-289
- Gong Mao-guo, Jiao Li-Cheng, Yang Dong-dong, et al. Research on evolutionary multi-objective optimization algorithms [J]. Journal of Software,2009,20(2):271-289