

基于迭代近似的异构网络功率控制算法

刘 岗¹, 赵杭生², 邵鸿翔^{1,3}, 李大力²

(1. 解放军理工大学 通信工程学院, 南京 210007; 2. 南京电讯技术研究所, 南京 210007; 3. 洛阳理工学院, 河南 洛阳 471023)

摘 要: 针对频谱资源短缺的问题, 提出一种保证宏蜂窝用户服务质量的功率控制算法。根据建立的功率优化模型, 通过 3 种不同方式对非凸目标函数进行凸优化估计处理, 将其转换为若干凸子问题并迭代近似, 从而得到原非凸目标函数的解。仿真结果表明, 该算法经过数次迭代后, 能收敛到原优化问题的解, 提高系统吞吐量。

关键词: 频谱资源; 异构网络; 功率控制; 凸优化; 吞吐量

中文引用格式: 刘 岗, 赵杭生, 邵鸿翔, 等. 基于迭代近似的异构网络功率控制算法[J]. 计算机工程, 2018, 44(9): 95-100.

英文引用格式: LIU Gang, ZHAO Hangsheng, SHAO Hongxiang, et al. Power control algorithm in heterogeneous network based on iterative approximation[J]. Computer Engineering, 2018, 44(9): 95-100.

Power Control Algorithm in Heterogeneous Network Based on Iterative Approximation

LIU Gang¹, ZHAO Hangsheng², SHAO Hongxiang^{1,3}, LI Dali²

(1. College of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

2. Nanjing Telecommunication Technology Research Institute, Nanjing 210007, China;

3. Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

【Abstract】 To solve the problem of shortage of spectrum resources, a power control algorithm is proposed under the condition that the Quality of Service (QoS) of Macro-cellular User Equipment (MUE) is satisfied. It approximates the nonconvex objective function in three different approaches, and converts the problem into a series of convex subproblems, then solves the subproblems iteratively and the solution of the original nonconvex objective function is obtained finally. Simulation results show that after several iterations, the proposed algorithm can effectively obtain the solution of the original optimization problem and improve the system throughput.

【Key words】 spectrum resource; heterogeneous network; power control; convex optimization; throughput

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0047728

0 概述

随着无线业务的急剧增长, 短缺的频谱资源正面临着巨大挑战, 这对第五代移动通信 (5G) 的网络结构和算法提出了新的要求。异构网络被视作一种提高资源利用率、增强用户体验的关键技术^[1-3]。异构网络通过在传统宏蜂窝中部署低功率小蜂窝, 有效地扩大了覆盖范围, 提高了系统吞吐量^[4-6]。但是, 部署异构网络带来便利的同时, 也面临一些挑战。由于微蜂窝和宏蜂窝复用相同资源, 微蜂窝用户会对宏蜂窝用户造成跨层干扰, 同时微蜂窝用户之间也会引起同层干扰, 降低系

统性能, 因此如何合理地对于干扰进行管理显得尤为重要^[4]。

合理的功率控制是干扰管理的一种重要方法。但是无线网络优化目标函数就功率而言通常是非线性且非凸的, 是非确定性多项式困难问题 (NP-hard), 具有很高的复杂度^[7], 很难用一般优化方法求解。目前, 大量文献对无线网络功率控制进行了研究。如文献[8]提出了一种基于最大化能量效率的功率分配框架, 在满足功率限制条件下, 求得了非凸问题的优化解。文献[9]提出了一种在 D2D 网络中的功率分配方案, 利用随机博弈对问题进行分析求解。文献[10]提出了一种基于拍卖博弈的两步功

基金项目: 国家自然科学基金 (61471395); 江苏省自然科学基金 (BK20161125)。

作者简介: 刘 岗 (1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电磁频谱管理、认知无线网络; 赵杭生, 研究员、博士; 邵鸿翔, 博士研究生; 李大力, 硕士。

收稿日期: 2017-06-27

修回日期: 2017-09-05

E-mail: liugang200819@163.com

率分配机制,该机制根据服务提供商和宏蜂窝用户的相互影响,设计了斯坦博格均衡定价机制,最后根据拍卖博弈分配功率。文献[11]提出了一种基于斯坦博格贝叶斯博弈的功率分配算法,在保证宏蜂窝用户服务质量的情况下,最大化宏蜂窝和微蜂窝的容量。文献[12]对双层蜂窝网络功率控制进行了分析。文献[13]分析了LTE-U网络中非授权频段和授权频段的功率控制问题,通过合理分配功率,将授权频段业务压力成功地卸载到非授权频段上,有效提高了频谱利用率。

本文提出一种保证宏蜂窝用户服务质量、最大化蜂窝用户速率的连续功率控制方案。由于所建立的功率控制模型中优化目标函数非线性且非凸,因此给出3种不同的凸优化估计方法,将非凸优化问题转换为若干凸子问题,然后设计3种不同迭代算法对凸子问题不断迭代求解,最终得到原问题的解。

1 系统模型与问题描述

考虑下行双层异构无线网络,一些微基站(Femtocell Base Station, FBS)和宏用户(Macro-cellular User Equipment, MUE)随机分布在一个宏基站(Micro Base Station, MBS)的覆盖范围内,如图1所示。为简化作图,图中各链路、干扰均同时表示多条链路和干扰。FBS集合为 $F = \{1, 2, \dots, M\}$, $|F| = M$, MUE集合为 $MU = \{Mu_1, Mu_2, \dots, Mu_R\}$, $|MU| = R$ 。为简化分析,假设各微基站一次只服务1个微蜂窝用户(Femtocell User Equipment, FUE)。微基站 m 中FUE记作 Fu_m ,系统FUE集合记作 $FU = \{Fu_1, Fu_2, \dots, Fu_M\}$, $|FU| = M$ 。所有MUE和FUE共用 R 条信道,用集合 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_R\}$ 表示。假设各信道已经提前分配给MUE,如 c_j 分配给 Mu_j 。为了充分利用频谱资源,假设各信道可同时被多个FUE复用,且各FUE可同时在 R 条信道上传输信息。为保证 Mu_j 的服务质量,规定 Mu_j 在 c_j 上造成的总干扰不能超过干扰门限 I_{\max}^j 。

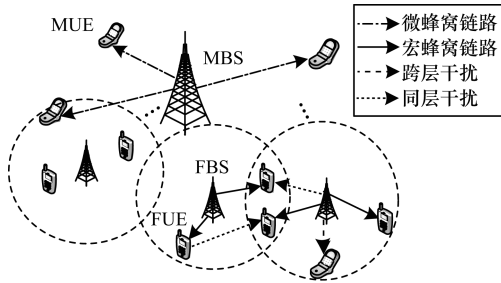


图1 系统模型

Fu_i 在 c_j 上的信干噪比为:

$$\gamma_{Fu_i}^j = \frac{p_{Fu_i}^j h_{i,i}^j}{\sum_{Fu_k \in FU \setminus Fu_i} p_{Fu_k}^j h_{k,i}^j + \sigma^2} \quad (1)$$

其中, $\sigma_{ij}^2 = p_{MBS}^j g_{MBS,i} + \sigma^2$, $p_{Fu_i}^j$ 为 Fu_i 在 c_j 上的发射功率, p_{MBS}^j 为宏基站在 c_j 上的发射功率, $g_{MBS,i}$ 和 $h_{i,i}^j$ 分别为宏基站到 Fu_i , 微基站 i 与 Fu_i 在 c_j 上的信道增益, σ^2 是噪声功率, $\sum_{Fu_k \in FU \setminus Fu_i} p_{Fu_k}^j h_{k,i}^j$ 为 Fu_i 在 c_j 上所受其他蜂窝用户的干扰, $h_{k,i}^j$ 为微基站 k 与 Fu_i 之间的信道增益。因此, Fu_i 在 c_j 上的可达速率可表示为:

$$R_{Fu_i}^j = B_j \text{lb}(1 + \gamma_{Fu_i}^j) \quad (2)$$

Fu_i 总速率可表示为:

$$R_{Fu_i} = \sum_{j \in C} R_{Fu_i}^j \quad (3)$$

其中, B_j 为 c_j 的带宽。 Fu_i 在 c_j 上对 Mu_j 造成的跨层干扰可表示为 $I_{Fu_i}^j = p_{Fu_i}^j g_{i, Mu_j}$, g_{i, Mu_j} 为微基站 i 与 Mu_j 之间的信道增益。 Mu_j 受到的总跨层干扰可表示为 $I_j = \sum_{Fu_i \in FU} I_{Fu_i}^j$ 。本文优化目标是最大化整个系统FUE的可达速率,表示如下:

$$P1: \max \sum_{Fu_i \in FU} R_{Fu_i} \quad (4)$$

s. t.

$$C1: I_j \leq I_{\max}^j, \forall j \in C$$

$$C2: \sum_{j \in C} p_{Fu_i}^j \leq p_{Fu_i}^{\max}, \forall Fu_i \in FU$$

$$C3: 0 \leq p_{Fu_i}^j \leq p_{Fu_i}^{\max}, \forall Fu_i \in FU, j \in C$$

其中, $p_{Fu_i}^{\max}$ 为 Fu_i 所能发送的最大功率,在P1中,限制条件C1规定所有FUE在 c_j 上对 Mu_j 造成的干扰低于 Mu_j 的干扰门限,从而保证 Mu_j 的服务质量。限制条件C2为功率限制条件,即各用户在各信道上发送功率总和不能超过基站最大发射功率。显然P1是一个是非确定性多项式困难问题,不能用凸优化理论对其求解。

2 迭代功率分配方案

由于P1是非凸问题,不能直接用凸优化理论对其求解,因此,提出3种不同方式对非凸目标函数进行凸优化估计处理,将其转换为若干凸子问题,然后设计3种迭代算法(迭代DC功率分配算法、迭代AGM功率分配算法、迭代LA功率分配算法)对若干凸子问题进行迭代求解,最后得到原非凸目标函数的解。

2.1 迭代DC功率分配

首先对P1进行改写,P1等价于:

$$P2: \max F(p) - G(p)$$

s. t. C1, C2, C3

其中:

$$F(p) = \sum_{Fu_i \in FU} \sum_{j \in C} B_j \text{lb}(p_{Fu_i}^j h_{i,i}^j + p_{MBS}^j g_{MBS,i} + \sum_{Fu_k \in FU \setminus Fu_i} p_{Fu_k}^j h_{k,i}^j + \sigma^2) \quad (6)$$

$$G(p) = \sum_{Fu_i \in FU} \sum_{j \in C} B_j \text{lb}(p_{MBS}^j g_{MBS,i} + \sum_{Fu_k \in FU \setminus Fu_i} p_{Fu_k}^j h_{k,i}^j + \sigma^2) \quad (7)$$

显然 $F(p)$ 、 $G(p)$ 是凸函数, 即 P1 可表示为 2 个凸函数之差 (Difference of Two Convex Functions, DC)。

由于:

$$\frac{\partial G(p)}{\partial p_{Fu_k}^j} = \sum_{Fu_i \in FU \setminus Fu_k} \frac{\omega_j h_{k,i}^j}{\sum_{Fu_m \in FU \setminus Fu_i} p_{Fu_m}^j h_{m,i}^j + \sigma_{ij}^2} \quad (8)$$

其中, $\omega_j = \frac{B_j}{\ln 2}$ 。由式(8)易知, $\frac{\partial^2 G(p)}{\partial (p_{Fu_k}^j)^2} < 0$, 因此有:

$$G(p) \leq G(p^{(t)}) + \langle \nabla G(p^{(t)}), p - p^{(t)} \rangle \quad (9)$$

注意到有:

$$F(p) - G(p^{(t)}) - \langle \nabla G(p^{(t)}), p - p^{(t)} \rangle \quad (10)$$

是关于 p 的凸函数。P2 近似于求解 P3, 得:

$$\begin{aligned} \text{P3: max } & F(p) - G(p^{(t)}) - \langle \nabla G(p^{(t)}), p - p^{(t)} \rangle \\ \text{s. t. } & \text{C1, C2, C3} \end{aligned} \quad (11)$$

$p^{(t)}$ 为第 t 次迭代时 P3 的最优解。此时易证 P3 是凸规划问题^[14], 可用凸优化理论求解。

定理 1 经过对式(11)近似处理后, 不断对式(11)求解可产生一系列单调不减解, 并且最终会收敛到 P1 的局部最优解。

证明 由式(10)可知:

$$F(p^{(t+1)}) - G(p^{(t+1)}) \geq F(p^{(t+1)}) - [G(p^{(t)}) + \langle \nabla G(p^{(t)}), p^{(t+1)} - p^{(t)} \rangle] \quad (12)$$

又因为 $p^{(t+1)}$ 为 P3 的最优解, 所以有:

$$F(p^{(t+1)}) - [G(p^{(t)}) + \langle \nabla G(p^{(t)}), p^{(t+1)} - p^{(t)} \rangle] \geq F(p^{(t)}) - G(p^{(t)}) \quad (13)$$

即:

$$F(p^{(t+1)}) - G(p^{(t+1)}) \geq F(p^{(t)}) - G(p^{(t)})$$

所以 P3 的下一个最优解总是比当前最优解更好, 当 $\|p^{(t+1)} - p^{(t)}\| < \varepsilon$ 时, P3 与 P1 等价, 此时解为 P1 局部最优解。

迭代 DC 功率分配算法具体过程如下:

初始化 $t=1, p^{(0)}=0, p^{(1)}=\bar{p}$, \bar{p} 表示各用户在各信道上传输功率相等且均分最大的发射功率。

While $\|p^{(t)} - p^{(t-1)}\| > \varepsilon$ 。

给定 $p^{(t)}$, 利用内点法求解 P3, 最优解记作 $p^{(t+1)}$ 。

$t=t+1$ 。

end while。

2.2 迭代 AGM 功率分配

注意到 P1 等价于 P4:

$$\begin{aligned} \text{P4: min } & \prod_{Fu_i \in FU} \prod_{j \in C} \left(\frac{u_{ij}(p) + \sigma_{ij}^2}{\bar{v}_{ij}(p^{(t)}) + \sigma_{ij}^2} \right)^{B_j} \\ \text{s. t. } & \text{C1, C2, C3} \end{aligned} \quad (14)$$

其中:

$$u_{ij}(p) = \sum_{Fu_k \in FU \setminus Fu_i} p_{Fu_k}^j h_{k,i}^j \quad (15)$$

$$v_{ij}(p) = \sum_{Fu_k \in FU \setminus Fu_i} p_{Fu_k}^j h_{k,i}^j + p_{Fu_i}^j h_{i,i}^j \quad (16)$$

令 $v_{ij}^k = p_{Fu_k}^j h_{k,i}^j$, 由算术几何均值不等式 (Arithmetic-Geometric Mean inequality, AGM) 知:

$$\sum_{k \in F} \alpha_k v_{ij}^k \geq \prod_{k \in F} (v_{ij}^k)^{\alpha_k} \quad (17)$$

其中, $v_{ij} = [v_{ij}^1, v_{ij}^2, \dots, v_{ij}^M] > 0, \alpha_k \geq 0, \forall k \in F$, 且 $\sum_{k \in F} \alpha_k = 1$ 。由式(17)可得:

$$v_{ij}(p) = \sum_{k \in F} v_{ij}^k = \sum_{k \in F} \alpha_k \frac{v_{ij}^k}{\alpha_k} \geq \bar{v}_{ij}(p) = \prod_{k \in F} \left(\frac{v_{ij}^k}{\alpha_k} \right)^{\alpha_k} \quad (18)$$

其中, $\alpha_k = \frac{v_{ij}^k}{v_{ij}}$ 。由于 $v_{ij}(p) \geq \bar{v}_{ij}(p^{(t)})$, 当 $p = p^{(t)}$ 时, 不等式取等号。将 P4 改写为 P5:

$$\begin{aligned} \text{P5: min } & \prod_{Fu_i \in FU} \prod_{j \in C} \left(\frac{u_{ij}(p) + \sigma_{ij}^2}{\bar{v}_{ij}(p^{(t)}) + \sigma_{ij}^2} \right)^{B_j} \\ \text{s. t. } & \text{C1, C2, C3} \end{aligned} \quad (19)$$

显然此时 P5 经过对数变换可以转换为一个凸问题, 可直接用凸优化算法求解。

定理 2 经过对式(19)近似处理后, 不断对式(19)求解可产生一系列单调不减解, 并且最终会收敛到 P1 的局部最优解。

受篇幅限制, 证明见文献[15]。

迭代 AGM 功率分配算法具体过程如下:

初始化 $t=1, p^{(0)}=0, p^{(1)}=\bar{p}$, \bar{p} 表示各用户在各信道上传输功率相等且均分最大的发射功率。

While $\|p^{(t)} - p^{(t-1)}\| > \varepsilon$ 。

计算 $v_{ij}^k(t-1), v_{ij}^k(t), \forall i, k \in F, j \in C$ 。

计算系数:

$$\alpha_k(t) = \frac{v_{ij}^k(t-1)}{v_{ij}(t-1)}$$

计算 $\bar{v}_{ij}(p^{(t)})$:

$$\bar{v}_{ij}(p^{(t)}) = \prod_{k \in F} \left(\frac{v_{ij}^k(t)}{\alpha_k(t)} \right)^{\alpha_k(t)}$$

将 $\bar{v}_{ij}(p^{(t)})$ 代入 P5, 利用内点法对 P5 求解, 求得最优解记作 $p^{(t+1)}$ 。

$t=t+1$ 。

end while。

2.3 迭代 LA 功率分配

由于:

$$\text{lb}(1+x) \geq \alpha \text{lb}(x) + \beta \quad (20)$$

如果不等式在 $x=x_0 > 0$ 时取等号, 则:

$$\alpha = \frac{x_0}{1+x_0} \quad (21)$$

$$\beta = \text{lb}(1+x_0) - \frac{x_0}{1+x_0} \text{lb}(x_0) \quad (22)$$

利用不等式式(20)对 R_{Fu_i} 进行估计, 同时令:

$$\hat{p}_{Fu_i}^j = \ln(p_{Fu_i}^j) \quad (23)$$

则有:

$$\text{P6: max } \sum_{Fu_i \in FU} \sum_{j \in C} R_{Fu_i}^j (e^{\hat{p}_{Fu_i}^j}, \alpha_{Fu_i}^j, \beta_{Fu_i}^j)$$

s. t.

$$\text{C1: } \sum_{Fu_i \in FU} e^{\hat{p}_{Fu_i}^j} g_{i, Mu_j} \leq I_{\max}^j, \forall j \in C$$

$$\begin{aligned} C2: \sum_{j \in C} e^{\hat{p}_{Fu_i}^j} &\leq p_{Fu_i}^{\max}, \forall Fu_i \in FU \\ C3: 0 &\leq e^{\hat{p}_{Fu_i}^j} \leq p_{Fu_i}^{\max}, \forall Fu_i \in FU, j \in C \end{aligned} \quad (24)$$

其中:

$$R_{Fu_i}^j(e^{\hat{p}_{Fu_i}^j}, \alpha_{Fu_i}^j, \beta_{Fu_i}^j) = B_j \alpha_{Fu_i}^j \text{lb}(\hat{\gamma}_{Fu_i}^j) + \beta_{Fu_i}^j \quad (25)$$

$$\hat{\gamma}_{Fu_i}^j = \frac{e^{\hat{p}_{Fu_i}^j} h_{i,i}^j}{\sum_{Fu_k \in FU \setminus Fu_i} e^{\hat{p}_{Fu_k}^j} h_{k,i}^j + \sigma_{ij}^2} \quad (26)$$

$$\alpha_{Fu_i}^j = \frac{\hat{\gamma}_{Fu_i}^j}{1 + \hat{\gamma}_{Fu_i}^j} \quad (27)$$

$$\beta_{Fu_i}^j = \text{lb}(1 + \hat{\gamma}_{Fu_i}^j) - \frac{\hat{\gamma}_{Fu_i}^j}{1 + \hat{\gamma}_{Fu_i}^j} \text{lb}(\hat{\gamma}_{Fu_i}^j) \quad (28)$$

称这种估计方式为拉格朗日估计(Logarithmic Approximation, LA), 易证 P6 属于凸规划问题^[14]。令:

$$\begin{aligned} L(\hat{p}, \lambda, \mu) = &\sum_{Fu_i \in FU} \sum_{j \in C} R_{Fu_i}^j(e^{\hat{p}_{Fu_i}^j}, \alpha_{Fu_i}^j, \beta_{Fu_i}^j) - \\ &\sum_{j \in C} \lambda_j \sum_{Fu_i \in FU} (e^{\hat{p}_{Fu_i}^j} g_{i, Mu_j} - I_{\max}^j) - \\ &\sum_{Fu_i \in FU} \mu_{Fu_i} (\sum_{j \in C} e^{\hat{p}_{Fu_i}^j} - p_{Fu_i}^{\max}) \end{aligned} \quad (29)$$

其中, $\lambda_j \geq 0, \mu_{Fu_i} \geq 0, \forall j \in C, Fu_i \in FU$ 。

$$\text{令 } \frac{\partial L(\hat{p}, \lambda, \mu)}{\partial p_{Fu_i}^j} = 0, \text{ 求得:}$$

$$p_{Fu_i}^j = e^{\hat{p}_{Fu_i}^j} = \left[\frac{\omega_j \alpha_{Fu_i}^j}{\sum_{Fu_{i'} \in FU \setminus Fu_i} \frac{\omega_{j'} \alpha_{Fu_{i'}}^j h_{i',i'}^j}{I_{\text{in}}^j(t)} + \lambda_j g_{i, Mu_j} + \mu_{Fu_i}(t)} \right]^+ \quad (30)$$

其中, $\omega_j = \frac{B_j}{\ln 2}, I_{\text{in}}^j(t) = \sum_{Fu_k \in FU \setminus Fu_{i'}} e^{\hat{p}_{Fu_k}^j} h_{k,i'}^j + \sigma_{ij}^2, [\cdot]^+ = \max(\cdot, 0)$ 。根据式(30)求出 $p_{Fu_i}^j$ 后, 利用次梯度法可求得 P6 的解, 具体如下:

$$\lambda_j(t+1) = [\lambda_j(t) + \delta_\lambda (\sum_{Fu_i \in FU} e^{\hat{p}_{Fu_i}^j} g_{i, Mu_j} - I_{\max}^j)]^+ \quad (31)$$

$$\mu_{Fu_i}(t+1) = [\mu_{Fu_i}(t) + \delta_\mu (\sum_{j \in C} e^{\hat{p}_{Fu_i}^j} - p_{Fu_i}^{\max})]^+ \quad (32)$$

$\forall j \in C, Fu_i \in FU$, 其中, $\delta_\lambda, \delta_\mu$ 为迭代步长且 $\delta_\lambda > 0, \delta_\mu > 0$ 。

定理 3 经过对式(24)近似处理后, 不断对式(24)求解可产生一系列单调不减解, 并且最终会收敛到 P1 的局部最优解。

证明 由于:

$$R_{Fu_i}^j(e^{\hat{p}_{Fu_i}^j}, \alpha_{Fu_i}^j, \beta_{Fu_i}^j(t)) = \max_p R_{Fu_i}^j(p, \alpha_{Fu_i}^j(t), \beta_{Fu_i}^j(t)) \geq$$

$$R_{Fu_i}^j(e^{\hat{p}_{Fu_i}^j}(t-1), \alpha_{Fu_i}^j(t), \beta_{Fu_i}^j(t)) = R_{Fu_i}^j(p(t-1)) \geq$$

$$R_{Fu_i}^j(e^{\hat{p}_{Fu_i}^j}(t-1), \alpha_{Fu_i}^j(t-1), \beta_{Fu_i}^j(t-1))$$

因此 P6 在不断迭代过程中得到的一系列最优解是非减的, 最终会收敛到 P1 的局部最优解。

迭代 LA 功率分配算法具体过程如下:

初始化 $t=0$ 。

$\lambda_j(0) > 0, \mu_{Fu_i}(0) > 0, \alpha_{Fu_i}^j = 1, \beta_{Fu_i}^j = 0, p_{Fu_i}^j(0) = 0, \forall j \in C, Fu_i \in FU$ 。

重复求解 P6。

由式(30)计算 $p_{Fu_i}^j$:

$$p_{Fu_i}^j(t+1) =$$

$$\left[\frac{\omega_j \alpha_{Fu_i}^j(t)}{\sum_{Fu_{i'} \in FU \setminus Fu_i} \frac{\omega_{j'} \alpha_{Fu_{i'}}^j(t) h_{i',i'}^j}{I_{\text{in}}^j(t)} + \lambda_j(t) g_{i, Mu_j} + \mu_{Fu_i}(t)} \right]^+$$

根据式(31)、式(32)更新 $\lambda_j, \mu_{Fu_i}, \forall j \in C, \forall Fu_i \in FU$ 。

$t = t + 1$ 。

Until $\lambda_j, \mu_{Fu_i}, \forall j \in C, Fu_i \in FU$ 收敛。

算法结束。

其中, $I_{\text{in}}^j(t) = \sum_{Fu_k \in FU \setminus Fu_{i'}} e^{\hat{p}_{Fu_k}^j(t)} h_{k,i'}^j + \sigma_{ij}^2$ 。

3 仿真分析

仿真考虑一个异构网络部署在 $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 的正方形区域内, MBS 位于正方形区域中心, MUE、FBS 随机分布在 MBS 通信范围内。各 FUE 随机分布在以 FBS 坐标为圆心、半径为 20 m 的圆内。MBS 发射功率为 46 dBm, FBS 功率为 23 dBm, 噪声功率为 -90 dBm, 各信道带宽为 180 kHz, 并假设各信道干扰门限相同。信道增益 $g_{T,R} = 10^{(-L(d_{T,R}))/10}$, $L(d_{T,R})$ 为发射端与接收端的路径损耗, 假设 $L(d_{T,R}) = 15.3 + 37.6 \lg(d_{T,R})$, $d_{T,R}$ 为 FBS 与 FUE 之间的距离。 $g_{T,R}$ 可代表 MBS 到 FUE、FBS 与 FUE、FBS 与 MUE 之间的信道增益。

图 2 显示了 $M=7, R=3$ 时, 3 种算法的收敛性能。从图 2 可以看出 3 种算法都能收敛到相同解, 其中, 迭代 DC 功率分配算法在经 3 次迭代后收敛, 迭代 LA 功率分配算法经 6 次迭代后收敛, 迭代 AGM 功率分配算法经 10 次迭代后收敛。故算法收

敛性能由高到低分别是迭代 DC 功率分配算法、迭代 LA 功率分配算法、迭代 AGM 功率分配算法。

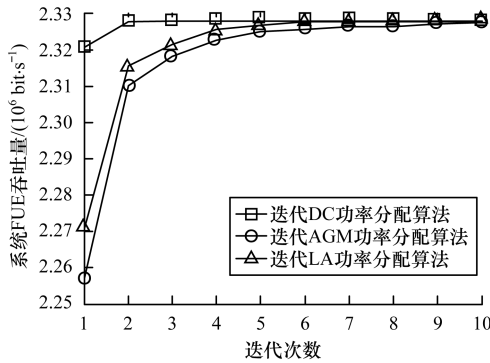


图 2 算法收敛性分析结果对比

图 3 给出了干扰门限为 -85 dBm , $M = 7, R = 3$ 时,系统 FUE 吞吐量与干扰门限的关系曲线。从图中可以看出 3 种不同的迭代算法的曲线非常接近,在高干扰门限时基本重合。另外,从 3 种算法曲线中可以看出,随着干扰门限的增大,系统 FUE 吞吐量增加,当干扰门限大于 -45 dBm 时,系统 FUE 吞吐量不再变化,因为这时干扰门限对 FUE 已经没有影响。

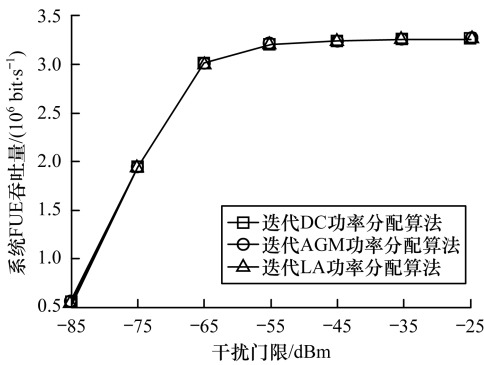


图 3 系统 FUE 吞吐量与干扰门限的关系曲线

图 4 显示了各信道干扰门限为 -85 dBm , $M = 3, R = 1 \sim 7$ 时,系统 FUE 吞吐量随信道数量变化的关系。从图中 3 种不同算法的结果曲线可以看出,随着信道数量的不断增加,系统 FUE 吞吐量随着信道数量的增加近似呈线性递增。这是因为这时各 FUE 可利用资源增多,当 FUE 数量小于信道数量时,各 FUE 可以选择不同信道接入,从而避免 FUE 用户间的干扰。另外从图中可以看出,迭代 DC 功率分配算法在性能上优于迭代 LA 功率分配算法,迭代 LA 功率分配算法性能优于迭代 AGM 功率分配算法。

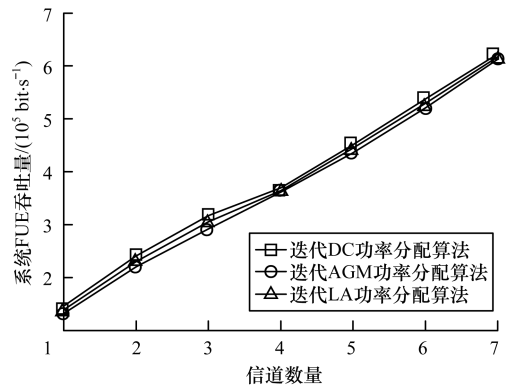


图 4 系统 FUE 吞吐量与信道数量的关系曲线

图 5 显示了在各信道干扰门限为 -85 dBm , $R = 3$, FUE 数量分别为 $1 \sim 10$ 时,系统 FUE 吞吐量与 FUE 数量之间的关系。从图中可以看出,随着 FUE 数量的增加,系统 FUE 吞吐量增加。在 FUE 数量小于等于 3 时,增加明显,因为这时信道数量大于 FUE 数量,各 FUE 可接入不同信道,将功率全部分配到该信道上,从而避免 FUE 之间的干扰。在 FUE 数量为 $4 \sim 10$ 之间时,增速先放缓,然后继续增加。这是由于当 FUE 数量为 4 时,此时信道数量小于 FUE 数量, FUE 之间存在相互干扰,造成增速下降。随着 FUE 数量的继续增加,系统 FUE 吞吐量增加的程度越来越明显,故此时增速又逐渐加快。

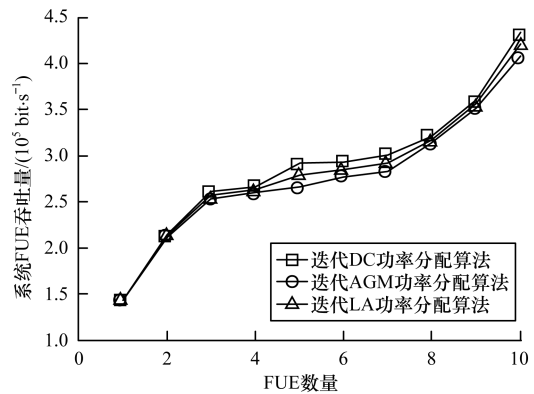


图 5 系统 FUE 吞吐量与 FUE 数量的关系曲线

4 结束语

本文针对异构网络提出高效的功率分配方法。建立在保护 MUE 服务质量情况下的功率分配模型,并从数学上对模型中的优化目标进行分析估计,给出 3 种迭代算法,对问题进行迭代求解,最终得到优化目标的解,实现高效的功率分配。

参考文献

- [1] KHANDEKAR A, BHUSHAN N, TINGFANG J, et al. LTE-advanced: heterogeneous networks [C] // Proceedings of European Wireless Conference. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2010: 978-982.
- [2] 刘伟强. 异构蜂窝网络的干扰管理研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- [3] 黄 晨, 陈前斌, 唐 伦, 等. 异构蜂窝网络干扰管理研究与展望 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2015, 27 (3): 285-296.
- [4] 黄 鹏, 黄 晨, 廖薪棋, 等. HetNet 中基于功率控制的动态增强小区域干扰协调方案 [J]. 计算机工程, 2016, 42 (12): 102-107, 111.
- [5] DAMNJANOVIC A, MONTOJO J, WEI Yongbin, et al. A survey on 3GPP heterogeneous networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18 (3): 10-21.
- [6] CHOI Y, KIM H, HAN S W, et al. Joint resource allocation for parallel multi-radio access in heterogeneous wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9 (11): 3324-3329.
- [7] KARPR M. Reducibility among combinatorial problems [M]. Berlin, Germany: Springer, 1972.
- [8] SBOUI L, REZKI Z, ALOUINI M S. Energy-efficient power allocation for underlay cognitive radio systems [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2015, 1 (3): 273-283.
- [9] CHANG M K, CHIEN F T, CHEN T C, et al. Stochastic game-theoretical power allocation in D2D communications [C] // Proceedings of IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2016: 1-4.
- [10] CAO Bin, LANG Wenqiang, LI Yun, et al. Power allocation in wireless network virtualization with buyer/seller and auction game [C] // Proceedings of IEEE Global Communications Conference. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2014: 1-6.
- [11] DUONG N D, MADHUKUMAR A S, NIYATO D. Stackelberg Bayesian game for power allocation in two-tier networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65 (4): 2341-2354.
- [12] FU Fengchao, LU Zhaoming, WEN Xiangming, et al. Exact potential game based power control with QoS provisioning in two-tier femtocell networks [C] // Proceedings of International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2014: 180-185.
- [13] SHAO Hongxiang, SUN Youming, ZHAO Hangsheng, et al. Locally cooperative traffic-offloading in multi-mode small cell networks via potential games [J]. KSII Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2016, 27 (7): 968-981.
- [14] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [15] CHIANG M, TAN C W, PALOMAR D P, et al. Power control by geometric programming [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6 (7): 2640-2651.
- [10] YAMADA K, ITOKAWA T, KITASUKA T, et al. Cooperative MPR selection to reduce topology control packets in OLSR [C] // Proceedings of TENCON' 10. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2010: 293-298.
- [11] WANG A, ZHU B. Improving MPR selection algorithm in OLSR protocol based on node localization technology [J]. Journal of Networks, 2014, 9 (7): 1674-1681.
- [12] LEE S J, GERLA M. Dynamic load-aware routing in Ad Hoc networks [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2001: 3206-3210.
- [13] 刘 智, 徐 桢. 航空高动态网络负载感知路由算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40 (12): 1697-1701.
- [14] MACCARI L, CIGNO R L. How to reduce and stabilize MPR sets in OLSR networks [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2012: 373-380.
- [15] 姚卫红, 方仁孝, 张旭东. 基于混合人工鱼群优化 SVR 的交通流量预测 [J]. 大连理工大学学报, 2015, 55 (6): 632-637.
- [16] 张 磊, 邹春学, 陈凯明. 基于负载均衡的 ZigBee 动态路由优化算法 [J]. 计算机工程, 2016, 42 (3): 138-142.
- [17] 马林华, 张 嵩, 茹 乐, 等. 航空高动态网络链路感知 OLSR 路由算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42 (7): 1326-1334.
- [18] 赵建龙, 曲 桦, 赵季红, 等. 基于 Morlet-SVR 和 ARIMA 组合模型的网络流量预测 [J]. 北京邮电大学学报, 2016, 39 (2): 53-57.
- [19] 孙轶轩, 邵春福, 计 寻, 等. 基于 ARIMA 与信息粒化 SVR 组合模型的交通事故时序预测 [J]. 清华大学学报, 2014, 54 (3): 348-353.
- [20] 戴江为, 黎福海, 周志飞. Wi-Fi 自组网环境下 OLSR 路由协议性能分析及改进研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.

编辑 顾逸斐

编辑 吴云芳

(上接第 94 页)