

文章编号: 2095-4980(2017)02-0223-08

基于能效和异构服务的密集家庭小区资源分配

唐春菊

(攀枝花学院 电气信息工程学院, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 密集家庭小区网络提高了网络容量, 同时也严重增大了网络的能耗。为了提高家庭基站网络的能效, 针对密集家庭小区场景, 联合考虑家庭用户的异构服务、电路功率、网络的跨层干扰, 提出了最大化家庭用户总能效的资源分配算法, 利用Dinkelbach理论和拉格朗日对偶分解理论, 求解了该优化问题的闭式解, 并分析了算法复杂度。仿真结果表明, 所提的资源分配算法具有更高的网络能效, 比已有资源分配算法的能效提高了约20%。

关键词: 家庭小区; 资源分配; 能效; Dinkelbach 理论

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201702.0223

Energy-efficiency and heterogeneous services based resource allocation in dense femtocells

TANG Chunju

(Institute of Electrical and Information Engineering, Panzhihua College, Panzhihua Sichuan 617000, China)

Abstract: Dense femtocells can boost the network capacity, and also significantly increase the energy consumption of the network. In order to improve the energy-efficiency of dense femtocells, resource allocation algorithm of maximizing the total energy efficiency of the dense femtocells network is proposed considering heterogeneous services, circuit power, and cross-tier interference, which uses the theory of Dinkelbach and Lagrangian dual decomposition method to solve the optimization problem, and the algorithm complexity is also analyzed. Simulation results show that, the proposed resource allocation algorithm has higher energy-efficiency than the existing resource allocation algorithm with energy-efficiency improved by about 20%.

Keywords: femtocell; resource allocation; energy-efficiency; Dinkelbach method

随着移动通信网络的发展, 如何在有限的带宽资源下实现更高速率和更大容量成为业界的研究重点。为了更加有效地利用带宽资源, 提高网络容量, 在宏小区内部署低功率的小基站(如家庭基站、中继、微基站等), 形成宏小区-家庭小区这样的双层网络, 以提高系统频谱效率, 提升系统整体吞吐量, 减轻基站负荷, 增大网络的整体覆盖面积。同时, 随着多媒体业务及高速率数据业务要求的提高, 通信过程中所消耗的能量将会增大, 这不仅增加了经济开销, 也增大了二氧化碳的排放, 对环境造成一定的影响。同时, 高能级的能效消耗给仅有有限电池容量的移动设备带来诸多不便。因此, 如何高效利用有限的能量, 提高能量使用效率成为资源分配设计中的一个重要问题^[1-2]。文献[3-6]针对平坦衰落、频率选择性衰落信道研究了最大化系统能效的资源分配算法, 但这些算法没有考虑双层网络的异构环境。针对异构网络, 一些基于最大化系统能效的资源分配算法也大量涌现^[7-11], 文献[7]分析了单宏小区下的单小小区场景下的能效资源分配; 文献[8]基于认知技术, 提出了最大化家庭基站网络能效的资源分配算法, 算法没有考虑跨层干扰; 文献[9]基于非合作博弈, 提出了最大化密集家庭基站网络和能效的次优的资源分配算法; 文献[10]研究了基于斯坦伯格博弈的能效资源分配算法; 文献[11]研究了基于随机几何理论的双层网络下的能效问题。这些研究成果要么没有考虑密集家庭基站网络场景, 要么没有考虑家庭用户的异构服务。

本文主要针对单宏小区密集家庭网络, 考虑家庭用户的异构服务^[12-13]、电路功率及跨层干扰, 研究最大化系统总能效问题。文献[12]就终端的异构服务, 研究了最大化系统能效的资源分配算法, 但没有设计异构双层

网络；文献[13]在异构双层网络下，考虑家庭用户的异构服务，研究了最大化家庭网络容量的资源分配，但没有涉及系统能效问题。本文在文献[12-13]的基础上，联合考虑家庭用户的异构服务、用户电路功率、网络的同层干扰和跨层干扰，构建了最大化家庭网络总能效的优化模型，并利用 Dinkelbach 理论^[14-16]和拉格朗日对偶分解理论求解了该能效最大化优化问题。

1 系统模型及问题描述

1.1 系统模型

本文考虑一个如图 1 所示的双层网络的上行链路，该网络由 1 个宏基站和 K 个家庭基站组成，假设宏小区有 M 个宏用户，每个用户占用 1 个信道，共有 M 个信道。假设每个家庭小区有 U 个家庭用户， $g_{k,u,n}^{\text{MF}}$ 表示在子信道 n 上从家庭基站 k 的用户 u 到宏基站的信道增益， $g_{k,u,n}^{\text{F}}$ 表示在子信道 n 上从家庭基站 k 的用户 u 到本家庭基站的信道增益， $g_{k,m,n}^{\text{FM}}$ 表示在子信道 n 上宏用

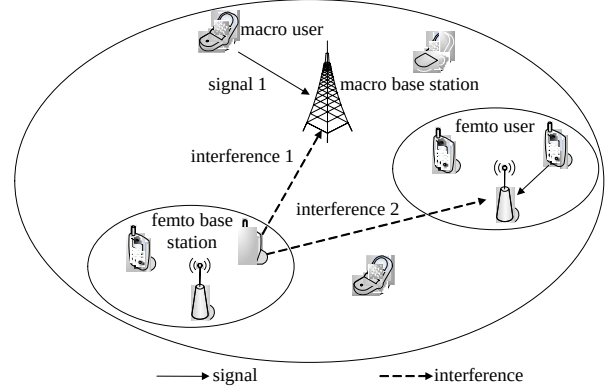


Fig.1 Model of two-tier cellular networks

图 1 双层网络上行干扰模型

户 m 到家庭基站 k 的信道增益， $p_{k,u,n}^{\text{F}}$ 表示家庭小区 k 内的家庭用户 u 在信道 n 上的发射功率， $p_{m,n}^{\text{M}}$ 表示宏用户 m 在信道 n 上的发射功率，其中， $k \in \{1, 2, \dots, K\}$, $u \in \{1, 2, \dots, U\}$, $n \in \{1, 2, \dots, N\}$, $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。与其他文献相似，定义 DS_k 和 DT_k 分别表示家庭基站 k 内的延时敏感用户与延时容忍用户，并满足延时敏感用户与延时容忍用户之和为每个家庭基站内的总家庭用户数，且每个家庭用户只能为延时敏感用户或延时容忍用户两者之一，即，应满足 $|DS_k| + |DT_k| = U$, $DS_k \cap DT_k = \emptyset$ 。由于对家庭用户来说，相邻家庭用户对其的干扰相比宏用户对其的干扰小很多，因此可以忽略同层干扰，则第 k 个家庭基站的第 u 个用户占用第 n 个信道的接收信干噪比为：

$$\gamma_{k,u,n}^{\text{F}} = \frac{p_{k,u,n}^{\text{F}} g_{k,u,n}^{\text{F}}}{p_{m,n}^{\text{M}} g_{k,m,n}^{\text{FM}} + \sigma^2} \quad (1)$$

式中 σ^2 为热噪声功率。

根据香农公式，第 k 个家庭基站的第 u 个用户占用第 n 个信道的容量可表示为：

$$C_{k,u,n}^{\text{F}} = W \log_2 (1 + \gamma_{k,u,n}^{\text{F}}) \quad (2)$$

式中 W 为每个子信道的带宽。

1.2 问题描述

为最大化家庭网络的能效，建立优化目标函数：

$$\begin{cases} \max_{a_{k,u,n}, p_{k,u,n}^{\text{F}}} \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \sum_{n=1}^N a_{k,u,n} C_{k,u,n}^{\text{F}}}{\sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \left(\sum_{n=1}^N a_{k,u,n} p_{k,u,n}^{\text{F}} + p_c \right)} \\ \text{s.t. } C_1 : \sum_{n=1}^N a_{k,u,n} p_{k,u,n}^{\text{F}} \leq P_{\max}, \forall k, u; & C_2 : \sum_{n=1}^N a_{k,u,n} C_{k,u,n}^{\text{F}} \geq R_u, \forall u \in DS_k, \forall k \\ C_3 : \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U a_{k,u,n} p_{k,u,n}^{\text{F}} g_{k,u,n}^{\text{MF}} \leq I_n^{\text{th}}, \forall n; & C_4 : p_{k,u,n}^{\text{F}} \geq 0, \forall k, u, n \\ C_5 : \sum_{u=1}^U a_{k,u,n} \leq 1, \forall k, n; & C_6 : a_{k,u,n} \in [0, 1], \forall k, u, n \end{cases} \quad (3)$$

式中： p_c 为电路功率；约束 C_1 表示每个家庭用户的总功率限制；约束 C_2 表示延时敏感的家庭用户有 QoS 要求； R_u 为延时敏感用户的最低速率要求；约束 C_3 表示与家庭用户共享信道的宏用户能容忍的干扰范围； I_n^{th} 为占用

信道 n 的宏用户能容忍的最大干扰门限; 约束 C_4 表示家庭用户的功率的非负性; 约束 C_5 和 C_6 表示每个信道只能被每个家庭基站内的家庭用户使用。

2 基于能效的资源分配

该优化问题还是非凸规划问题, 属于非线性分数规划问题。首先将约束 C_6 放缩为 $a_{k,u,n} \in [0, 1], \forall k, u, n$, 此时, $a_{k,u,n}$ 可以视为 n 子信道的时间共享因子, 即在一个传输帧中子信道 n 被分配给家庭小区 k 的用户 u 的时间比例。并引入变量 $\bar{p}_{k,u,n}^F = a_{k,u,n} p_{k,u,n}^F$, 则此时的容量表示为:

$$\bar{C}_{k,u,n}^F = W \log_2 \left(1 + \frac{\bar{p}_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^F}{a_{k,u,n} (p_{w,n}^M g_{k,w,n}^{FM} + \sigma^2)} \right) \quad (4)$$

将约束 $C_1 \sim C_6$ 中的 $p_{k,u,n}^F$ 和 $C_{k,u,n}^F$ 分别用 $\bar{p}_{k,u,n}^F$ 和 $\bar{C}_{k,u,n}^F$ 替换, 则式(3)中的优化问题可重写为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{a_{k,u,n}, \bar{p}_{k,u,n}^F} \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \sum_{n=1}^N a_{k,u,n} \bar{C}_{k,u,n}^F}{\sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \left(\sum_{n=1}^N \bar{p}_{k,u,n}^F + p_c \right)} \\ s.t. \quad C_1: \sum_{n=1}^N \bar{p}_{k,u,n}^F \leq P_{\max}, \forall k, u; \quad C_2: \sum_{n=1}^N a_{k,u,n} \bar{C}_{k,u,n}^F \geq R_u, \forall u \in DS_k, \forall k \\ C_3: \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \bar{p}_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^{MF} \leq I_n^{\text{th}}, \forall n; \quad C_4: \bar{p}_{k,u,n}^F \geq 0, \forall k, u, n \\ C_5: \sum_{u=1}^U a_{k,u,n} \leq 1, \forall k, n; \quad C_6: a_{k,u,n} \in [0, 1], \forall k, u, n \end{array} \right. \quad (5)$$

假设式(5)的最优能效为 q , 根据 Dinkelbach 理论, 将其改写为:

$$F(q, a_{k,u,n}, \bar{p}_{k,u,n}^F) = \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \sum_{n=1}^N a_{k,u,n} \bar{C}_{k,u,n}^F - q \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \left(\sum_{n=1}^N \bar{p}_{k,u,n}^F + p_c \right) \quad (6)$$

并有, 当且仅当 $F(q, a_{k,u,n}, \bar{p}_{k,u,n}^F) = 0$ 时, 最优功率分配 $\hat{p}_{k,u,n}^F$ 获得最大能效。

$$\hat{q} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \sum_{n=1}^N a_{k,u,n} C_{k,u,n}^F(\hat{p}_{k,u,n}^F)}{\sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \sum_{n=1}^N a_{k,u,n} (\hat{p}_{k,u,n}^F + p_c)} \quad (7)$$

因而可将原优化问题等效为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{a_{k,u,n}, \bar{p}_{k,u,n}^F} F(q, a_{k,u,n}, \bar{p}_{k,u,n}^F) \\ s.t. \quad C_1: \sum_{n=1}^N \bar{p}_{k,u,n}^F \leq P_{\max}, \forall k, u; \quad C_2: \sum_{n=1}^N a_{k,u,n} \bar{C}_{k,u,n}^F \geq R_u, \forall u \in DS_k, \forall k \\ C_3: \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \bar{p}_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^{MF} \leq I_n^{\text{th}}, \forall n; \quad C_4: \bar{p}_{k,u,n}^F \geq 0, \forall k, u, n \\ C_5: \sum_{u=1}^U a_{k,u,n} \leq 1, \forall k, n; \quad C_6: a_{k,u,n} \in [0, 1], \forall k, u, n \end{array} \right. \quad (8)$$

定理 1 $F(q, a_{k,u,n}, \bar{p}_{k,u,n}^F)$ 是关于 $a_{k,u,n}, \bar{p}_{k,u,n}^F$ 的凹函数。

$$F(q, a_{k,u,n}, \bar{p}_{k,u,n}^F) = \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \sum_{n=1}^N a_{k,u,n} \bar{C}_{k,u,n}^F - q \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \left(\sum_{n=1}^N \bar{p}_{k,u,n}^F + p_c \right)$$

令 $F_1 = \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \sum_{n=1}^N a_{k,u,n} \bar{C}_{k,u,n}^F$, $F_2 = -q \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \left(\sum_{n=1}^N \bar{p}_{k,u,n}^F + p_c \right)$, F_1 的海瑟矩阵为 $\mathbf{H}_1$:

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 F_1}{\partial a_{k,u,n}^2} & \frac{\partial^2 F_1}{\partial a_{k,u,n} \partial \bar{p}_{k,u,n}^F} \\ \frac{\partial^2 F_1}{\partial a_{k,u,n} \partial \bar{p}_{k,u,n}^F} & \frac{\partial^2 F_1}{\partial \bar{p}_{k,u,n}^F^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{p_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^F}{(a_{k,u,n} I_{k,u,n} + \bar{p}_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^F) \ln 2} \left(\frac{a_{k,u,n} I_{k,u,n}}{a_{k,u,n} I_{k,u,n} + \bar{p}_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^F} - 1 \right) & \frac{g_{k,u,n}^F}{(a_{k,u,n} I_{k,u,n} + \bar{p}_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^F) \ln 2} \left(1 - \frac{a_{k,u,n} I_{k,u,n}}{a_{k,u,n} I_{k,u,n} + \bar{p}_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^F} \right) \\ \frac{g_{k,u,n}^F}{(a_{k,u,n} I_{k,u,n} + \bar{p}_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^F) \ln 2} \left(1 - \frac{a_{k,u,n} I_{k,u,n}}{a_{k,u,n} I_{k,u,n} + \bar{p}_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^F} \right) & \frac{a_{k,u,n} (g_{k,u,n}^F)^2}{(a_{k,u,n} I_{k,u,n} + \bar{p}_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^F)^2 \ln 2} \end{bmatrix}$$

容易验证其一阶顺序主子式小于 0, 二阶主子式等于 0, 所以 F_1 是关于 $a_{k,u,n}, \bar{p}_{k,u,n}^F$ 的凹函数。另一方面, 容易看出 F_2 是关于 $a_{k,u,n}, \bar{p}_{k,u,n}^F$ 的凹函数。所以 2 个关于 $a_{k,u,n}, \bar{p}_{k,u,n}^F$ 的凹函数之和仍是关于 $a_{k,u,n}, \bar{p}_{k,u,n}^F$ 的凹函数。

根据文献[15], 可以在适当的条件下, 满足强对偶特性, 使得对偶差额为 0。因此, 可以通过对偶分解求解该优化问题。其拉格朗日函数可以表示为:

$$L(\{a_{k,u,n}\}, \{\bar{p}_{k,u,n}^F\}, \lambda, \mu, \eta, \gamma) = \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \sum_{n=1}^N a_{k,u,n} \bar{C}_{k,u,n}^F - q \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \left(\sum_{n=1}^N \bar{p}_{k,u,n}^F + p_c \right) + \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \lambda_{k,u} (P_{\max} - \sum_{n=1}^N \bar{p}_{k,u,n}^F) +$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{u \in DS_k} \mu_{k,u} \left(\sum_{n=1}^N a_{k,u,n} \bar{C}_{k,u,n}^F - R_u \right) + \sum_{n=1}^N \eta_n (I_n^{\text{th}} - \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \bar{p}_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^{\text{MF}}) + \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \gamma_{k,n} \left(1 - \sum_{u=1}^U a_{k,u,n} \right)$$

对应的拉格朗日对偶函数表示为:

$$g(\lambda, \mu, \eta, \gamma) = \max_{\{a_{k,u,n}\}, \{\bar{p}_{k,u,n}^F\}} L(\{a_{k,u,n}\}, \{\bar{p}_{k,u,n}^F\}, \lambda, \mu, \eta, \gamma) \quad (9)$$

对偶问题可表示为:

$$\begin{cases} \min_{\lambda, \mu, \eta, \gamma} g(\lambda, \mu, \eta, \gamma) \\ \text{s.t. } \lambda, \mu, \eta, \gamma \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\lambda, \mu, \eta, \gamma$ 分别为对应约束 C_1, C_2, C_3, C_5 的拉格朗日乘子向量。

可以通过将该对偶问题分解为一个主问题和 $K \times N$ 个子问题。其中子问题是在固定的拉格朗日乘子下分配功率, 而主问题是利用子梯度算法更新拉格朗日乘子。

1) 子问题的解

由库恩塔克(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)条件获得子问题的最优功率解为:

$$\hat{p}_{k,u,n}^F = \left[\frac{W}{\ln 2} \left(\frac{1 + \mu_{k,u}}{q + \lambda_{k,u} + \eta_n g_{k,u,n}^{\text{MF}}} \right) - \frac{I_{k,u,n}}{g_{k,u,n}^F} \right]^+, \forall u \in DS_k \quad (11)$$

$$\hat{p}_{k,u,n}^F = \left[\frac{W}{\ln 2} \left(\frac{1}{q + \lambda_{k,u} + \eta_n g_{k,u,n}^{\text{MF}}} \right) - \frac{I_{k,u,n}}{g_{k,u,n}^F} \right]^+, \forall u \in DT_k \quad (12)$$

式中 $[x]^+ = \max\{0, x\}$ 。另外, 将式(12)对 $a_{k,u,n}$ 求偏导得:

$$\frac{\partial L_{k,n}(\dots)}{\partial a_{k,u,n}} = W(1 + \mu_{k,u}) \log_2 \left(1 + \frac{\hat{p}_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^F}{p_{w,n}^M g_{k,w,n}^{FM} + \sigma^2} \right) - \frac{W(1 + \mu_{k,u})}{\ln 2} \left(1 + \frac{\hat{p}_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^F}{\hat{p}_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^F + p_{w,n}^M g_{k,w,n}^{FM} + \sigma^2} \right) -$$

$$(\lambda_{k,u} + \eta_n g_{k,u,n}^{MF} + q) \hat{p}_{k,u,n}^F - \gamma_{k,n}$$

令

$$M_{k,u,n} = W(1 + \mu_{k,u}) \log_2 \left(1 + \frac{\hat{p}_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^F}{p_{w,n}^M g_{k,w,n}^{FM} + \sigma^2} \right) - \frac{W(1 + \mu_{k,u})}{\ln 2} \left(1 + \frac{\hat{p}_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^F}{\hat{p}_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^F + p_{w,n}^M g_{k,w,n}^{FM} + \sigma^2} \right) -$$

$$(\lambda_{k,u} + \eta_n g_{k,u,n}^{MF} + q) \hat{p}_{k,u,n}^F \quad (13)$$

子信道 n 应分配给最大化 $M_{k,u,n}$ 的家庭用户 n , 即

$$\hat{a}_{k,u^*,n} = 1 \Big|_{u^* = \max_u M_{k,u,n}}, \forall k, n \quad (14)$$

2) 主问题的解

根据子梯度算法按照式(15)~(17)等更新拉格朗日乘子:

$$\lambda_{k,u}^{(l+1)} = \left[\lambda_{k,u}^{(l)} - s_1^{(l)} \left(P_{\max} - \sum_{n=1}^N a_{k,u,n} p_{k,u,n}^F \right) \right]^+, \forall k, u \quad (15)$$

$$\mu_{k,u}^{(l+1)} = \left[\mu_{k,u}^{(l)} - s_2^{(l)} \left(\sum_{n=1}^N a_{k,u,n} C_{k,u,n}^F - R_u \right) \right]^+, \forall k, u \in DS_k \quad (16)$$

$$\eta_n^{(l+1)} = \left[\eta_n^{(l)} - s_3^{(l)} \left(I_n^{\text{th}} - \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U a_{k,u,n} p_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^{MF} \right) \right]^+, \forall n \quad (17)$$

根据 Dinkelbach 理论, 求解优化式(5)的流程图如图 2 所示, 引理 1 将证明算法 1 的收敛性。

引理 1 算法 1 能收敛到最优解。

根据已有成果^[16]中相似的方法证明其收敛性, 首先引入 2 个命题。为了方便描述, 式(5)的等效目标函数定义为:

$$F(q') = \max_{A,P} \{ R_{\text{tot}}(A, P) - q' P_{\text{tot}}(A, P) \}, \text{ 其中 } R_{\text{tot}}(A, P) \text{ 表示系统的总速率, } P_{\text{tot}}(A, P) \text{ 表示系统消耗的总功率。}$$

命题 1 $F(q')$ 函数是其定义域内的非负函数。

假设 (A', P') 是式(4)中的优化问题的一个任意最优解, 则

$$q' = \frac{R_{\text{tot}}(A', P')}{P_{\text{tot}}(A', P')}, \text{ 那么}$$

$$F(q') = \max_{A,P} \{ R_{\text{tot}}(A, P) - q' P_{\text{tot}}(A, P) \} \geq R_{\text{tot}}(A', P') - q' P_{\text{tot}}(A', P') = 0 \quad (18)$$

命题 2 $F(q')$ 函数是关于 q' 的严格单调递减函数。即, 如果 $q' > q''$, 则 $F(q'') > F(q')$ 。

假设 (A', P') 和 (A'', P'') 分别是关于 $F(q')$ 和 $F(q'')$ 的 2 个不同的最优分配政策, 那么

$$F(q'') = \max_{A,P} \{ R_{\text{tot}}(A, P) - q'' P_{\text{tot}}(A, P) \} = R_{\text{tot}}(A'', P'') - q'' P_{\text{tot}}(A'', P'') >$$

$$R_{\text{tot}}(A', P') - q'' P_{\text{tot}}(A', P') \geq R_{\text{tot}}(A', P') - q' P_{\text{tot}}(A', P') = F(q') \quad (19)$$

现在证明引理 1, 首先证明能效 q 随着迭代次数增大而增大, 然后证明当迭代次数足够大时, 能效 q 收敛到最优值 q^* , 即 $F(q^*) = 0$ 。假设 (A_n, P_n) 和 (A_{n+1}, P_{n+1}) 分别是第 n 和 $n+1$ 迭代的最优分配策略, 并假设 $q_n \neq q^*$, $q_{n+1} \neq q^*$ 分别表示第 n 和 $n+1$ 迭代时系统的能效, 则 $F(q_n) > 0, F(q_{n+1}) > 0$, $q_{n+1} = R_{\text{tot}}(A_n, P_n) / P_{\text{tot}}(A_n, P_n)$ 。那么

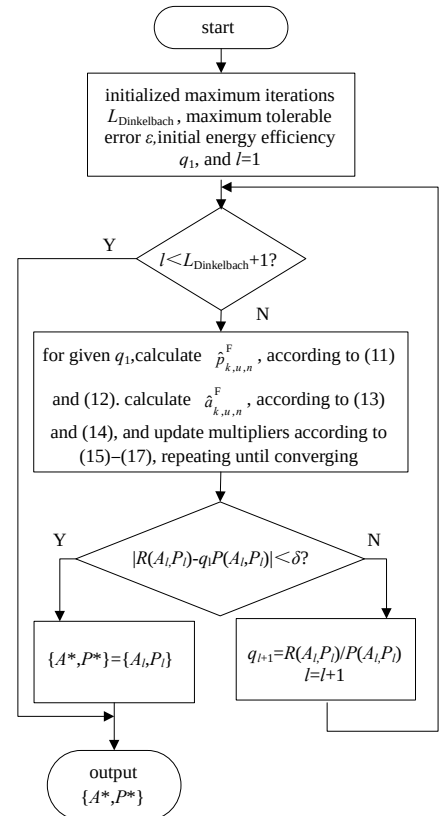


Fig.2 Iteration based energy efficiency resource allocation procedure
图 2 基于迭代的能效资源分配流程

$F(q_n)$ 可表示为:

$$F(q_n) = R_{\text{tot}}(A_n, P_n) - q_n P_{\text{tot}}(A_n, P_n) = (q_{n+1} - q_n) P_{\text{tot}}(A_n, P_n) \stackrel{(a)}{> 0} \Rightarrow q_{n+1} > q_n \quad (20)$$

式(20)中用到**命题 1**的结论和 $P_{\text{tot}}(A_n, P_n)$ 。结合式(20)和**命题 1**、**命题 2**可知, 只要迭代次数足够大, $F(q_n)$ 最终会趋于 0, 此时, $q^* = q_n$ 。

3 算法复杂度分析

在算法 1 的子算法中, 对每个家庭基站内的每个用户在每个子信道上计算式(13), 需要 $K \times U \times N$ 次, 最坏情况下计算式(14), 也需要 $K \times U \times N$ 次, 更新乘子 λ, μ 需要 $K \times U$ 次计算, 更新乘子 η 需要 N 次计算, 若次梯度算法收敛需要 Q 次迭代, 根据文献[14], 算法 1 的子算法的总复杂度为 $O(K^2 U^2 N^2 Q)$, 则算法 1 的总复杂度为 $O(L_{\text{Dinkelbach}} K^2 U^2 N^2 Q)$, 通过选择合适的拉格朗日乘子的初值和迭代步长, 可以在较小的 Q 和 $L_{\text{Dinkelbach}}$ 下, 使系统收敛, 仿真结果中将进一步说明。

4 仿真结果及分析

本文仿真参考文献[13], 宏基站与宏用户的最小距离为 40 m, 家庭基站与家庭基站、家庭基站与宏基站间距也为 40 m, 文中路径损耗模型参考文献[17], 主要考虑大尺度衰落, 其他仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table1 Simulation parameters

parameter	value	parameter	value
cell topology	single macrocell	transmitting power of femto users/dBm	10-30
radius of macro cell/m	500	circuit power ^[10] /dBm	20
radius of femtocell/m	10	thermal noise density/(dBm·Hz ⁻¹)	-174
number of macro users	50	system bandwidth/MHz	10
femto users per femtocell	1,2,4,6,8	penetration loss ^[14] /dB	10
transmitting power of macro users ^[14] /dBm	23	shadowing standard deviation ^[14] /dB	8

图 3 给出基于能效和异构服务的资源分配算法的收敛特性曲线。可以看出, 整体上都能够在 7 次迭代后就能收敛。同时, 随着家庭小区数的增多, 系统能效反而会下降, 这是因为家庭小区间的同层干扰加剧, 满足一定 QoS 要求时的传输功率增加, 从而导致网络能效下降。

图 4 给出家庭基站网络总能效随每个家庭小区中用户数变化特性曲线。可以看出, 随着每个家庭小区家庭用户数量的增加, 家庭网络的总能效逐渐下降, 另外, 系统中在每个家庭小区具有相同家庭用户数的情况下, 系统具有 50 个家庭小区的总能效较 30 个家庭小区的总能效低。

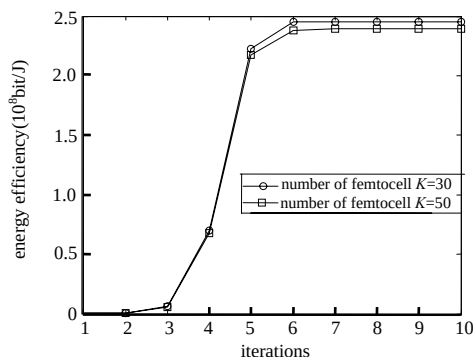


Fig.3 Energy efficiency vs. iterations

图 3 基于能效的迭代资源分配算法收敛曲线

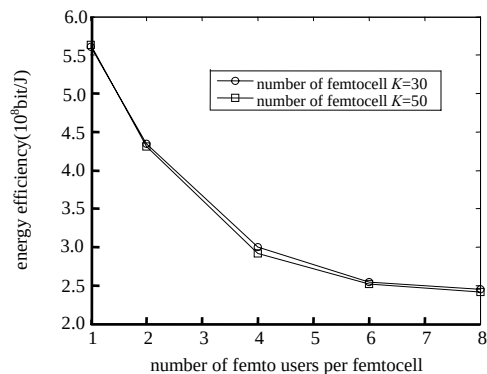


Fig.4 Energy efficiency vs. the number of femto users per femtocell

图 4 能效随小区用户数量的变化

图 5 给出家庭基站网络总能效随每个家庭小区中延迟敏感用户数变化特性曲线。容易看出, 随着每个家庭小区中延迟敏感用户数量的增加, 家庭基站网络的总能效下降, 这是因为要保证延迟敏感用户的 QoS 要求, 需要消耗更多的能耗。

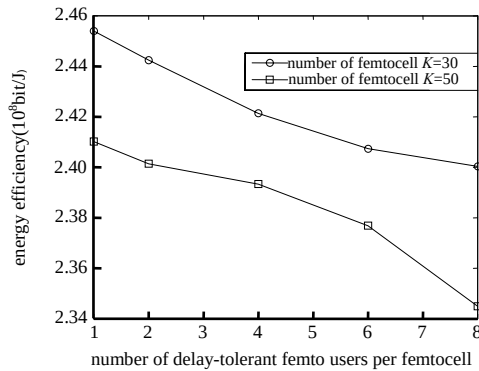


Fig.5 Energy efficiency vs. the number of delay-sensitive femto users
图 5 能效随延迟敏感的家庭用户数的变化

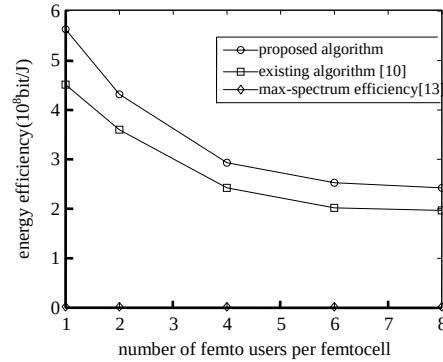


Fig.6 Comparison of different resource allocation algorithms in system energy efficiency
图 6 几种资源分配算法下家庭基站网络能效比较

图 6 比较了几种资源分配算法所得家庭基站网络的总能效。可以看出, 本文的能效资源分配算法能效最高, 文献[10]的方案次之, 文献[13]的能效最差, 这是因为文献[10]中基于能效的资源分配方法中, 是最大化各家庭用户的能效, 无法达到系统最优的总能效, 而文献[13]中最大化网络和速率的资源分配算法为了最大化网络和速率, 不会考虑网络能耗, 所以能效最低, 此时每家庭小区用户数为 1 时的最高能效也仅仅为 $1.7448 \times 10^5 \text{ bit/J}$ 。

5 结论

密集小基站网络是提升网络容量的最有效方式之一, 然而, 随之而来的干扰问题和能耗问题也显著加剧。另外, 不同用户有各自的服务质量要求, 使得异构服务需求成为提升用户体验的一个因素。本文针对密集家庭小区场景, 联合考虑家庭用户的异构服务、电路功率、网络的跨层干扰, 提出了最大化家庭用户总能效的资源分配算法, 并通过大量仿真分析了家庭小区用户数、家庭小区数、家庭基站传输功率对网络总能效的影响, 验证了所提能效资源分配算法的有效性。下一步将研究降低能效资源分配算法的复杂度。

参考文献:

- [1] LI G Y, XU Z K, XING C, et al. Energy-efficient wireless communications: tutorial, survey, and open issues[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(6): 28–35.
- [2] MESHKATI F, POOR H V, SCHWARTZ S C. Energy-efficient resource allocation in wireless networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 58–68.
- [3] ISHEDEN C, CHONG Z, JORSWIECH E, et al. Framework for link-level energy efficiency optimization with informed Transmitter[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(8): 2946–2957.
- [4] ISHEDEN C, FETTWEIS G P. Energy-efficiency multi-carrier link adaptation with rate dependent circuit power[C]// 2010 IEEE Global Telecommunications Conference. [S.l.]: IEEE, 2010: 1–6.
- [5] MIAO G, HIMAYAT N, LI G Y. Energy-efficiency link adaptation in frequency-selective channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(2): 545–554.
- [6] XIONG C, LI G Y, ZHANG S, et al. Energy-efficient resource allocation in OFDMA networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(12): 1–5.
- [7] JIANG J, PENG M, ZHANG K, et al. Energy-efficient resource allocation in heterogeneous network with cross-tier interference constraint[C]// 2013 IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. [S.l.]: IEEE, 2013: 168–172.
- [8] XIE R, YU F R, JI H, et al. Energy-efficient resource allocation for heterogeneous cognitive radio networks with femtocells[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(11): 3910–3920.
- [9] ZHANG Z, ZHANG H, LU Z, et al. Energy-efficient resource optimization in OFDMA-based dense femtocell networks[C]. 2013 20th International Conference on Telecommunications (ICT). [S.l.]: IEEE, 2013: 1–5.
- [10] DU B, PAN C, ZHANG W, et al. Energy-efficient cooperative transmission in heterogeneous wireless networks with QoS constraint[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 76(1): 77–98.
- [11] QUEK T Q S, CHEUNG W C, KOUNTOURIS M. Energy efficiency analysis of two-tier heterogeneous networks[C]// 11th European Wireless Conference 2011–Sustainable Wireless Technologies. [S.l.]: VDE, 2011: 1–5.

(下转第 238 页)