

基于能量采集异构蜂窝网络的功率分配算法研究

万晓榆,冯小龙,王正强,樊自甫

(重庆邮电大学下一代网络研究所,重庆 400065)

摘 要: 针对能量采集异构蜂窝网络,由于能量到达和信道状态的随机性导致离线功率分配算法只能取得理论最优,本文提出了一种在线功率分配算法.算法在每个时隙开始时,基站控制器通过能量判别选出满足开启条件的小蜂窝基站,然后采用基于拉格朗日乘子的两层迭代算法对所选择的小蜂窝基站分配发射功率,能够实际最大化系统在每个时隙的能效.仿真表明在满足基站开启条件的情况下,所提算法可以为密集异构网络提供更高的能量效率.该算法适用于信道状态和能量状态不可预测的网络.

关键词: 能效优化; 能量采集; 功率分配; 电池容量; 在线算法; 异构网络

中图分类号: TN929.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)09-2308-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.036

Power Allocation Algorithm for Heterogeneous Cellular Networks Based on Energy Harvesting

WAN Xiao-yu, FENG Xiao-long, WANG Zheng-qiang, FAN Zi-fu

(Institute of Next Generation Network, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: For heterogeneous cellular network based on energy harvesting, due to randomness of the energy and channel state, the applicability of the offline power allocation algorithm can only obtain the theoretical optimal value, therefore, an online power allocation algorithm is proposed. Base station controller uses energy checking algorithm to choose the small base station, which satisfies the activation condition at the beginning of each time slot for the proposed algorithm. Then, a two layer iterative (TLI) algorithm based on the Lagrange multiplier method is proposed to maximize the system energy efficiency of the chosen small base stations practically in each time slot. Simulation results show that the proposed algorithm can provide high energy efficiency for dense heterogeneous networks when the activation condition of the small base station is satisfied. The proposed algorithm is suitable for the network with unpredictability of the channel state information and energy state information.

Key words: energy efficiency optimization; energy harvesting; power allocation; battery capacity; online algorithm; heterogeneous network

1 引言

随着移动网络应用和智能终端的日益普及,小蜂窝在原来宏蜂窝架构下被大量部署,这有助于提高系统容量.然而,不同小蜂窝间存在同频干扰,单纯地增加发射功率会对能量造成浪费.为响应节能减排的号召,能量采集技术在绿色蜂窝网络中受到广泛关注^[1,2].

研究基于能量采集异构网络现有的功率分配算法发现,已有算法主要存在三个问题,导致算法实用性不

强.首先,研究考虑的场景过于简单,例如文献[3]只考虑了单个宏蜂窝的能量采集,而文献[4]虽以异构网络为基础,但仅讨论了单个小蜂窝的情况,显然,为此类简单场景设计的算法无法适用于实际网络中;而且文献[3~5]等的研究都未考虑电池容量限制.其次,算法复杂度过高,导致网络扩展性差,例如文献[4]提出的基于李雅普洛夫的能效优化算法.再次,现有的研究在设计算法时大多假定各时隙能量到达提前已知,基于该假设设计的优化算法并未考虑能量到达的因果关系,

收稿日期:2016-07-11;修回日期:2016-12-20;责任编辑:覃怀银

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11502039);重庆市教委科学技术研究项目(No. KJ1600424);重庆邮电大学博士科研启动基金资助项目(No. A2015-41);重庆邮电大学青年科学基金资助项目(No. A2015-62)

例如文献[6]的几何注水算法和文献[4]中的离线资源分配算法都属于此类。

为了提高能量采集异构网络功率分配算法的实用性,在考虑电池容量和能量到达因果性的前提下,提出在线功率分配算法,避免因为电力不足引起的通信中断问题,使算法变得实际可用;再使用两层迭代(Two Layer Iterative, TLI)算法求解能效优化问题,实现系统能效最大化。

2 优化模型

假定一个宏基站覆盖下小蜂窝数量为 N , 构成基站集合 $\{b_1, b_2, \dots, b_N\}$ 。为了保证系统的覆盖不出现盲区,宏基站由稳定的电网供电。考虑实际的部署场景,系统采用集中式功率控制,以降低对小蜂窝计算能力的要求。系统模型如图 1 所示,本文考虑每个小蜂窝只覆盖一个用户的情况,构成用户集合 $\{s_1, s_2, \dots, s_N\}$, 小蜂窝 b_j 到用户 s_n 的信道增益表示为 $g_{j,n}$, $j, n = 1, 2, \dots, N$, 宏蜂窝到用户 s_n 的信道增益表示为 $g_{m,n}$; 对小蜂窝 b_n 所分配的功率为 p_n^R , 其静态功耗为 p_n^O , 宏蜂窝的发射功率为 p_m 。令系统带宽为 w , 考虑频率复用因子为 1 的情况^[5]。

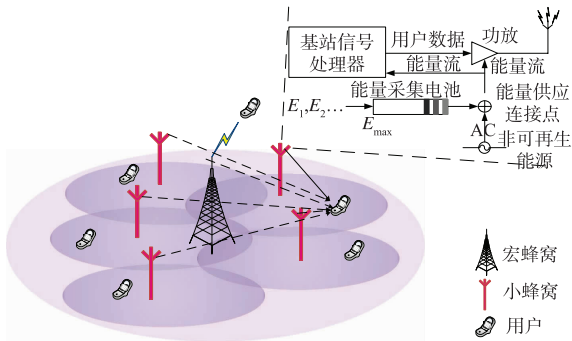


图1 系统模型

假设可再生能源到达满足参数为 λ 的泊松过程, 每个小蜂窝能量收集速率不同, 每个时隙获取的能量值服从独立同分布。定义每个事件的平均长度为 \bar{L} , 时隙数 $K = T/\bar{L}$ 是 T 时间段内的平均, 其中, \bar{L} 的值可以通过长期的信道估计和对到达能量进行测量得到^[3]。假定第 n 个小蜂窝在时隙 i 内到达的能量为 $E_{i,n}$, 发射功率为 $p_{i,n}^R$ 、固定功耗为 $p_{i,n}^O$ 。小蜂窝将采集到的能量缓存到各自最大容量为 $E_{\max,n}$ 的电池中。此时, T 时间段内的系统总吞吐量 $C(\mathbf{p})$ 和系统总能耗 $P(\mathbf{p})$ 可以表示如下:

$$C(\mathbf{p}) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^K w \log_2 \left(1 + \frac{g_{i,n} p_{i,n}^R}{\sum_{j=1, j \neq n}^N g_{i,j} p_{i,j}^R + \sigma^2} \right) \quad (1)$$

$$P(\mathbf{p}) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^K (p_{i,n}^R + p_{i,n}^O) \quad (2)$$

其中 $\mathbf{p} = (p_{i,1}, p_{i,2}, p_{i,3}, \dots, p_{i,N})$, $g_{i,n}$ 表示 i 时隙内第 n 个基站到目标用户的信道增益, $g_{i,j}$ 表示 i 时隙内第 j 个基站到目标用户的信道增益, 因此, 能效优化问题可表示为:

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{p}}{\text{maximize}} \quad \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^K C_{i,n}}{\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^K (p_{i,n}^R + p_{i,n}^O)} \\ & \text{s. t.} \quad C1: \sum_{i=1}^K \bar{L} (p_{i,n}^R + p_{i,n}^O) \leq \sum_{i=1}^K E_{i,n}, \forall n; \\ & \quad C2: \sum_{i=1}^K E_{i,n} - \sum_{i=1}^K S_i \leq E_{\max,n}; \\ & \quad C3: \sum_{n=1}^N \bar{L} C_{i,n} \geq \frac{R_{\min}}{N}; \\ & \quad C4: p_{i,n}^R, p_{i,n}^O \geq 0, \forall i, n; \\ & \quad C5: p_{i,n}^R \leq p_{i,n}^{\max}, \forall i, n; \end{aligned} \quad (3)$$

其中 C1, C2, C3, C4, C5 分别表示基站与用户间的能量的使用限制、能量存储限制、最低速率约束、基站发射功率和静态功耗非负以及基站最大发射功率限制。

由于能量状态信息和信道状态信息受因果性限制, 基站在多个时隙的全局信息是不可用的。因此, 将问题式(3)转化为在保证用户业务质量的前提下最大化单个时隙内的系统能效, 其目标包括: (1) 最大化可再生能源的利用率, 通过能源传递机制来完成; (2) 最大化单个时隙上的系统能效。因此, 提出在线功率分配算法解决以上两个问题。

3 在线功率分配算法

在线功率分配算法包括能量判别算法和 TLI 算法两个子算法。

3.1 能量判别算法

能量判别算法的具体步骤如下, 每个时隙开始时, 中央控制模块收集各小蜂窝与用户间的信道状态信息 $g_{j,n}$ 与每个小蜂窝的上一次发送结束后电池的剩余能量值 $E_{\text{surplus},n}$, 当剩余电量不足以提供基站正常工作则关闭该基站, 其中 $E_{\min,n} = p_n^{\max} + p_n^O$; 通过 TLI 功率分配算法计算每个小蜂窝的最优发射功率, 并将其反馈给各个小蜂窝, 小蜂窝以此为依据进行功率分配。

算法 1 能量判别算法

输入: 1: $i = 1, N, \mathbf{w}_n, g_{j,n}, p_n^O$
 2: $E_{i,n}, E_{\min,n}, E_{\text{surplus},n} = E_{\text{surplus},n} + E_{i,n}$
 3: for $n = 1; N$
 if $E_{\text{surplus},n} \geq E_{\max,n}$
 then $E_{\text{surplus},n} = E_{\max,n}$;
 4: for $n = 1; N$

if $E_{\text{surplus},n} \geq E_{\text{min},n}$, then $n \in \zeta$
 第 n 个小蜂窝保持开启;
 else 关闭第 n 个小蜂窝;

5: 采用 TLI 算法对 ζ 内的小蜂窝进行功率分配;

6: 将本时隙剩余的能量存储到电池中;

7: $i = i + 1$, 跳到 2;

3.2 基于拉格朗日乘子的 TLI 功率分配算法

本节将考虑每个时隙内系统能效的最大化问题.

(1) 效用函数

首先,对单个时隙内的效用函数进行建模,为了简化算法,假设资源分配策略在每个时隙内是不变的. 第 i 个时隙内的效用函数可以表示如下:

$$q = \underset{p}{\text{maximize}} \frac{\sum_{n=1}^N C_n}{\sum_{n=1}^N (p_n^R + p_n^O)}$$

$$\text{s. t. C4: } p_n^R, p_n^O \geq 0, \forall n;$$

$$\text{C5: } p_n^R \leq p_n^{\text{max}}, \forall n; \quad (4)$$

其中:

$$C_n = w \log_2 \left(1 + \frac{g_n p_n^R}{\sum_{j=1, j \neq n}^N g_j p_j^R + p_m g_m + \sigma^2} \right) \quad (5)$$

(2) 转化目标函数

注意到目标函数式(4)可以归类为非线性分式规划函数^[7]. 为了可以将式(5)的目标函数进行等价转化从而找到有效的求解方法,定义非负变量 q 代表整个系统的能量效率即 $q = C(p)/P(p)$, 其中 p 代表功率分配方案. 同时定义能量效率的最大值为 $q^* = C(p^*)/P(p^*)$, 其中 p^* 代表最优功率分配方案.

定理 1 目标函数式(3)的最大能效 q^* 当且仅当以下条件满足时取得^[8]:

$$\underset{p}{\text{maximize}} C(p) - q^* P(p) = 0 \quad (6)$$

同时 $C(p) \geq 0$ 和 $P(p) \geq 0$, 其中 p 为任意满足限制条件的功率分配的可行解. 要解决式(4)用定理 1 (目标函数转化)求解参数 q .

$$\underset{p}{\text{maximize}} \sum_{n=1}^N C_n - q \sum_{n=1}^N (p_n^R + p_n^O)$$

$$\text{s. t. C4 - C5} \quad (7)$$

(3) 算法求解

问题(7)的拉格朗日函数定义为:

$$L(p, \gamma, \mu) = \sum_{n=1}^N C_n - q \sum_{n=1}^N (p_n^R + p_n^O)$$

$$- \sum_{n=1}^N \gamma_n (p_n^R - p_n^{\text{max}}) - \sum_{n=1}^N \mu_n p_n^R \quad (8)$$

其中 $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N)$ 和 $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)$ 分别表示 C4, C5 的拉格朗日乘子. 在算法迭代过程中设置最低发射功率门限, 从而保证用户服务质量 (Quality of

Service, QoS). 因此,对偶优化问题如下:

$$\underset{\gamma, \mu}{\text{minimize}} \underset{p}{\text{maximize}} L(p, \gamma, \mu) \quad (9)$$

应用 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件^[9], 可以得到:

$$p_n^R = \frac{w}{\ln 2 (q^* + \gamma_n - \mu_n)} - \frac{\sum_{j=1, j \neq n}^N g_j p_j^R + \sigma^2}{g_n} \quad (10)$$

由式(10)可以看出这是注水问题, 其中 $q > 0$ 是注水线. 根据定理 1, 此时取得最优的能效值 q^* 就是问题式(3)的目标值.

$$q^* = \frac{w_n \log_2 \left[(1 + g_n p_n^{R*}) / \left(\sum_{j=1, j \neq n}^N g_j p_j^{R*} + \sigma^2 \right) \right]}{\sum_{n=1}^N (p_n^{R*} + p_n^O)} \quad (11)$$

其中, p_n^{R*} 是式(11)的最优可行解. 采用次梯度迭代的方式更新拉格朗日乘子.

$$\gamma_n^{(t+1)} = \gamma_n^{(t)} - \nabla_{\gamma}^{(t+1)} \times (p_n^R - p_n^{\text{max}}) \quad (12)$$

$$\mu_n^{(t+1)} = \mu_n^{(t)} - \nabla_{\mu}^{(t+1)} p_n^R$$

其中 $\nabla^{(t+1)}$ 为迭代更新的步长, 均为正值, t 为迭代次数, 且对偶变量更新的收敛条件参见文献[10]. 根据式(11), 外层循环通过二分法更新第 i 次迭代过程中的 $q^{(i)}$, 逐步找到最优 q^* 即最优系统总能效; 再根据式(9), 内层循环通过对偶分解和次梯度迭代对 $p^{(i)}$ 进行更新, 找出最优功率分配策略 $\{p^*\}$.

算法 2 TLI 功率分配算法

输入: $\{w_n, g_{i,n}, q_{\text{old}}, p_{n,\text{old}}, k1, k2, \gamma_1, \mu_1\}$ ($k1, k2$ 分别表示内、外层循环结束的判别门限.)

1: 根据式(12)更新乘子 $\{\gamma, \mu\}$;

2: 根据式(9)更新 p_{new} ;

3: 令 $p_{\text{gap}} = \text{abs}(p_{n,\text{new}} - p_{n,\text{old}})$, 若 $p_{\text{gap}} \geq k1$, 则跳到 5;

4: 令 $p_{n,\text{old}} = p_{n,\text{new}}$;

5: 令 $\sum_{n=1}^N C_n - q_{\text{new}} \sum_{n=1}^N p_n = 0$, 采用二分法求 q_{new} ;

6: 令 $q_{\text{gap}} = \text{abs}(q_{\text{new}} - q_{\text{old}})$,
 if $q_{\text{gap}} \geq k2$, 则令 $q_{\text{old}} = q_{\text{new}}$, 并跳到 2;

输出: $\{p^*, q^*\}$.

4 在线功率分配算法仿真

在这部分中,对算法进行仿真,仿真参数设置如下:
 $p_{\text{max}} = 0.1 \text{ W}$, $\sigma^2 = 2 \times 10^{-9} \text{ W}$, $p_n^O = 2 \text{ W}$, $w = 5 \text{ MHz}$, $E_{\text{max}} = 15 \text{ J}$. 各基站到用户间的路径衰落 (pathloss) 考虑为 WINNER 模型^[11]:

$$\text{pathloss} = A \log_{10}(d) + B + C \log_{10} \left(\frac{f_c}{5.0} \right) + S$$

其中 S 是随机正态对数衰落, d 是基站到用户之间的距离

离,载波频率 $f_c = 1.9\text{GHz}$. 为简化计算,假定每个时隙时长为 1s ,这使同一时隙内能量到达的功率与能量在数值上相等.

系统能效随能量到达率 λ 的变化情况如图2所示. 从图2中可以看出PA(Proposed Algorithm)算法和GWFA(Geometric Water Filling Algorithm)算法在 $\lambda = 2$ 之后系统能效开始迅速上升,随着能量到达超过小蜂窝的开启门限,有更多的小蜂窝被开启. 而GA(Greed Algorithm)算法的系统平均能效在增加到一定程度后,随着发射功率的增加,小蜂窝之间的相互干扰增大,使得系统平均能效下降.

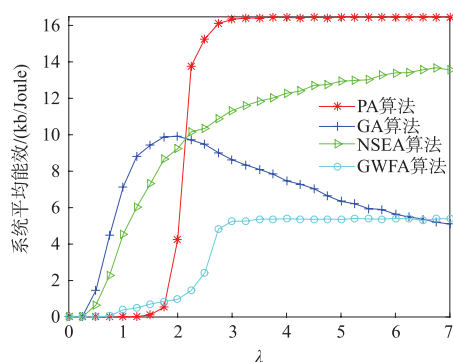


图2 系统能效随能量到达率(λ)的变化曲线

从图3中可以看出,GA算法与NESA(No Energy to Save Algorithm)算法变化趋势一致. 所有算法的系统能效均随小蜂窝数量的增加而下降,相比其他算法,使用PA算法可以在一个宏蜂窝系统能效取得最大值时能容纳更多小蜂窝,这是由于当 N 进一步增加,静态功耗快速增加导致系统能效降低.

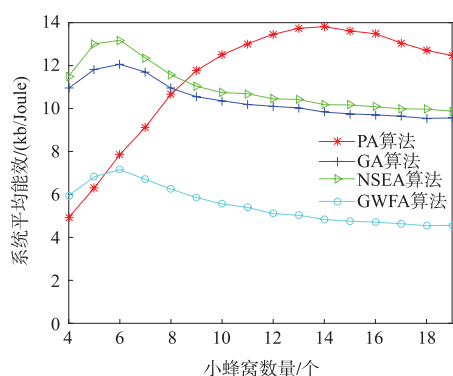


图3 系统能效随小蜂窝数量的变化曲线

5 结束语

本文基于能量采集异构蜂窝网络,提出能量判别算法和TLI功率分配算法来最大化系统的能效. 通过仿真分析,所提算法在能量到达率满足蜂窝开启条件时,相比于对比算法提高了系统的能效;所提算法在满足

最大能效的同时,使得每个宏蜂窝覆盖下能容纳更多数量的小蜂窝. 在下一步的研究工作中将考虑解决引入在线功率分配导致的时延以及算法复杂度增加等问题.

参考文献

- [1] Liu D, Wang L, Chen Y, ElKashlan M, Wong K K, Schober R, Hanzo L. User association in 5G networks: A survey and an outlook[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 1018 - 1044.
- [2] T O Olwal, K Djouani, A M Kurien. A survey of resource management towards 5G radio access networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 1656 - 1686.
- [3] D W K Ng, E S Lo, Schober R. Energy-efficient resource allocation in OFDMA systems with hybrid energy harvesting base station[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7): 3412 - 3427.
- [4] Mao Y, Zhang J, Letaief K B. A Lyapunov optimization approach for green cellular networks with hybrid energy supplies[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(12): 2463 - 2477.
- [5] 张天魁, 徐鸿章, 朱禹涛, 石俊峰. 可再生能源供电异构蜂窝网络中基于拓扑势的用户接入算法[J]. 北京邮电大学学报, 2015, 38(5): 113 - 117.
ZHANG Tian-kui, Xu Hong-zhang, Zhu Yu-tao, SHI Jun-feng. Renewable energy power supply heterogeneous users access algorithm based on topology potential in cellular networks[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015, 38(5): 113 - 117. (in Chinese)
- [6] He P, Luo J, Zhao L, Kuang Y. Optimal power allocation for energy harvesting and grid power hybrid systems[A]. IEEE 17th International Conference on Computational Science and Engineering [C]. Chengdu, China: IEEE, 2014. 1455 - 1460.
- [7] Naeem M, Illanko K, Karmokar A, Anpalagan A, Jaseemuddin M. Optimal power allocation for green cognitive radio: fractional programming approach[J]. IET Communications, 2013, 7(12): 1279 - 1286.
- [8] Schaible S, Ibaraki T. Fractional programming[J]. European J. Operational Research, 1983, 12(4): 325 - 338.
- [9] Bertsekas, Dimitri P. Convex Optimization Algorithms[M]. Belmont, MA: Athena Scientific, 2015.
- [10] Sun C D, Peng M G, Sun Y H, Li Y, Jiang J M. Distributed power control for device-to-device network using Stackelberg game[A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) [C]. Istanbul: IEEE, 2014. 1 - 5.
- [11] 赵雄文, 高波. MIMO信道仿真模型比较及其验证[J].

电信科学,2016,32(2):75-82.

Zhao Xiong-wen, Gao Bo. MIMO channel simulation

model to compare and validate [J]. Journal of Telecom Science,2016,32(2):75-82. (in Chinese)

作者简介



万晓榆 男,1963 年生于四川成都. 现为重庆邮电大学教授、博士、硕士生导师. 主要研究方向为下一代网络技术、通信组织与运营管理.

E-mail:waxy@cqupt.edu.cn



冯小龙 男,1991 年生于贵州遵义. 现为重庆邮电大学通信与信息工程学院硕士研究生. 主要研究方向为通信网能效优化.

E-mail:fengxlcqupt@163.com



王正强(通讯作者) 男,1983 年生于四川省邛崃市. 2015 年 3 月获上海交通大学工学博士学位. 现为重庆邮电大学通信与信息工程学院讲师. 主要研究方向为绿色通信.

E-mail:wangzq@cqupt.edu.cn



樊自甫 男,1977 年生于安徽省舒城县. 现为重庆邮电大学经济管理学院副教授. 主要研究方向为下一代网络技术和决策.

E-mail:fanzf@cqupt.edu.cn