

# 基于 LTE-A 中继网的自适应功率分配策略

李校林<sup>a,b</sup>, 刘冰华<sup>a</sup>

(a. 重庆邮电大学 通信新技术应用研究中心; b. 重庆信科设计有限公司, 重庆 400065)

**摘 要:** 中继作为 Long Term Evolution Advanced(LTE-A)关键技术之一, 主要作用是扩大小区覆盖面积和提高系统吞吐量, 但是 2 跳速率匹配成为中继网中提高资源利用率的关键问题. 针对该问题, 提出一种基于 LTE-A 中继网的自适应功率分配策略. 此策略分别以最大化用户速率和最小化系统发射功率为目标, 根据第 1 跳和第 2 跳的实际速率的大小, 自适应的调节子载波上的传输功率. 仿真结果表明, 和传统的资源分配算法相比, 此自适应功率分配策略有效提高了系统的整体性能.

**关键词:** LTE-A 中继网; 功率分配; 自适应; 2 跳

**中图分类号:** TN929.5

**文献标志码:** A

由于资源的短缺, 传统的蜂窝网只能通过小区裂变改善小区边缘用户的性能来提高系统吞吐量. 考虑到小区间干扰和基站建设成本, 小区裂变不能无限的进行下去. 为了解决这一问题, 在传统的蜂窝网中引入了中继来提高系统吞吐量和扩大小区的覆盖面积<sup>[1]</sup>. 作为 LTE-A 中的关键技术之一, 中继技术成为无线网络中一个研究热点.

中继引入之后增加了新的链路, 用户可以直接与基站通信, 也可以通过中继与基站通信. 由此, 中继网络中的资源分配和传统蜂窝网中的资源分配相比不仅仅只是子载波的分配, 还牵扯到用户路由选择的问题, 传统的资源分配方法也不在适用于 LTE-A 中继网络. 截至目前, 已有大量关于中继网络中资源分配的研究. 文献[2]提出一种基于多载波传输系统的比例公平策略, 以最大化用户平均速率对数为目标; 文献[3]提出了 2 种基于中继蜂窝网的自适应的调度方法: 贪婪的轮询和部分比例公平算法. 它们提升了系统的性能. 但在资源分配时, 都没有考虑到中继网的 2 跳特性, 因此会造成资源利用率低的问题. 文献[4]提出了 2 跳比例公平, 和部分比例公平相比, 此方法同时考虑 2 跳资源分配的公平性, 但是同样没有考虑中继网 2 跳特性. 而文献[5]是对目的节点同时接收源节点和中继节点信号的协作中继网进行研究, 以最大化能效为目标, 提出一种简化的子载波和功率分配算法. 文献[6]考虑下行 OFDMA 系统, 在每个基站功率受限的条件下最大化最小速率加权和, 这种资源分配方式保证每个小区有相似的速率, 保证了系统的公平性, 但会牺牲系统总吞吐量. 文献[7]提出一种在单小区情形下的最优的功率分配算法. 它主要针对 AF 中继. 文献[8]在总的功率限制下提出一种联合中继选择、子载波分配及功率分配的策略, 利用凸优化理论求解, 以牺牲总的吞吐量为代价, 保证每个用户的 QoS, 但复杂度较高. 同样文献[9-10]也是联合资源分配问题, 求解复杂度较高.

基于以上文献, 本文提出一种基于 LTE-A 中继网的自适应功率分配策略. 这种策略分别以最大化用户速率和最小化系统发射功率为目标, 自适应的调节子载波上的传输功率.

## 1 系统模型

本文考虑单小区的中继网络, 用户进行通信的方式最多为 2 跳, 即: 用户直接与基站通信或用户通过中继与基站通信. 直接与基站通信的用户称为直接用户或 1 跳用户; 通过中继与基站通信的用户称为中继用户

收稿日期: 2014-05-15; 修回日期: 2014-09-10.

基金项目: 重庆市自然科学基金(CSTC2012jjA40054)

作者简介: 李校林(1968-), 男, 江西赣州人, 重庆邮电大学高级工程师, 主要研究第三代移动通信技术.

通信作者: 刘冰华(1987-), E-mail: 569997681@qq.com.

或者 2 跳用户。

单小区场景下的中继系统模型如图 1 所示. 基站位于小区的边缘, 1 个小区中有 6 个中继分别固定在小区的边缘, 距离中心的距离为小区半径的  $2/3$ <sup>[11]</sup>.

本文采用最简单的中继选择方式, 即基于距离的中继选择方式. 当用户到基站的距离大于设定的门限值时, 用户通过中继与基站通信, 否则直接与基站通信.

在 OFDMA 中, 无线资源在时域中划分为多个时隙, 在频域中以子载波为单元进行资源划分, 时域上的 1 个时隙和频域上的 12 个子载波组成 1 个资源块. 中继网中进行资源调度时, 中继工作方式是时分双工(TDD), 因此中继的收发在 2 个不同子时隙中进行, 基站与中继的通信和基站与直接用户的通信在第 1 个子时隙中进行, 这时中继和直接用户处于接收状态. 中继与中继用户的通信在第 2 个子时隙中进行, 这时中继处于发射状态.

系统总带宽为  $B$ , 子载波个数为  $K$ , 则每个子载波带宽为  $B/K$ , 中继个数为  $N$ , 用户总数为  $M$ , 这  $M$  个用户随机的分布在 1 个小区中. 当第  $k$  个子载波被分给直接用户  $m$  时, 直接用户  $m$  获得的速率为:

$$r_{k,m}(t) = \frac{B}{K} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{kB} g_{k,m}}{\sigma^2} \right). \quad (1)$$

当子载波  $k$  被分给中继  $n$  时, 中继  $n$  获得的速率

$$r_{k,n}(t) = \frac{B}{K} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{kB} g_{k,n}}{\sigma^2} \right), \quad (2)$$

当子载波  $k$  被分给中继用户  $m$  时, 中继用户  $m$  获得的速率

$$r_{k,n,m}(t) = \frac{B}{K} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{kR} g_{k,n,m}}{\sigma^2} \right). \quad (3)$$

其中,  $P_{kB}$  和  $P_{kR}$  分别表示基站和中继在子载波  $k$  上的传输功率,  $g_{k,m}, g_{k,n}, g_{k,n,m}$  分别表示直接用户  $m$ , 中继  $n$ , 中继用户  $m$  在第  $k$  个子载波上的信道增益,  $\sigma^2$  为加性高斯白噪声.

当第  $k$  个子载波被分给直接用户  $m$  时,  $\alpha_{k,m} = 1$ . 需要满足  $\sum_{m=1}^M \alpha_{k,m} = 1$ , 此式表明同时刻相同子载波只能分给 1 个用户. 当第  $k$  个子载波通过中继  $n$  被分给中继用户  $m$  时  $\beta_{k,n,m} = 1$ , 当第  $k$  个子载波被分给中继  $n$  时  $\alpha_{k,n} = 1$ , 同样要满足  $\sum_{m=1}^M \beta_{k,n,m} = 1, \sum_{m=1}^M \alpha_{k,n} = 1$ .

综上所述, 资源分配完之后, 在  $t$  时刻, 直接用户  $m$  获得的总的速率

$$R_{m_d}(t) = \sum_{k=1}^K r_{k,m}(t) \alpha_{k,m}, m \in U_D. \quad (4)$$

在  $t$  时刻, 中继  $n$  在第 1 个子时隙获得的总速率

$$R_n^{(1)}(t) = \sum_{k=1}^K r_{k,n}(t) \alpha_{k,n}; \quad (5)$$

在  $t$  时刻, 中继用户  $m$  在第 2 个子时隙获得的总速率

$$R_m^{(2)}(t) = \sum_{k=1}^K r_{k,n,m}(t) \beta_{k,n,m}, m \in U_{RN}. \quad (6)$$

在第 1 个子时隙中, 中继  $n$  被它服务的所有用户共享, 因此, 中继用户  $m$  在第 1 个子时隙获得的总速率

$$R_m^{(1)}(t) = R_n^{(1)}(t) \frac{R_m^{(2)}(t)}{\sum_{m \in U_{R_n}} R_m^{(2)}(t)}, \quad (7)$$

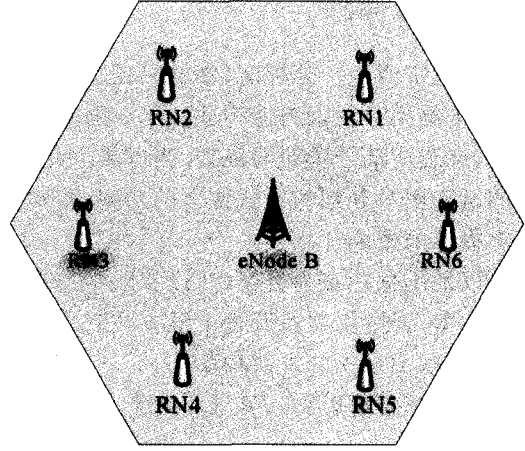


图1 中继系统模型

其中,分母表示在  $t$  时刻中继  $n$  服务的所有用户总速率. 由于中继用户是通过 2 条链路进行协作传输的,因此它的速率取决于第一跳链路和第二跳链路中最小的值,则

$$R_{m_r}(t) = \min\{R_m^{(1)}(t), R_m^{(2)}(t)\}, m \in U_{RN}. \quad (8)$$

## 2 算法的描述

在进行资源进行分配时,本文采用文献[4]中提出的 2 跳比例公平的调度算法. 由于中继网中 2 跳链路的的存在,中继用户的最终速率取决于 2 跳中最小的速率,等功率分配时,如果中继  $n$  第 1 跳的速率大于第 2 跳的速率,会造成部分资源的浪费. 当以最大化用户速率为目标时,在功率限制的条件下,通过调整中继  $n$  在它服务的所有用户分到的子载波上的功率,否则就调整基站在中继  $n$  分到的所有子载波上的功率,最终达到用户速率提升的效果.

当以最小化功率为目标时,以 2 跳中速率最小的速率作为基准,重新调整基站在分给中继  $n$  的所有子载波上的功率,否则就重新调整中继  $n$  在它服务的所有用户分到的子载波上的发射功率,最终在保证用户速率的前提下,减小系统的发射功率.

从第 1 部分得出:在  $t$  时刻,中继  $n$  在第 2 时隙获得的总速率是它服务的所有用户的总速率

$$R_n^{(2)}(t) = \sum_{m \in RN_n} \sum_{k=1}^{K_n} \frac{B}{K} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{kR} g_{k,n,m}}{\sigma^2} \right) \beta_{k,n,m}, \quad (9)$$

而  $t$  时刻,中继  $n$  在第 1 时隙获得的总速率可以由式(5)得出.

### 2.1 最小化功率为目标的功率分配

当中继  $n$  第 1 跳的总速率大于第 2 跳的总速率时目标函数  $\min \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} P_{kB}$ . 约束条件  $R_n^{(1)}(t) \geq R_n^{(2)}(t)$ ,  $P_{kB} \geq 0$ . (10)

首先把上述问题转化为针对每个中继的问题,采用注水算法来进行求解.(10) 式对应的拉格朗日函数

$$G(P_{kB}, \lambda) = \sum_{k=1}^{K_n} P_{kB} - \lambda (R_n^{(1)}(t) - R_n^{(2)}(t)). \text{ 令 } \frac{\partial G(P_{kB}, \lambda)}{\partial P_{kB}} = 0, \text{ 可以求出}$$

$$P_{kB} = \left( \lambda - \frac{\sigma^2}{g_{k,n}} \right)^+, \quad (11)$$

其中,  $(x)^+ = \begin{cases} x, & x > 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ . 由限制条件可得  $\lambda = (2^{R_n^{(2)}(t)} / \left( \prod_{k=1}^{K_n} \ln(2g_{k,n}/\sigma^2) \right))^{\frac{1}{K_n}}$ , 其中,  $K_n$  代表中继  $n$  分到的子载波总数. 从式子(12) 求出  $\lambda$ , 然后带入式子(11) 求  $P_{kB}$ , 迭代进行, 至每个子载波上的功率都不小于零为止.

当中继  $n$  第 1 跳的总速率小于第 2 跳的总速率时,求解方法类似.

### 2.2 最大化速率为目标的功率分配

当中继  $n$  第 1 跳的总速率小于第 2 跳的总速率时,如果以最大化速率为目标,则需要调整基站在中继  $n$  分到的子载波上的功率. 这时,优化目标为  $\max \sum_{n=1}^N R_n^{(1)}(t)$ ; 约束条件:  $\sum_{k=1}^{K_N} P_{kB} \leq P'_B, P_{kB} \geq 0$ ; 其中,  $K_N$  是分给所有中继的子载波总数,  $P'_B$  表示基站在分给所有中继的子载波上传输的总功率.

当中继  $n$  第 1 跳的总速率大于第 2 跳的总速率时,求解方法类似.

## 3 仿真与性能分析

算法的仿真通过 Matlab 实现仿真参数如下表 1 所示. 30 个用户在小区中的分布是随机的.

表 1 系统仿真参数

参数名	参数值
站间距	500 m
基站的发射功率	46 dBm
中继的发射功率	30 dBm
系统带宽	10 MHz
噪声功率谱密度	-174 dBm
窗口长度	25 ms
路径损耗	eNB-UE; $128.1 + 37.6 \lg(R/(1 \text{ km}))$ eNB-RN; $100.7 + 23.5 \lg(R/(1 \text{ km}))$ RN-UE; $145.4 + 37.5 \lg(R/(1 \text{ km}))$
用户数	30
阴影衰落的标准差	eNB-UE; 8 dB RN-UE; 10 dB eNB-RN; 6 dB

当以最小化功率为目标时,在 2 跳中的最小速率限制条件下,调整速率比较大的那一跳中子载波上的传输功率.通过子载波上功率的重分配过程,减小了速率较大的那一跳中子载波上总的传输功率,不会影响最后用户的总速率.图 2 和图 3 中的仿真结果也证明了这个结论,从中可以看出在保证用户总速率的条件下,基站和中继的发射功率都有所减小,达到节能的效果.

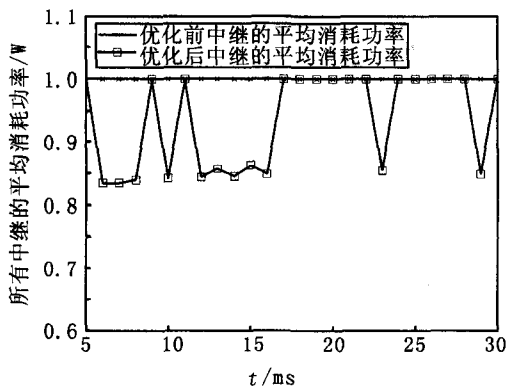


图2 中继消耗功率随时间的变化

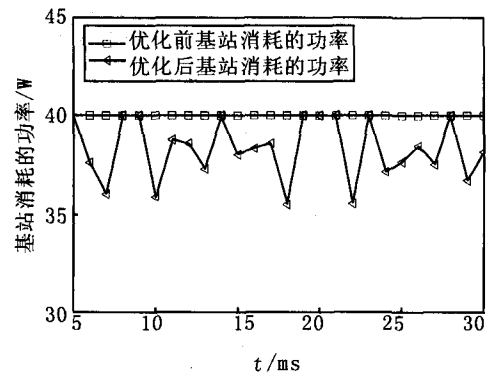


图3 基站消耗的功率随时间的变化

当以最大化速率为目标时,仿真结果见图 4 和图 5.从中可以看出中继用户的速率和系统中所有用户的总速率在优化前后都有所增大.当以最大化用户速率为目标时,在系统总发射功率限制的条件下,通过子载波上功率的重分配,使速率较小的那一跳的速率达到最大,然后比较 2 跳的速率,取其中最小的速率作为中继最终获得的速率,此时取得的最小值比等功率分配时取得的最小值要大,因此中继用户最终获得的速率比等功率分配时获得的速率大.本文没要考虑直接用户分到的子载波上功率的重分配过程,因此,随着中继用户获得的速率的增大,整个系统中所有用户的总速率也相应的增大.

## 4 总 结

本文提出一种基于 LTE-A 中继网的自适应功率分配策略.此策略分别以最大化用户速率和最小化功率为目标,根据中继在第 1 跳和第 2 跳获得速率的大小,自适应的调整子载波上传输功率.仿真结果表明,当以最大化用户速率为目标时,系统总的速率得到提高,此时中继和基站以全功率发射.当以最小化功率为目标时,在保证用户速率的同时,系统的发射功率有所减小,达到节能的效果.

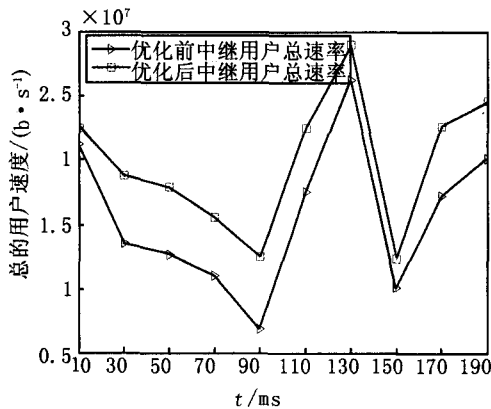


图4 优化前后中继用户的速率的比较

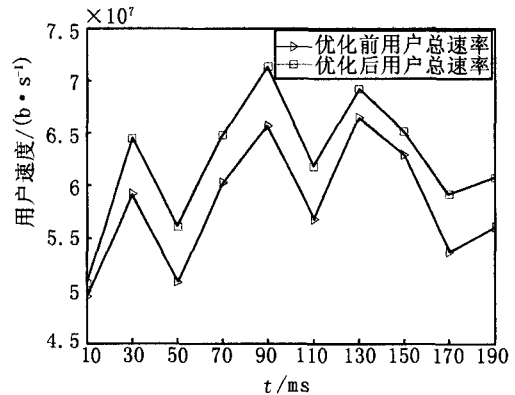


图5 优化前后所有用户总速率的比较

## 参 考 文 献

- [1] 袁戈非. LTE/LTE-Advanced 关键技术与系统性能[M]. 北京:人民邮电出版社,2013.
- [2] Kim H, Kim K, Han Y, et al. A proportional fair scheduling for multicarrier transmission systems[J]. Commun Lett, 2005, 9(3): 210-212.
- [3] Lei Huang, Rong Mengtian, Wang Lan, et al. Resource Scheduling for OFDMA/TDD Based Relay Enhanced Cellular Networks[C]. Wireless Commun. 2007; 1544-1548.
- [4] Lin X, Cuthbert L. A Two-Hop Proportional Fairness Scheduling Algorithm for Relay Based OFDMA Systems[C]. Wireless Commun. 2008; 1-4.
- [5] Jung J, Sun S. Power efficient resource allocation for downlink OFDMA relay cellular networks[J]. IEEE Trans, 2012, 6(5): 2447-2459.
- [6] Wang T, Vandendorpe L. Resource Allocation for Maximizing Weighted Sum Min-Rate in Downlink Cellular OFDMA Systems[C]. Communications(ICC), IEEE, 2010; 1-6.
- [7] 张欢, 王文博, 程显, 等. 多跳中继系统中子载波与功率的分配[J]. 系统仿真学报, 2009, (23): 7549-7554.
- [8] Alam M S, Mark J W, Shen X M. Relay selection and resource allocation for multi-user cooperative LTE-A uplink[C]. Communications (ICC), IEEE, 2012; 5092 - 5096.
- [9] 张海龙. 无线中继网络中资源分配算法的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
- [10] 龙吟, 朱江, 李方伟. OFDM 认知无线电系统中分布式资源分配[J]. 电视技术, 2013, (01): 118-121.
- [11] 张瀚峰. 宽带 OFDMA 系统无线资源管理技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.

## An Adaptive Power Allocation Strategy Based on LTE-A Relay Network

LI Xiaolin<sup>a,b</sup>, LIU Binghua<sup>a</sup>

(a. Chongqing University of Posts and Telecommunications;

Research Centre for Application of New Communication Technologies;

b. Chongqing Information Technology Designing CO., LTD, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** Relay as one of the key technologies of LTE-A, the main role is to expand the coverage and improve the throughput of the system, but the two-hop rate matching become a key issue to improve the resource utilization rate in the relay network. Aiming at this problem, this paper puts forward an adaptive power allocation strategy which based on LTE-A relay network. The goals of the strategy are to maximize user rate and minimize the transmission power of the system, adjust the transmission power of the subcarriers according to the actual rate of the first and second hop. The simulation results show that, compared with the traditional resource allocation algorithm, the adaptive power allocation strategy proposed in this paper can effectively improve the overall performance of the system.

**Keywords:** LTE-A relay network; power allocation; adaptive; two-hop