

基于非合作博弈的 OFDMA 无线多跳中继网络上行链路资源分配算法

向征^{1,2}, 方旭明¹, 徐鹏^{1,3}

(1. 西南交通大学 信息编码与传输重点实验室, 四川 成都 610031;

2. 中国民航飞行学院 空中交通管理学院, 四川 广汉 618307; 3. 西南交通大学 数学学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 研究了基于 OFDMA 多址技术的无线多跳中继网络上行链路资源分配问题。首先, 在最大发射功率等约束条件下, 建立了多小区 OFDMA 无线多跳中继网络上行链路的资源分配优化模型。将非合作博弈论和定价机制引入后, 该优化问题可转化为在每个子信道上独立地进行功率分配。基于非合作博弈的功率分配模型中的纳什均衡点的存在性和唯一性得到了证明, 并给出了具体的分布式求解算法。仿真结果表明, 所提算法能在大幅减少系统总发射功率的情况下, 有效地提升系统吞吐量, 达到较高的能效比。

关键词: 中继网络; OFDMA; 非合作博弈; 上行链路; 资源分配

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)03-0067-08

Resource allocation algorithm based on non-cooperative game theory in uplink OFDMA multi-hop relay networks

XIANG Zheng^{1,2}, FANG Xu-ming¹, XU Peng^{1,3}

(1. Key Lab of Information Coding and Transmission, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;

3. School of Mathematics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Resource allocation issue in uplink OFDMA multi-hop relay networks was investigated. Firstly, with constraints such as maximum transmission power being imposed, a multi-cell optimization model for resource allocation in uplink OFDMA multi-hop relay networks was formulated. By applying non-cooperative game and pricing theories, the optimization is transformed into the case where power was independently allocated on each sub-channel. The existence and uniqueness of Nash equilibrium for power allocation model which was based on non-cooperative was proven, and accordingly a distributed algorithm was proposed. Simulation results show that, the proposed algorithm can improve the system throughput effectively while profoundly reducing total system transmission power, thus achieving much higher energy efficiency ratio.

Key words: relay networks; OFDMA; non-cooperative game theory; uplink; resource allocation

1 引言

近年来, 无线多跳中继技术^[1]因其在提升系统吞吐量、减少系统发射功率等方面所表现出来的优势, 越来越受到研究学者的关注。另一方面,

正交频分多址接入技术^[2] (OFDMA) 与 FDMA、TDMA 和 CDMA 等传统多址技术相比, 由于具有占用带宽小、无码间干扰以及多用户分集等优点, 已经被 LTE-Advanced、IEEE 802.16m 等下一代无线宽带接入网络标准所采用。因此, 将 2 种技术

收稿日期: 2010-12-07; 修回日期: 2012-02-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61071108); 铁道部科技研究开发计划重点课题基金资助项目 (2009X009-E)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61071108); Key Programs of Technological R&D of the Ministry of Railways (2009X009-E)

相结合的 OFDMA 无线多跳中继网络中的各项关键技术都非常值得研究, 无线资源分配问题即是其中之一。

关于 OFDMA 网络无线资源分配的研究成果按场景可以分为单小区和多小区 2 种。在单小区场景下, 其他小区对本小区的干扰被完全忽略, 通过利用最优化方法, 在一定的限制条件下来最大化系统吞吐量 (即余量自适应) 或者最小化系统总发射功率 (即速率自适应)。余量自适应 (MA) 的优化目标是在一定的网络吞吐量和误码率限制下最小化网络总发射功率, 即以节省系统能耗为目的, 文献 [3] 和文献 [4] 讨论了此种优化目标。而速率自适应 (RA) 的优化目标是在一定的网络总发射功率限制下最大化网络吞吐量, 文献 [5] 和文献 [6] 对该优化目标进行了深入的研究。

实际蜂窝系统一般都是干扰受限的, 小区间干扰是影响系统性能的关键因素, 所以单小区场景不能真实地反映整个网络的性能。因此, 考虑各小区间干扰的多小区场景就成为了更合理的研究场景。然而, 在多小区场景下, 各小区之间无法共享信道状态信息, 各小区用户只能以局部方式最大化自身性能, 由此将导致系统性能不升反降。另一方面, 博弈论作为一种新兴的研究手段, 已经在无线通信研究的各个领域得到了广泛应用。而作为其中一个分支的非合作博弈论, 也逐渐被应用到了多小区 OFDMA 系统资源分配的研究中。文献 [7] 应用非合作博弈论研究了 OFDMA 系统多小区功率协调问题, 但未将子载波分配和功率分配联合进行优化。为了解决此问题, 文献 [8] 在提出最小干扰准则的用户调度的基础上运用非合作博弈论对系统功率进行联合优化。文献 [9] 考虑了包含中继的多小区 OFDMA 系统下行链路资源分配问题, 但只对第 2 跳进行了分析。文献 [10] 和文献 [11] 对多小区 OFDMA 无线多跳中继网络下行资源分配问题进行了研究, 运用非合作博弈论对中继情况下的 2 跳链路分别进行了建模和分析。文献 [12] 则对多小区 OFDMA 系统单跳上行链路资源分配问题进行了一定的研究。虽然以上文献对多小区 OFDMA 系统的资源分配进行了深入研究, 但都没有考虑包含中继上行链路资源分配的情况。

基于上述研究背景, 本文应用非合作博弈论对多小区场景下 OFDMA 无线多跳中继网络上行链路

的资源分配问题进行了研究。首先建立了多小区 OFDMA 无线多跳中继网络上行链路的资源分配优化模型, 然后给出了包含定价机制的非合作功率分配博弈模型, 并且证明了在该模型中纳什均衡点的存在性和唯一性。最后, 提出了求解该非合作博弈模型的分布式算法, 并通过仿真分析验证了该算法的性能。

2 系统模型

考虑一种典型的采用 OFDMA 多址技术的多跳中继网络 (如图 1 所示)。各小区中心有一个中心基站 (BS), 在靠近小区边缘的位置有多个中继站 (RS) 用来提升小区边缘覆盖质量。小区中的各移动台 (MS) 选择距离自己最近的 BS 或者 RS 来接入网络, 接入 BS 的 MS 称为直传 MS, 接入 RS 的 MS 称为中继 MS。由于本文考虑的是上行链路的资源分配, 因此需要考虑以下 2 种上行链路: 第 1 种是从 MS 到 BS 的直传链路, 第 2 种是先由 MS 发送到 RS, 再从 RS 转发到 BS 的中继链路。这里将每一个发送时隙 (即调度周期) 分为 2 个子时隙, 如图 2 所示。在第 1 个子时隙中, 各个小区的直传链路, 以及中继链路的第 1 跳进行传输, 因此发送节点为各小区中的 MS; 在第 2 个子时隙中, 只有中继链路的第 2 跳进行传输, 因此发送节点为各小区中的 RS。另外, 在各个小区内部, 某一子载波在任何一个子时隙中只能分配给一个发送节点, 而其他小区中的发送节点则能够同时使用该子载波。因此, 小区内没有同频干扰, 而小区之间存在同频干扰。

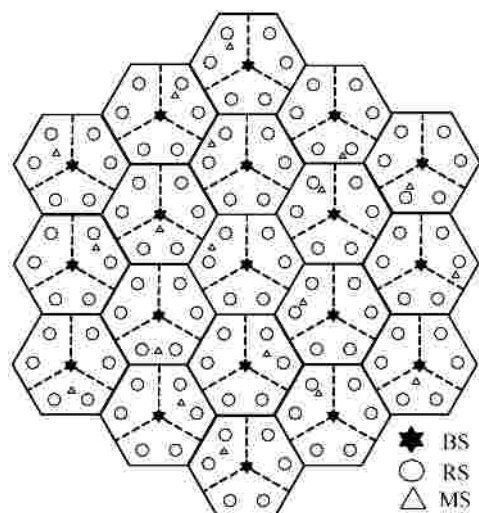


图 1 基于 OFDMA 的多跳中继网络拓扑示意

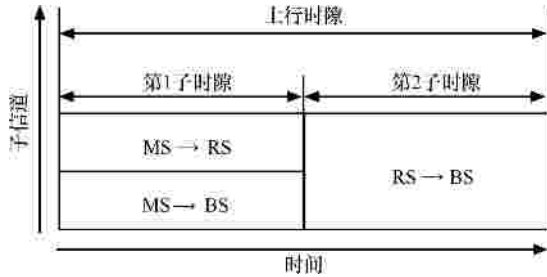


图2 上行链路一个调度周期中的帧结构

设系统中有 I 个具有同频干扰的小区，用 i ($i \in 1, 2, \dots, I$) 表示各小区序号。各小区中 MS 的数量为 K 个，RS 的数量为 6 个。系统带宽为 B ，子载波数量为 N ，则每个子载波带宽为 $B_n=B/N$ 。在第 1 个子时隙中， $H_{i,k,n}$ 表示小区 i 中的第 k 个 MS 在第 n 个子信道上的上行链路信道增益， $H_{j,k,n}^i$ 为同频小区 j 中在第 n 个子信道上同时进行发送的 MS 到小区 i 的 BS 或 RS 的信道增益。因此，在第 1 个子时隙中，小区 i 中的第 k 个 MS 在第 n 个子信道上的上行链路信噪比可表示为

$$g_{i,k,n} = \frac{H_{i,k,n} p_{i,k,n}}{\sum_{j \neq i} H_{j,k,n}^i p_{j,k,n} + s^2} \quad (1)$$

其中， $p_{i,k,n}$ 为小区 i 中的第 k 个 MS 在第 n 个子信道上的发送功率， $p_{j,k,n}$ 表示同频小区 j 中在第 n 个子信道上同时进行发送 MS 的发送功率， s^2 为 AWGN 功率。同理可得，在第 2 个子时隙中，小区 i 中的第 m 个 RS 在第 n 个子信道上的上行链路信噪比为

$$g_{i,m,n} = \frac{H_{i,m,n} p_{i,m,n}}{\sum_{j \neq i} H_{j,m,n}^i p_{j,m,n} + s^2} \quad (2)$$

其中， $H_{i,m,n}$ 表示小区 i 中的第 m 个 RS 在第 n 个子信道上的上行链路信道增益， $H_{j,m,n}^i$ 为同频小区 j 中在第 n 个子信道上同时进行发送的 RS 到小区 i 的 BS 的信道增益。 $p_{i,m,n}$ 为小区 i 中的第 m 个 RS 在第 n 个子信道上的发送功率， $p_{j,m,n}$ 表示同频小区 j 中在第 n 个子信道上同时进行发送 RS 的发送功率。

对于一定的误码率 (BER)，可以求得在第 1 个子时隙中，小区 i 中的第 k 个 MS 在第 n 个子信道上的上行链路信道容量为

$$R_{i,k,n} = B_n \text{lb} \left(1 + \frac{g_{i,k,n}}{G} \right) \quad (3)$$

其中， G 为实际系统 M-QAM 调制信号和信道香农容量的 SNR 差值，其与 BER 的关系为 $G = -\ln(5BER)/1.5^{[5]}$ 。同理可知，在第 2 个子时隙中，小区 i 中的第 m 个 RS 在第 n 个子信道上的上行链路信道容量为

$$R_{i,m,n} = B_n \text{lb} \left(1 + \frac{g_{i,m,n}}{G} \right) \quad (4)$$

在一个调度周期内，令 $R_{i,k}^d$ 为小区 i 中的第 k 个直传 MS 所能达到的上行速率。则

$$R_{i,k}^d = \sum_{n \in S_k} R_{i,k,n} \quad (5)$$

其中， S_k 为在第 1 个子时隙中直传 MS 所分配到的子信道集合。 $R_{i,k}^r$ 为小区 i 中的第 k 个中继 MS 所能达到的上行速率，其中， $R_{i,k}^r$ 由第 1 跳链路速率和第 2 跳链路速率之间的小者决定，即

$$R_{i,k}^r = \min \left\{ \sum_{n \in X_k} R_{i,k,n}, \sum_{n \in Y_k} R_{i,m,n} \right\} \quad (6)$$

其中， X_k 为在第 1 个子时隙中中继 MS 所分配到的子信道集合， Y_k 为在第 2 个子时隙中为该中继 MS 进行转发的 RS 所分配到的子信道集合。本文的资源分配目标是：在每一个调度周期内，在满足各 RS 和 MS 功率约束限制的前提下，合理地进行子载波分配和功率分配，从而最大化系统上行链路吞吐量。该最优化问题可表述为

$$\max \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{K_i} (R_{i,k}^d + R_{i,k}^r), \text{ s.t. } \begin{cases} p_{i,k,n} \leq P_{i,k}^{\max} \\ p_{i,m,n} \leq P_{i,m}^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

其中，对于小区 i 中序号为 k 的直传 MS， $R_{i,k}^r = 0$ ；而对于小区 i 中序号为 k 的中继 MS， $R_{i,k}^d = 0$ 。另外，式(7)中的第 1 个约束条件表示每个 MS 在任意子信道上的发射功率不能超过该 MS 在子信道上的最大发射功率，第 2 个约束条件表示每个 RS 在任意子信道上的发射功率不能超过该 RS 在子信道上的最大发射功率。

3 基于非合作博弈的资源分配算法

3.1 非合作博弈模型

由前文可知，系统中直传 MS 和中继 MS 的速率都等于它们各自所分配到的所有子信道速率之和，因此可以通过最大化各子信道速率来近似地实现系统整体吞吐量的最大化。另一方面，系统中的

各 MS 或 RS 都只能根据自身获得的一些相关信息，分布式地在各个子信道上进行功率分配。所以，在各同频子信道上的功率分配可以用非合作博弈模型来描述。由于每一个调度周期中的 2 个子时隙的发送节点类型不同，因此需要分别对每一个子时隙进行建模。对于第 1 个子时隙，该非合作博弈模型可表示为

$$G^{MS} = \left[\{i\}, \{p_{i,n}^{MS}\}, \{u_{i,n}^{MS}(\cdot)\} \right] \quad (8)$$

其中， $\{i\}=\{1,2,\dots,I\}$ 表示各小区在相同子信道 n 上具有同频干扰的 MS 集合， $p_{i,n}^{MS} \in [p_{i,n}^{\min}, p_{i,n}^{\max}]$ 为各 MS 在子信道 n 上的发送功率策略集合， $u_{i,n}^{MS}(\cdot)$ 是各 MS 在子信道 n 上的净效用函数。相似地，第 2 个子时隙中的各 RS 非合作博弈模型可表示为

$$G^{RS} = \left[\{i\}, \{p_{i,n}^{RS}\}, \{u_{i,n}^{RS}(\cdot)\} \right] \quad (9)$$

对于 G^{MS} ，令向量 $\mathbf{P}_n^{MS} = (p_{1,n}^{MS}, p_{2,n}^{MS}, \dots, p_{I,n}^{MS})$ 为博弈后所有 MS 在子信道 n 上的发送功率值，向量 $\mathbf{P}_{-i,n}^{MS}$ 为除第 i 个 MS 发送功率 $p_{i,n}^{MS}$ 之外的功率向量，因此第 i 个 MS 在子信道 n 上最终获得的净效用可表示为 $u_{i,n}^{MS}(p_{i,n}^{MS}, \mathbf{P}_{-i,n}^{MS})$ 。在非合作博弈中，各 MS 为了最大化各自在其每一个子信道上的速率（即效用），必然使自己的发送功率达到最大值，因此系统最终的平衡点是一组由各个 MS 的最大发送功率值所组成的向量，然而该组向量中的各个值却不是帕累托最优解。通过引入定价机制，在每个 MS 获得发送功率的同时制定出所需要付出的代价，然后寻找出效用与代价之间的最佳平衡点，即可以使系统达到最优。

由于净效用函数等于效用函数与定价函数之差，所以第 i 个 MS 在子信道 n 上的净效用函数^[12]可表示为

$$\begin{aligned} u_{i,n}^{MS}(p_{i,n}^{MS}, \mathbf{P}_{-i,n}^{MS}) &= f_{i,n}^{MS}(p_{i,n}^{MS}, \mathbf{P}_{-i,n}^{MS}) - c_{i,n}^{MS}(p_{i,n}^{MS}, \mathbf{P}_{-i,n}^{MS}) \\ &= B_n \ln \left(1 + \frac{g_{i,k,n}}{G} \right) - l_{i,n}^{MS} \cdot p_{i,n}^{MS} \end{aligned} \quad (10)$$

其中，效用函数 $f_{i,n}^{MS}(p_{i,n}^{MS}, \mathbf{P}_{-i,n}^{MS})$ 采用的是香农信道容量公式。定价函数 $c_{i,n}^{MS}(p_{i,n}^{MS}, \mathbf{P}_{-i,n}^{MS})$ 采用的是随发送功率线性增长的形式，定价因子 $l_{i,n}^{MS}$ ($l_{i,n}^{MS} \geq 0$) 可看作单位功率价格。对于 G^{RS} ，其净效用函数等参数与 G^{MS} 时的情况类似，可参照进行分析，这里不再赘述。

3.2 纳什均衡点的存在性和唯一性

纳什均衡是非合作博弈论的一个基本概念。根据定义，纳什均衡是任何一个局中人单独偏离它，其期望收益函数值不会因此变大。因此一旦所有局中人的混合策略组成了纳什均衡，任何一个局中人都不会擅自偏离它。它是非合作博弈的“解”的合适定义。对于 G^{MS} ，纳什均衡点是由同频子信道 n 上各个 MS 的发射功率值组成的一个向量。在该点上，任何一个 MS 都不能在其他同频子信道 MS 发射功率保持不变的情况下，通过单方面提升发射功率来增加自身的净效用。即该向量（即纳什均衡点）是功率分配的最终解。下面将证明关于 G^{MS} 的纳什均衡点的存在性和唯一性。

由纳什定理可知，在非合作博弈中，如果每个局中人的策略空间是欧氏空间上的一个非空的、闭的、有界的凸集，并且每个局中人的净效用函数是连续且拟凹的函数，则该博弈必存在纳什均衡。由于每个 MS 的策略空间 $p_{i,k,n} \in [0, P_{i,k}^{\max}]$ 且 $P_{i,k}^{\max} > 0$ ，显然 MS 的策略空间是欧氏空间 R^N 上的一个非空的、闭的、有界的凸集。另外，净效用函数 $u_{i,n}^{MS}(p_{i,n}^{MS}, \mathbf{P}_{-i,n}^{MS})$ 对的二阶偏导为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 u_{i,n}^{MS}(p_{i,n}^{MS}, \mathbf{P}_{-i,n}^{MS})}{\partial (p_{i,n}^{MS})^2} \\ &= -\frac{B_n}{\ln 2} \cdot \frac{H_{i,k,n}^2}{\left[\Gamma \left(\sum_{j \neq i} H_{j,k,n}^i p_{j,k,n} + s^2 \right) + H_{i,k,n} p_{i,k,n} \right]^2} < 0 \end{aligned} \quad (11)$$

所以， $u_{i,n}^{MS}(p_{i,n}^{MS}, \mathbf{P}_{-i,n}^{MS})$ 在 $p_{i,n}^{MS}$ 上是凹的。由于一个凹函数也是拟凹函数，因此净效用函数 $u_{i,n}^{MS}(p_{i,n}^{MS}, \mathbf{P}_{-i,n}^{MS})$ 是连续且拟凹的函数，则 G^{MS} 存在纳什均衡点。

设 $\arg \max_{p_{i,n}^{MS}} u_{i,n}^{MS}(p_{i,n}^{MS}, \mathbf{P}_{-i,n}^{MS})$ 为 G^{MS} 的最优解，由一阶优化的必要条件 $\frac{\partial u_{i,n}^{MS}(p_{i,n}^{MS}, \mathbf{P}_{-i,n}^{MS})}{\partial p_{i,n}^{MS}} = 0$ 可得最优解为

$$p_{i,n}^{MS} = \frac{B_n}{l_{i,n}^{MS} \ln 2} - \frac{G \left(\sum_{j \neq i} H_{j,k,n}^i p_{j,k,n} + s^2 \right)}{H_{i,k,n}} \quad (12)$$

另外，由于实际系统中 $p_{i,n}^{MS} \geq 0$ ，因此定价因子 $l_{i,n}^{MS}$ 的取值范围为

$$l_{i,n}^{MS} \leq \frac{B_n \cdot H_{i,k,n}}{(\ln 2)G \left(\sum_{j \neq i} H_{j,k,n}^i p_{j,k,n} + s^2 \right)} \quad (13)$$

要证明 G^{MS} 纳什均衡点的唯一性，关键是证明其最优解表达式是标准函数，即满足正性、单调性和可测量性。由定价因子 $l_{i,n}^{MS}$ 的取值范围可以保证功率求解表达式大于 0，即满足正性。关于单调性，由式(12)可知，由于某一 MS 自身的发射功率与同一子信道的其他 MS 的干扰发射功率有关，故可令 $P=I(P)$ 。设 $P \geq P'$ ，有：

$$I(P) - I(P') = \frac{\sum_{j \neq i} G H_{j,k,n}^i (p'_{j,k,n} - p_{j,k,n})}{H_{i,k,n}} \leq 0 \quad (14)$$

则表达式为单减函数，当 $P=P'$ 时取等号。最后，要证明可测量性，即是要证明 $\forall q > 1, ?I(P) \geq I(?P)$ 。因为

$$\begin{aligned} & qI(P) - I(qP) \\ &= \frac{B_n(q-1)}{l_{i,n}^{MS} \ln 2} - \frac{Gs^2(q-1)}{H_{i,k,n}} \\ &> (q-1) \cdot \left(\frac{B_n}{l_{i,n}^{MS} \ln 2} - \frac{Gs^2}{H_{i,k,n}} - \frac{G \sum_{j \neq i} H_{j,k,n}^i p_{j,k,n}}{H_{i,k,n}} \right) \\ &= (q-1) \cdot \left(\frac{B_n}{l_{i,n}^{MS} \ln 2} - \frac{G \left(\sum_{j \neq i} H_{j,k,n}^i p_{j,k,n} + s^2 \right)}{H_{i,k,n}} \right) \geq 0 \quad (15) \end{aligned}$$

所以表达式满足可测量性。综上可得， G^{MS} 具有唯一的纳什均衡点。 G^{RS} 纳什均衡点的存在性和唯一性与 G^{MS} 时的情况相似，可同理证明。

3.3 求解算法

对非合作博弈纳什均衡点的求解，通常采用基于迭代的求解算法，从非均衡状态逐步收敛到纳什均衡点。对于 G^{MS} ，由式(12)可得同频子信道 n 上各 MS 功率的迭代表达式为

$$p_{i,n}^{MS}(t) = \frac{B_n}{l_{i,n}^{MS} \ln 2} - \frac{G \left(\sum_{j \neq i} H_{j,k,n}^i p_{j,k,n}(t-1) + s^2 \right)}{H_{i,k,n}} \quad (16)$$

基于以上迭代表式，本文给出多小区 OFDMA 中继网络上行链路中一种基于非合作博弈论的分布式资源分配算法，过程如下：

1) 在第 1 个子时隙中，在各小区内，分别为中继 MS 和直传 MS 分配子信道（如 round robin 算法）；
2) 在每一个子信道 n 上，令 $t=0$ ，初始化功率矢量 $\mathbf{P}_n^{MS}(0) = \mathbf{P}_n^{\max}$ ，其中， \mathbf{P}_n^{\max} 为各 MS 在子信道 n 上的最大允许发射功率，算法迭代精度为 $\epsilon > 0$ ；

3) 令 $t=t+1$ ，根据式(16)计算 $\mathbf{P}_n^{MS}(t)$ ；

4) 如果 $|\mathbf{P}_n^{MS}(t) - \mathbf{P}_n^{MS}(t-1)| < \epsilon$ ，则第 1 个子时隙的功率分配结束， $\mathbf{P} = \mathbf{P}_n^{MS}(t)$ 为最终的功率分配结果；否则重复步骤 3)；

5) 在第 2 个子时隙中，在各小区内，为中继 MS 分配子信道（如 round robin 算法）；

6) 在每一个子信道 n 上，令 $t=0$ ，初始化功率矢量 $\mathbf{P}_n^{RS}(0) = \mathbf{P}_n^{\max}$ ，其中， \mathbf{P}_n^{\max} 为各 RS 在子信道 n 上的最大允许发射功率，算法迭代精度为 $\epsilon > 0$ ；

7) 令 $t=t+1$ ，与式(16)类似地计算 $\mathbf{P}_n^{RS}(t)$ ；

8) 如果 $|\mathbf{P}_n^{RS}(t) - \mathbf{P}_n^{RS}(t-1)| < \epsilon$ ，则第 2 个子时隙的功率分配结束， $\mathbf{P} = \mathbf{P}_n^{RS}(t)$ 为最终的功率分配结果；否则重复步骤 7)；

9) 对于直传 MS，利用第 1 子时隙的子信道分配结果和功率分配结果可计算出直传 MS 最终的吞吐量；对于中继 MS，分别利用第 1 子时隙和第 2 子时隙的子信道分配结果和功率分配结果可计算出各子时隙的吞吐量，再取其中小者即为中继 MS 最终的吞吐量。

从以上对求解算法的描述可以看出，该求解算法的复杂度只与系统中的小区个数 I 、子载波个数 N 以及每个调度周期的子时隙个数有关，而与每个小区中 MS 的个数 K 无关。因此，在系统小区个数 I 、子载波个数 N 以及每个调度周期的子时隙个数确定的情况下，各小区中 MS 的接入和退出并不会影响到该算法的复杂度，因此使得该算法有很广泛的适用场景。

4 仿真分析

为了对所提出的资源分配算法进行评价，本文用 MATLAB 进行了算法实现，相关仿真参数设置如下：系统总带宽为 10MHz，可用子载波数为 256 个；系统包含 19 个小区，小区半径为 1 000m，每小区内含有 6 个 RS，RS 与基站距离为 500m，各 RS 最大可用发射功率为 10W；各小区 MS 数量相同，小区内 MS 均匀分布，其中，1/4 数量的 MS 为直传 MS，剩下 3/4 数量的 MS 为中继 MS，各 MS 最大可

用发射功率为 1W；考虑信号的大尺度衰落和瑞利衰落，路径损耗指数为 4，不考虑阴影效应；系统误码率 (BER) 为 10^{-4} ，相应地 $G=5.0673$ ；AWGN 信道噪声功率密度为 -200dBm/Hz ；调度周期为 1ms，均匀地分为 2 个子时隙。仿真时长为 50 000 个调度周期。仿真中采用的子信道分配算法为轮询 (round robin) 算法，即在各小区中平均地为每个 MS 分配所有可用子载波。每小区 MS 数量为 16、32、64。逐渐增大定价因子，观察每个调度周期内，系统吞吐量和系统总发射功率的变化情况。

首先，从图 3~图 5 可以看出，无论在任何场景下，随着定价因子的增大，系统吞吐量均呈现先快速增长、后缓慢下降的趋势。图 4~图 8 则显示系统总发射功率随定价因子的增长而单调下降，下降的速度先急后缓。其原因是：当定价因子较小时，各节点在考虑自身所付出代价的情况下，使用比最大发射功率少一些的功率来进行发射，相应地互相之间的干扰功率也减小，由此使得系统吞吐量得到提升。当定价因子超过最优定价因子之后，定价因子的惩罚性大大加强，各节点的发射功率大大减小，使得吞吐量逐渐下降。

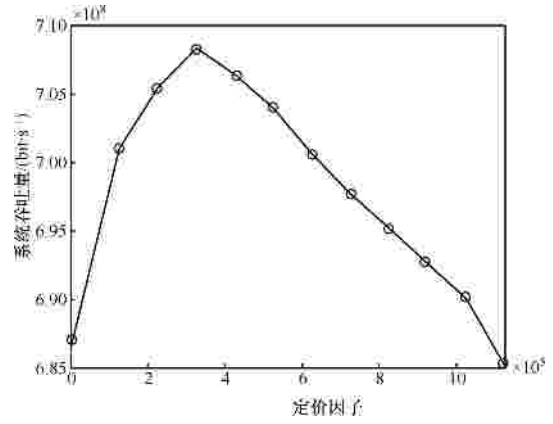


图 5 每小区 64 个 MS 时系统吞吐量

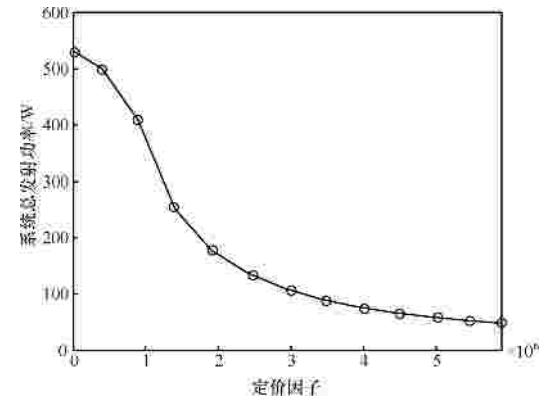


图 6 每小区 16 个 MS 时系统总发射功率

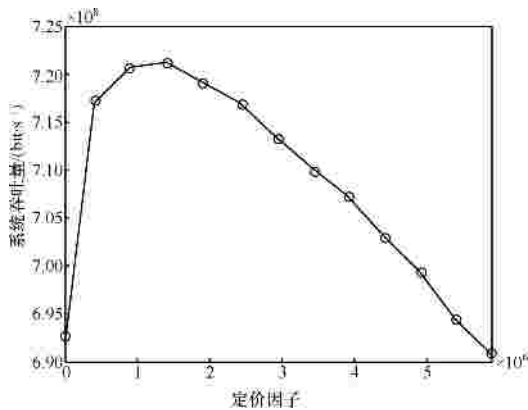


图 3 每小区 16 个 MS 时系统吞吐量

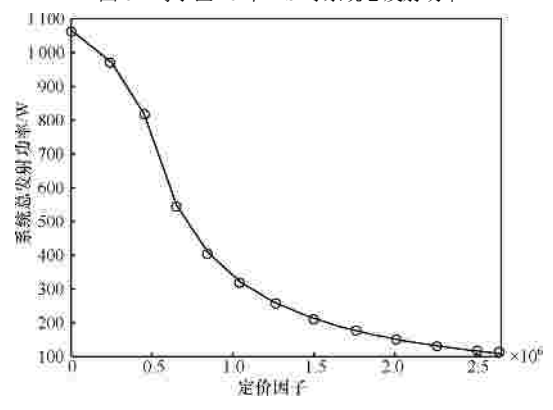


图 7 每小区 32 个 MS 时系统总发射功率

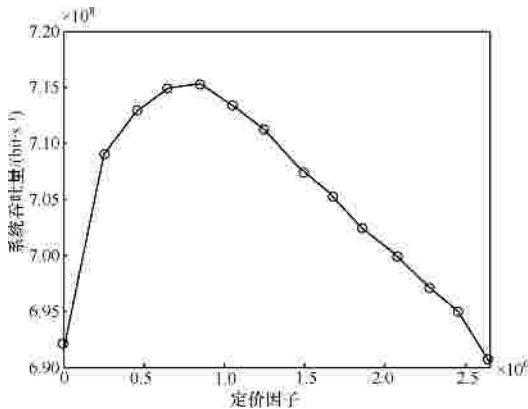


图 4 每小区 32 个 MS 时系统吞吐量

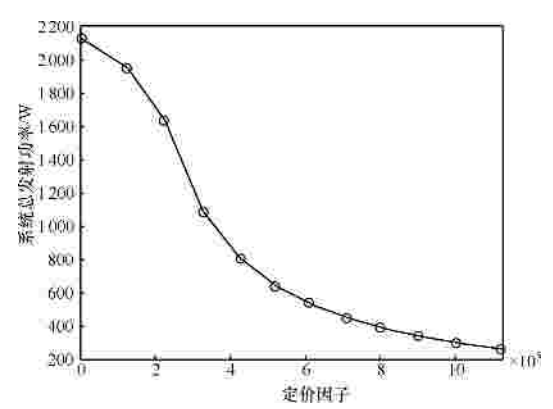


图 8 每小区 64 个 MS 时系统总发射功率

当定价因子为 0 时，对应的系统吞吐量为各 MS 和 RS 在各子载波上用最大等功率发射时获得的系统吞吐量，此时系统总发射功率为最大。可以看出，随着定价因子的增大，系统吞吐量相对于定价因子为 0 的情况下，最大可以提升 5% 左右，而此时系统总发射功率仅为最大等功率发射时的 40%~50% 左右。随着定价因子的继续增大，系统吞吐量将回落到定价因子为 0 时的水平，此时从图 6~图 8 可以看出，系统总发射功率相对于最大等功率发射时减少了 90% 左右，大大减少了能量消耗，达到了较高的能效比。由于时间和篇幅的限制，仿真中的定价因子在各子时隙和各自信道上都是恒定不变的。如果能根据各子信道增益实际情况来动态地改变各子时隙和各子信道上的定价因子，不仅能使系统吞吐量得到更大的提升，而且也能使系统总发射功率减少的更多，从而达到更高的能效比，当然同时也会带来更大的系统计算复杂度和控制开销。

为了进一步说明本文提出的功率分配算法所带来的系统性能增益，本文将等功率分配算法、经典的注水算法^[7]与本文提出的功率分配算法进行了比较。等功率分配算法是不考虑信道增益，简单地将节点自身功率平均地分配到自身获得的所有子信道上，其复杂度最低。注水算法是根据自身获得的子信道的不同增益，在信道增益较好的子信道上分配较多的功率，在信道增益较差的子信道上分配较少的功率，其复杂度稍高。图 9 可以看到，尽管注水算法考虑了自身各子信道的信道增益，但是其性能仍然和使用等功率算法时基本相同，而本文提出的算法则较其他两者能获得 4% 左右的吞吐量增益。

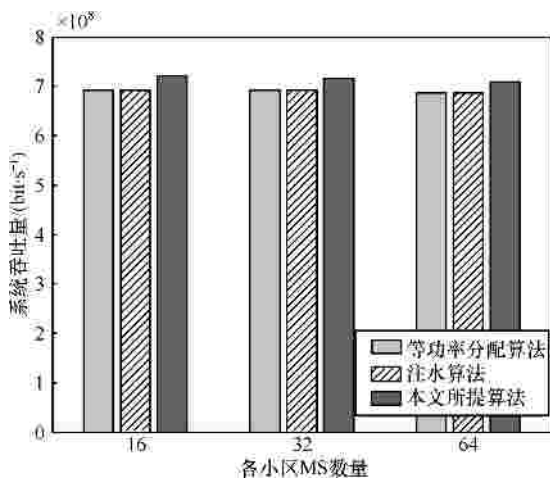


图 9 3 种功率分配算法的吞吐量比较

从图 10 显而易见，使用本文提出的算法在较其他两者在获得更多系统吞吐量的同时，其系统总发射功率仅为其他两者的 40%~50% 左右，大幅降低了系统总发射功率。这里定义一个能效比因子，它的值等于系统吞吐量与总发射功率之比，单位为比特/焦耳。能效比因子越大，单位能量下产生的比特数就越多，系统则越节能。综合图 9 和图 10 可以得出，采用等功率算法、注水算法时的能效比因子基本相同，分别为 1.33×10^6 (每小区 16 个 MS)、 0.66×10^6 (每小区 32 个 MS) 和 0.33×10^6 (每小区 64 个 MS)，而采用本文提出的算法时的能效比因子分别为 3.00×10^6 (每小区 16 个 MS)、 1.79×10^6 (每小区 32 个 MS) 和 0.65×10^6 (每小区 64 个 MS)。因此，本文提出的功率分配算法具有较高的能效比。

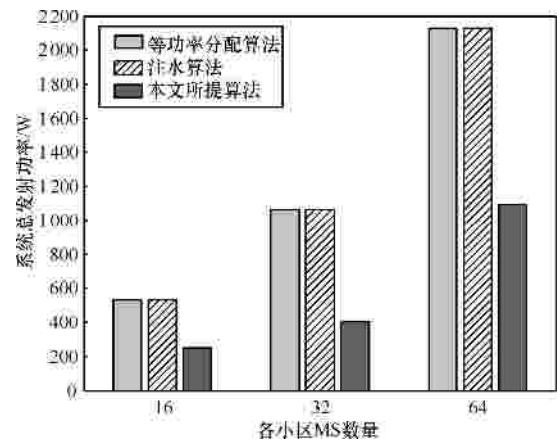


图 10 3 种功率分配算法的系统总发射功率比较

5 结束语

博弈论作为一个新兴的研究方法，已经日渐深入地应用到通信研究的各个领域之中，而本文即采用了其分支之一的非合作博弈论对 OFDMA 无线多跳中继网络上行链路资源分配问题进行了研究。在建立两跳系统优化模型的基础上，通过引入非合作博弈论及定价机制来建立了相应的非合作功率分配博弈模型，同时纳什均衡的存在性和唯一性也得到了证明，并且提出了具体的求解算法。仿真结果显示本文所提出的算法既能有效地提升系统吞吐量，又能大幅降低系统总发射功率，达到了较高的能效比。

参考文献：

[1] PABST R. Relay-based deployment concepts for wireless and mobile

- broadband radio[J]. IEEE Communication Magazine, 2004, 42(9): 80-89.
- [2] SALEM. An overview of radio resource management in relay-enhanced OFDMA-based networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2010, 12(3): 422-438.
- [3] YOON J P, KIM W J, BAEK J Y, *et al.* Efficient uplink resource allocation for power saving in IEEE 802.16 OFDMA systems[A]. 2008 IEEE 67th Vehicular Technology Conference, VTC Spring 2008[C]. Singapore, 2008. 2167-2171.
- [4] SADR S, ANPALAGAN A, RAAHEMIFAR K. Radio resource allocation algorithms for the downlink of multiuser OFDM communication systems[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(3): 92-106.
- [5] WONG I C, SHEN Z K, EVANS B L, *et al.* A low complexity algorithm for proportional resource allocation in OFDMA systems[A]. The IEEE 2004 Workshop on Signal Processing Systems, SIPS'04[C]. Austin, Texas, USA, 2004. 1-6.
- [6] SHEN Z K, ANDREWS J G, EVANS B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(6): 2726-2737.
- [7] 张天魁, 曾志民, 张颖莹. 基于博弈论的 OFDMA 系统多小区功率协调分配算法[J]. 通信学报, 2008, 29(1): 22-29.
ZHANG T K, ZENG Z M, ZHANG Y Y. Multicell adaptive power allocation scheme based on game theory in OFDMA systems[J]. Journal on Communications, 2008, 29(1): 22-29.
- [8] 仲崇显, 李春国, 杨绿溪. 基于非合作博弈论的多小区 OFDMA 系统动态资源分配算法研究[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(8): 1935-1940.
ZHONG C X, LI C G, YANG L X. Dynamic resource allocation algorithm for multi-cell OFDMA systems based on noncooperative game theory[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(8): 1935-1940.
- [9] XINMIN Y, TONG W, JING H, *et al.* A non-cooperative game approach for distributed power allocation in multi-cell OFDMA-relay networks[A]. IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 2008[C]. Marina Bay, Singapore, 2008. 1920-1924.
- [10] XIAO L, CUTHBERT L. Multi-cell non-cooperative power allocation game in relay based OFDMA systems[A]. IEEE Vehicular Technology Conference, VTC Spring 2009[C]. Barcelona, Spain, 2009. 1-5.
- [11] XIAO L, ZHANG T K, CUTHBERT L. User fairness analysis of a game theory based power allocation scheme in OFDMA relay systems[A]. European Wireless Conference 2009, EW2009[C]. Aalborg, Denmark, 2009. 173-177.
- [12] ZHANG T K, FENG C Y, SU G, *et al.* Uplink multi-cell non-cooperative power allocation game algorithm for OFDMA cellular networks[A]. 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCom 2009[C]. Beijing, China, 2009.1-4.

作者简介:



向征 (1983-), 男, 四川成都人, 博士, 中国民航飞行学院讲师, 主要研究方向为新航行系统通信、导航、监视技术、无线多跳中继网络资源管理等。



方旭明 (1962-), 男, 浙江义乌人, 博士, 西南交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向包括下一代无线网络无线资源管理、无线多跳中继技术、高移动性无线宽带接入技术等。



徐鹏 (1981-), 男, 河南新乡人, 博士, 西南交通大学讲师, 主要研究方向为混合无线网络无线资源管理、无线定位技术、无线电智能监测、频谱管理等。