

## OFDMA 上行链路中基于博弈论的子载波和功率分配算法

喻的雄 蔡跃明 吴丹 钟卫  
(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

**摘要:** 传统 OFDMA 上行链路资源分配算法中一般以最大化各用户速率或最小化发射功率为依据对子载波和功率进行分配, 而对于各用户的功率效率问题并没有加以考虑。针对这一问题, 该文提出了一种基于功率效率最优的联合子载波功率分配算法。首先给出了在各用户峰值功率约束条件下达到收益函数最优的必要条件并证明了算法纳什均衡的存在及唯一性, 然后给出了子载波功率分配算法。仿真表明: 相比最大边界速率子载波和功率分配算法(MaxRt+WF)和固定子载波和功率分配算法(MaxFA+WF), 该文算法能大幅度提高各用户的功率效率。同时如果合理地选择代价参数, 算法获得的和功率效率能够达到更大。

**关键词:** OFDMA; 功率效率; 资源分配; 博弈论

**中图分类号:** TN92

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2010)04-0775-06

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2008.00401

## Subcarrier and Power Allocation Based on Game Theory in Uplink OFDMA Systems

Yu Di-xiong Cai Yue-ming Wu Dan Zhong Wei

(Institute of Communication and Engineering, PLAUST, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** The main objective of the traditional OFDMA uplink resource allocation focuses on two aspects: one is to maximize the transmission rate of each user, the other is to minimize power. But both of them do not consider the power efficiency of each user. To deal with this problem, in this paper, a novel joint power and subcarrier allocation scheme in uplink OFDMA systems is proposed based on game theory. The goal is to maximize the power efficiency of each user under peak power constraint. For the purpose, the necessary condition for optimality using Karush-Kuhn-Tucker condition is drawn and the existence of the Nash Equilibrium of the function is proved. Then the subcarrier and power allocation algorithm is showed. The simulation results show that the power efficiency of the proposed algorithm increases greatly over that of the MaxRt+WF (Maximal marginal Rate subcarrier and WaterFilling power allocation), which is the optimal algorithm to derive the maximal transmission rate, and MaxFA+WF (Fixed subcarrier Allocation and WaterFilling power allocation). Meanwhile, if the pricing fact is properly chosen which the number is five in the simulation model, the sum of power efficiency can be maximized.

**Key words:** OFDMA; Power efficiency; Resource allocation; Game theory

### 1 引言

在 OFDM 系统中, 合理的资源分配算法能够有效地提高系统性能而得到人们广泛的关注<sup>[1-7]</sup>。然而大多数关于 OFDM 资源分配的文章着重于考虑下行链路<sup>[1-3]</sup>。在下行链路中, 最优算法是将每个子载波分配给具有最优信道的用户, 然后在这些信道上进行功率注水。然而, 对于上行链路来说, 由于每个用户都有各自的峰值功率约束, 所以这种算

法并不适用于上行链路<sup>[4]</sup>。文献[5]对 OFDM 系统上行链路的资源分配算法进行了研究, 其目标是在各用户峰值功率约束的条件下最大化系统的和速率。但它可能会导致“边缘效应”加剧。文献[4]等则将这一问题用博弈论的方法来解决, 其目标是在用户各自峰值功率约束和最小速率约束的情况下获得最小的发射功率。文章将这两个约束简化为峰值功率约束条件下的最小发射功率求解问题。然而这种算法并不总能达到纳什均衡, 也就是说算法并不总是收敛, 其应用范围受到限制。文献[6]考虑了多蜂窝小区的功率分配, 但该文并没有考虑子载波分配问题, 它假定每个蜂窝小区中只有一个用户。这些文章一般来说都是基于两个出发点考虑: 一是在峰值

2008-04-07 收到, 2010-01-22 改回

国家自然科学基金(60672079)和江苏省自然科学基金(BK2006701, BK2007002)资助课题

通信作者: 喻的雄 ydx2996@gmail.com

功率约束的情况下最大化系统的速率；二是最小速率条件下最小发射功率。

和以上文献给出的算法不同，本文没有单独考虑优化用户的发射功率或者传输速率，而是考虑最优化各用户的功率效率，它是用户发射功率和传输速率的函数。本文将OFDMA系统的资源分配问题建模成一个博弈模型，这个模型中的每个参与者(用户)都期望在各自峰值功率约束的条件下能够得到最大的收益，本文定义收益为各个用户的功率效率。通过最优化条件(Karush-Kuhn-Tucker (KKT) condition)的应用，求得了达到收益最优的必要条件并给出了一种相应的迭代子载波和功率分配算法。为了消除“远近效应”的影响，保证系统的公平性，本文假定系统中的所有用户轮流选择子载波。同时为了进一步提升系统性能，并期望能尽量保证系统的公平性，本文引入了代价机制。通过仿真表明：相比最大边界速率子载波和功率分配算法(MaxRt+WF)和固定子载波和功率分配算法(MaxFA+WF)，本文算法能够得到功率效率较大的提升，同时如果能够合理地选择代价参数，功率效率能够达到更优。

本文的组织如下：第1节描述了OFDMA系统模型并将优化问题建模成一个基于功率效率的博弈模型；第2节分析了设计的博弈函数并证明了纳什均衡的存在及唯一性；第3节给出了相应的迭代子载波和功率更新算法；最后给出了仿真分析和总结。

## 2 系统模型

### 2.1 系统模型

考虑一个单小区蜂窝 OFDM 系统，一共有  $N$  个用户和  $L = \{1, 2, \dots, L\}$  个子载波。定义  $C = [c_i^l]$   $i \in [1, 2, \dots, N], l \in [1, 2, \dots, L]$  为子载波分配矩阵，如果第  $l$  个子载波分配给用户  $i$ ，那么  $c_i^l = 1$ ，否则  $c_i^l = 0$ 。则第  $m$  个子载波的上行链路接收端的接收信号可以表示为

$$y_m = \sum_{n=1}^N c_n^m h_n^m \sqrt{p_n^m} x_n^m + n_n^m \quad (1)$$

其中  $p_n^m$ ， $n_n^m$  和  $h_n^m$  分别表示第  $n$  个用户的第  $m$  个子载波上的发射功率、噪声和信道增益。本文假设每个子载波上的噪声  $n_n^m$  都相等，噪声功率为  $\sigma^2$ ，且  $h_n^m$  是路径衰落因子和频率选择性衰落因子的乘积。对于路径衰落因子<sup>[8]</sup>，定义其为  $\psi_n^m = 0.097/d_n^v$ ，其中  $v \in [3, 6]$ ，对于频率选择性衰落因子，本文用 COST207 TU\_3 坏城区模型对其进行建模。则第  $n$  个用户第  $m$  个子载波的信噪比  $\gamma_n^m$ ，可表示为  $\gamma_n^m = (h_n^m)^2 p_n^m / \sigma^2$ 。根据文献[6]，假设所有用户均

采用 MQAM 调制，则在速率  $r_n^m$  下，第  $n$  个用户的第  $m$  个子载波的误比特率可以为

$$P(\gamma_n^m) \approx 0.2 \exp\left(-\frac{1.5\gamma_n^m}{2^m - 1}\right) \quad (2)$$

那么第  $n$  个用户第  $m$  个子载波上的传输速率可以表示为

$$r_n^m = \log\left(1 - \frac{1.5\gamma_n^m}{\ln(5P(\gamma_n^m))}\right) \quad (3)$$

### 2.2 问题公式化

由以上分析，本文给出的基于博弈论的功率和子载波分配算法的收益函数可以表示为

$$\eta_n = \sum_{m=1}^{L(n)} \eta_n^m = \sum_{m=1}^{L(n)} \frac{r_n^m}{(p_n^m)^{1/2}} = \sum_{m=1}^{L(n)} \frac{\log(1 + g_{n,m} p_n^m)}{(p_n^m)^{1/2}} \quad (4)$$

其中  $\eta_n$  为第  $n$  个用户的和功率效率，即优化目标， $\eta_n^m$  表示第  $n$  个用户第  $m$  个子载波的功率效率，其中  $L(n)$  表示分配给第  $n$  个用户的子载波数， $g_{n,m} = \frac{1.5(h_n^m)^2}{\ln(5P(\gamma_n^m))\sigma^2}$  表示为有效的信道增益。如果考虑到子载波分配，那么收益函数可以表示为

$$u_n = \sum_{m=1}^{L(n)} c_n^m \eta_n^m = \sum_{m=1}^{L(n)} c_n^m \frac{\log(1 + g_{n,m} p_n^m)}{(p_n^m)^{1/2}} \quad (5)$$

但是，博弈模型中的每一个用户都是自私的，只关心自身利益的最大化，而不考虑其它用户的需求，这会使获得的纳什均衡可能并不是系统的最优点。为此，参照文献[8,9]引入代价机制来加以解决。虽然系统中每个用户并不相互干扰，但它们会争夺系统中有限的子载波，因而它们之间肯定存在相互竞争的关系。同时，每个用户的峰值功率约束使得分配给每个用户的载波之间也会存在功率的竞争关系。所以加入代价机制是比较合理的，它能促使系统中的用户更有效地使用有限的资源，使得系统中的用户具有隐含的合作性。若用  $\tau$  表示代价因子，加入线性代价函数以后，博弈模型可具体表示如下：

$$G : u_n = \arg \max_P \sum_m c_n^m \eta_n^m - \tau g_{n,m} p_n^m$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{m=1}^L p_n^m - P_{\max} \leq 0 \quad \forall n, \\ r_n^m, p_n^m \geq 0, \quad \forall n, m \\ \sum_{n=1}^N c_n^m \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

## 3 博弈论分析

对于设计的博弈子载波功率分配模型  $G = [L, \{P_n, C\}, \{u_n(\bullet)\}]$ ，如何在各用户之间分配子载波，然后怎样在其分配的子载波上进行功率分配不仅关系到自身收益的多少，同时也影响到其他用户的收

益进而也关系到整个系统的性能。如果所有用户通过“自私”优化达到一个均衡点, 每个用户就不会单独改变其选择策略(功率和子载波)。下面将证明本文设计的收益函数纳什均衡的存在性。

**定理 1**<sup>[8]</sup> 如果某一函数为凹(凸)函数, 那么此函数肯定是拟凹(拟凸)函数。

**定理 2**<sup>[8]</sup> 对于设定的收益函数  $G = [L, \{\mathbf{P}_n, \mathbf{C}\}, \{u_n(\cdot)\}]$ , 如果子载波分配完毕, 那么对应剩下的功率分配函数可以表示为  $G = [L, \{\mathbf{P}_n\}, \{u_n(\cdot)\}]$ , 如果其策略空间  $\{\mathbf{P}_n\}$  是非空的紧密凸集, 且收益函数  $u_n(\cdot)$  关于其策略函数  $p_n^m$  为一拟凹(拟凸)函数, 此时它存在至少一个纳什均衡点。

**证明** 对于设定的收益函数, 很显然策略空间是一个非空的紧密凸集, 对于第 2 个条件, 如果对收益函数求其策略空间  $p_n^m$  的二阶导数, 可以获得

$$\frac{\partial^2 u_n^2}{\partial (p_n^m)^2} < 0^{[10]}, \text{ 也就是说我们设计的收益函数是一}$$

个凹函数, 由定理 1 可知凹函数一定是拟凹函数, 所以可以证明该收益函数至少存在一个纳什均衡点。因为本文设计的子载波与功率分配是一个迭代的过程, 如果每个子载波上的功率已经分配完毕, 子载波应该重新分配直到所有用户的子载波分配没有变动, 也就是说达到子载波分配的纳什均衡。

## 4 子载波和功率分配

### 4.1 每个用户分配的子载波数

为了减少系统中各个用户的“边缘效应”问题, 我们假定所有子载波平均分配给每个用户。所以第  $n$  个用户可以分配到的子载波数为  $T_n = \lfloor L/K \rfloor$ 。其中  $\lfloor x \rfloor$  表示对  $x$  下取整。这种分配方法可能造成的问题就是: 如果子载波数并不是用户数的整数倍, 系统中还有空闲的子载波并没有加以利用从而造成浪费, 降低了频谱利用效率。为了解决这一问题, 我们将这些子载波分配给具有最优功率效率的用户。

### 4.2 子载波分配方案

本文算法的目标是最优化每个用户的收益函数。为了后面的分析方便, 在这里放宽了对  $c_n^m$  的要求, 做了连续化处理, 定义了取值范围为  $[0,1]^{[1,5]}$ , 根据上文提出的收益函数模型可知, 如果对收益函数求其策略  $c_n^m$  和  $p_n^m$  的一阶导数可以得到相应的边界函数。具体表示为  $\frac{\partial u(\mathbf{P}, \mathbf{C})}{\partial c_n^m} = \frac{r_n^m}{(p_n^m)^{1/2}}$  和

$$\frac{\partial u(\mathbf{P}, \mathbf{C})}{\partial p_n^m} = \frac{c_n^m}{p_n^m} \left[ \frac{g_{n,m} (p_n^m)^{1/2}}{1 + g_{n,m} p_n^m} - \frac{1}{2} (p_n^m)^{-1/2} \log(1 + g_{n,m} p_n^m) \right] - \tau g_{n,m}$$

对于设定的博弈模型, 对其使用 Lagrange 松弛, 可得

$$L(c_n^m, p_n^m) = \sum_{m=1}^{L(n)} \frac{c_n^m r_n^m}{(p_n^m)^{1/2}} - \tau g_{n,m} p_n^m - \sum_{n=1}^K \mu_n \left( \sum_{m=1}^{L(n)} p_n^m - P_{\max}^n \right) - \sum_{m=1}^{L(n)} \lambda_m \left( \sum_{n=1}^K c_n^m - 1 \right) \quad (7)$$

其中  $\mu_n, \lambda_m$  为非负 Lagrange 因子。对式(7)分别求其关于发射功率  $p_n^m$  和子载波分配系数  $c_n^m$  的一阶导数, 同时使用 KKT 最优化条件, 那么很容易得到下列表示式:

$$\frac{\partial L(c_n^m, p_n^m)}{\partial c_n^m} = \frac{r_n^m}{(p_n^m)^{1/2}} - \lambda_m \leq 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial L(c_n^m, p_n^m)}{\partial p_n^m} = \frac{c_n^m}{p_n^m} \left[ \frac{g_{n,m} (p_n^m)^{1/2}}{1 + g_{n,m} p_n^m} - \frac{1}{2} (p_n^m)^{-1/2} \log(1 + g_{n,m} p_n^m) \right] - \tau g_{n,m} - \mu_n \leq 0 \quad (9)$$

$$c_n^m \left( \frac{r_n^m}{(p_n^m)^{1/2}} - \lambda_m \right) = 0 \quad (10)$$

$$p_n^m \frac{\partial L(c_n^m, p_n^m)}{\partial p_n^m} = 0 \quad (11)$$

从式(8)和式(10)可知, 如果子载波  $m$  没有分配给用户  $n$ , 那么  $c_n^m = 0$ , 且  $\frac{r_n^m}{(p_n^m)^{1/2}} - \lambda_m < 0$ 。否则有

$$\frac{r_n^m}{(p_n^m)^{1/2}} - \lambda_m = 0 \text{ 成立。这也意味着子载波 } m \text{ 应该分}$$

配给满足  $n = \max_x \left\{ \frac{r_x^m}{(p_x^m)^{1/2}} \right\}$  条件的用户。同样, 从

式(9)和式(11)可知, 用户  $n$  的功率应该分配给满足条件式(12)的子载波。

$$l = \arg \max_y \left[ \frac{c_n^y}{p_n^y} \left( \frac{g_{n,y} (p_n^y)^{1/2}}{1 + g_{n,y} p_n^y} \right) - \frac{1}{2} (p_n^y)^{-1/2} \log(1 + g_{n,y} p_n^y) \right] - \tau g_{n,y} \quad (12)$$

众所周知, 如果给定子载波分配方案以后, 每个用户对其分配的子载波进行功率注水可以获得最大的传输速率。但是对于每个用户来说, 功率注水算法对其功率效率并不一定是最优的。从式(12)可知, 如果功率分配给满足此条件的子载波, 用户的功率效率可以达到最优。对于分配给用户  $n$  的每一

个子载波  $m$ , 都有  $c_n^m = 1$ 。同时, 用户将功率分配到各个子载波上必须满足  $\frac{\partial u(\mathbf{P}, \mathbf{C})}{\partial p_n^m} = 0$  的条件, 也就是说用户  $n$  的功率应该分配给用户占有的所有子载波。

对于子载波和功率分配, 我们给出下面一种联合子载波和功率分配的贪婪算法。简单地说就是通过式(7)轮流选择每个用户的子载波, 然后在所选择的子载波上进行功率分配, 每个子载波上分配的功率大小必须满足  $\frac{\partial u(\mathbf{P}, \mathbf{C})}{\partial p_n^m} = 0$ 。如果子载波上为了满足条件而求得的功率和大于总功率约束, 那么将利用功率贪婪算法, 将剩余的功率全部分配给剩余子载波有效信道增益最大的一个。下面将给出本文所提的子载波和功率分配算法(简称 MaxPE+GT 算法):

(1) 设置初始功率  $p_n = 0$  以及分配给每个用户的子载波数, 例如分配给用户  $n$  的子载波数为  $T_n' = 0$ , 剩余的功率大小  $p_n' = P_{\max}^n$ 。假定  $C = 1, 2, \dots, L$  表示为分配完毕的子载波数。对于每一个未分配的子载波  $m$ , 假定其已经分配给用户  $n$ , 应用平均功率分配算法或者下面的功率分配算法, 计算在这个子载波上应该分配的功率  $p_n^m$ 。

(2)(子载波分配方案)对于每一个未分配的子载波和每一个用户, 采用步骤 1 求得的功率, 计算  $(n, m) = \arg \max_{n, m} (r_n^m (p_n^m)^{-1/2})$ , 然后将子载波  $m$  分配给用户  $n$ , 同时  $T_n' = T_n' + 1$ ,  $C = C - \{m\}$ 。最重要的是每个用户只能轮流选择子载波。

(3)(功率分配方案)如果某个子载波已经分配给用户, 那么用户在这个子载波上应该分配的功率值应该满足  $\frac{\partial u(\mathbf{P}, \mathbf{C})}{\partial p_n^m} = 0$ 。同时对于这个用户剩余的功率值  $p_n' = p_n' - p_n^m$ , 如果对于剩余的功率  $p_n'$  小于 0, 也就是说此用户并没有足够多的功率来满足  $\frac{\partial u(\mathbf{P}, \mathbf{C})}{\partial p_n^m} = 0$ , 所以用户将  $P_{\max}^n - p_n'$  的功率分配给该子载波。

(4) 重复步骤 2 和步骤 3 直到将所有子载波分配完毕, 然后利用步骤 3 重新调整每个子载波上应该分配的功率值。

## 5 仿真分析

考虑一个六边形单蜂窝 OFDMA 系统, 蜂窝小区的半径设为 1 km。假定系统中有 8 个用户随机分布在小区中, 基站分布在小区的中央, 且有 1024 个子载波, 整个系统的带宽为 5 MHz。系统中各个用

户与基站之间的信道增益是路径衰减和频率选择因子的乘积, 其中对于路径衰减  $\psi_n = 0.097/d_n^v$ ,  $v = 3$ ,  $d_n$  表示第  $n$  个用户与基站的距离, 具体而言, 各用户与基站距离分别设定为 [0.323, 0.437, 0.670, 0.683, 0.753, 0.829, 0.844, 0.954] km, 本文采用 COST207 TU\_3 坏城区模型对其进行建模。在系统中, 假设所有用户的峰值功率约束相同且都为 2 W, 同时假设误比特率 BER =  $10^{-4}$ , 且噪声方差为  $N_0 = -90$  dB。

为了与设计的博弈函数相比较, 我们考虑以下几种算法:

MaxRt+WF<sup>[5]</sup>: 最大边界速率子载波分配与功率注水算法。

MaxPE+WF: 最大功率效率子载波分配与功率注水算法。

MaxFA+WF: 固定子载波分配与功率注水算法。

图 1 和图 2 给出了系统中所有用户的总功率效率与总传输速率性能与代价因子的关系图。从图 1 中很容易看到:

(1) 如果给定的代价因子大于 3, 那么本文设计的收益函数得到的功率效率要优于 MaxRt+WF 和 MaxFA+WF 算法。

(2) 如果代价因子等于 5 时, 本文设计的收益函数的功率效率达到最佳。

(3) 如果功率效率等于 3 的时候, 本文设计的收益函数所获总功率效率与其它两种算法性能基本接近, 如果小于 3 则要小于这两种算法。

(4) 当代价因子大于 5 的时候, 3 种算法的功率效率之间的差距越来越大。

从图 2 可以看到如果代价因子很小的时候, 本文提出的算法获得的和速率与 MaxRt+WF 算法基本相当。随着代价因子的增大, 算法得到的和速率逐步减小。当代价因子大于 5 的时候, 3 种算法之间性能的差距基本上不变。

图 3 和图 4 则分别给出了当代价因子等于 5 的时候, 系统中每个用户的功率效率和传输速率的性能。从图 3 中可以看到, 本文提出的 MaxPE+GT 算法的功率效率性能要优于其它 3 种算法, 特别是对于那些距离基站很远的用户, 本文提出的算法具有很大的优势。同时也可以看到, 如果结合本文提出的子载波分配算法以及功率注水算法(MaxPE+WF)获得的性能与 MaxRT+WF 算法相比相等, 这一点也可以从图 4 中得到, 另外从图 4 中还可以得知, MaxPE+GT 和 MaxRt+WF 算法获得的传输

功率性能差值基本上不变, 不管用户与基站的距离远近。注意到图 3 和图 4 中 MaxFA+WF 算法曲线有一些起伏点, 这是因为给各个用户固定分配子载波的时候, 由于频率选择性的关系, 第  $n$  个用户第  $m$  个子载波的包络有可能很小, 尽管引入了大尺度损耗, 但其信道增益可能比距离基站较远的用户的信道增益还要小, 导致其传输速率和功率效率也很小。

图 5 给出了不同代价因子情况下, 本文提出算法各用户的功率效率的比较。从图中也可以看到: 当代价因子等于 5 的时候, 各用户的功率效率基本上达到最优。只要加入代价机制, 获得的性能要优于不加代价因子的情况。

图 6 则给出了不同代价因子条件下系统中所有用户的和发射功率性能图。从图中可以看到, 当代

价因子小于等于 4 时, 每个都以峰值功率进行发射。当代价因子增大时, 用户的发射功率急剧减少。

## 6 结束语

本文提出了一种基于博弈论的子载波和功率分配算法。其中博弈函数被定义为各用户子载波的功率效率和减去代价函数。通过使用 KKT 最优化条件, 获得了功率效率最优时子载波和功率的分配算法。这个算法是一个迭代的过程。在每次迭代过程中, 用户都能分配到一个子载波, 并利用相应的功率分配机制对其进行功率分配。直到所有的子载波分配完毕以后, 用户在这些子载波上进行重新功率调整。仿真结果表明: 如果能够合理地选择代价因子, 相比 MaxRt +WF, MaxPE+WF 和 MaxFA+WF 算法, 本文所提算法能够达到功率效率最优。

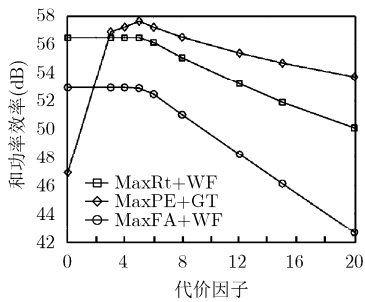


图 1 和功率效率与代价因子的关系

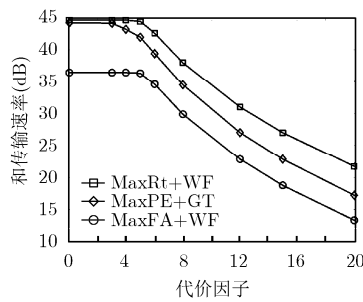


图 2 和传输速率与代价因子的关系

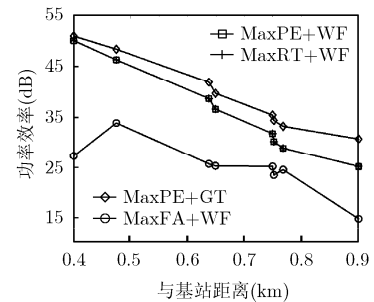


图 3 功率效率性能图

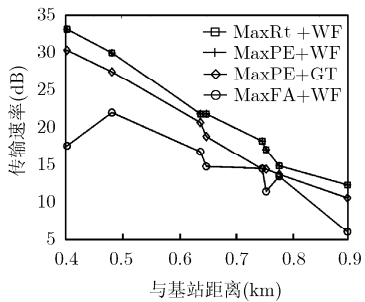


图 4 传输速率性能图

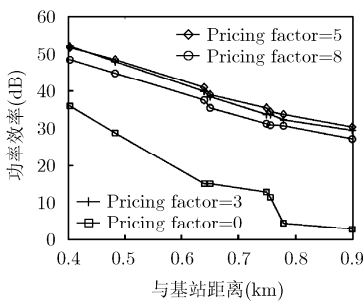


图 5 不同代价因子时各用户功率效率比较

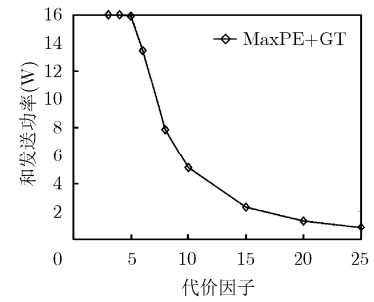


图 6 和发送功率与代价因子的关系

## 参考文献

- [1] Wong C Y, Cheng R S, Letaief K B, and Murch R D. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit and power allocation [J]. *IEEE Journal of Selected Areas Communications*, 1999, 10(17): 1747-1757.
- [2] Jang J and Lee K B. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems [J]. *IEEE Journal of Selected Areas Communications*, 2003, 2(21): 171-178.
- [3] Han Seungyoun, Kim Sungtae, Oh Eunsung, and Hong Daesik. Adaptive resource allocation with rate proportionality tracking in OFDMA systems [C]. *IEEE 65th Vehicular Technology Conference*, Dublin, 2007, 4: 3031-3035.
- [4] Wang Lang, Xue Yi-sheng, and Schulz Egon. Resource allocation in multicell OFDM systems based on noncooperative game [C]. *IEEE 17th Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Helsinki, 2006, 9: 1-5.
- [5] Kim Keun-young, Han Young-nam, and Kim Seong-Lyun. Joint subcarrier and power allocation in uplink OFDMA systems [J]. *IEEE Communications Letter*, 2005, 6(9): 526-528.
- [6] Han Zhu, Ji Zhu, and Liu K J Ray. Power minimization for multi-cell OFDM networks using distributed non-cooperative

- game approach [C]. IEEE Globecom, Texas, 2004, 5: 3742-3747.
- [7] Yang Li-guo, He Zhi-qiang, and Wang Lan. A new utility based subcarrier and power joint allocation scheme in uplink OFDMA systems [J]. IEEE 65th Vehicular Technology Conference, Dublin, 2007, 4: 2756-2760.
- [8] Saraydar C U, Mandayam N B, and Goodman D J. Efficient power control via pricing in wireless data networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, 50(2): 291-303.
- [9] Shan V, Mandayam N B, and Goodman D J. Power control for wireless data based on utility and pricing[C]. Proc. PIMRC, London, 1998: 1427-1432.
- [10] 喻的雄, 蔡跃明, 钟卫. CDMA中一种新的博弈功率控制算法研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(2): 443-446.
- Yu de-xiong, Cai Yue-ming, and Zhong Wei. A novel distributed power control algorithm in CDMA systems: A game theoretic approach. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(2): 443-446.
- 喻的雄: 男, 1983年生, 硕士生, 研究方向为博弈功率控制及接入控制.
- 蔡跃明: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信与移动通信等.
- 吴丹: 女, 1983年生, 硕士生, 研究方向为博弈功率控制及接入控制.
- 钟卫: 男, 1980年生, 助教, 硕士生, 研究方向为博弈功率控制、天线选择、接入控制等.