



基于不完备 CSI 的 OFDMA 公平资源分配算法

吴耀辉^{1,2}, 李有明¹, 金丽萍^{1,2}, 邵鹏飞²

(1. 宁波大学通信技术研究 所 宁波 315211;

2. 浙江万里学院电子信息学院 宁波 315100)

摘 要:针对在信道状态信息不完备时,很难兼顾系统容量和公平性这一问题,通过引入公平松弛因子,提出一种公平性可调的遍历容量最大化资源分配算法。为了降低计算复杂度,在利用对偶优化方法求解拉格朗日算子过程中,提出同层循环迭代的搜索方式以代替传统的内外层循环迭代方式。通过仿真和分析表明,该算法在满足公平性的同时实现了遍历容量最大化,且计算复杂度明显降低。

关键词:正交频分复用多址接入;资源分配;不完备信道状态信息;遍历容量;公平性

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015011

Fair Resource Allocation Algorithm for OFDMA System with Imperfect CSI

Wu Yaohui^{1,2}, Li Youming¹, Jin Liping^{1,2}, Shao Pengfei²

(1. Institute of Communication Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, China)

Abstract: Existing resource allocation algorithms can't balance system capacity and fairness well when the channel state information is imperfect. In order to solve this problem, a fair resource allocation algorithm was proposed to maximize the system ergodic capacity, while the fairness could be adjusted flexibly by introducing the fairness relaxation factor. In order to reduce the complexity in the use of dual optimization method for solving the lagrange operator process, an iteration searching method in the same layer was proposed to replace the traditional multi-layer iteration searching method. Simulation results show that the proposed algorithm can effectively maximize the system ergodic capacity and guarantee the fairness, while the computational complexity was reduced significantly.

Key words: OFDMA, resource allocation, imperfect channel state information, ergodic capacity, fairness

1 引言

正交频分复用多址接入 (orthogonal frequency division

multiple access, OFDMA)技术是实现 4G 通信的关键技术。OFDMA 系统的资源分配问题就是研究如何自适应地为各用户分配子载波、比特以及功率等资源,以提高系统的资

收稿日期:2014-09-16;修回日期:2014-10-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (No.61071119),浙江省自然科学基金资助项目 (No.LY14F010007),宁波市自然科学基金资助项目 (No.2012A610061, No.2012A610016),“信息与通信工程”浙江省重中之重学科开放基金资助 (No.xkx1412)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61071119), Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (No.LY14F010007), Ningbo Natural Science Foundation (No.2012A610061, No.2012A610016), Zhejiang Information and Communication Engineering Open Foundation of the Most Important Subjects (No.xkx1412)



源利用率和服务质量^[1,2]。该问题是无线通信领域的研究热点,得到了广泛关注。参考文献[3]在资源分配中引入用户速率成比例约束条件,是一种比例公平的容量最大化算法。参考文献[4]假设各用户分配的子载波数和比例与约束条件一致,提出低复杂度的线性功率分配方法,但是牺牲了一定的公平性。参考文献[5]提出一种基于鱼群算法的功率自适应分配算法,实现了容量和公平度的折中。参考文献[6]通过信道效率控制和注水线功率分配模型,兼顾了系统容量和高公平性。上述参考文献在研究资源分配时,都假设基站已知所有的信道状态信息(CSI)。但是,由于信道估计误差以及反馈时延等因素,实际系统中反馈给基站的 CSI 是不完备的^[7]。

目前,基于不完备 CSI 的资源分配问题已取得了一定进展。参考文献[8]针对两种不完备信道模型,提出了遍历容量最大化和中断容量最大化算法,但是未考虑多用户情况。参考文献[9]研究了 OFDMA 系统中的信道误差模型,并利用对偶优化方法解决了总功率约束下的遍历容量最大化问题,通过速率权重体现用户的公平性。参考文献[10]提出一种基于对偶分解的方法,将原问题分解成一系列对偶子问题,从而得到最优解,而用户的公平性用速率要求上限表示。参考文献[11,12]提出了比例公平的容量最大化算法,其中参考文献[11]将资源分配分为速率分配和子载波分配两个阶段,从而得到了次优解,而参考文献[12]利用拉格朗日对偶方法得到了最优解。上述算法在资源优化分配时考虑了用户公平性,但是在实际系统中很难兼顾遍历容量和公平性。CSI 不完备时,速率是不确定的,通过速率权重或速率要求上下限,可能无法达到用户要求的公平性。比例公平算法虽然使公平性接近于 1,但是牺牲了较大的系统容量。

本文提出了一种新的资源分配算法,通过引入公平松弛因子实现系统容量和公平性之间的折中。当公平性要求高时增大公平松弛因子,公平性要求低时减小松弛因子,最终在满足公平性的同时实现系统遍历容量最大化。在对偶优化方法求解过程中,提出同层循环迭代方式,依次搜索各次优拉格朗日算子值,再根据总功率限制调整子载波功率分配。相比传统的内外层循环迭代方式联合搜索最优算子值,计算复杂度明显降低,代价是略微牺牲公平性。仿真结果表明,提出的算法在满足公平性的同时提高了系统性能。

2 系统模型

本文中的资源分配模型是在总功率一定的条件下,使系统遍历容量最大化。假设 OFDMA 系统中共有个 K 用

户, N 个子载波,总的发射功率为 P_t ,第 k 个用户在第 n 个子载波上的分配功率为 $p_{k,n}$ 。由于多用户共享子载波的效率低于信噪比最大的用户独享子载波^[13],设每个子载波只能分配给一个用户。系统的数学模型可以表示为:

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N a_{k,n} r_{k,n} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{k,n} \leq P_t \quad (a)$$

$$\sum_{k=1}^K a_{k,n} = 1, a_{k,n} \in \{0,1\} \quad (b)$$

$$\sum_{n=1}^N a_{k,n} r_{k,n} \geq \theta_k \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N a_{k,n} r_{k,n}, \forall k \quad (c)$$

其中,(a)为系统总功率约束条件;(b)为子载波约束条件, $a_{k,n}$ 为子载波分配系数,如果第 n 个子载波分配给用户 k ,则 $a_{k,n}$ 为 1,否则为 0;(c)为速率约束条件,用户 k 的速率约束系数 $\theta_k = \eta \phi_k / \sum_{k=1}^K \phi_k$,其中 ϕ_k 是预定义的正实数,表示用户 k 的速率比例约束, η 为本文引入的公平松弛因子,取值在 $[0,1]$,因此 $\sum_{k=1}^K \theta_k = \eta \leq 1$ 。

目标函数中, $r_{k,n}$ 表示第 k 个用户在第 n 个子载波上的速率。当 CSI 不完备时,不能考虑瞬时速率,而应考虑遍历速率,此时系统容量为遍历容量。 $r_{k,n}$ 表达式为:

$$r_{k,n} = E\{\ln(1 + p_{k,n} \gamma_{k,n})\} \quad (2)$$

其中, $E\{\cdot\}$ 是在不完备 CSI 情形下求函数的期望, $\gamma_{k,n}$ 为子载波 n 在用户 k 上的信道增益噪声比(CNR)。

在不完备 CSI 情形下, $\gamma_{k,n}$ 可以表示为:

$$\gamma_{k,n} = \frac{|h_{k,n}|^2}{(\Gamma N_0 B / N)} \quad (3)$$

其中, N_0 为噪声功率谱密度, B 为系统总带宽, Γ 是信噪比差额,在 QAM 调制情形下与误码率(BER)的关系为 $\Gamma = -\ln(5BER)/1.5$ 。 $h_{k,n} = \hat{h}_{k,n} + e_{k,n}$ 为子载波 n 在用户 k 上的不完备信道状态信息, $\hat{h}_{k,n}$ 为信道估计值, $e_{k,n}$ 为信道估计误差、反馈时延引起的扰动。

根据参考文献[9],在已知信道估计值条件下的信道状态信息服从正态分布,即 $h_{k,n} | \hat{h}_{k,n} \sim CN(\hat{h}_{k,n}, \sigma_{k,n}^2)$,其中 $\sigma_{k,n}^2$ 是反馈误差方差。在已知 $\hat{\gamma}_{k,n} = |\hat{h}_{k,n}|^2 / (\Gamma N_0 B / N)$ 条件下的 $\gamma_{k,n}$ 服从自由度为 2 的非中心 χ^2 分布,可以用

Nakagami 分布近似,其概率密度为:

$$f(\gamma_{k,n} | \hat{\gamma}_{k,n}) \approx \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \gamma_{k,n}^{\alpha-1} e^{-\beta \gamma_{k,n}} \quad (4)$$

其中, $\alpha = (\hat{\gamma}_{k,n} \rho_{k,n}^{-1} + 1)^2 / (2\hat{\gamma}_{k,n} \rho_{k,n}^{-1} + 1)$, $\beta = \alpha / (\hat{\gamma}_{k,n} + \rho_{k,n})$, $\rho_{k,n} = \sigma_{k,n}^2 / (N_0 B / N)$ 是反馈误差方差与噪声功率比。

为了衡量整个系统在不同条件下用户间的公平性,定义公平性参数 F 如下^[14]:

$$F = \frac{\left(\sum_{k=1}^K R_k / \phi_k \right)^2}{K \sum_{k=1}^K (R_k / \phi_k)^2} \quad (5)$$

其中, $R_k = \sum_{n=1}^N a_{k,n} r_{k,n}$ 为用户 k 的遍历速率。

由式(1)的约束条件(c)可知,当 $\eta=0$ 时不考虑公平性,算法为传统的容量最大化算法;当 $\eta=1$ 时算法为比例公平的容量最大化算法,公平性接近于 1。 η 在 0 和 1 之间时,则兼顾系统容量和公平性。

3 资源分配算法

由于 $a_{k,n}$ 为整形变量,式(1)不属于凸优化模型。因此,将 $a_{k,n}$ 松弛为 $[0,1]$ 范围内的实变量,式(1)的约束条件(a)、(b)

分别转化为 $\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N a_{k,n} p_{k,n} \leq p_t$ 和 $\sum_{k=1}^K a_{k,n} = 1, a_{k,n} \in [0,1]$, 则原问题转化为凸优化问题。为求解其最优解,根据对偶优化理论^[15],可以构造相关的拉格朗日方程如下:

$$L = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N a_{k,n} r_{k,n} + \lambda \left(P_t - \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N a_{k,n} p_{k,n} \right) + \sum_{n=1}^N v_n \left(1 - \sum_{k=1}^K a_{k,n} \right) + \sum_{k=1}^K \mu_k \left(\sum_{n=1}^N a_{k,n} r_{k,n} - \theta_k \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N a_{k,n} r_{k,n} \right) \quad (6)$$

其中, λ, v_n, μ_k 为拉格朗日算子。

3.1 给定算子下的资源分配

由对偶优化理论可知,寻找最优的 $p_{k,n}, a_{k,n}$ 使得 L 最大,就是原问题的目标解。如果算子 λ, v_n, μ_k 固定,则式(6)可以在每个子载波上独立地解决。将 L 对 $p_{k,n}$ 求导,可得:

$$\frac{\partial L}{\partial p_{k,n}} = a_{k,n} (1 + \mu_k - \mu_k \theta_k) \frac{\partial r_{k,n}}{\partial p_{k,n}} - \lambda a_{k,n} \quad (7)$$

由式(2)可知,当 $\alpha_{k,n} \neq 0$ 时,该导数随着 $p_{k,n}$ 的增大而

减小,因此当导数值为 0 时, L 取得最大值,即:

$$E \left\{ \frac{\gamma_{k,n}}{1 + p_{k,n}^* \gamma_{k,n}} \right\} = \frac{\lambda \ln 2}{1 + \mu_k - \mu_k \theta_k} \quad (8)$$

其中, $p_{k,n}^*$ 为最优分配功率。

由于式(8)的左边是一个关于 $p_{k,n}^*$ 的单调递减函数,因此最多只有一个解,即:

$$p_{k,n}^* = \begin{cases} 0, E\{\gamma_{k,n}\} \leq \frac{\lambda \ln 2}{1 + \mu_k - \mu_k \theta_k} \\ E \left\{ \frac{\gamma_{k,n}}{1 + p_{k,n}^* \gamma_{k,n}} \right\} = \frac{\lambda \ln 2}{1 + \mu_k - \mu_k \theta_k}, \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

根据参考文献[9],式(9)中的数学期望可以转换为:

$$E \left\{ \frac{\gamma_{k,n}}{1 + p_{k,n}^* \gamma_{k,n}} \right\} \approx \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^\infty \frac{\gamma_{k,n}^\alpha}{1 + p_{k,n}^* \gamma_{k,n}} e^{-\beta \gamma_{k,n}} d\gamma_{k,n} \\ = \frac{\alpha}{p_{k,n}^*} \left(\frac{\beta}{p_{k,n}^*} \right)^\alpha e^{\frac{\beta}{p_{k,n}^*}} \Gamma \left(-\alpha, \frac{\beta}{p_{k,n}^*} \right) \quad (10)$$

其中, $\Gamma(x,y)$ 为不完全 Gamma 函数。

将 L 对 $a_{k,n}$ 求导,并用 $p_{k,n}^*$ 代替 L 中的 $p_{k,n}$, 可得:

$$\frac{\partial L}{\partial a_{k,n}} = (1 + \mu_k - \mu_k \theta_k) r_{k,n}^* - \lambda p_{k,n}^* - v_n \quad (11)$$

其中,遍历速率 $r_{k,n}^* = E\{\ln(1 + p_{k,n}^* \gamma_{k,n})\}$ 。

考虑到最终每个子载波只能分配给一个用户,由对偶优化理论可知,对于 $\forall n$,利用算子 v_n 调整式(11)的导数值,使得所有用户中只有一个用户 k_n^* 对应的导数值为正数,其他都为负数,而子载波 n 分配给用户 k_n^* 。因此 k_n^* 对应的导数值一定是最大值,其选择与 v_n 无关,即:

$$k_n^* = \arg \max_k \{ (1 + \mu_k - \mu_k \theta_k) r_{k,n}^* - \lambda p_{k,n}^* \} \quad (12)$$

给定 $\lambda, \mu_k(\forall k)$ 下的最优子载波分配和功率分配分别为:

$$a_{k,n}^* = \begin{cases} 1, & k = k_n^* \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

$$p_{k,n}^* = \begin{cases} p_{k,n}^*, & k = k_n^* \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

3.2 算法实现

得到全局最优解的关键是找出最优的算子 λ 和 $\mu_k(\forall k)$ 。参考文献[10,12]算法对每个算子利用次梯度方法迭代更新,算子之间采用内外层循环迭代方式,即每次更新 $\mu_k(\forall k)$ 一小步,都需要循环迭代 λ ,直到收敛,计算复



杂度很高。本文提出了同层循环迭代方式,首先循环迭代 λ 直到满足总功率约束,接着循环迭代 $\mu_k(\forall k)$ 直到满足速率约束,这时原来的总功率约束可能不成立,得到的 λ 和 $\mu_k(\forall k)$ 是次优值,所以再根据总功率限制调整子载波功率分配。同层循环迭代方式略微牺牲了公平性或系统容量,但是计算复杂度明显降低。本算法利用次梯度方法迭代更新 $\mu_k(\forall k)$,一般次梯度方法为:

$$\mu_k^{i+1} = \mu_k^i - \tau_i \left(R_k - \theta_k \sum_{k=1}^K R_k \right) \quad (15)$$

其中, $\tau_i = d/\sqrt{i}$ 是逐渐减小的迭代步长, d 是正常数, i 是迭代步数。

可以看出,次梯度方法的关键是迭代初值和步长的设置。为了加快收敛,本算法采用固定步长和变步长相结合的迭代方式,当某用户速率第一次超过速率约束之前用固定步长,之后用逐渐减小的变步长。另外,对算子 λ 利用二分法迭代更新,避免了迭代初值和步长的设置。

本文提出的资源分配算法具体步骤如下。

(1) 初始化

令 $\mu_k(\forall k)$ 为0,根据式(8)设 $\lambda_{\min} = \min_{k,n} \frac{1}{\ln 2} E \left(\frac{\gamma_{k,n}}{1 + P_l \gamma_{k,n}} \right)$,

$$\lambda_{\max} = \max_{k,n} \frac{1}{\ln 2} E \{ \gamma_{k,n} \}, \underline{\lambda} = \lambda_{\min}, \bar{\lambda} = \lambda_{\max}, \lambda = (\underline{\lambda} + \bar{\lambda})/2$$

对于 $\forall k$,调整标记 $F_k = 0$,第一次超过速率约束标记和对应步数分别为 $V_k = 0, s_k = 0$ 。令迭代步数 $i=0$,总迭代次数 $t=0$,算子收敛误差为正常数 κ 。

(2) 算子 λ 的循环迭代

对于 $\forall k, n$,根据式(9)、式(12)计算 $p_{k,n}^*$ 和 k_n^* ,再根据式(13)、式(14)计算 $a_{k,n}^*$ 和 $p_{k,n}^*$ 。令 $i=i+1, t=t+1, P_t^* = \sum_{k,n} p_{k,n}^*$ 。

如果 $P_t^* \geq P_t$,令 $\underline{\lambda} = \lambda$;否则,令 $\bar{\lambda} = \lambda$ 。如果 $\bar{\lambda} - \underline{\lambda} > \kappa$,则 $\lambda = (\underline{\lambda} + \bar{\lambda})/2$,重复步骤(2);否则,跳转到步骤(3)。

(3) 判断哪些 $\mu_k(\forall k)$ 需要调整

对于 $\forall k$,计算 $R_k^* = \sum_n r_{k,n}^*$,如果 $R_k^* < \theta_k \sum_k R_k^*$,则令 $F_k=1$ 。

如果存在 $F_k=1$,则令 $i=0$,设初值 $\mu_k = -d(R_k^* - \theta_k \sum_k R_k^*)$,

跳转到步骤(4);否则,算法结束。

(4) 算子 $\mu_k(\forall k)$ 的循环迭代

对于 $\forall k, n$,根据式(9)、式(12)计算 $p_{k,n}^*$ 和 k_n^* ,再根据式(13)、式(14)计算 $a_{k,n}^*$ 和 $p_{k,n}^*$ 。令 $i=i+1, t=t+1$ 。对于 $\forall k(F_k=1)$,

如果 $V_k=0$ 且 $R_k^* > \theta_k \sum_k R_k^*$ 则 $V_k=1, s_k=i$, 如果 $V_k=0$ 则 $\mu_k' = \mu_k - d(R_k^* - \theta_k \sum_k R_k^*)$;否则, $\mu_k' = \mu_k - d/\sqrt{i+1-s_k}(R_k^* - \theta_k \sum_k R_k^*)$ 。如果 $\sum_k |\mu_k' - \mu_k| > \kappa$,则对于 $\forall k(F_k=1)$,令 $\mu_k = \mu_k'$,重复步骤(4);否则,跳转到步骤(5)。

(5) 检查 $\mu_k(\forall k)$ 优化后是否存在速率不满足用户

对于 $\forall k(F_k=0)$,如果 $R_k^* < \theta_k \sum_k R_k^*$,则令 $F_k=1$ 。如果有新的 $F_k=1$,则设初值 $\mu_k = -d(R_k^* - \theta_k \sum_k R_k^*)$,跳转到步骤(4);否则,跳转到步骤(6)。

(6) 总功率限制调整子载波功率分配

计算 $P_t^* = \sum_{k,n} p_{k,n}^*$,对于 $\forall k, n$,令 $p_{k,n}^* = P_{k,n}^* P_t / P_t^*$ 。算法到此结束。

3.3 算法复杂度

当 λ 和 $\mu_k(\forall k)$ 给定时,若对于 $\forall k, n$,式(9)寻找零点求解最优分配功率 $p_{k,n}^*$ 的计算量为 I_p ,式(12)中遍历速率 $r_{k,n}^*$ 的计算量为 I_c ,而式(13)和式(14)的计算量可以忽略不计,则计算复杂度为 $O(KN(I_p+I_c))$ 。在本算法步骤(1)中,若对于 $\forall k, n, \lambda_{\min}$ 和 $\lambda_{\max}$ 表达式中期望值的计算量分别为 I_1 和 I_2 ,则步骤(1)的计算量为 $O(KN(I_1+I_2))$;步骤(2)中若 λ 的迭代次数是 I_λ ,则计算量为 $O(I_\lambda KN(I_p+I_c))$;步骤(3)~(5)中若 $\mu_k(\forall k)$ 的迭代次数是 I_μ ,则计算量为 $O(I_\mu KN(I_p+I_c))$;步骤(6)的计算量可以忽略不计,算法总的计算量为 $O(KN(I_1+I_2)) + O((I_\lambda+I_\mu)KN(I_p+I_c))$,前一项相对较小可以忽略不计,因此算法复杂度为 $O((I_\lambda+I_\mu)KN(I_p+I_c))$ 。参考文献[10,12]对每个算子利用次梯度方法迭代更新,而算子之间采用内外层循环迭代方式,若 λ 和 $\mu_k(\forall k)$ 的平均迭代次数分别是 I_λ' 和 I_μ' ,则算法复杂度为 $O((I_\lambda'+I_\mu')KN(I_p+I_c))$ 。本算法中 λ 通过二分法快速搜索,使得 $I_\lambda < I_\lambda'$; $\mu_k(\forall k)$ 采用固定步长和变步长相结合,且仅对部分算子迭代,使得 $I_\mu < I_\mu'$ 。本算法的计算复杂度明显降低。

4 仿真与分析

信道模型为6径频率选择性瑞利衰落信道^[9]。系统总带宽为1 MHz,总功率为1 W,子载波数为128,平均信噪比为20 dB,设各个子载波上的反馈误差方差与噪声功率比都相同且为5 dB,误码率为 10^{-4} 。用户数 K 变化范围是

2~12, 用户速率比例约束 ϕ_k 依次为 1、1、2、1、1、2、1、1、1、1、2、1, 公平松弛因子 η 为 0~1。不失一般性, 蒙特卡罗仿真次数为 100。

4.1 系统遍历容量和公平性

图 1 和图 2 分别是系统遍历容量和公平性随公平松弛因子的变化情况。可以看出, η 为 0 时, 系统遍历容量最大而公平性最低, 表明算法为传统的容量最大化算法。随着 η 的增大, 系统遍历容量逐渐降低, 而公平性逐渐增大, 表明算法优化目标逐渐偏向公平性。当 η 为 1 时, 系统遍历容量最小而公平性接近于 1, 此时算法为比例公平的容量最大化算法。用户数 $K=8$ 时, 系统遍历容量相对较大, 表明了多用户分集的效果; 而公平性相对较低, 说明多用户之间更难保证公平性。实际系统中根据优化目标可以灵活地调整公平松弛因子, 兼顾系统容量和公平性。

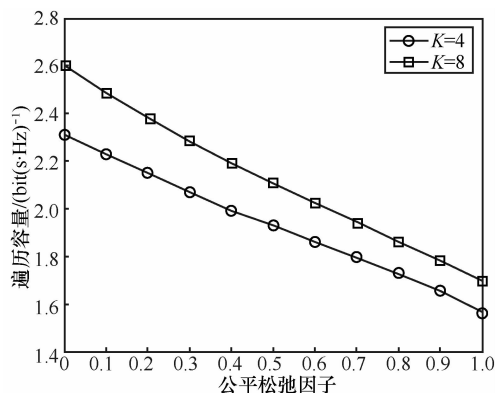


图 1 系统遍历容量随公平松弛因子的变化

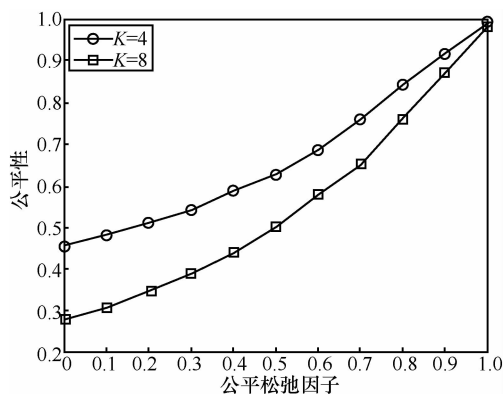


图 2 用户公平性随公平松弛因子的变化

图 3 和图 4 分别比较了各算法的系统遍历容量和公平性随用户数的变化情况。为了公正地比较, 参考文献[9]和参考文献[12]的速率权重、比例公平因子设置, 与本算法的用户速率比例约束 ϕ_k 一致, 而参考文献[10]的各用户归

一化速率要求上限设为 $1.5\phi_k / \sum_{k=1}^K \phi_k$ 。从图 3、图 4 中可以看出, 本算法公平松弛因子 η 为 0 时, 系统遍历容量最大, 多用户分集效果最好; η 为 1 时, 系统遍历容量最小, 且用户数较大时容量出现下降, 而公平性接近于 1。参考文献[9]算法的公平性比本算法 η 为 0 时略低, 说明速率权重不能有效保证用户间公平性; 而系统遍历容量出现较大下降, 表明其综合性能最差。参考文献[10]算法的系统遍历容量和公平性与本算法 η 为 0.5 时比较接近, 当用户数较大时, 容量和公平性都优于本算法, 因为参考文献[10]算法按照速率要求上限进行资源分配, 优先保证了信道质量较好的用户, 信道质量较好的多个用户之间的公平性抬高了整体公平性, 但是该算法牺牲了信道质量最差的用户。参考文献[12]算法的公平性近似于 1, 比本算法 η 为 1 时略高, 而系统遍历容量与本算法基本一致, 表明本算法在降低计算复杂度时, 仅略微牺牲了公平性。

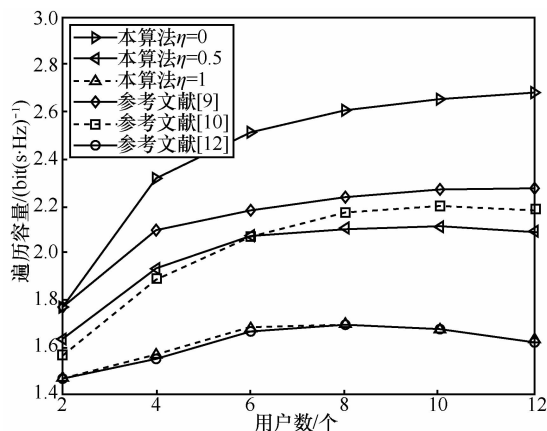


图 3 各算法的系统遍历容量随用户数的变化

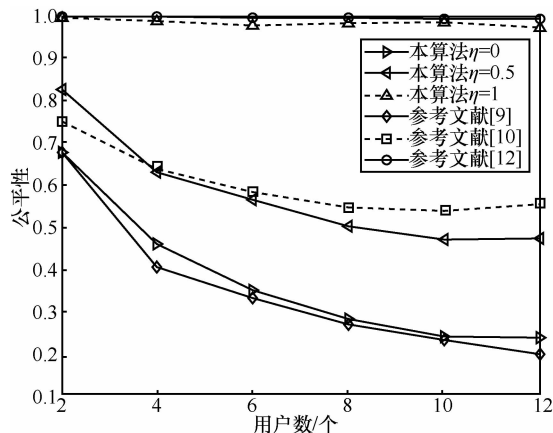


图 4 各算法的公平性随用户数的变化



4.2 计算复杂度

图5和图6是 $K=4, \eta=1$ 时,在一次蒙特卡罗仿真中,两种循环迭代算法的资源分配收敛过程。可以看出,在不考虑用户速率限制,即仅优化算子 λ 时,本算法的循环迭代次数约为9,而参考文献[10,12]算法的迭代次数约为16,说明与次梯度方法相比,二分法虽然初期波动大,但收敛更快。此时用户2和用户3的遍历速率是0,表明需要优化 $\mu_k(\forall k)$ 调整用户间速率分配。本算法在循环迭代 $\mu_k(\forall k)$ 时,各用户速率分配快速收敛,但是总功率超出限制,所以再根据总功率限制调整子载波功率分配。如采用参考文献[10,12]算法的内外层循环迭代方式,从图6可以看出,由于算子 λ 嵌套在内层,每次迭代更新 $\mu_k(\forall k)$ 一小步,都需要重新循环迭代 λ 次直到收敛,总迭代次数约为110。本算法的总迭代次数约为20,计算复杂度明显降低。

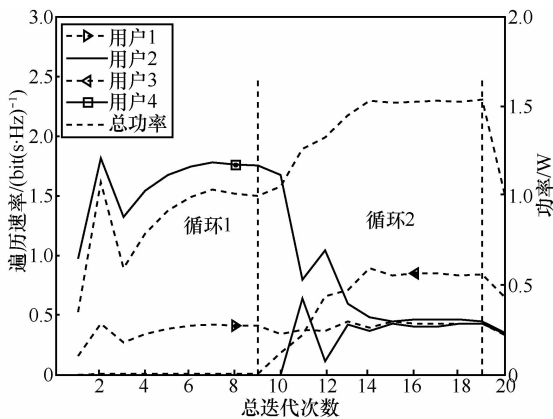


图5 本算法的同层循环迭代收敛过程

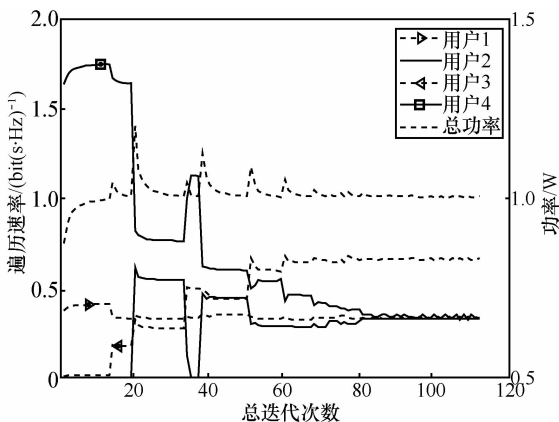


图6 参考文献[10,12]算法的内外层循环迭代收敛过程

5 结束语

本文实现了公平性可调的遍历容量最大化资源分配算法,实际系统中根据优化目标可以灵活地调整公平松弛因子,兼顾系统遍历容量和公平性。在对偶优化求解过程中提出了

同层循环迭代方式,并且两个拉格朗日算子分别用二分法和改进的次梯度方法迭代更新。虽然搜索到的算子是次优值,但是在根据总功率限制调整子载波功率分配后,与内外层循环迭代方式相比,计算复杂度明显降低,而容量基本一致,仅略微牺牲了公平性。仿真结果验证了本算法的有效性。

参考文献

- Jang J, Lee K B. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems. *IEEE Journal on Selected Areas Communications*, 2003, 21(2): 171~178
- Liu Y F, Dai Y H. On the complexity of joint subcarrier and power allocation for multi-user OFDMA systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(3): 583~596
- Shen Z K, Andrews J G, Evans B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(6): 2726~2737
- 杜娜, 顾品标, 闵锐. 一种低复杂度基于公平性的 MIMO-OFDMA 资源分配方案. *电子与信息学报*, 2010, 32(4): 770~774
- Du N, Gu P B, Min R. A low complexity resource allocation scheme with proportional fairness for MIMO-OFDMA system. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(4): 770~774
- 汪照, 李有明, 陈斌. 基于鱼群算法的 OFDMA 自适应资源分配. *物理学报*, 2013(12)
- Wang Z, Li Y M, Chen B. OFDMA adaptive resource allocation based on fish swarm algorithm. *Acta Physica Sinica*, 2013(12)
- 吴耀辉, 李有明, 邵鹏飞. 一种新型的 OFDMA 比例公平资源分配算法. *电信科学*, 2014, 30(6): 79~85
- Wu Y H, Li Y M, Shao P F. A novel resource allocation for OFDMA system with proportional fairness. *Telecommunications Science*, 2014, 30(6): 79~85
- Kuhne A, Klein A. Throughput analysis of multi-user OFDMA systems using imperfect CQI feedback and diversity techniques. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(8): 1440~1450
- Yao Y, Giannakis G B. Rate-maximizing power allocation in OFDM based on partial channel knowledge. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(3): 1073~1083
- Wong I C, Evans B L. Optimal resource allocation in the OFDMA downlink with imperfect channel knowledge. *IEEE Transaction on Communications*, 2009, 57(1): 232~241
- Awad M K, Mahinthan V, Mehrjoo M. A dual-decomposition-based resource allocation for OFDMA networks with imperfect CSI. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(5): 2394~2403
- George M, Koilpillai R D. Fairness-based resource allocation in OFDMA downlink with imperfect CSIT. 2013 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing, Hangzhou, China, 2013

(2015011~7 接排在 2015041~6 后)