



一种新型的 OFDMA 比例公平资源分配算法^{*}

吴耀辉^{1,2}, 李有明¹, 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:针对已有算法对系统容量和高公平性兼顾较差的情况,提出了一种满足公平性的系统容量最大化资源分配算法。在子载波分配中通过建立信道效率控制模型,给当前用户分配信道效率最高的子载波,将信道增益低于门限值的子载波重新分配,改进了最大化最小(max-min)用户速率模型。在功率分配中将系统模型转化成用注水线表示的数学模型,首先求解各用户的注水线,再求解各用户的功率分配,保证了用户间比例公平性。两种信噪比情形下的仿真和分析表明,整个方案计算复杂度稍低,系统容量获得较大提升,并且用户间的公平性始终为 1。

关键词:正交频分复用多址接入;资源分配;比例公平;容量

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.06.012

A Novel Resource Allocation Algorithm for OFDMA System with Proportional Fairness

Wu Yaohui^{1,2}, Li Youming¹, 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 algorithms couldn't balance system capacity and high fairness well, so a multi-user rate adaptive allocation algorithm was proposed to maximize the capacity of OFDMA system under proportional fairness. Improved maximize the minimum(max-min) user rate model was proposed, the current user was allocated the highest efficiency subcarrier according to the channel efficiency control parameter. If some allocated subcarrier's channel gain was lower than the threshold value, which would be reallocated to another user whose channel gain was highest. Power allocation model was converted into expression of water-filling line; every user's power allocation was resolved according to the resolved water-filling line. Simulation results and analysis show that the proposed scheme can achieve higher capacity and perfect fairness in a variety of SNR cases, while requiring slightly less computation.

Key words: OFDMA, resource allocation, proportional fairness, capacity

1 引言

正交频分复用多址接入(orthogonal frequency division multiple access, OFDMA)技术是一种基于 OFDM 的多用户

接入技术,它具有传输速率高、资源分配灵活、能同时支持多个用户等特点,具有广泛的应用前景^[1,2]。OFDMA 系统的资源分配是一种子载波、功率、比特的联合优化问题,它根据各用户需求以及信道条件,动态地把子信道分配给适合

^{*} 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)



的用户,以实现系统资源的优化利用。

目前,对 OFDMA 系统的资源分配问题的研究已经有了若干成果。参考文献[2]提出一种子载波和功率分配算法,以总功率和误码率约束下最大化系统容量为目标,但是不能保证用户间的公平性。参考文献[3]考虑了公平性问题,以满足用户间最小速率要求进行优化分配,使得每个用户获得近似相等的速率。然而在无线通信系统中,不同用户对速率的要求通常是不同的,不同的信道状态可实现的最佳速率配置也不相同。在资源分配中,通过引入用户速率成比例约束条件,根据各用户的速率需求和实际信道状态,动态地调整比例约束因子,可以更好地反映用户间比例公平性。参考文献[4]是一种比例公平的容量最大化算法,在信噪比较高的无线环境下具有较高的系统容量和公平性,但是在信噪比变差时系统性能急剧下降。参考文献[5,6]提出了低复杂度的线性功率分配方法,然而其假设各用户分配的子载波数与比例约束条件一致,降低了用户间公平性。参考文献[7,8]利用贪婪功率分配算法,改善了用户间公平性,但是系统容量提升不明显。参考文献[9,10]基于鱼群算法,根据兼顾系统容量与公平性的适应度函数,通过全局搜索实现用户间的资源分配,但是不能保证很高的公平性。参考文献[11,12]提出了基于公平度门限的容量最大化算法,但是在公平性接近 1 时容量较低且计算复杂度很高。上述算法实现了系统容量和公平性之间的折中,但是不能保证很高的公平性,或者在公平性很高时其他性能指标急剧下降。然而,高公平性对于不同等级的用户是非常有用的,它允许不同等级的用户具有不同的付费机制^[10]。

针对上述问题,本文提出了一种新型的比例公平资源分配算法。在子载波分配中,通过建立信道效率控制模型,给当前用户分配信道效率最高的子载波,将信道增益低于门限值的子载波重新分配,更能提高系统容量。在功率分配中,通过将用户速率约束之比转化成各用户注水线之间的等式约束,首先求解各用户的注水线,再求解各用户的功率分配,保证了用户间比例公平性。仿真结果表明系统容量得到了较大提升,并且用户间公平性始终为 1。

2 系统模型

本文中 OFDMA 系统采用的资源分配模型是在系统总功率一定的条件下,使得系统容量最大化,同时满足用户速率成比例的约束条件。假设 OFDMA 系统中共有 K 个用户, N 个子载波,系统的总带宽为 B ,总的发射功率为

P_{total} ,第 k 个用户在第 n 个子载波上的信道状态信息和分配功率分别为 $h_{k,n}$ 和 $p_{k,n}$ 。假设每个子载波只能分配给一个用户,因为子载波共享并不能带来性能增益^[13]。系统的数学模型可以表示为:

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \frac{\rho_{k,n} B}{N} \ln(1 + p_{k,n} H_{k,n}) \quad (1)$$

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

$$p_{k,n} \geq 0 \quad (b)$$

$$\rho_{k,n} = \{0, 1\} \quad (c)$$

$$\sum_{k=1}^K \rho_{k,n} = 1 \quad (d)$$

$$R_1 : R_2 : \dots : R_K = \theta_1 : \theta_2 : \dots : \theta_K \quad (e)$$

其中, $\rho_{k,n}$ 表示子载波分配指示, $H_{k,n} = |h_{k,n}|^2 / (N_0 \frac{B}{N} \Gamma)$ 表

示信道信噪比, Γ 是信噪比差值^[14],在 QAM 调制情形下与误比特率(BER)的关系为 $\Gamma = -\ln(5 \text{ BER})/1.5$ 。参数集 $\{\theta_1 : \theta_2 : \dots : \theta_K\}$ 是一组预定义的比例常数,在每次资源分配前根据各用户的速率需求和实际信道状态动态调整,其中 θ_k 是正的实数,表示用户速率成比例约束。 R_k 是第 k 个用户的速率,可表示成:

$$R_k = \sum_{n=1}^N \frac{\rho_{k,n} B}{N} \ln(1 + p_{k,n} H_{k,n}) \quad (2)$$

为了衡量整个系统的用户间比例公平性,定义公平性参数 F 如下^[15]:

$$F = \frac{\left(\sum_{k=1}^K R_k / \theta_k \right)^2}{K \sum_{k=1}^K (R_k / \theta_k)^2} \quad (3)$$

可以看出, $F \leq 1$, F 越接近 1 说明系统公平性越好, $F=1$ 表示公平性得到最大保证。

该系统模型是一个带非线性约束条件的联合优化问题,随着变量和约束条件的引入,最优算法的复杂度呈指数增加。为了降低计算复杂度,资源分配算法一般分两步进行,分别是子载波分配和功率分配。

3 子载波分配

在子载波分配中,最大化最小(max-min)原则得到了广泛应用^[4-8]。其假设功率在每个子载波上平均分配,分配准则是最大化最小用户速率,即根据 $k = \arg \min_{k \in \Omega_k} (R_k / \theta_k)$,选

择速率与约束之比最小的用户,再根据 $n=\arg \min_{n \in \Omega_k} (H_{k,n})$,给当前用户 k 分配信道增益最高的子载波。max-min 原则兼顾了用户公平性,但是未充分考虑子载波利用率。子载波分配过程见表 1,假设两个用户的速率约束之比是 1:1,按照 max-min 分配准则,子载波 6 分配给了用户 1,但是在子载波利用率上,最佳选择是用户 2。

本文通过建立信道效率控制模型,如式(4)所示,给当前用户 k 分配信道效率最高的子载波。

$$n = \arg \max_{n \in \Omega_k} \Phi_{k,n,\alpha} = \arg \max_{n \in \Omega_k} \left(\frac{(1-\alpha)H_{k,n}}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N H_{k,j}} + \frac{\alpha H_{k,n}}{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K H_{i,n}} \right) \quad (4)$$

其中, Ω_k 表示子载波集合。 α 表示信道效率控制参数(简称效率因子),取值为 0~1。 $\Phi_{k,n,\alpha}$ 表示用户 k 在子载波 n 上效率因子为 α 时的信道效率。 $\alpha=0$ 表示给当前用户分配信道增益最高的子载波,即现有的 max-min 原则,保证了当前用户的最优选择; $\alpha=1$ 表示给当前用户分配信道增益相对其他用户最高的子载波,保证了子载波的更高利用率。 α 为 0~1 时,兼顾了用户最优选择和子载波利用率。

基于信道效率控制模型的子载波算法具体步骤如下。

步骤 1 初始化。令每个用户速率 $R_k=0$,子载波分配指示 $\rho_{k,n}=1$,子载波集合 $\Omega_N=\{1,2,\dots,N\}$,用户集合 $\Omega_k=\{1,2,\dots,K\}$,平均功率 $p=P_{\text{total}}/N$ 。

步骤 2 给每个用户分配信道效率最好的子载波。对每个用户 $k=1:K$,找出满足式(4)的子载波 n 并分配给用户 k ,然后将该子载波从子载波集中删除,并更新用户 k 的速率,令: $\Omega_N=\Omega_N \setminus \{n\}$, $\rho_{k,n}=1$, $R_k=\frac{B}{N} \ln(1+pH_{k,n})$ 。

步骤 3 如果子载波分配完毕,则跳转到步骤 5;否则将未被分配的子载波继续分配给用户,即在所有的 $i(0 \leq i \leq K)$ 中,找出满足 $\frac{R_k}{\theta_k} \leq \frac{R_i}{\theta_i}$ 的用户 k 。针对用户 k ,找出满足式(4)的子载波 n 。

步骤 4 将子载波 n 分配给用户 k ,并将子载波 n 从子载波集中删除,令: $\Omega_N=\Omega_N \setminus \{n\}$, $\rho_{k,n}=1$, $R_k=R_k+\frac{B}{N} \ln(1+pH_{k,n})$,并返回执行步骤 3。

步骤 5 子载波调整,将信道增益低于门限值的子载波重新分配给合适的用户。对每个子载波 $n=1:N$,如果 $\rho_{k,n}=1$ 且 $H_{k,n} < H_{\text{th}}$,其中 H_{th} 表示设定的信道增益门限,则令 $\rho_{k,n}=0$;根据 $k=\arg \max_{k \in \Omega_k} (H_{k,n})$,找出子载波 n 上信道增益最大的用户 k ,令 $\rho_{k,n}=1$ 。子载波算法到此结束。

按照上述子载波算法,效率因子 α 分别为 0、1、0.8 时的子载波分配过程如表 1 所示。与 $\alpha=0$ 时的 max-min 原则相比, $\alpha=1$ 时,子载波 6 分配给了用户 2,信道效率得到了提升;在 $\alpha=0.8$ 时,子载波 7 分配给了用户 1,信道效率进一步得到了提升。可以看出,利用信道效率控制模型,改变效率因子取值,可以控制子载波的分配过程,得到不同的信道效率。

4 功率分配

子载波分配过程中,为了降低计算复杂度,假设功率平均分配。但是,由注水原理^[2]可知,根据子载波的信道增益动态分配功率,增益高的多分,增益低的少分甚至没有分,可以明显提高系统容量。所以,在第一步子载波分配后,需要进行第二步功率优化分配。由于子载波分配已确定,式(1)所示的系统模型中的约束条件(c)和(d)已满足,则功率分配模型可以简化为如式(5)所示。

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{n \in D_k} \frac{B}{N} \ln(1+p_{k,n}H_{k,n}) \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \sum_{k=1}^K \sum_{n \in D_k} p_{k,n} \leq P_{\text{total}} \quad (a)$$

$$p_{k,n} \geq 0 \quad (b)$$

$$R_1:R_2:\dots:R_K = \theta_1:\theta_2:\dots:\theta_K \quad (c)$$

其中, D_k 表示第 k 个用户分配到的子载波集。

4.1 传统的比例公平功率分配

传统的比例公平功率分配利用拉格朗日方程,根据用

表 1 子载波分配过程

	载波 1	载波 2	载波 3	载波 4	载波 5	载波 6	载波 7	载波 8
用户 1	694	802 ^{③(4)}	571 ^{4①(1)}	201 ^{6⑦(6)}	18	26 ⁸	179 ⁽⁸⁾	503
用户 2	315 ^{2⑥(5)}	163	50	41	107 ^{7②(2)}	97 ^{③(3)}	116 ^{5⑤}	228 ^{3⑧(7)}

注: i 、 $\textcircled{i}$ 、 (i) 分别表示效率因子为 0、1、0.8 时的子载波分配顺序。



户速率成比例约束条件, 得出各用户总功率之间的关系, 如式(6)和式(7)所示^[4]:

$$\frac{N_1}{\theta_1 N} (\text{lb}(1 + H_{1,1} \frac{P_{1,\text{tot}} - V_1}{N_1}) + \text{lb} W_1) = \frac{N_k}{\theta_k N} (\text{lb}(1 + H_{k,1} \frac{P_{k,\text{tot}} - V_k}{N_k}) + \text{lb} W_k) \quad (6)$$

$$V_k = \sum_{n \in D_k} (\frac{1}{H_{k,1}} - \frac{1}{H_{k,n}}) \quad (7)$$

其中, N_k 、 $P_{k,\text{tot}}$ 和 V_k 分别表示用户 k 的子载波数、功率和信道增益总差值, $H_{k,1} \leq H_{k,2} \leq \dots \leq H_{k,n}$, $n \in D_k$,

$$W_k = \left(\prod_{n=2}^{N_k} H_{k,n} / H_{k,1} \right)^{1/N_k}.$$

接着对式(6)做了两个近似处理。

- 令 $V_k=0$, 假设每个用户分配到的信道增益很高且差异很小, 与 $P_{k,\text{tot}}$ 相比, V_k 可以忽略不计。
- 删除 $\log$ 函数中的分量 1, 假设功率分配比较充足且信道增益很高, $H_{k,1} P_{k,\text{tot}} / N_k \gg 1$ 。

此时式(6)简化为:

$$P_{k,\text{tot}} = c_k (P_{1,\text{tot}})^{d_k} \quad (8)$$

$$\text{其中, } c_k = \left(\frac{H_{1,1} W_1}{N_1} \right)^{\frac{N_1 \theta_k}{N_k \theta_1}} / \left(\frac{H_{k,1} W_k}{N_k} \right), d_k = \frac{N_1 \theta_k}{N_k \theta_1}.$$

由式(8)和式(5)的约束条件(a)可得:

$$\sum_{k=1}^K c_k (P_{1,\text{tot}})^{d_k} - P_{\text{total}} = 0 \quad (9)$$

由式(9)和式(8)可求解各用户的功率, 接着由式(10)可求解最终的功率分配。

$$P_{k,n} = \frac{P_{k,\text{tot}} - V_k}{N_k} + \left(\frac{1}{H_{k,1}} - \frac{1}{H_{k,n}} \right) \quad (10)$$

传统功率分配算法较好地兼顾了系统容量和公平性, 在信噪比高时有较好的公平性。但是在信噪比变差时, 由于算法中的两个近似处理, 公平性变差。

4.2 本文功率分配

本文通过将如式(5)所示的功率分配模型转化成用注水线表示的数学模型, 先求解各用户的注水线, 再求解各用户的功率分配, 以避免传统算法中的近似处理。

根据注水原理, 每个用户的注水线与功率分量存在对应关系, 即:

$$P_{k,n} + \frac{1}{H_{k,n}} = \lambda_k \quad (11)$$

其中, λ_k 是第 k 个用户的注水线。

如果各用户注水线已知, 则根据式(11)进行功率分配, 可以实现系统容量最大化。所以式(5)中的目标函数可以转化如式(12)所示, 即未知的功率分量用注水线表示。

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{n \in D_k} \frac{B}{N} \text{lb}(\lambda_k H_{k,n}) \quad (12)$$

如果根据式(12)调整 λ_k , 则可以进一步最大化系统容量。但是考虑式(5)的约束条件(c), 即用户速率存在比例约束, 而各用户速率可以转化成 λ_k 表示, 如式(13)所示。所以, 实际上 λ_k 已经可以直接求解, 而无法调整了, 式(12)的最大化目标自然得到满足。

$$R_k = \sum_{n \in D_k} \frac{B}{N} \text{lb}(\lambda_k H_{k,n}) = \frac{B}{N} (N_k \text{lb} \lambda_k + \sum_{n \in D_k} \text{lb} H_{k,n}) \quad (13)$$

结合式(5)中的约束条件(c)可得:

$$\frac{R_k}{R_1} = \frac{\theta_k}{\theta_1} = \frac{N_k \text{lb} \lambda_k + \sum_{n \in D_k} \text{lb} H_{k,n}}{N_1 \text{lb} \lambda_1 + \sum_{n \in D_1} \text{lb} H_{1,n}} \quad (14)$$

由式(14)直接求解, 即可得:

$$\lambda_k = c'_k (\lambda_1)^{d_k} \quad (15)$$

$$\text{其中, } c'_k = 2^{\frac{Y_1 \theta_k - Y_k \theta_1}{N_k \theta_1}}, d_k = \frac{N_1 \theta_k}{N_k \theta_1}, Y_k = \sum_{n \in D_k} \text{lb} H_{k,n}.$$

结合式(5)中的约束条件(a)可得:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n \in D_k} (\lambda_k - \frac{1}{H_{k,n}}) = \sum_{k=1}^K N_k \lambda_k - G_{\text{const}} = P_{\text{total}} \quad (16)$$

其中, $G_{\text{const}} = \sum_{k=1}^K \sum_{n \in D_k} \frac{1}{H_{k,n}}$ 是一个常数, 因子载波已分配。

由式(15)和式(16), 即可得:

$$\sum_{k=1}^K N_k c'_k (\lambda_1)^{d_k} - (P_{\text{total}} + G_{\text{const}}) = 0 \quad (17)$$

式(15)和式(17)是本文推导的用注水线表示的数学模型。通过牛顿法^[4]求解式(17)的零点得到注水线 λ_1 , 再根据式(15)求解其他用户的注水线, 最后由式(11)得到各用户的功率分配。

如式(5)中的约束条件(b)所示, 子载波分配功率不能小于 0。由式(11)可知, 对于用户 k , 如果 $\lambda_k < 1/H_{k,1}$, 说明信道增益 $H_{k,1}$ 太低, 在其对应的子载波上分配功率是一种浪费。这时需要关闭该子载波, 重新进行功率分配。这个与传

统算法类似,如式(10)所示,如果 $P_{k,\text{tot}} < V_k$,需要关闭某个子载波并重新进行功率分配。由于本文在子载波分配中,将信道增益低于门限值的子载波重新分配,最大程度地避免了功率重新分配,既提高了子载波利用率,又节省了功率分配运算时间。

由式(3)和式(14)可知,本算法的用户速率与预先设定的比例完全一致,公平性始终为 1。与传统的比例公平功率分配算法相比,本文将用户速率约束之比转化成各用户注水线之间的等式约束,并且用牛顿法求解,保证了用户间比例公平性。

5 仿真结果及分析

仿真信道采用 6 径频率选择性瑞利衰落信道,系统总带宽为 1 MHz,总发送功率为 1 W,子载波数为 128,最大多普勒频移为 30 Hz,时延拓展为 5 μs ,误比特率为 10^{-5} ,通过改变噪声功率谱密度得到不同的平均信噪比 SNR,设信道增益门限为 $H_{\text{th}} = \text{SNR}/20$ 。下面从系统容量、公平性、计算复杂度 3 方面描述本算法性能。

5.1 系统容量

图 1、图 2 是在两种信噪比情形下,使用本文功率分配算法,系统容量随效率因子的变化情况,图中“ $\alpha=0$,门限无”即传统的 max-min 子载波分配算法。可以看出, α 取值在 0~0.8 时,容量随着 α 的增大而提高,在 0.8~1 时略有下降,说明分配过程中以提高子载波利用率为主兼顾用户优先选择,更能提高系统容量。本算法在效率因子为 0.8 时系统容量最大,表 1 情形与之相符。用户数 $K=4$ 时,容量变化曲线相对陡峭,说明效率因子在用户数较少时容量提升更明显。

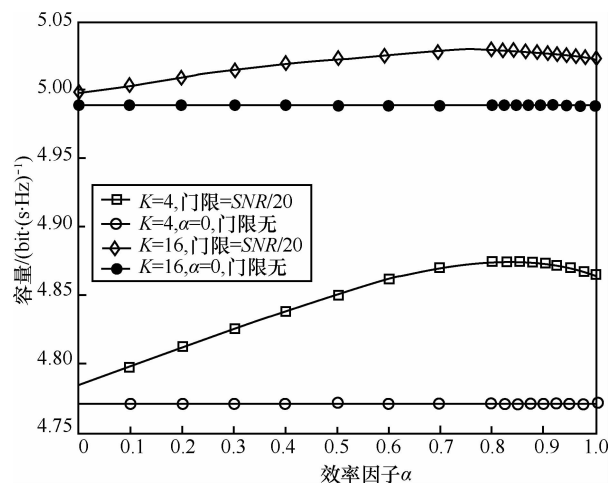


图 1 SNR=30 dB 时,系统容量随效率因子的变化

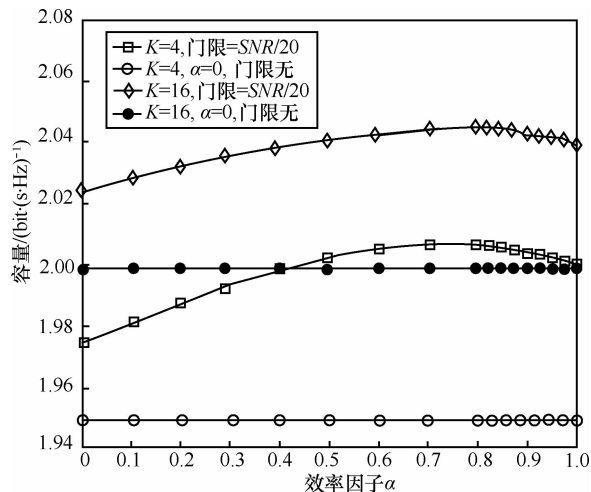


图 2 SNR=15 dB 时,系统容量随效率因子的变化

$\alpha=0$ 时本算法的容量比 max-min 算法更大,是因为将信道增益低于门限值 $\text{SNR}/20$ 的子载波重新分配,进一步提高了利用率。

图 3、图 4 给出了两种信噪比情形下,本算法与其他算法系统容量的比较。从图中可以看出,当 $\text{SNR}=30$ dB 时,本算法的系统容量比参考文献[4]算法提升约 4%,与参考文献[10]算法基本相当,比参考文献[12]算法公平性门限为 0.999 时提升约 7%。当 $\text{SNR}=15$ dB 时,本算法的系统容量比参考文献[4]、参考文献[10]和参考文献[12]的算法各提升约 8%、2.5% 和 3.5%。说明信噪比不高时,参考文献[4]功率分配中的近似处理降低了系统容量,参考文献[10]通过鱼群算法提升的系统容量有限,参考文献[12]为提升公平性牺牲的系统容量相对减少,而本算法始终保持相对较高的系统容量。

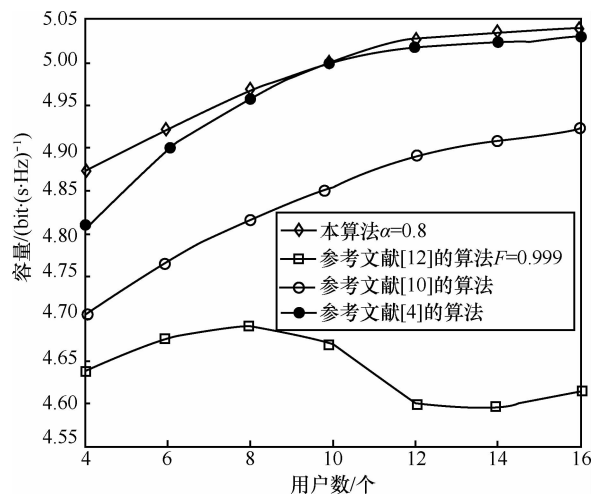


图 3 SNR=30 dB 时,本算法与其他算法的系统容量

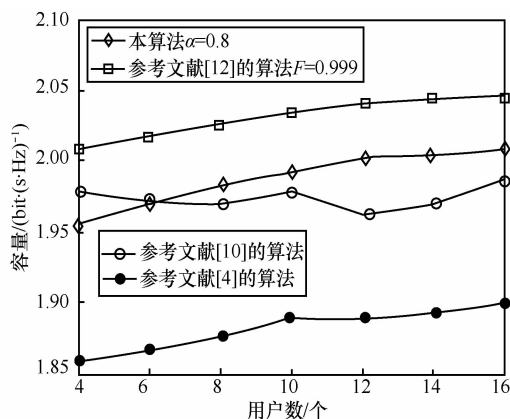


图4 SNR=15 dB时,本算法与其他算法的系统容量

5.2 公平性

图5、图6给出了两种信噪比情形下,本算法与其他算法公平性的比较。从图中可以看出,当SNR=30 dB时,参考文献[4]的算法能获得很高的公平性,接近于1;参考文献[12]算法公平性门限为0.999时,随着用户数的增多,公平性逐渐下降,这是因为子载波在多用户之间重新分配

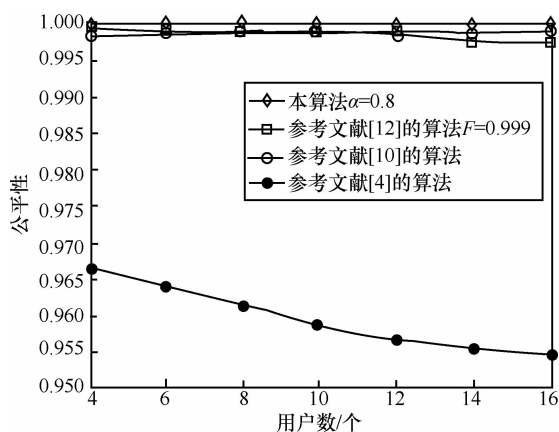


图5 SNR=30 dB时,本算法与其他算法的公平性

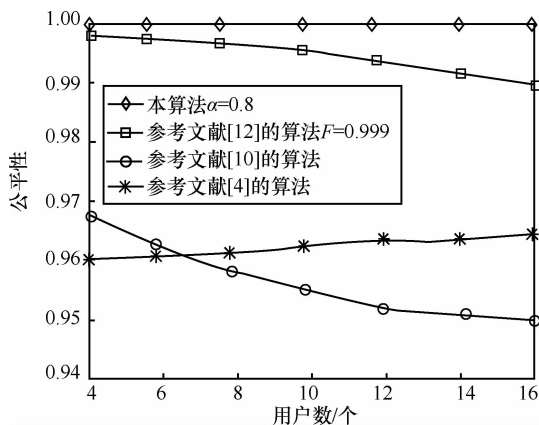


图6 SNR=15 dB时,本算法与其他算法的公平性

引起了乒乓效应^[12]。当SNR=15 dB时,参考文献[4]算法的公平性在0.96~0.965,说明功率分配中的近似处理降低了用户间公平性;参考文献[12]算法的公平性随着用户数的增多出现了较大的下降,说明信噪比不高时乒乓效应更明显。在两种信噪比情形下,参考文献[10]算法的公平性在0.95~0.97,相对较低,这是因为该算法通过牺牲一定的公平性以提升系统容量;而本算法的公平性始终为1,这是因为在功率分配中,将用户速率约束之比转化成各用户注水线之间的等式约束,没有做任何近似处理,保证了用户间公平性。

图7比较了SNR=15 dB时各算法的用户归一化容量与比例公平约束的关系,其中用户数K=16,预先设定的速率约束之比为1:1:2:1:4:2:1:1:2:4:2:1:1:1:2:1。从图中可以看出,参考文献[4]和参考文献[10]的算法获得的用户归一化容量与速率约束之比有较大差别,参考文献[12]与速率约束之比略有不同,而本算法则完全一致,这个结果与图6公平性情形相符。

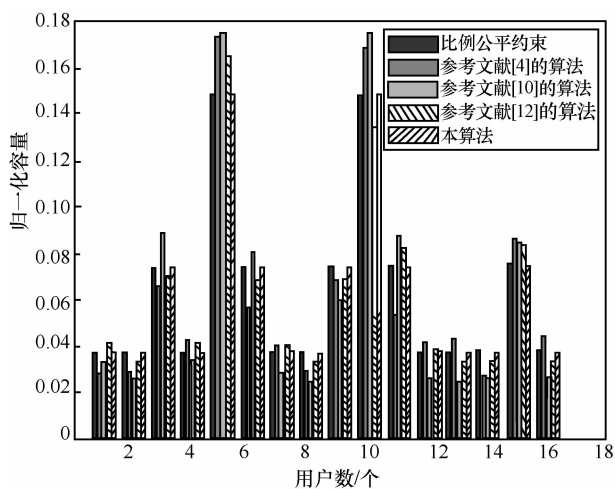


图7 SNR=15 dB时,各算法的用户归一化容量

5.3 计算复杂度

与参考文献[4]和参考文献[10]算法一样,本算法分为子载波分配和功率分配两个过程。在子载波分配时,前两种算法都采用max-min原则,而本算法的流程与max-min原则基本相同,所以计算复杂度都为 $O(KN \lg N)$ 。在功率分配时,本算法与参考文献[4]的求解模式基本相同,计算复杂度都为 $O(nK)$, $n \approx 9$,但是本算法通过子载波调整最大程度地避免了重新功率分配,实际复杂度更低;参考文献[10]根据兼顾系统容量和公平性的适应度函数,通过全局搜索实现功率分配,计算复杂度为 $O(kN)$ 。参考文献[12]

通过将速率与约束之比最大用户的信道增益最小的子载波重新分配,逐步提升用户间公平性,当公平性门限接近1时,计算复杂度为 $o(kN^2)$ 。

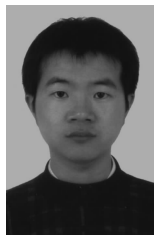
6 结束语

本文提供了一种新的比例公平资源分配算法。在子载波分配中,通过建立信道效率控制模型,效率因子取值在0.8时,系统容量得到了最大提升;根据系统的平均信噪比设置信道增益门限,将信道增益低于门限值的子载波重新分配,系统容量得到了进一步提升,并且最大程度地避免了功率分配中由于信道增益过低引起的重复运算。在功率分配中,通过将用户速率约束之比转化成各用户注水线之间的等式约束,避免了传统功率分配中的近似处理,保证了用户间比例公平性。两种信噪比情形下的仿真和分析表明,提出的方案计算复杂度稍低,系统容量获得较大提升,并且公平性始终为1。

参考文献

- 1 Zhu H L. Radio resource allocation for OFDMA systems in high speed environments. *IEEE Journal on Selected Areas Communications*, 2012, 30(4): 748~759
- 2 Jang J, Lee K B. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems. *IEEE Journal on Selected Areas Communications*, 2003, 21(2): 171~178
- 3 Rhee W, Cioffi J M. Increasing in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation. *Proceedings of IEEE International Vehicular Technology Conference*, Tokyo, Japan, 2000: 1085~1089
- 4 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
- 5 Wong I C, Evans B L. Optimal downlink OFDMA subcarrier, rate, and power allocation with linear complexity to maximize ergodic weighted-sum rates. *Proceedings of Global Telecommunications Conference*, Washington, USA, 2007: 1683~1686
- 6 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
- 7 Odhah N A, Dessouky M I, Al-Hanafy W E. Greedy power allocation algorithm for proportional resource allocation in multi-user OFDM systems. *Proceedings of the 29th National Radio Science Conference*, Cairo, Egypt, 2012: 421~428
- 8 Ren Z Y, Chen S Z, Hu B. Proportional resource allocation with subcarrier grouping in OFDM wireless systems. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(5): 868~871
- 9 王丽萍, 孙国防, 程永明. 鱼群算法在多用户 OFDM 跨层资源分配中的应用. *电路与系统学报*, 2011, 16(3): 87~91
- 10 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, 62(12)
- 11 张春发, 赵晓晖. 基于公平度门限的多用户 OFDM 系统自适应资源分配算法. *通信学报*, 2011, 32(12): 65~71
- 12 Rodrigues E B, Casadevall F. Rate adaptive resource allocation with fairness control for OFDMA networks. *Proceedings of the 18th European Wireless Conference*, Poznan, Poland, 2012
- 13 Yu W, Cioffi J M. FDMA capacity of Gaussian multiple-access channels with ISI. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, 50(1): 102~111
- 14 Chung S T, Goldsmith A J. Degrees of freedom in adaptive modulation: a unified view. *IEEE Transactions on Communications*, 2001, 49(9): 1561~1571
- 15 Jain R, Chiu D, Hawe W. A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems. *DEC Research Tech Rep*, TR-301, 1984

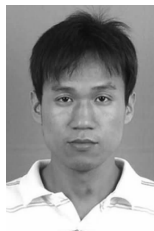
[作者简介]



吴耀辉,男,宁波大学博士生,浙江万里学院讲师,主要研究方向为 OFDM 系统资源分配。



李有明,男,宁波大学通信技术研究所周士生导师、教授,主要研究方向为无线和有线宽带通信技术中的干扰抑制、动态资源分配、MIMO-OFDM、协作中继、认知无线电等。



邵鹏飞,男,浙江万里学院副教授,主要研究方向通信网络技术。

(收稿日期:2014-03-17)