

# OFDMA 系统中资源公平调度算法研究

张冬梅<sup>1</sup>, 徐友云<sup>1,2</sup>, 蔡跃明<sup>1</sup>

(1. 解放军理工大学通信工程学院, 南京 210007; 2. 上海交通大学电子工程系, 上海 200030)

[摘要] 研究了宽带正交频分复用多址 (OFDMA) 系统中存在多种不同业务时的无线资源公平调度问题, 深入分析了经典的资源调度算法——用户最小容量最大化算法, 提出了一种明显改善公平性能的改进算法, 仿真结果证明, 改进算法在各种应用环境下, 都具有良好的公平性能, 能为不同业务类型的用户提供较严格的速率保证。

[关键词] OFDMA; 无线资源调度; 子载波分配; 功率分配

[中图分类号] TN929.5 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742 (2007) 06-0077-05

## 1 引言

OFDMA 系统利用子载波的正交特性来实现用户多址接入, 系统中的资源调度模块可利用多用户分集和信道衰落特性, 根据信道增益自适应地进行资源分配, 可明显地提高系统吞吐量等性能。OFDMA 系统中的资源分配涉及子载波、功率、自适应调制、比特, 几种资源的联合优化是一个复杂度极高的问题。在已有的研究中, 主要采用分步优化的方法: 第 1 步, 分配子载波; 第 2 步, 确定各子载波的功率、调制方式和加载比特数。

分配子载波既可以直接根据信道增益和用户需要将子载波分配给用户, 也可以先确定各用户可分的子载波数, 再根据信道增益和用户需求进行分配。子载波分配算法的研究重点是如何保证用户间公平性能和各用户 QoS 性能, 并且利用用户的信道差异获得尽可能大的系统总吞吐量。基于不同调度目标, 形成不同的子载波调度算法, 通过研究发现系统总吞吐量与用户间公平性能是相互矛盾的, 子载波分配算法的选取最重要的是根据系统的要求, 在系统吞吐量与用户间公平性间寻求一个平衡点。

笔者分析和研究 OFDMA 系统中总功率约束条件下的用户最小容量最大化资源分配算法<sup>[1,2]</sup>, 这种算法同时考虑了用户资源比例公平和用户效用公平, 在假设所有用户平均信道条件一致的情况下, 能较好地保证用户资源比例公平和用户效用公平。但在实际应用环境中, 小区中的用户距离基站远近不同, 其信道条件也不同, 此时用户最小容量最大化资源分配算法的性能明显恶化。从提供良好公平性能角度出发, 分析了该资源分配算法, 找出了影响公平性能的问题, 并针对各个问题提出有效的改进措施, 提出了一种明显改善公平性能的改进算法。

## 2 系统模型

在 OFDMA 系统中, 一个小区的下行链路上多个用户分配资源如图 1 所示。在基站侧, 所有下行链路分组在基站排队, 资源调度器根据用户反馈的信道状态和各下行数据流排队状况, 做出子载波和功率分配策略, 并传送给 OFDM 收发信机。OFDM 收发信机根据子载波分配情况, 从不同用户队列中取出数据形成一个 OFDM 符号, 按确定的功率发射

[收稿日期] 2006-01-22; 修回日期 2006-07-03

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (60372080); “八六三” 高技术研究发展计划资助项目 (2003AA123310); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2004014)

[作者简介] 张冬梅 (1972-), 女, 浙江瑞安市人, 硕士, 南京解放军理工大学讲师, 研究方向为移动通信, 无线资源管理等

出去。这里，假设移动用户对信道状态的估计是准确的，并且瞬时信道状态信息是可用的。每个子载波在一个时隙内只分给一个用户。资源分配策略更新与信道信息收集是同步的，同时资源分配信息通过分离的控制信道传输给移动台。

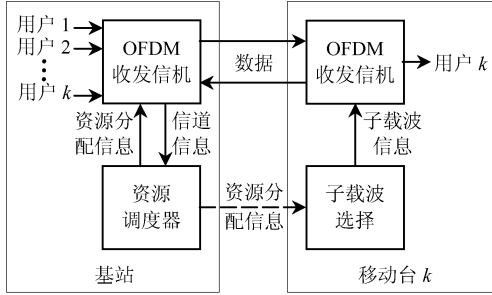


图 1 OFDMA 系统模型

Fig.1 OFDMA system model

### 3 用户最小容量最大化算法

Rhee 和 Cioffi 研究了  $\max-\min$  问题<sup>[1]</sup>，它以容量最小用户的容量最大化为目标，利用凸优化理论来描述，给出了一种简化的资源分配算法，但这种算法是以所有用户的数据速率相同为前提条件。在此基础上，Wong 和 Shen 研究了各用户业务类型不同情况时的  $\max-\min$  问题<sup>[2]</sup>，利用比例公平原则首先进行子载波数量的分配，再利用文献[1]中的算法完成各子载波的分配，最后再利用文献[3]提出的一种线性算法完成各子载波上的功率分配。在系统可分配的子载波数远大于用户数时，资源分配算法的公平性能是较好的，但在系统资源较少时，公平性能将明显恶化，特别是对于用户请求资源量大于子载波数时，算法将无法正常工作，其公平性能与不考虑用户公平性能的贪婪算法近似。为了能在实际系统中提供良好公平性能，对  $\max-\min$  算法进行分析和改进。

#### 3.1 $\max-\min$ 调度问题的公式化描述

$$\begin{aligned} & \max_{\rho_{k,n}, P_{k,n}} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \lg[1 + \rho_{k,n} \alpha_{k,n}^2 P_{k,n} / N_0 \Gamma] \quad (1) \\ & \text{s.t. } \forall k, n \sum_{k=1}^K \rho_{k,n} \leq 1 \text{ 其中 } \rho_{k,n} = 1 \text{ 或 } 0, \\ & P_T = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N P_{k,n} \leq P \text{ 且 } P_{k,n} \geq 0 \quad \forall k, n, \\ & \text{pro}_i : \text{pro}_j = \phi_i : \phi_j \quad \forall i, j \in \{1, 2, \dots, K\}, i \neq j \\ & \text{且} \quad \sum_{k=1}^K \phi_k = 1, \end{aligned}$$

其中  $N$  表示频道内的子载波总数， $K$  表示同时使用频道的总用户数， $\alpha_{k,n}$  表示用户  $k$  在第  $n$  个子载波上的信道增益， $\rho_{k,n}=1$  表示用户  $k$  占用了第  $n$  个子载波， $\rho_{k,n}=0$  表示用户  $k$  未占用了第  $n$  个子载波，每个子载波只能分配给一个用户。 $P_{k,n}$  表示系统在第  $n$  个子载波上给用户  $k$  分配的功率，所有子载波分配的功率总和为  $P_T$ ， $P$  表示系统设置的总功率，为定值。 $N_0$  表示加性噪声的单边功率谱，假设所有用户取值相同。符号信噪比为  $\alpha_{k,n}^2 P_{k,n} / N_0$ ， $\text{pro}_i$  表示第  $i$  个用户的业务级别，取值越大要求的速率越高， $\phi_i$  表示第  $i$  个用户的速率比例值。 $\Gamma$  表示与物理层编码调制关联的常量，考虑 MQAM 调制方式时， $\Gamma = -\ln(5\text{BER}) / 1.5$ <sup>[4]</sup>。

#### 3.2 多业务条件下的 $\max-\min$ 调度算法

$\max-\min$  调度算法分为三个步骤：第一步按比例公平原则确定各用户的子载波数；第二步按  $\max-\min$  原则分配子载波；第三步按容量最大化原则将功率分配给各子载波。

步骤 1 按业务比例计算将分配给每个用户的子载波数

$$N_1 : N_2 : \dots : N_k = \phi_1 : \phi_2 : \dots : \phi_k \quad (2)$$

其中  $N_k = \lceil \phi_k N \rceil$ ，则剩余的子载波为  $N^* = N - \sum_{k=1}^K N_k$ 。

步骤 2 子载波分配

1) 按轮询原则，依次给每个用户分配一个最优子载波，按平均功率计算吞吐量，作为各用户的初始吞吐量；

2) 以吞吐量比例最小的用户优先选择子载波的原则，分配各用户预留的资源；

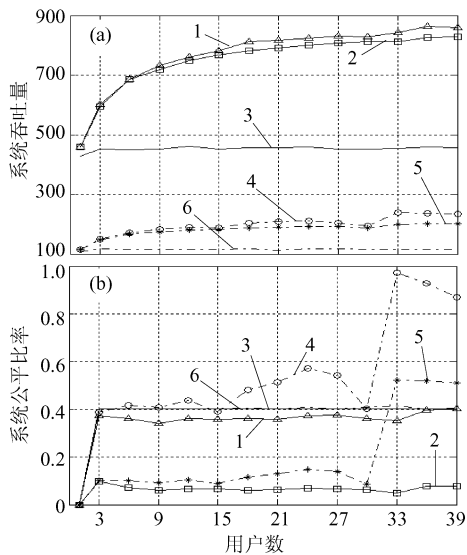
3) 将剩余子载波按贪婪原则分配各用户，为了兼顾用户间的公平性，文献[2]中规定每个用户最多分配一个剩余子载波。但在多业务情况下，存在剩余子载波数大于用户数的情况，为了不浪费子载波资源，仿真采用每用户分配的剩余子载波不超过其业务等级的方法。

步骤 3 功率分配 文献[2, 3]中给出了一种以吞吐量最大化为目标的线性功率分配算法，但这种算法是以用户高 SNR 为条件的，通过仿真发现平均 SNR > 25 dB 时算法才能工作，文献[2]中取平均 SNR 为 38 dB 进行仿真验证，这与实际系统条件相差较大。采用经典的迭代注水方法<sup>[4]</sup>，两种方法的都是以吞吐量最大化为目标的，差异只是在运算

量上, 并重点讨论用户间的公平性问题。功率分配算法的运算量问题略。

### 3.3 算法性能仿真与分析

在仿真中, 考虑单个小区的 OFDMA 系统的下行链路数据传输, 使用子载波数 64 和 256 两种情况。无线信道模型是 COST207 中的城区模型<sup>[5]</sup>, 时延扩展  $\gamma=2.5 \mu\text{s}$ , 仿真中考虑了两种用户信道条件, 环境 1 假设所有用户平均 SNR 一致, 取 10 dB; 环境 2 假设所有用户在小区中均匀分布, 用户平均 SNR 有 5 dB, 10 dB, 15 dB 3 种情况。仿真中考虑系统中有 3 种不同的业务, 误码率均为  $10^{-3}$ , 各类业务级别  $\text{pro}=1, 2, 4$ , 各类业务用户出现的概率分别为 0.5, 0.25, 0.25, 各用户的业务类型是在仿真中随机产生。其中每次仿真包括 100 次调度过程, 一共进行 100 次仿真。max-min 算法的性能分析曲线见图 2。



1—环境 2,  $N=256$ ; 2—环境 1,  $N=256$ ; 3—RR 算法,  $N=256$ ;  
4—环境 2,  $N=64$ ; 5—环境 1,  $N=64$ ; 6—RR 算法,  $N=64$

图 2 max-min 算法的性能分析曲线

Fig.2 Performance analyzing curve for max-min algorithm

图 2a 为 max-min 算法在几种仿真环境下系统吞吐量的对比曲线。图 2b 为 max-min 算法在几种系统环境下用户吞吐量公平比率曲线对比。系统吞吐量是以式 (1) 为准的, 其单位为比特/符号。系统公平比率  $R_{\text{fair}}$  是与用户吞吐量的统计特性有关的比值, 表示了一次仿真中用户吞吐量的平均偏差比率

$$R_{\text{fair}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{|C_k/\text{pro}_k - \text{mean}[C_k/\text{pro}_k]|}{\text{mean}[C_k/\text{pro}_k]} \quad (3)$$

其中  $C_k$  表示一次仿真中第  $k$  个用户的平均吞吐量,  $\text{mean}$  代表所有  $K$  个用户的平均吞吐量。用户吞吐量公平比率可用来量化算法的吞吐量公平性能,  $R_{\text{fair}}=0$  时表示算法对于所用用户完全公平, 算法的  $R_{\text{fair}}$  值越大, 则其公平性越差。在仿真中利用用户吞吐量公平比率, 可以较直观地用曲线表示调度算法的吞吐量公平性能。

由图 2a 可见, 由于轮询算法 (RR) 是按用户次序循环分配资源的, 系统吞吐量在不同用户数情况下基本保持不变, 而且两种环境下的曲线基本一致; max-min 算法利用了多用户分集技术, 系统吞吐量随用户数增加而呈上升趋势。在  $N=64$  情况下, 用户数  $\geq 33$  时系统吞吐量曲线出现突变, 因为此时的系统总资源数小于用户请求的最小资源量。

由图 2b 可见, 所有用户的平均信道条件一致, 即环境 1 时, 算法的公平性能明显优于 RR 算法, 可以提供良好的公平性能; 但在用户信道条件不同的环境 2 时, 算法的公平性能明显恶化; 在  $N=64$  时, 当用户数  $\geq 33$  时, 由于系统子载波数小于所有用户所要求的最小资源总数, 算法的公平性能将急剧恶化, 不能保证用户间的公平性能。

## 4 改进算法

从改善用户公平性能角度出发, 深入分析 max-min 算法, 找出该算法中对公平性能有影响的几个问题, 并逐一进行下面改进。

### 4.1 调度初始值问题

在 max-min 算法中每次调度是独立的, 调度的初始值是以轮询方式设置的, 不能对前续调度后各用户吞吐量的差异进行补偿。特别是, 当系统资源数小于所有用户所要求的最小资源数时, 算法基本无公平性可言。

改进措施 1 是将独立调度改为关联调度, 即将各用户调度后的吞吐量保存下来, 作为下一次调度的初始值, 可以给吞吐量比例最小的用户有更大的优先权。特别是, 当系统资源数小于所有用户所要求的最小资源数时, 可以起到连续分配资源的效果, 明显改善公平性能。

环境 1 时, max-min 算法和采用改进措施 1 时的对比曲线见图 3, 改进后的算法公平性能均有改

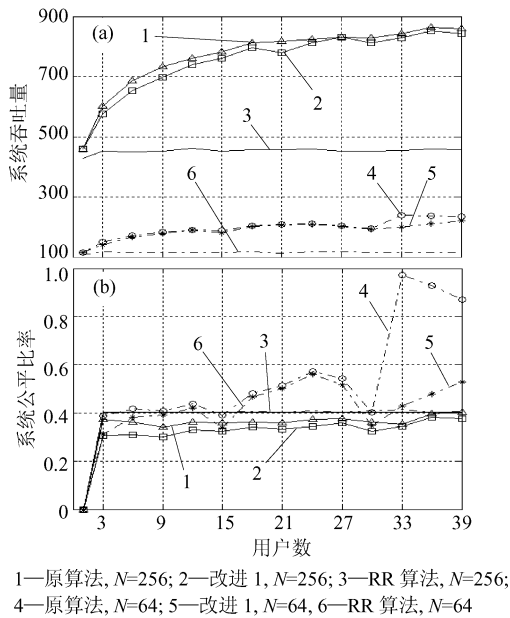


图3 采用改进措施1的性能分析曲线  
Fig.3 Performance analyzing curve for improved method 1

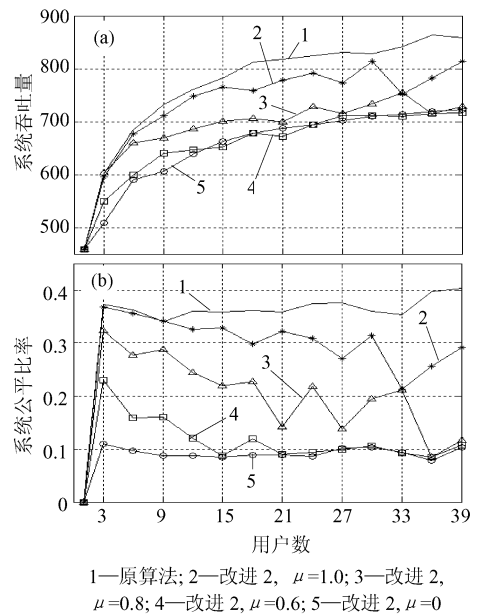


图4 采用改进措施2的性能分析曲线  
Fig.4 Performance analyzing curve for improved method 2

善。特别是，在  $N=64$  情况下，用户数  $\geq 33$  时系统公平性明显改善，当然系统总吞吐量略有下降。

#### 4.2 剩余子载波的分配问题

$\max$ - $\min$  算法执行时，在按用户业务比例分配子载波后，会有一些数量的剩余子载波，文献中提出算法是按贪婪原则分配各用户，虽然为了兼顾用户间的公平性，限制了每用户最多可分配的剩余子载波数量。但此时还能按贪婪原则分得子载波的用户，其吞吐量比例已偏高，如再获得剩余子载波，只能加剧用户间公平性能的恶化。

改进措施2是以改善用户间公平性为原则，继续以吞吐量比例最小的用户优先选择子载波的原则使用户为原则。同时，为了有较多的剩余子载波来平衡吞吐量比例，设置参数  $\mu$  来限定算法步骤1中按比例分配的子载波数，如  $\mu=0.8$ ，表示系统按比例分配给用户的子载波数最多为总数的80%。

环境2时， $N=256$ ， $\max$ - $\min$  算法和采用改进措施2，设置不同  $\mu$  值时的对比曲线见图4，随着  $\mu$  值的减小，以损失吞吐量为代价，算法公平性改善明显，当  $\mu=0$  时，所有子载波都是按  $\max$ - $\min$  原则分配，公平性能接近相同条件下环境1时的公平性能。因为不同用户数时剩余子载波数量不同，图中吞吐量和公平比率随用户数不同出现明显波动。

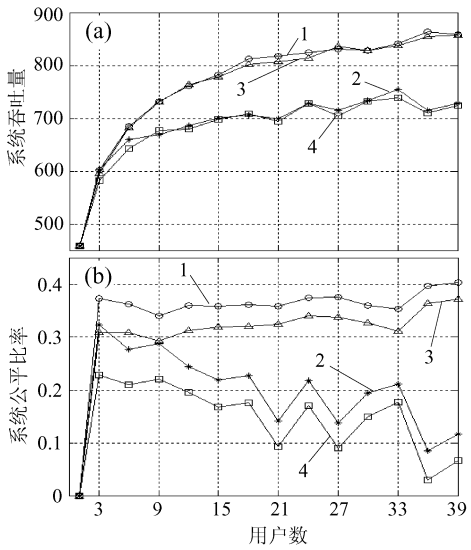
#### 4.3 功率分配问题

$\max$ - $\min$  算法在子载波分配过程，是以平均功率分配方式来计算吞吐量的，在子载波分配后，为提高系统总吞吐量，采用注水功率分配方式，即信道状态好的子载波多分配功率，信道状态不好的子载波少分配功率，甚至不分配功率。这种方式在增加系统吞吐量的同时，恶化了用户间的公平性能。特别是采用改进措施2，将剩余子载波补偿给吞吐量比例小的用户，而这些吞吐量比例小的用户也就是信道状态较差的用户，采用注水功率分配后，这些补偿的子载波只能分到很少的功率，甚至根本分不到功率，因此也就不能达到吞吐量补偿的目的。

改进措施3是在用户间按获取子载波的比例平均分配功率，在用户内采用注水算法提高吞吐量。这样既保证用户间的公平性能，又一定程度上提高了系统吞吐量。在用户内部注水只有在用户得到的子载波数量较多时，才能起到提高吞吐量的作用。

环境2时， $N=256$ ， $\mu=0.8$ ，采用改进措施3后， $\max$ - $\min$  算法的性能对比曲线见图5，改进后的算法的公平性能改善明显，此时的公平性能基本与按平均功率分配方式计算时的一致，但吞吐量却达到了采用迭代注水功率分配时的水平。

#### 4.4 改进的 $\max$ - $\min$ 算法



1—原算法; 2—改进 2,  $\mu=0.8$ ; 3—改进 3; 4—改进 2+3

图 5 采用改进措施 3 的性能分析曲线  
Fig.5 Performance analyzing curve for improved method 3

综合以上分析, 提出一种在各种应用环境下保持良好的用户公平性能的改进算法。具体如下:

Step 1 预留 20% 的子载波后, 按业务比例计算将分配给每个用户的子载波数。

Step 2 子载波分配。

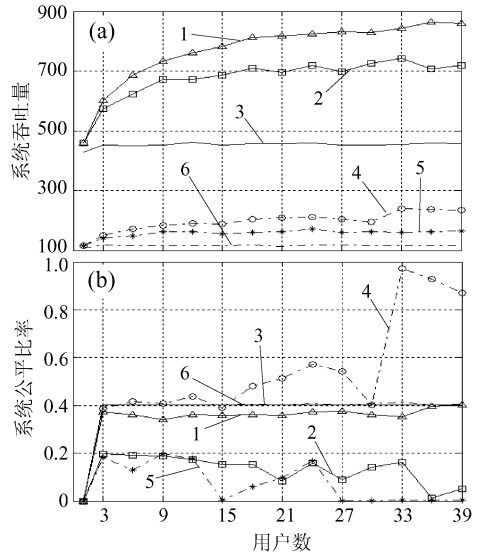
1) 第一次分配时按轮询原则, 给每个用户分配一个子载波, 按平均功率计算吞吐量, 作为各用户的初始吞吐量; 随后各次分配以已获得的吞吐量为分配初始值。

2) 以吞吐量比例最小的用户优先选择子载波的原则, 分配各用户预留的资源。

3) 以吞吐量比例最小的用户优先选择子载波原则, 分配剩余资源, 不限定用户占用剩余资源数。

Step 3 在用户间按获取子载波的比例平均分配功率, 在用户内采用注水算法提高吞吐量。

环境 2 时, 改进的 max-min 算法的性能分析曲线见图 6, 改进算法具有良好的公平性能, 甚至优于 RR 算法, 在合理控制接入系统的用户数量, 改进算法在各种应用环境下, 能为不同业务类型的用户提供较严格的速率保证。当然, 与此同时, 系统的吞吐量增益会有所损失, 这也进一步说明了用户间的公平性与系统总吞吐量是相互矛盾的。



1—原算法,  $N=256$ ; 2—改进算法,  $N=256$ ; 3—RR 算法,  $N=256$ ; 4—原算法,  $N=64$ ; 5—改进算法,  $N=64$ ; 6—RR 算法,  $N=64$

图 6 改进的 max-min 算法性能分析曲线  
Fig.6 Performance analyzing curve for improved max-min algorithm

### 5 结语

研究 OFDMA 系统中存在多种不同业务时的无线资源公平调度问题, 深入分析了经典的资源调度算法——用户最小容量最大化算法, 提出了一种明显改善公平性能的改进算法, 仿真证明, 改进算法在各种应用环境下, 都具有良好的公平性能, 能为不同业务类型的用户提供较严格的速率保证。当然, 研究前提是调度器可获得完全的信道状态信息, 这是一种理想假设, 下一步将研究在有限反馈条件下的机会公平调度算法实现, 并打算综合子载波、功率、调制方式和加载比特数的联合优化分配的研究, 形成完整的资源分配算法。

### 参考文献

[1] Rhee W, Giuffi J M. Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation [A]. Tokyo: Proc IEEE Vehicular Technology Conf [C]. VTC'00—Spring, 2000. 1085~1089

[2] Wong I C, Shen Z K, Evans B L, et al. A low complexity algorithm for proportional resource allocation in OFDMA systems [J]. Proceeding IEEE Signal Processing Systems, 2004,(10):1~6