

## 一种低复杂度基于公平性的 MIMO-OFDMA 资源分配方案

杜娜<sup>①</sup> 顾品标<sup>②</sup> 闵锐<sup>②③</sup> 曹宁<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(河海大学计算机及信息工程学院 南京 210098)

<sup>②</sup>(东南大学信息科学与工程学院 南京 210096)

<sup>③</sup>(解放军理工大学理学院 南京 211101)

**摘要:** 该文针对 MIMO-OFDMA 下行链路系统, 考虑在总功率和 BER 以及用户数据速率成比例的约束下, 以获取整个系统吞吐量极大化为准则, 提出一种基于成比例公平性约束的资源分配方案。新的方案基于 MIMO 信道状态信息, 利用特征子信道来确定子载波和功率分配, 充分利用了空间域, 频域以及多用户分集提高系统的频谱效率。在子载波分配时, 松弛成比例约束条件, 使用户数据速率近似地成比例于每个用户分配的子载波数, 推导出一种线性的不需要迭代的低复杂度的功率分配方案。仿真和分析表明, 整个方案在保证系统吞吐量的前提下, 取得了用户间良好的速率公平性, 同时又具有较低的计算复杂度。

**关键词:** 无线通信; MIMO-OFDMA; 资源分配; 公平性

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)04-0770-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2008.00728

## A Low Complexity Resource Allocation Scheme with Proportional Fairness for MIMO-OFDMA System

Du Na<sup>①</sup> Gu Pin-biao<sup>②</sup> Min Rui<sup>②③</sup> Cao Ning<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Computer & Information Engineering College, Hohai University, Nanjing 210098, China)

<sup>②</sup>(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

<sup>③</sup>(Institute of Science, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101, China)

**Abstract:** This paper presents a new scheme based on proportional fairness for MIMO-OFDM downlink resource allocation to maximize the sum of user data rates, subject to constraints on total power, bit error rate, and proportionality among user data rates. This new scheme embraces the ability to simultaneously exploit space, frequency and multi-user diversity to improve spectrum efficiency. Based on MIMO channel state information, eigen-channels are intelligently used to determine subcarrier allocation and power allocation, which forms the foundation of the new scheme. A linear non-iterative power allocation method with low complexity is deduced that is made by the relaxation of strict user rate proportionality constraints. Simulation results show that this new adaptive allocation scheme can achieve good tradeoff between capacity and fairness, while requiring significantly less computation.

**Key words:** Wireless communication; MIMO-OFDMA; Resource allocation; Fairness

### 1 引言

宽带移动通信中符号间干扰(ISI)、信道时变等因素的存在, 使正交频分复用多址(OFDMA)和多输入多输出(MIMO)技术得到了广泛关注<sup>[1,2]</sup>。将 MIMO 和 OFDMA 结合起来的 MIMO-OFDMA 技术, 能够充分利用天线分集, 频域分集和多用户分集提高可达数据速率和频谱效率, 改善系统的性能<sup>[3-5]</sup>。

未来的无线通信系统, 要求尽可能地提高系统

容量, 使之服务更多用户并给每个用户提供更高数据速率, 同时, 用户间速率的分配也是个亟待考虑的问题<sup>[6-8]</sup>。对 MIMO-OFDMA 下行链路系统, 已有的研究中<sup>[3-5]</sup>, 提出了很多自适应资源分配算法, 然而这些算法较少考虑用户间速率分配的公平性。在文献[9]中, 提出了一种基于迭代的子载波和功率分配算法, 在满足各个用户传输速率和误比特率的前提下, 使整个发送功率最小化。文献[10]研究了速率最大化问题, 将每个子载波分配给信道增益最好的用户, 基于注水原理在各个子载波间最优分配功率, 这样很可能在一段时间内, 那些平均信道增益不太好的用户将得不到任何数据。这个问题在文献

[11,12]中引起了部分关注。文献[11],通过确保每个用户发送的最小速率,文献[12]通过最大化最小用户数据速率,来满足用户间一定的公平性,确保所有的用户都得到一个近似的数据速率。然而 Max-Min 最优化准则仅提供用户间最大的公平性。文献[13]提出了一种用户数据速率成比例约束的资源分配方案,对于不同等级的用户,可以提供灵活的服务。然而文献[13]中,对功率分配的求解是一组非线性的方程组,需要大量的迭代运算,复杂度较高,不太适合实时在线操作,且文献[9]的研究仅仅局限于单天线下的资源分配问题。文献[14]中提到一种考虑用户速率公平性的自适应资源分配方案,但却仍然没有解决功率分配时迭代搜索复杂度较高的问题。

本文提出一种同时增强系统吞吐量和用户速率成比例公平性的资源分配方案,通过松弛成比例公平性的约束条件,推导出一种不需要迭代的低复杂度的资源分配方案。

## 2 系统模型

考虑下行链路 MIMO-OFDMA 系统有个  $K$  用户和  $N$  个子载波,基站有  $M_T$  个发送天线,每个用户端有  $M_R$  个接收天线。定义  $M_R \times M_T$  矩阵  $\mathbf{H}_{k,n}$  为用户  $k$  在子载波  $n$  上的频域信道增益矩阵,  $p_{k,n}$  为用户  $k$  在子载波  $n$  上加载的发送功率。对  $\mathbf{H}_{k,n} \mathbf{H}_{k,n}^H$  进行奇异值分解得到一组特征值中,最大的主特征值用  $\hat{\lambda}_{k,n}$  表示。第  $i$  个空间子信道上的信噪比为  $\gamma_{k,n}^i = \lambda_{k,n}^i p_{k,n} / \sigma^2$ , 这里  $\sigma^2 = N_0 B / N$ ,  $N_0$  为高斯白噪声的功率谱密度,系统可用带宽为  $B$ 。

假设第  $i$  个空间子信道上携带的比特数为  $b_{k,n}^i$ , 采用 MQAM 方形星座调制方式,误比特率是信噪比  $\gamma_{k,n}^i$  和  $b_{k,n}^i$  的函数,可以近似表示为<sup>[15]</sup>

$$\text{BER}_{\text{MQAM}} \approx 0.2 \exp \left[ \frac{-1.6 \gamma_{k,n}^i}{2^{b_{k,n}^i} - 1} \right] \quad (1)$$

令  $\Gamma = \ln(5\text{BER})/1.6$ , 得到

$$b_{k,n}^i = \log_2(1 + \gamma_{k,n}^i / \Gamma) \quad (2)$$

本文考虑的资源分配的目标函数可以表示如下:

$$\max_{p_{k,n}, c_{k,n}} \frac{B}{N} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N c_{k,n} \left[ \sum_{i=1}^M \log_2 \left( 1 + \frac{\lambda_{k,n}^i p_{k,n}}{\sigma^2 \Gamma} \right) \right] \quad (3)$$

约束条件为

$$C1: c_{k,n} \in \{0, 1\}, \forall k, n$$

$$C2: p_{k,n} \geq 0, \forall k, n$$

$$C3: \sum_{k=1}^K c_{k,n} = 1, \forall n$$

$$C4: \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N c_{k,n} p_{k,n} \leq P_{\text{total}}$$

$$C5: R_i : R_j = \phi_i : \phi_j, \forall i, j \in \{1, \dots, K\}, i \neq j, \sum_{k=1}^K \phi_k = 1$$

上述条件中,  $P_{\text{total}}$  为基站总的发射功率。  $c_{k,n}$  表示是否将子载波  $n$  分配给用户  $k$ ,  $c_{k,n}$  为 1 或 0 分别表

示子载波  $n$  分配或者不分配给用户  $k$ 。  $\phi_1 : \phi_2 : \dots : \phi_K$  表示归一化的各用户速率成比例的约束条件,  $R_k$  为第  $k$  个用户总的的数据速率。最优的资源分配方案,复杂度太高,因此本文采用次最优的方案,把联合子载波和功率分配的方案分成两步完成。

## 3 提出的方案

本文提出一种新的资源分配方案,利用 MIMO 空间特征子信道来确定子载波和功率分配。通过松弛成比例公平性条件,使用户数据速率近似的与每个用户分配的子载波数成线性关系,取得大致的成比例公平性本文的方案分为两步。

### 3.1 子载波分配

松弛公平性约束条件,使每个用户使用的子载波数近似满足线性条件:

$$N_1 : N_2 : \dots : N_k = \phi_1 : \phi_2 : \dots : \phi_k \quad (4)$$

基于上面的合理假设,可以确定每个用户初始分配的子载波数  $N_k = \lfloor \phi_k N \rfloor$ 。由此可能带来子载波的初始分配剩余为  $N^* = N - \sum_{k=1}^K N_k$ 。先对每个用户分配  $N_k$  个子载波及相应的空间子信道,然后再按照最大化吞吐量同时保证粗略成比例的准则分配剩余的  $N^*$  个子载波,完成子载波在用户之间的分配。

### 3.2 功率分配

子载波分配完成后,每个用户分配的子载波为  $\Omega_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ , 式(3)中的问题可以简化为

$$\max_{p_{k,n}} \frac{B}{N} \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} \left[ \sum_{i=1}^M \log_2 \left( 1 + \frac{\lambda_{k,n}^i p_{k,n}}{\sigma^2 \Gamma} \right) \right] \quad (5)$$

其中用户  $k$  上的总的的数据速率为

$$R_k = \frac{B}{N} \sum_{n \in \Omega_k} \left[ \sum_{i=1}^M \log_2 \left( 1 + \frac{\lambda_{k,n}^i p_{k,n}}{\sigma^2 \Gamma} \right) \right] \quad (6)$$

对式(5)利用拉格朗日方法,令

$$\begin{aligned} L = & \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} \left[ \sum_{i=1}^M \log_2 \left( 1 + \frac{\lambda_{k,n}^i p_{k,n}}{\sigma^2 \Gamma} \right) \right] \\ & + \mu_1 \left( \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} p_{k,n} - P_{\text{total}} \right) \\ & + \frac{B}{N} \sum_{k=2}^K \mu_k \left[ \sum_{n \in \Omega_k} \sum_{i=1}^M \log_2 \left( 1 + \frac{\lambda_{1,n}^i p_{1,n}}{\sigma^2 \Gamma} \right) \right. \\ & \left. - \frac{\phi_1}{\phi_k} \sum_{n \in \Omega_k} \sum_{i=1}^M \log_2 \left( 1 + \frac{\lambda_{k,n}^i p_{k,n}}{\sigma^2 \Gamma} \right) \right] \quad (7) \end{aligned}$$

对  $L$  进行求导并对求导后的式子取 0:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial p_{1,n}} = & \frac{B}{N \ln 2} \sum_{i=1}^M \frac{E_{1,n}^i}{1 + p_{1,n} E_{1,n}^i} + \mu_1 \\ & + \frac{B}{N \ln 2} \sum_{k=2}^K \mu_k \left( \sum_{i=1}^M \frac{E_{1,n}^i}{1 + p_{1,n} E_{1,n}^i} \right) \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial p_{k,n}} &= \frac{B}{N \ln 2} \sum_{i=1}^M \frac{E_{k,n}^i}{1 + p_{k,n} E_{k,n}^i} \\ &+ \mu_1 - \frac{\phi_1 \mu_k B}{\phi_k N \ln 2} \sum_{i=1}^M \frac{E_{k,n}^i}{1 + p_{k,n} E_{k,n}^i}, \\ k &= 2, 3, \dots, K, n \in \Omega_k \end{aligned} \quad (9)$$

由式(8)和式(9)式可以得到

$$\sum_{i=1}^M \frac{E_{k,n}^i}{1 + p_{k,n} E_{k,n}^i} = \sum_{i=1}^M \frac{E_{k,m}^i}{1 + p_{k,m} E_{k,m}^i}, \quad n, m \in \Omega_k, k = 2, 3, \dots, K \quad (10)$$

在一组特征值所表示的空间子信道中, 通常有一个最大的主特征值  $\hat{E}_{k,n} = \hat{\lambda}_{k,n} / \sigma^2 \Gamma$  远远大于其他特征值。式(10)可以用主特征子信道来近似, 这样得到

$$\frac{\hat{E}_{k,n}}{1 + p_{k,n} \hat{E}_{k,n}} = \frac{\hat{E}_{k,m}}{1 + p_{k,m} \hat{E}_{k,m}} \quad (11)$$

假定  $\hat{E}_{k,1}, \hat{E}_{k,2}, \dots, \hat{E}_{k,m}, m \in \Omega_k$  按照从小到大的顺序排列, 可以推导出  $p_{k,n}$  和  $p_{k,1}$  的关系为

$$p_{k,n} = p_{k,1} + \frac{\hat{E}_{k,n} - \hat{E}_{k,1}}{\hat{E}_{k,n} \hat{E}_{k,1}} \quad (12)$$

由式(12)可以得到

$$p_{k,\text{total}} = N_k p_{k,1} + \sum_{n=2}^{N_k} \frac{\hat{E}_{k,n} - \hat{E}_{k,1}}{\hat{E}_{k,n} \hat{E}_{k,1}} \quad (13)$$

$$\text{令 } W_k = \sum_{n=2}^{N_k} \frac{\hat{E}_{k,n} - \hat{E}_{k,1}}{\hat{E}_{k,n} \hat{E}_{k,1}}, \text{ 得到}$$

$$p_{k,1} = \frac{p_{k,\text{total}} - W_k}{N_k} \quad (14)$$

当主特征子信道  $\hat{E}_{k,m}$  远大于其他特征子信道时, 由式(10)可以得到如下近似

$$\prod_{i=1}^M (1 + p_{k,n} E_{k,n}^i) \approx \frac{\hat{E}_{k,n}}{\hat{E}_{k,1}} \prod_{i=1}^M (1 + p_{k,1} E_{k,1}^i) \quad (15)$$

由此, 用户  $k$  的数据速率可以表示为

$$\begin{aligned} R_k &= \frac{B}{N} \sum_{n \in \Omega_k} \left[ \sum_{i=1}^M \log_2 \left( 1 + \frac{\lambda_{k,n}^i p_{k,n}}{\sigma^2 \Gamma} \right) \right] \\ &= \frac{B}{N} \sum_{n=1}^{N_k} \log_2 \left[ \prod_{i=1}^M (1 + p_{k,n} E_{k,n}^i) \right] \\ &\approx \frac{BN_k}{N} \left\{ \log_2 \left[ \prod_{i=1}^M (1 + p_{k,1} E_{k,1}^i) \right] + \log_2 V_k \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

这里,  $V_k = \left( \prod_{n=2}^{N_k} \frac{\hat{E}_{k,n}}{\hat{E}_{k,1}} \right)^{1/N_k}$ 。再根据各用户数据成

比例约束条件  $R_1 : R_k = \phi_1 : \phi_k, k = 2, 3, \dots, K$ , 当  $N_k$  较大时, 主特征子信道  $\hat{E}_{k,1}$  起主要作用, 得到

$$\begin{aligned} \frac{BN_1}{N\phi_1} \left\{ \log_2 \left( 1 + \frac{p_{1,\text{total}} - W_1}{N_1} \hat{E}_{1,1} \right) + \log_2 V_1 \right\} \\ \approx \frac{BN_k}{N\phi_k} \left\{ \log_2 \left( 1 + \frac{p_{k,\text{total}} - W_k}{N_k} \hat{E}_{k,1} \right) + \log_2 V_k \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

同时, 由总功率约束:

$$\sum_{k=1}^K p_{k,\text{total}} = P_{\text{total}} \quad (18)$$

这样式(17)和式(18)中, 总共有  $K$  个变量。由式(4)中松弛但合理的成比例约束条件  $R_k : R_j = N_k : N_j, \forall i, j \in \{1, 2, \dots, K\}, i \neq j$ , 我们可以用  $N_k$  替代公式(17)中的  $\phi_k$ , 可以得到一个线性方程组, 求得这个线性方程组的线性解为

$$\begin{aligned} p_{1,\text{total}} &= \left( P_{\text{total}} - \sum_{k=2}^K \frac{b_k}{a_{k,k}} \right) / \left( 1 - \sum_{k=2}^K \frac{1}{a_{k,k}} \right) \\ p_{k,\text{total}} &= (b_k - p_{1,\text{total}}) / a_{k,k}, k = 2, 3, \dots, K \end{aligned} \quad (19)$$

其中

$$a_{k,k} = -\frac{N_1 \hat{E}_{k,1} V_k}{N_k \hat{E}_{1,1} V_1} \quad (20)$$

$$b_k = \frac{N_1}{\hat{E}_{1,1}} \left( V_k - V_1 + \frac{\hat{E}_{1,1} W_1 V_1}{N_1} - \frac{\hat{E}_{k,1} W_k V_k}{N_k} \right) \quad (21)$$

一旦确定了每个用户  $k$  分配的总功率  $p_{k,\text{total}}$ , 将  $p_{k,\text{total}}$  在用户  $k$  所分配的子载波对应的所有空间子信道上进行分配, 增强整个系统的吞吐量。根据注水算法, 由式(12)和式(14)可以得到每个用户各个空间子信道上的最终功率分配, 具体如下:

将用户  $k$  所分配得到的  $N_k$  个子载波  $\Omega_k$  所对应的  $N_k$  组空间子信道  $\{\lambda_{k,n}^i\}_{i=1}^M, n \in \Omega_k$ , 按照从小到大的顺序排列 ( $N_k M$  个空间子信道) 为  $\{\lambda_{k,i}\}_{i=1}^{N_k M}$ 。同样令  $E_{k,i} = \lambda_{k,i} / (\sigma^2 \Gamma)$ , 这里

$$\bar{W}_k = \sum_{n=2}^{N_k M} \frac{E_{k,n} - E_{k,1}}{E_{k,n} E_{k,1}} \quad (22)$$

则第  $i$  个空间子信道上的功率  $p_{k,i}, i = 2, 3, \dots, N_k M$  为

$$p_{k,1} = \frac{p_{k,\text{total}} - \bar{W}_k}{N_k M} \quad (23)$$

$$p_{k,i} = p_{k,1} + \frac{E_{k,i} - E_{k,1}}{E_{k,i} E_{k,1}} \quad (24)$$

这样完成了功率在用户所有空间子信道上的分配。

整个子载波分配过程的计算复杂度近似为  $O(NK \log_2 N)$ , 功率分配过程中, 计算复杂度为  $O(K)$ 。文献[13,14]中, 在子载波分配阶段的运算量和本文的复杂度相当。而计算功率在各用户间的分配时, 需要迭代搜索来计算一组非线性方程组, 复杂度一般为  $O(\varepsilon K)$ , 其中  $\varepsilon$  的典型取值至少大于 10。由此可以看出本文提出的资源分配方案, 采用不需迭代的线性方法进行功率分配, 相比以往功率分配时需要大量运算的迭代算法, 复杂度大大地降低。

#### 4 仿真与分析

信道模型采用 IMT-2000 vehicular Model A 六

径衰落模型, 总的发射功率为  $P_{total}=1$  W, 整个带宽为 1 MHz。子信道上的平均发射信噪比在仿真中取为 38 dB。为简便起见, 使各空间子信道上 BER =  $10^{-3}$ 。系统的吞吐量定义为 bit/(s·Hz)。信道状态信息抽样间隔为 0.5 ms。Matlab 仿真中用户数从 2 到 16 之间变化, 对于不同的用户数, 仿真了 1000 个不同的信道实现方式, 每个信道实现方式抽样 100 次。

图 1 给出了本文提出的方案和其他方案吞吐量 (bit/(s·Hz)) 的比较。子载波数  $N$  设为 256, 用户数  $K$  从 2 到 16 变化, 天线设置为  $M_R = M_T = 4$ 。每一个信道实现方式, 设定一个速率比例限制条件  $\xi_k = \phi_k / \min \phi_k$ ,  $\xi_k$  的概率函数  $p_{\xi_k}$  满足:  $p_{\xi_k}$  的值等于 1 的概率为 0.5, 等于 2 的概率为 0.3, 等于 4 的概率为 0.2。分别对本文提出的方案, 文献[10]提出的最大化系统吞吐量的方案, 文献[13,14]中的方案, 以及静态 TDMA 方案进行了仿真。

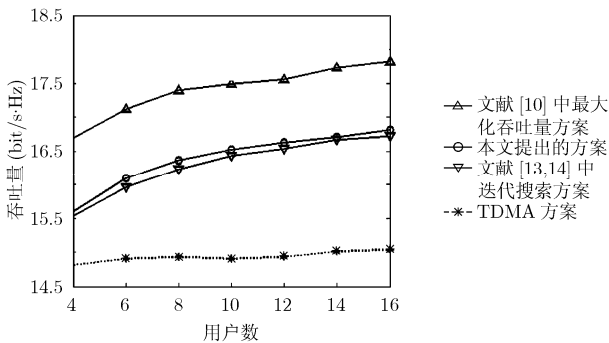


图 1 本文提出的方案与其它方案的吞吐量比较( $K=2:16, N=256, M_R=M_T=4$ )

从图 1 中可以明显的看出, 本文提出的方案相对于文献[13]中提出的方案以及静态 TDMA 方案, 取得明显的吞吐量增益, 这是由于在子载波分配时, 剩余子载波  $N^*$  的存在增加了自由度, 从而提高了系统的容量。同时也可以看出, 系统的吞吐量随着用户数的增加而增加。这也说明了提出的方案具有多用户分集增益。

图 2 仿真了用户数为 8 时, 本文提出的方案和其它方案中, 每个用户归一化数据速率与所要求的比例性之间的比较。从图 2 可以知道, 相比于文献[10]中仅仅极大化系统吞吐量的方案, 本文提出的方案能够取得用户间良好的速率成比例公平性的分布。同时也可以看出, 所提出的方案并没有完全精确地吻合成比例性速率的要求, 这是因为方案中放松了成比例的约束以及在用户功率分配的推导中的几处近似处理所致。结合图 1 和图 2 可以看出, 本

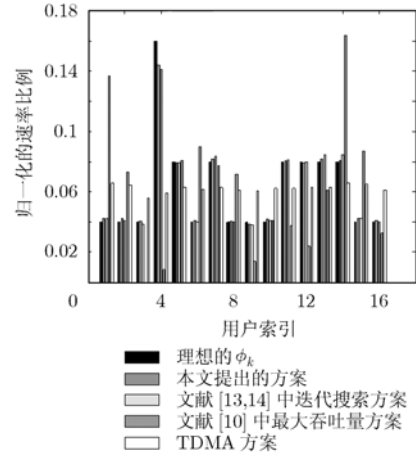


图 2 用户间归一化数据速率分布,  $K=16, N=256, M_R=M_T=4$

文所提出的方案是介于整个系统吞吐量最大化与各个用户数据速率成比例性的折中。

### 5 结论

本文针对 MIMO-OFDMA 系统提出一种新的资源分配方案, 解决在成比例公平性约束条件下的自适应资源分配问题, 提出一种同时增强系统吞吐量和用户速率成比例公平性的资源分配方案, 通过松弛成比例公平性的约束条件, 在保证近似的成比例性约束下, 推导出了一种线性的非迭代的算法来直接解决功率分配问题, 大大减少了计算复杂度。仿真结果表明, 与以往的方案相比, 提出的方案在获得用户间良好的速率公平性和系统吞吐量增益的同时, 又具有较低的复杂度。

### 参考文献

- [1] Wong K, Cheng R, and Letaief K, et al. Adaptive antennas at the mobile and base stations in an OFDM/TDMA system[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2001, 49(1): 195-206.
- [2] Stuber G L, Barry J R, and Mclaughlin S W, et al. Broadband MIMO-OFDM wireless communications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92(2): 271-294.
- [3] Hui J and Zhou Y. Enhanced rate adaptive resource allocation scheme in downlink OFDMA system[C]. *IEEE VTC2006-Spring*, Melbourne, Australia, 2006, 5: 2464-2468.
- [4] Pan C K, Cai Y M, and Xu Y Y. Adaptive subcarrier and power allocation for multiuser MIMO-OFDM systems[C]. *ICC2005*, Seoul, 2005, 4: 2631-2635.
- [5] Zhang Y J and Letaief K B. An efficient resource-allocation scheme for spatial multiuser access in MIMO/OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2005, 53(1): 107-116.
- [6] Shen Z, Andrews J G, and Evans B L. Optimal power

- allocation in multiuser OFDM systems[C]. IEEE Global communications conference, San Francisco, 2003, 1: 337-341.
- [7] Brah F, Louveaux J, and Vandendorpe L. Proportional fair power allocation for OFDM-CDM systems in frequency-selective fading channel[C]. IEEE SPAWC'06, Cannes, 2006: 1-5.
- [8] Sann M M and Iwao S. Resource allocation scheme in MIMO-OFDMA system for user's different data throughput requirements[C]. IEEE WCNC'07, Hong Kong, 2007: 1706-1710.
- [9] Wong C Y, Cheng R S, and Lataief K B, *et al.* Multiuser OFDM system with adaptive subcarrier, bit, and power allocation[J]. *IEEE Journal on Selected Areas Communications*, 1999, 17(10): 1747-1758.
- [10] Jang J and Lee K B. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas Communication*, 2003, 21(2): 171-178.
- [11] Yin H and Liu H. An efficient multiuser loading algorithm for OFDM-based broadband wireless systems[C]. IEEE Global Telecommunications Conference, San Francisco, 2000, 1: 103-107.
- [12] Rhee W and Cioffi J M. Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation[C]. IEEE Vehicular Technology Conference, Tokyo, 2000, 2: 1085-1089.
- [13] Shen Z, Andrewss J G, and 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.
- [14] Xu J, Kim J, and Paik W, *et al.* Adaptive resource allocation algorithm with fairness for MIMO-OFDM system[C]. IEEE VTC2006-Spring, Melbourne, 2006, 4: 1585-1589.
- [15] Seong T C and Goldsmith A J. Degrees of freedom in adaptive modulation: A unified view[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2001, 49(9): 1561-1571.
- 杜娜: 女, 1979年生, 博士生, 研究方向为MIMO、无线通信和空时信号处理等.
- 顾品标: 男, 1976年生, 博士生, 研究方向为信号与信息处理、超窄带研究等.
- 闵锐: 女, 1969年生, 副教授, 研究方向为信号与信息处理、图像编码等.
- 曹宁: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为多媒体信息处理与传输技术等.