

# 一种多用户 MIMO/OFDM 下行链路保障 QoS 的自适应传输机制

韩 锋 刘应状 朱光喜 卢小峰  
(华中科技大学电信系 武汉 430074)

**摘 要:** 在用户 QoS 参数限制下, 该文提出一种在多用户 MIMO/OFDM 下行链路使系统总速率最大的资源分配机制。基站应用空分多址接入, 使得每个子载波可支持多个用户, 应用线性预编码方法抵消用户间的干扰, 提出保障 QoS 的自适应功率、比特分配方案。该文并提出两种可应用到实际系统的低复杂度的比特加载和比特去除算法, 仿真结果表明, 这两种方法性能可非常接近最优遍历算法。

**关键词:** 多输入多输出/正交频分复用; 资源分配; 服务质量

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)07-1540-04

## An Adaptive Scheme with Guaranteed QoS for Multiuser MIMO/OFDM Downlink

Han Feng Liu Ying-zhuang Zhu Guang-xi Lu Xiao-feng

(Dept. of Electronic and Information Engineering, Huazhong University Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** This paper investigates adaptive resource allocation scheme to maximize the sum-rate under the QoS constraint for multiuser MIMO/OFDM downlink. Specifically, the basestation exploits spatial division multiple access (SDMA) to support several users in each subcarrier, and linear precoding to reduce interferences among users. An adaptive power and bit allocation scheme with guaranteed QoS is provided. And two low-complexity suboptimal bit fill and bit removal algorithms which could be used in practical systems are proposed. Simulation results show that these two algorithms achieve nearly the same performance as the optimal one.

**Key words:** MIMO/OFDM; Resource allocation; QoS

### 1 引言

日益增长的业务需求要求高速的数据速率, 第四代移动通信系统要求在高速移动环境下几 Mbit/s 的速率, 低速移动环境下达到 1 Gbit/s。如此高的速率面临着两大瓶颈: 频谱资源的匮乏和无线信道衰落。多天线多载波技术被认为是解决该瓶颈问题的关键技术, 前者可获得高的频谱效率, 后者将频率选择性信道转化为平坦衰落信道, 减轻了多径的影响, 避免了复杂的均衡技术。

在单天线下行系统, 获取最大和容量的传输策略是 TDMA 多址接入方式(例如, 只允许最高信噪比用户传输), 然而在 MIMO 下行系统中只传输一个用户并不能获得性能优化<sup>[1]</sup>。尽管脏纸编码可以获取 MIMO 广播信道的容量域<sup>[2]</sup>, 但由于其复杂的编码算法, 应用到实际系统中不太可取, 因此次优的线性预编码方法得到了重视<sup>[3,4]</sup>。本文关注多用户 MIMO/OFDM 下行链路的自适应资源分配。尽管已提出多种多用户 OFDM 自适应资源分配算法, 比如文献[5], 但与多天线技术的结合, 由于增加了空间维, 使得问题变得复杂起来。文献[6,7]提出了最大总速率的自适应方法, 但每个子

载波仅分配一个用户。文献[8]应用脏纸编码可在每个子载波上承载多个用户, 但其算法过于复杂。

本文参考文献[4], 将线性预编码机制应用到频率选择性信道, 完全消除用户间干扰, 从而在每个子载波上支持多个用户。不同于文献[4]基于香农容量的优化方案, 本文以系统总速率最大化为目标, 在发射功率和用户 QoS 限制下, 提出自适应的功率、比特分配算法。由于最优遍历算法的复杂性, 提出了两种简化算法。

标识说明: 矩阵和向量用粗体字表示。 $(\bullet)^H$ ,  $(\bullet)^\dagger$  分别表示 Hermitian 转置, 伪逆阵。 $\|\bullet\|$  表示向量 2-范数。

### 2 系统模型

多用户 MIMO/OFDM 系统如图 1 所示。考虑单小区下行链路, 基站  $M$  根发送天线, 系统中  $K$  个用户, 每用户单根接收天线, 每个 OFDM 符号包含  $N$  个子载波。假设每用户能够利用导频获得正确的信道信息, 且能够将信道信息无错误、无时延地反馈给基站端, 各用户经历的信道是相互独立同分布的。如图 1, 基站首先对各用户进行子载波、功率、比特分配, 线性预编码处理, 然后经过 IFFT 变换、添加 CP 后送至天线发送, 接收端进行逆向处理接收数据。

采用零均值循环对称高斯信道(ZMCSCG)模型, 用户  $k$

2006-12-07 收到, 2007-06-04 改回

国家自然科学基金(60496315)和国家“863”计划(2003AA12331005)资助课题

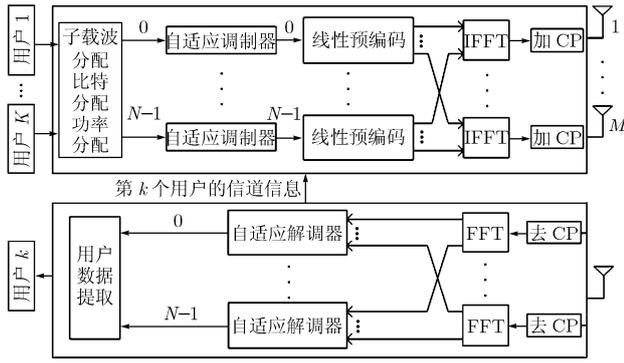


图1 多用户 MIMO/OFDM 下行系统框图

在第  $n$  个子载波上接收的符号表示为

$$y_n^k = \mathbf{H}_n^k \mathbf{x}_n + z_n, \quad k = 1, \dots, K \quad (1)$$

式中  $\mathbf{x}_n \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  为传输向量,  $\mathbf{H}_n^k \in \mathbb{C}^{L \times M}$  为用户  $k$  的信道增益向量,  $z_n$  为加性白高斯噪声, 服从均值为 0, 方差为  $\sigma^2$  的高斯分布。假定所有天线上传输的 OFDM 符号的总功率为  $P$ , 定义第  $n$  个子载波上传给用户  $k$  的调制符号为  $s_n^k$ ,  $\mathbf{w}_n^k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  代表其预编码向量,  $P_n^k$  代表其发送功率, 则第  $n$  个子载波上发送的向量表示为  $\mathbf{x}_n = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_n^k} \mathbf{w}_n^k s_n^k$ , 第  $n$  个子载波上用户  $k$  的接收符号为

$$y_n^k = \sqrt{P_n^k} \mathbf{h}_n^k s_n^k + \sum_{j \neq k} \sqrt{P_n^j} \mathbf{h}_n^j \mathbf{w}_n^j s_n^j + z_n \quad (2)$$

式中第 2 部分为用户间干扰, 此时受 OFDM 符号功率限制:

$$\sum_{n=1}^N \mathbf{E}\{\mathbf{x}_n^H \mathbf{x}_n\} \leq P \quad (3)$$

由于优化  $\mathbf{w}_n^k$ ,  $P_n^k$  非常复杂, 本文采用一种次优线性预编码机制——迫零波束成型(zero-forcing beamforming)<sup>[4]</sup>。满足

$$\mathbf{h}_n^k \mathbf{w}_n^j = 0 \quad j \neq k \quad \forall n \quad (4)$$

定义  $\mathbf{H}_n = [(\mathbf{h}_n^1)^T \dots (\mathbf{h}_n^K)^T]^T$  和  $\mathbf{W}_n = [\mathbf{w}_n^1 \dots \mathbf{w}_n^K]$ 。为满足式(4), 当  $K \leq M$  时,  $\mathbf{W}_n$  为  $\mathbf{H}_n$  的伪逆阵,  $\mathbf{W}_n = (\mathbf{H}_n)^{\dagger} = \mathbf{H}_n^H (\mathbf{H}_n \mathbf{H}_n^H)^{-1}$ 。此时, 完全抵消了用户间的干扰, 且  $\mathbf{h}_n^k \mathbf{w}_n^k = 1, k = 1 \dots K$ , 式(2)进一步表示为

$$y_n^k = \sqrt{P_n^k} s_n^k + z_n \quad (5)$$

将  $\mathbf{x}_n$  代入式(3), 得功率限制  $\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_n^k\|^2 P_n^k \leq P$ , 其中

$\|\mathbf{w}_n^k\|^2 = [(\mathbf{H}_n \mathbf{H}_n^H)^{-1}]_{k,k}$ 。由上式可见, 用户  $k$  的预编码向量不仅与其自身的信道增益向量有关, 同时与其他用户的信道增益向量有关。根据式(5), 用户  $k$  在子载波  $n$  的信噪比为  $\gamma_n^k = P_n^k / \sigma^2, k = 1 \dots K$ 。当  $K > M$  时, 需要从  $K$  个用户选取至多  $M$  个用户进行传输, 从而需要进行用户调度, 本文仅关注  $K \leq M$  的情况。

### 3 多用户自适应资源分配

在这一节, 在总发射功率和用户 QoS 参数限制下, 以获取系统最大总速率为目标, 提出自适应的功率、比特分配机制。考虑用户比特差错概率(BER)作为用户 QoS 参数, 假定

采用 QAM 调制, 则在加性白高斯信道(AWGN)下, BER 近似表示为  $\text{BER}(\gamma) \approx 0.2 \exp\left(-\frac{1.5\gamma}{2^r - 1}\right)$ <sup>[9]</sup>。式中,  $\gamma$  是信噪比,  $r$  是传输速率。定义  $\Gamma = \frac{\ln(0.2/\text{BER})}{1.5}$ , 则

$$r = \log_2(1 + \gamma/\Gamma) \quad (6)$$

以系统总速率最大化为目标, 提出以下的目标函数:

$$\left. \begin{aligned} \max \quad & \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K r_n^k \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_n^k\|^2 P_n^k \leq P \\ & \text{BER}_n^k \leq \text{BER}_{\text{target}}^k \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中  $r_n^k$  是用户  $k$  在子载波  $n$  上的传输速率,  $\text{BER}_{\text{target}}^k$  是用户  $k$  的目标比特差错概率。由于优化式(7)非常复杂, 因此需要进一步简化问题。为了降低系统复杂性, 我们假定功率在各个子载波上平均分配, 则只要使各个子载波总速率最大化。因此式(7)更新为

$$\left. \begin{aligned} \max \quad & \sum_{k=1}^K r_n^k \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_n^k\|^2 P_n^k \leq \frac{P}{N} \\ & \text{BER}_n^k \leq \text{BER}_{\text{target}}^k \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

若不考虑  $r_n^k$  的整数要求, 将用户  $k$  在子载波  $n$  上的信噪比  $\gamma_n^k$  代入式(6), 则式(8)进一步表示为

$$\left. \begin{aligned} \max \quad & \sum_{k=1}^K \log_2 \left( 1 + \frac{P_n^k}{\Gamma_k \sigma^2} \right) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_n^k\|^2 P_n^k \leq \frac{P}{N} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

利用拉格朗日优化算法, 则用户  $k$  在子载波  $n$  上的功率限制为  $\|\mathbf{w}_n^k\|^2 P_n^k = [\mu - \|\mathbf{w}_n^k\|^2 \Gamma_k \sigma^2]^+$ 。式中  $[x]^+$  表示 0 和  $x$  的最大值,  $\mu$  为功率注水系数, 由下式决定:  $\sum_{k=1}^K [\mu - \|\mathbf{w}_n^k\|^2$

$\cdot \Gamma_k \sigma^2]^+ \leq \frac{P}{N}$ 。此时, 子载波  $n$  的总速率为  $R_n =$

$$\sum_{k=1}^K \log_2 \left[ \left( \frac{\mu}{\|\mathbf{w}_n^k\|^2 \Gamma_k \sigma^2} \right)^+ \right]$$

。尽管上式给出了子载波总速率理论值, 但其没有考虑各个用户的比特整数限制, 无法应用到实际系统中。

因此, 若考虑  $r_n^k$  为整数, 定义  $Q$  为调制阶数集合,  $|Q|$  为集合中元素个数, 注意  $Q$  不包括零。则式(9)增加约束条件:  $r_n^k \in Q$ 。为了解决上述问题, 需要对每个用户和每种星座点的可能组合进行遍历搜索, 在每个子载波上需要  $(|Q| + 1)^K$  次搜索, 上式表示还需考虑用户未分配比特的情况。当用户数较多时, 遍历算法非常复杂。因此, 本文提出了两种次优的功率比特分配算法, 下面分别叙述。

### 3.1 比特加载算法

该算法的基本思想是：在每个子载波上，比特分配过程从各个用户未分配比特开始，选择要求递增功率最小的用户，使其分配比特增加一个步长，直到达到最大星座图尺寸或传输功率达到限定值。值得注意的是，由于系统的预编码矩阵  $\mathbf{W}_n$  同系统中所有用户的信道增益矩阵相关，因此当某个用户加入到系统中，即其分配的比特由 0 开始增加一个步长时，需要重新计算各个用户的  $\|\mathbf{w}_n^k\|^2$ 。

将用户  $k$  在子载波  $n$  上的信噪比  $\gamma_n^k$  代入式(6)，则用户  $k$  在子载波  $n$  上功率限制为

$$T_n^k = \|\mathbf{w}_n^k\|^2 p_n^k = (2^{r_n^k} - 1) \|\mathbf{w}_n^k\|^2 \Gamma_k \sigma^2 \quad (10)$$

因此，用户  $k$  增加调制阶数时，其耗费的功率之差表示为

$$\Delta T(r_n^k, \hat{r}_n^k) = \begin{cases} \sum_{i \in S \cup k} (2^{r_n^i} - 1) \|\mathbf{w}_n^i\|^2 \Gamma_i \sigma^2 - \sum_{i \in S} (2^{r_n^i} - 1) \\ \cdot \|\mathbf{w}_n^i\|^2 \Gamma_i \sigma^2, \hat{r}_n^k \in Q \text{ and } k \in S \\ (2^{\hat{r}_n^k} - 2^{r_n^k}) \\ \cdot \|\mathbf{w}_n^k\|^2 \Gamma_k \sigma^2, \hat{r}_n^k \in Q \text{ and } k \in \hat{S} \\ C, \quad \hat{r}_n^k \notin Q \end{cases} \quad (11)$$

式中  $S$  定义为还未分配比特或分配比特为 0 的用户集合， $\hat{S}$  定义为已经分配比特的用户集合， $r_n^k$  为用户  $k$  当前分配的比特， $\hat{r}_n^k$  为增加一个步长后分配的比特。式(11)中第 1 个式子表示假如用户  $k$  分配比特后系统耗费的功率与分配比特前系统耗费的功率之差，同时应该注意前后  $\|\mathbf{w}_n^i\|^2$  不同。 $C$  表示足够大的常数，说明该用户分配比特达到最大星座图尺寸，停止为其分配。假定算法在子载波  $n$  上进行，算法描述如下：

初始化：

(1) 根据调制方式不同，设定集合  $Q$  取值范围，且  $Q$  不包括零。对每个子载波重复以下步骤。令集合  $S = \{1, \dots, K\}$  包含所有的用户，集合  $\hat{S} = \emptyset$ 。

(2) 假定系统中只有一个用户，根据信道矩阵  $\mathbf{H}_n^k$ ，计算集合  $S$  中每个用户的  $\|\mathbf{w}_n^k\|^2$ 。

(3) 对集合  $S$  中所有用户，设定  $r_n^k = \min Q$ 。根据式(10)计算  $T_n^k$ ，若所有  $T_n^k > P/N$ ，则算法结束。

(4) 根据式(11)，选择用户  $k^*$ ，其满足  $k^* = \arg \min_{k \in S}$

$\Delta T(0, \hat{r}_n^k)$ ，使其当前比特数  $r_n^k \leftarrow \hat{r}_n^k$ 。将用户  $k^*$  从集合  $S$  中去除，增加到集合  $\hat{S}$  中。即  $\{S\} = \{S\} - k^*$ ， $\{\hat{S}\} = \{\hat{S}\} + k^*$ 。

迭代过程：

(5) 对集合  $S$ ， $\hat{S}$  中所有用户，根据式(11)计算  $\Delta T(r_n^k, \hat{r}_n^k)$ 。选择  $k^* = \arg \min_{k \in S \cup \hat{S}} \Delta T(r_n^k, \hat{r}_n^k)$ ，若  $k^* \in S$ ，则

从集合  $S$  中去除，增加到集合  $\hat{S}$  中， $\{S\} = \{S\} - k^*$ ， $\{\hat{S}\} = \{\hat{S}\} + k^*$ 。根据式(10)计算  $\hat{T}_n^k$  和用掉的功率  $P_n = \sum_{k \in S} \hat{T}_n^k$ 。

若  $P_n > P/N$  或者所有用户分配比特达到最大星座图尺寸，则算法结束。否则，使其当前比特数  $r_n^k \leftarrow \hat{r}_n^k$ ，返回步骤(5)重新迭代。最终， $[T_n^k, r_n^k]$  即为每个用户的功率、比特分配结果。

### 3.2 比特去除算法

该算法的基本思想是：在每个子载波上，比特分配过程从各个用户都分配最大的星座图尺寸开始，选择要求递减功率最大的用户，使其分配比特减少步长，直到各个用户分配的比特数都为 0 或传输功率满足限定值。值得注意的是，当某个用户分配的比特数为 0 时，同比特加载算法一样，需要重新计算各个用户的  $\|\mathbf{w}_n^k\|^2$ 。因此，用户  $k$  降低调制阶数时，其耗费的功率之差表示为

$$\Delta T(r_n^k, \hat{r}_n^k) = \begin{cases} (2^{r_n^k} - 2^{\hat{r}_n^k}) \|\mathbf{w}_n^k\|^2 \Gamma_k \sigma^2, \quad \hat{r}_n^k \in Q \\ \sum_{i \in S} (2^{r_n^i} - 1) \|\mathbf{w}_n^i\|^2 \Gamma_i \sigma^2 \\ - \sum_{i \in \hat{S}} (2^{r_n^i} - 1) \|\hat{\mathbf{w}}_n^i\|^2 \Gamma_i \sigma^2, \hat{r}_n^k \notin Q \end{cases} \quad (12)$$

式中  $S$  定义为系统分配比特不为零的用户集合， $r_n^k$  为用户  $k$  当前分配的比特数， $\hat{r}_n^k$  为减少一个步长后分配的比特数。 $\hat{S}$  定义为集合  $S$  除去用户  $k$  后组成的集合， $\hat{\mathbf{w}}_n^k$  为  $\hat{S}$  集合相应元素的预编码向量。式(12)第 2 个式子表示用户  $k$  从系统中去除前系统耗费的功率与去除后系统耗费的功率之差。假定算法在子载波  $n$  上进行，算法描述为

初始化：

(1) 根据调制方式不同，设定  $Q$  取值范围，注意集合  $Q$  不包括零，集合  $S = \{1, \dots, K\}$ ，对每个子载波重复以下步骤。

(2) 根据信道矩阵  $\mathbf{H}_n$ ，计算集合  $S$  中每个用户的  $\|\mathbf{w}_n^k\|^2$ 。

(3) 对集合  $S$  中所有用户，设定  $r_n^k = \max Q$ 。

迭代过程：

(4) 根据式(10)计算  $T_n^k$  和用掉的功率  $P_n = \sum_{k \in S} T_n^k$ 。

(5) 若  $P_n \leq P/N$  或者  $|S| = \emptyset$ ，则算法结束。

(6) 对集合  $S$  中所有用户，根据式(12)计算  $\Delta T(r_n^k, \hat{r}_n^k)$ 。选择  $k^* = \arg \max_{k \in S} \Delta T(r_n^k, \hat{r}_n^k)$ ，使其当前比特数  $r_n^k \leftarrow \hat{r}_n^k$ 。

若  $r_n^k \in Q$ ，则返回步骤(4)。否则，需要将用户  $k^*$  从集合  $S$  中去除， $\{S\} = \{S\} - k^*$ ，并返回步骤(2)重新迭代过程。最终， $[T_n^k, r_n^k]$  即为每个用户的功率、比特分配结果。

值得指出的是，比特加载算法为每用户从零比特开始分配，当信噪比相对较小时，其迭代次数较少。反之，比特去除算法从星座图最大尺寸开始分配，当信噪比相对较大时，其迭代次数较少。因此，根据信噪比相对大小，可选取相应的比特分配算法。

此外，当系统中存在的用户数超过系统所能承载的用户数时，需要在每个子载波上进行用户调度，即从  $K$  个用户中

选择最多  $M$  用户进行调度, 然后, 应用本节的功率、比特分配进行自适应传输。本算法可很容易的推广到  $K > M$  的情况, 限于篇幅限制, 不再赘述。

#### 4 仿真

为了分析算法的性能, 本文进行了蒙特卡罗仿真。由于算法是在每个子载波基础上提出, 因此仿真没有考虑子载波个数的影响, 主要分析对子载波总速率的影响。定义每个子载波上发射信噪比为  $SNR = P/(N\sigma_s^2)$ , 可供选择的调制器包括 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, 即集合  $Q = \{2, 4, 6, 8\}$ , 同时考虑信道条件非常恶化时不发送的情况。假定系统中所有用户  $BER_{target}^k = 0.001$ , 此时式(6)接近理想值, 但本方案可很容易的推广到用户 QoS 参数不同的情况。

图 2 给出了子载波总速率与发送信噪比关系图。可以看出, 不管是 6 根发送天线 6 用户系统, 还是 2 根发送天线 2 用户系统, 比特去除和比特加载算法非常接近遍历算法的性能, 该两种算法却极大降低了复杂度。为了对比, 图 2 还画出了仅发送一个最优用户时子载波的总速率, 比如发送天线数 6 用户数 6 时, 仅发送速率最大的用户, 并进行自适应的比特遍历算法。可以看出, 基站应用空分多址接入支持多个用户的总速率明显高于仅发送一个最优用户的总速率。比如, 6 根发送天线时, 最优用户发送在信噪比 20dB 时就达到了最大速率 8bit/s/Hz, 而此时遍历算法超过 18bit/s/Hz。

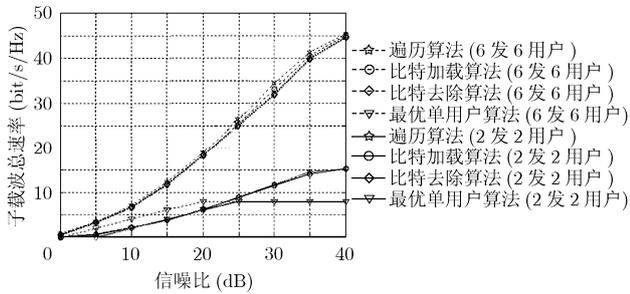


图 2 子载波总速率与信噪比关系图

图 3 给出了在不同用户数下发送天线数为 6 时子载波的总速率。可以看出, 不管发送信噪比是 20dB 还是 40dB, 随着每个子载波上承载的用户增加, 子载波总速率随之增大, 多用户分集增益越明显。同时, 比特加载和去除算法的总速率同样非常接近遍历算法的总速率, 却极大降低了复杂度。

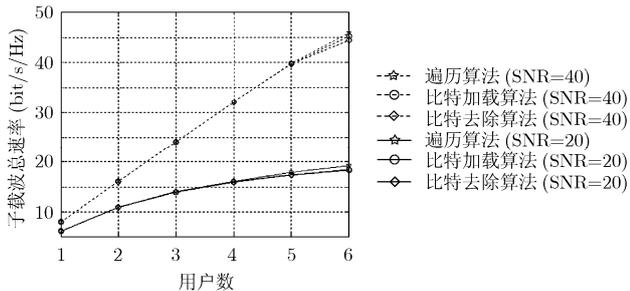


图 3 子载波总速率与系统中用户数关系图

#### 5 结束语

本文以最大化 MIMO/OFDM 系统总速率为目标, 提出了在发送功率和用户 QoS 参数限制下的自适应解决方案, 并提出了两种可应用到实际系统的比特加载和比特去除算法, 从而降低了复杂度。本文假定基站具有理想的用户信道信息, 因此研究在部分或量化信道信息下的资源分配是本文下一步的研究方向。

#### 参考文献

- [1] Tse D N. Optimal power allocation over parallel Gaussian broadcast channels. *IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings*, Ulm, Germany, 1997: 27.
- [2] Weingarten H, Steinberg Y, and Shamai S S. The capacity region of the gaussian multiple-Input multiple-output broadcast channel. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2006, 52(9): 3936-3964.
- [3] Spencer Q H, Swindlehurst A L, and Haardt M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2004, 52(2): 461-471.
- [4] Yoo T and Goldsmith A. On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(3): 528-541.
- [5] Wong C Y, Cheng R S, and Lataief K B, et al. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(10): 1747-1758.
- [6] Chemaly R, Letaief K B, and Zeghlache D. Adaptive resource allocation for multiuser MIMO/OFDM networks based on partial channel state information. *IEEE Global Telecommunications Conference*, Missouri, USA, 2005, vol.6: 3922-3926.
- [7] 卢小峰, 朱光喜, 伍仁勇. 基于多用户 MIMO/OFDM 系统的空间子信道分配算法. *通信学报*, 2006, 27(9): 34-39.
- [8] Pan C K, Cai Y, and Xu Y. Adaptive subcarrier and power allocation for multiuser MIMO-OFDM systems. *IEEE International Conference on Communications*, Seoul, Korea, 2005: 2631-2635.
- [9] Chung S T and Goldsmith A J. Degrees of freedom in adaptive modulation: a unified view. *IEEE Trans. on Communications*, 2001, 49(9): 1561-1571.

韩 锋: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为 MIMO/OFDM 下行系统中的自适应信号处理等。  
 刘应状: 男, 1964 年生, 副教授, 主要研究方向为下一代移动通信系统的关键技术等。  
 朱光喜: 男, 1945 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽带多媒体通信等。