

## 蜂窝通信系统中天线选择在虚拟 MIMO 的应用

陈霞 胡宏林

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所上海无线通信研究中心 上海 200050)

**摘要:** 天线选择技术(AS)和虚拟 MIMO(Virtual MIMO, VMIMO)技术都被广泛应用于只有一个无线射频(RF)模块的上行通信传输中。为了使两者的优势都得以发挥, 该文提出将天线选择技术应用在虚拟 MIMO 系统中, 该文中称作 VMIMO-AS 系统。然而, 仅从被调度用户设备(User Equipment, UE)中选择最好的天线组成虚拟 MIMO 并不能确保系统获得最佳的性能。该文提出了 VMIMO-AS 系统中几种不同用户设备配对算法, 并对这些算法就吞吐量性能和用户间公平度进行了比较。仿真结果表明第 1 个用户的选择需要应用 AS 原则, 而考虑到复杂度和性能的折中, 配对用户的选择则不需要应用 AS 原则。

**关键词:** 无线通信; 虚拟 MIMO; 天线选择; 用户设备配对

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2008)10-2454-05

## Virtual MIMO with Antenna Selection for Mobile Cellular Communications

Chen Xia Hu Hong-lin

(Shanghai Microsystem and Information Technology Institute of China Academy of Science,  
Shanghai Wireless Communication Research Center, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** Antenna Selection (AS) technique and Virtual MIMO(VMIMO) technique have been widely used in uplink transmission, where the User Equipment (UE) has two antennas but only one Radio Frequency (RF) link. With a view to fully take the advantages of these two techniques, in this paper we apply the AS technique in the VMIMO system, as VMIMO-AS system. However, when both the VMIMO and the AS are applied, always choose the better antennas from the users to form the VMIMO could not guarantee the optimal performance. In this paper, the UE pairing algorithms for the VMIMO system with antenna selection was studied. Different user pairing algorithms are proposed and their throughput and fairness performance are compared. Simulation results show that the first UE should be selected by using the AS technique. Comparably, the selection of the pairing user does not need the AS process, considering the trade-off between the complexity and performance.

**Key words:** Wireless communication; Virtual MIMO; Antenna selection; User pairing

### 1 引言

多输入/多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术因其能够大大提高系统容量和频谱利用率<sup>[1]</sup>, 使系统能在有限的频谱资源下传输更高速率的数据业务而得到广泛关注, 是下一代移动通信的关键技术之一。然而 MIMO 系统的主要缺点是部署多根天线而导致的高复杂度以及高成本。在蜂窝环境中, 这个缺点在基站端还能够克服, 但在用户端将变得尤为棘手, 成为 MIMO 在上行应用的一个瓶颈。这是由于一般要求用户设备具有复杂度低、体积小、成本低、功耗低等特点, 特别是对手持用户设备来说。正是由于以上这些原因, 在 3G 以及 B3G/4G 移动通信的初期, 大部分用户还是使用只有一根天线(或者有多根天线, 但只有一个 RF 模块)的设备。而且, 即使到 4G 阶段, 对设备更小更轻的普遍期望和需求, 用户端的天线数量仍受到限制, 因

此 MIMO 的优势还是不能完全发挥。

为了解决上述矛盾, 一般有两种解决方案: 一种就是天线选择技术(AS), 另外一种方案就是组成虚拟 MIMO (VMIMO)进行合作传输。天线选择技术通过使 RF 模块的个数小于实际的天线数, 把无线射频(RF)模块在性能较好的天线之间切换, 从而获得空间分集增益<sup>[2]</sup>。而上行虚拟 MIMO 技术, 就是让只有一根天线的两个或者多个用户设备(UE)在同个资源块上传输独立的数据, 这样发射端看起来有多根天线, 同时如果假定基站端有多根接收天线, 则在上行构建了虚拟 MIMO 的传输方式<sup>[3, 4]</sup>。可见, 天线选择技术和虚拟 MIMO 技术可以在不增加终端的复杂度和成本的前提下, 达到相当于多天线的性能, 从而被广泛用于上行通信系统中。但目前为止, 这两种技术都是被分开应用于系统中, 还未有文献提出将这两种技术结合起来应用。实际上, 这两种技术应该是互补而不是互相矛盾排斥的关系。因此本文提出将这两种技术结合起来, 将天线选择技术应用在虚拟 MIMO 系

统中(本文中称为 VMIMO-AS 系统), 从而使两者的优势都得以发挥。

当在虚拟 MIMO 中结合了天线选择技术, 用户配对变得更加复杂。由于需要考虑配对用户的信道特性(比如选择具有正交信道的两个用户), 每个 UE 总是选择其最好的一根天线组成虚拟 MIMO 并不一定能确保所组成的虚拟 MIMO 系统性能最佳。基站需要遵循一定的准则进行用户配对, 比如正交准则, 选择具有正交信道的两个用户组成虚拟 MIMO, 以较好获得多用户分集增益。除此以外, 基站调度时还需要考虑其他的准则, 但具体采用何种准则则取决于系统设计者偏重的目标: 是为了最大化系统吞吐量, 确保用户间最公平, 或者是两者的一种折中, 比如比例公平调度算法。目前针对虚拟 MIMO 的用户配对算法还未涉及天线选择技术。本文主要研究了结合天线选择技术的虚拟 MIMO 系统中的用户配对算法。

## 2 系统模型和接收机结构

上行虚拟 MIMO 的一个简单模型如图 1 所示。我们假定无小区间干扰或者单小区的场景, 即只有一个基站和小区内总共  $K$  个 UE 通信, 每个 UE 有两个发射天线, 但只有一个 RF 模块, 而基站则安装了  $N_r$  根天线, 本文中  $N_r=2$ 。本文主要研究将两个单天线的 UE 配对组成虚拟 MIMO 模式进行传输, 即  $N_u=2$ , 这样的配置是符合现实考虑的。比如, 3GPP LTE 中上行 MIMO 方案的基准配置就是用户端一根发送天线, 基站端两根接收天线<sup>[5]</sup>, 并且考虑用户端两根天线但只有一个 RF 模块的配置。然而, 本文所提的配对算法可以扩展到多于两个的用户配对组成虚拟 MIMO 进行传输的场景。

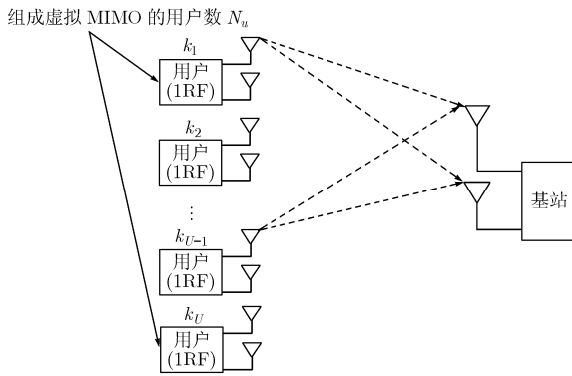


图 1  $2 \times 2$  虚拟 MIMO 场景

假定信道是平坦缓变信道, 即假定在一个传输间隔 (Transmitting Time Interval, TTI) 内, 信道是准静态的。同时假定信道估计是完全理想的, 因此接收端能获得完全准确的信道状态信息 (CSI), 但发送端不知道 CSI。此外, 假定各个用户同基站是完美同步的。

假定已经将  $N_u$  个 UE 配对组成虚拟 MIMO 传输, 则不

同用户发送的信号经过编码、调制以及无线信道后, 基站端接收到的信号可表示成:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中  $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_{N_u}]^T$  是  $N_u \times 1$  向量, 表示来自  $N_u$  个用户的发送信号, 并且  $E\{|s_i|^2\} = 1$ ;  $\mathbf{y}$  是  $N_r \times 1$  向量, 表示基站端  $N_r$  根接收天线的收到的信号;  $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_{N_u}]$  是个  $N_r \times N_u$  矩阵, 其第  $i$  列向量  $\mathbf{h}_i = [h_{i,1}, \dots, h_{i,N_r}]^T$  对应于第  $i$  个用户到基站端  $N_r$  根接收天线的信道。由于本文中只考虑平坦衰落信道, 我们把矩阵  $\mathbf{H}$  中的元素建模成独立复高斯随机变量, 即  $E\{h_{i,j}\} = 0$ , 且  $E\{|h_{i,j}|^2\} = 1$ 。而  $\mathbf{n}$  是  $N_r \times 1$  高斯白噪声向量, 均值为 0, 方差  $E(\mathbf{n}\mathbf{n}^H) = \delta^2 \mathbf{I}_{N_r}$ 。功率控制可以对抗深衰落, 消除远近效应以及多用户或小区间干扰的影响等, 从而满足不同用户的服务质量 (Quality of Service, QoS) 需求, 增加系统的吞吐量<sup>[5]</sup>。在不采用功率控制或者非理想功率控制场景下, 考虑到不同用户的 QoS 需求以及多用户干扰等因素, 则不同用户的路径损耗不能被补偿掉, 因此接收信号可表示成:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\sqrt{\mathbf{P}}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{P} = \text{diag}(p_1, \dots, p_{N_u})$  是个对角阵, 其元素表示处于不同位置用户所经历的路径损耗程度。相比之下, 在理想功率控制的场景中, 系统中的路径损耗将被补偿掉。同时如果我们假设所有用户具有相同的 QoS 需求, 且仅考虑单小区的场景 (即不考虑小区间的干扰), 那么在基站端接收到的来自不同用户的信号功率将一样, 即  $\mathbf{P} = \mathbf{I}$ 。

本文采用最小均方误差 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 结合排序连续干扰抵消 (Ordered Successive Interference Cancellation, OSIC) 的接收机方案。OSIC 的原则是每次迭代中具有最高信干噪比 (Signal Interference Noise Ratio, SINR) 的那路信号流都会先被解调, 这样确保了所有数据层中最高最差 (highest worst-case) SINR<sup>[6]</sup>。定义  $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{N_u}\}$ , 其元素分别对应于发送天线 (用户)  $\{1, \dots, N_u\}$  在 OSIC 中的检测顺序。在第  $l$  次迭代中, 具有最强 SINR 的用户  $\pi_l$  首先被解调, 即

$$\pi_l = \arg \max_i \gamma_{\text{OSIC},l,i} \quad (3)$$

其中  $\gamma_{\text{OSIC},l,i}$  表示第  $l$  次迭代中第  $i$  个用户的 SINR, 由下式计算得:

$$\gamma_{\text{OSIC},l,i} = \frac{p_i |\mathbf{w}_i^H \mathbf{h}_i|}{\mathbf{w}_i^H \mathbf{Z}_{\text{OSIC},l,i} \mathbf{w}_i} \quad (4)$$

其中  $\mathbf{w}_i$  对应于第  $l$  次迭代中用户  $i$  的权重矢量, 可由式 (5) 计算得到:

$$\mathbf{w}_i = p_i \mathbf{Z}_{\text{OSIC},l,i}^{-1} \mathbf{h}_i, \quad 1 \leq i \leq N_u - l + 1 \quad (5)$$

而  $\mathbf{Z}_{\text{OSIC},l,i}$  是干扰加噪声相关矩阵, 定义为

$$\mathbf{Z}_{\text{OSIC},l,i} = \delta^2 \mathbf{I}_{N_r} + \sum_{j \in \{\pi_1, \dots, \pi_{l-1}, i\}} p_j \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H, \quad 1 \leq i \leq N_u - l + 1 \quad (6)$$

其中  $\overline{\{\pi_1, \dots, \pi_{l-1}, i\}}$  表示集合  $\{1, \dots, N_u\}$  中排除了标号为  $\{\pi_1, \dots, \pi_{l-1}, i\}$  剩下的子集。换句话说, 前面第  $(l-1)$  次迭代后已解调的标号为  $\{\gamma_1, \dots, \gamma_{l-1}\}$  的用户信号流对第  $i$  个用户的影响在第  $l$  次迭代中被消除了。

### 3 VMIMO-AS 中用户配对算法

文献[7]中提出了一种针对虚拟 MIMO 系统的比例公平的用户配对算法(Double Proportional Fairness, D-PF), 该算法在选择第 1 个用户和及其配对用户时都采用了 PF 的原则。具体算法可以描述为下面两步:

步骤 1 根据 PF 准则选取第 1 个用户  $k_1$ [8]

$$k_1 = \arg \max_{k \in \{1, 2, \dots, K\}} \left( \frac{R_k(t)}{\bar{R}_k(t)} \right) \quad (7)$$

其中  $R_k(t)$  表示  $t$  时刻用户  $k$  的期望吞吐量,  $\bar{R}_k(t)$  表示用户  $k$  在滤波窗宽为  $\Delta t$  的低通滤波平均吞吐量[8]:

$$\begin{cases} \bar{R}_k(t) = (1 - 1/\Delta t)\bar{R}_k(t-1), & k \neq k'(t) \\ \bar{R}_{k'}(t) = (1 - 1/\Delta t)\bar{R}_{k'}(t-1) + (1/\Delta t)R_{k'}(t) \end{cases} \quad (8)$$

步骤 2 根据改进的 PF 准则选择配对用户, 具体表示为

$$k_2 = \arg \max_{k_2 \neq k_1} \left( \frac{R_{k_1}(t) + R_{k_2}(t)}{\bar{R}_{k_1}(t) + \bar{R}_{k_2}(t)} \right) \quad (9)$$

而其中预期吞吐量又是通过下式获得:

$$R(t) = \log_2(1 + \gamma(t)) \quad (10)$$

其中  $\gamma(t)$  表示  $t$  时刻的 SINR。这里需要说明的是, 为简单起见, 步骤 1 中的 SINR 是假定在没有其他用户干扰的情况下获得的。而在步骤 2 中 SINR 的计算则是考虑到其他用户的干扰, 并根据不同的接收机结构计算的。在 3GPP LTE 中, 大部分相关提案均采用了这样的计算方法, 如文献[4]。本文中采用了 MMSE+OSIC 结构的接收机, 其 SINR 的计算见式(4)。

根据天线选择的原则, 每个 UE 根据每根天线空间分集增益的不同, 选择较好的天线进行传输。因此, 当虚拟 MIMO 系统中结合了天线选择技术, 除了虚拟 MIMO 本身的多用户分集的增益, 每个用户还多了一维天线选择的空间增益, 配对算法将变得更加复杂。针对这个问题, 在原先没有天线选择的虚拟 MIMO 的配对算法的基础上(如以上所述), 我们提出了几种针对 VMIMO-AS 系统的用户配对方案。和虚拟 MIMO 中的配对方案一样, VMIMO-AS 系统的配对方案也可以分两步走, 先选择第 1 个用户, 然后再选择第 2 个用户, 但 VMIMO-AS 系统中的每个用户还可以进行天线选择, 进而获得更多的增益, 因而产生以下几种可选的组合, 具体描述如下:

(1)当选择第 1 个用户时, 应用如步骤 1 同样的算法, 但所凭借 SINR 有以下两种可能:

M11: 如天线选择原则一样, 根据每个 UE 选出的最好天线的 SINR。

M12: 根据每个 UE 两根天线平均的 SINR。

(2)选出第 1 个用户后, 当选择其配对用户时, 应用如步骤 2 同样的算法, 但由于天线选择的应用, 将出现以下可能的方式:

M21: 仅对第 1 个选出的 UE 的最好的天线进行配对; 选取配对用户时, 仅在小区中其余用户的最佳天线中进行匹配搜索。

M22: 仅对第 1 个选出的 UE 的最好的天线进行配对; 选取配对用户时, 在小区中其余用户的所有天线中进行匹配搜索。

M23: 对第 1 个选出的 UE 的所有天线都进行配对; 选取配对用户时, 仅在小区中其余用户的最佳天线中进行匹配搜索。

M24: 对第 1 个选出的 UE 的所有天线都进行配对; 选取配对用户时, 在其余用户的所有天线中进行匹配搜索。

显然, M21 方法的复杂度相对最低, 而 M24 的复杂度最高, 可以预见 M24 的吞吐量性能会最好。在第 4 节, 我们将对上述这 8 种可能的组合进行仿真和比较。为后续描述方便, 我们把这些方案的各种组合的可能性命名为:  $\alpha$ - $\beta$ , 其中  $\alpha$  代表(M11, M21)中的一种,  $\beta$  代表(M21, M22, M23, M24)中的一种。例如, 方案 M11-M21 表示选取第 1 个 UE 时, 是根据方案 M11, 选取配对用户时是根据方案 M21。

### 4 仿真结果和性能比较

本节中, 我们将通过蒙特卡罗仿真评估不同的用户配对算法的性能。为简单起见, 假定单小区环境, 并且每个用户在每次配对时, 都被分配了所有的资源块。本仿真主要基于  $2 \times 2$  虚拟 MIMO 的配置。假定调度的频率是每帧(这里一帧持续一个 TTI(0.5ms)的时间)调度一次, 同时信道每帧更新一次, 在每次调度中, 根据第 3 节描述的各种用户配对算法选择组成虚拟 MIMO 的两个用户。本仿真中, 采用了 12 径的典型市区(Typical urban, TU)[9]信道, 用户移动的速率是 3km/h, 同时假设理想信道估计, 接收端完全知道 CSI。分别针对功率控制完美和不完美两种场景, 仿真分析了不同配对算法的吞吐量和用户间公平度性能。在评估用户公平度时, 本文采用累积量分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)公平度准则, 这个公平度准则被 IEEE802.20 等标准中所采用[10]。

对于功率控制理想的场景下, 我们假定小区中的总的 UE 数  $K = 120$ , 且假定每个 UE 在基站端的接收功率一样, 都是 10dB, 表 1 和图 2 给出了功率控制非理想场景下的仿真结果。表 1 中, 行表示选第 1 个 UE 的方法, 列表示选配对用户的方法。第 1 行表示选择第 1 根天线时, 每个 UE 首先根据天线选择原则选出了最好的天线, 而第 2 行则是根据每个 UE 两根天线的平均 SNR。从表中, 可以看出, 第 1 行相对第 2 行, 大部分对应列的吞吐量都有一定的增益, 因此

表 1 理想功率控制下的吞吐量性能比较(bps/Hz)

用户配对算法	配对用户的选择	配对用户的选择			
		M21	M22	M23	M24
第 1 个	M11	4.1017	4.2182	4.0835	4.2231
用户的选择	M12	4.0637	4.1262	4.1340	4.2123

表 2 非理想功率控制情况下的吞吐量性能比较(bps/Hz)

用户配对算法	配对用户的选择	配对用户的选择			
		M21	M22	M23	M24
第 1 个	M11	4.8581	5.0163	4.9108	5.0241
用户的选择	M12	4.8178	4.9502	4.9511	5.0147

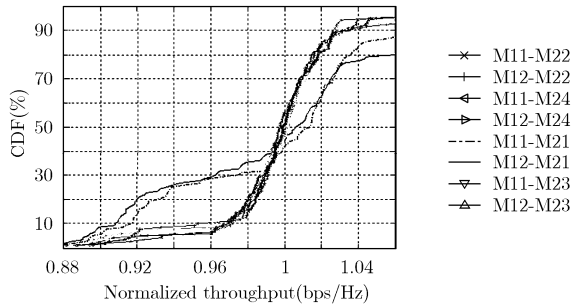


图 2 理想功率控制下的 CDF 公平度曲线

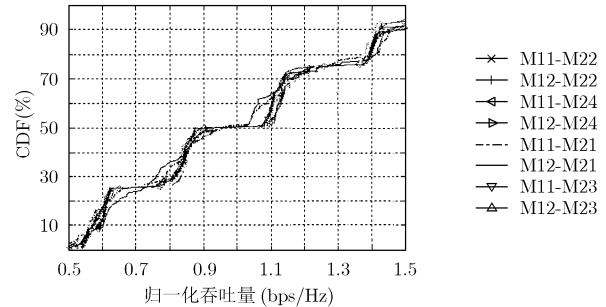


图 3 非理想功率控制情况下的 CDF 公平度曲线

说明在选择第 1 根天线时，根据天线选择原则的应用带来了一定的增益。但第 3 列特殊，第 1 行的吞吐量比第 2 行的吞吐量差，即(M11, M23)方案比(M12, M23)方案差，这是由于 M23 比较特殊，选第 2 个用户时，它搜索小区中其余用户的最佳天线与第 1 个已选出用户的所有天线与进行匹配，因此，出现了 M12-M23 的性能优于 M11-M23 的结果。虽然 M24 也是考虑第 1 个已选用用户的所有天线，但 M24 搜索的是小区中其余用户的所有天线，相当于搜索要配对两个用户的所有天线的最佳组合，因此和 M23 有很大的区别。M24 对应列的吞吐量相比其他列都有一定的增益，但显然 M24 方案的复杂度在所有列中是最高的。图 2 是各种方案的 CDF 公平度曲线。从图中，可以看到 M11-M21 和 M12-M21 方案曲线比较分散，而其他方案相对比较集中。表明 M11-M21 和 M12-M21 这两种方案中，最好和最差用户的吞吐量性能差别比较大，即这两个方案的 CDF 公平度比较差。因此，再选择配对用户时，仅搜索其余用户的最好的天线并不能确保虚拟 MIMO-AS 系统获得比较好的 CDF 公平度性能。相对而言，其余 6 种配对方案的 CDF 公平度曲线区别不是很明显。因此从吞吐量性能、CDF 公平度性能以及这些配对方案的复杂度几个方面综合考虑，可以看到 M11-M22 的方案相对优于其他方案。

如果没有理想功率控制，由于天线用户会经历不同程度的路径损耗，即使他们的发射功率都一样，基站端各个用户的平均接收 SNR 也会不同。为了模拟这种场景，将小区中总共  $K=120$  个用户等分成 4 组，接收的 SNR 分别为：5dB, 10dB, 15dB 和 20dB。表 2 和图 3 给出了功率控制非理想情况下，这 8 种配对方案的仿真结果。从表 I2 可以看到和表 1 相似的结果：第 1 行的结果相对的第 2 行都有一定的增益，而最后一列的结果相对其他列的结果而言是最好的。但表 2

中各种方案的吞吐量结果比表 1 中相应的结果大一些，这点增益主要是由于功率控制非理想情况下多用户分集的增益较为明显。而且，从图 3 可以观察到这 8 种方案的 CDF 公平度曲线区分得不是很清楚，表明在功率控制非理想的场景下，这些方案的 CDF 公平度差别不大。

### 5 结束语

本文提出将天线选择技术应用在虚拟 MIMO 系统中，并研究了这种结合下的用户配对算法，提出了 8 种方案组合。仿真结果表明在配对过程中，第 1 个用户的选择需要应用天线选择原则，即每个 UE 选择其相对较好的天线；而在选择第 1 个用户的配对用户时，则不应用天线选择原则。但从性能和复杂度折中的角度，最好的一个方案组合是 M11-M22，即只选择第 1 个用户时，应用了天线选择原则，而在其余用户的所有天线中搜索所选天线的配对用户。

### 参考文献

- [1] Foschini G J and Gans M J. On Limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Communications*, 1998, 6(3): 311-335.
- [2] Chen Z, Yuan J, and Vucetic B. Analysis of transmit antenna selection/maximal-ratio combining in Rayleigh fading channels. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2005, 54(4): 1312-1321.
- [3] 3GPP TSG RAN1#46, R1-062074, Link Simulation Results for Uplink Virtual MIMO, Tallinn, Estonia, Aug. 28 – Sept. 1, 2006.
- [4] 3GPP TSG-RAN 1 #46, R1-062052, UL System Analysis with SDMA, Tallinn, Estonia, August 28th – Sept. 1st, 2006.

- [5] 3GPP, TR 25.814(V710), Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA), 2006.
- [6] Yang L, Cheng S, and Wang H. Partial decision ordered successive interference cancellation detection algorithm for VBLAST, In Proc. IEEE PIMRC'2004, Sep. 2004, Vol. 3: 1564-1567.
- [7] Chen. X, Hu H L, and Chen H H. Double Proportional Fair User Pairing Algorithm for Uplink Virtual MIMO Systems, submitted to IEEE Transaction on wireless communication, Dec. 2006.
- [8] Park Taewon, Shin Oh-Soon, and Lee Kwang Bok. Proportional fair scheduling for wireless communication with multiple transmit and receive antennas, IEEE VTC '03 (Fall), Orlando, Florida, USA, Oct. 2003: 1573-1577.
- [9] COST 207, Digital Land Mobile Radio Communications, Luxemburg: Commission of the European Communities, 1989.
- [10] 802.20 Evaluation Criteria – Ver 06, IEEE C802.20-03/94.
- 陈霞: 女, 1980年生, 博士生, 从事未来移动通信领域多用户 MIMO 的研究.
- 胡宏林: 男, 1975年生, 博士, 副研究员, IEEE 会员, 主要从事移动通信领域的研究.