

MIMO-OFDM 系统的自适应 多用户分集及性能分析

胡封晔, **王树勋**, 孙晓颖, 郭 纲

(吉林大学通信工程学院, 吉林长春 130025)

摘 要: 本文建立基于随机波束成形和自适应调制的 MIMO-OFDM 系统的自适应多用户分集系统模型, 提出随机波束成形 QR 接收机的自适应多用户分集资源分配算法及其简化算法, 推导在最大化系统吞吐量条件下系统的误码性能。仿真结果表明该算法在用户数很小时使系统性能收敛到特征波束成形系统的性能; 当用户数增多时, 采用天线分配算法的多用户分集系统能获得比特特征波束成形系统更好的性能; 将自适应编码调制技术运用到多用户分集系统来提高系统的实际吞吐量和误码性能。

关键词: MIMO-OFDM; 自适应调制; 多用户分集

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 07-1324-05

The Adaptive Multi-User Diversity and Performance Analysis Based on MIMO-OFDM System

HU Feng-ye, **WANG Shu-xun**, SUN Xiao-ying, GUO Gang

(Institute of Communication Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130025, China)

Abstract: In this paper, an model of adaptive multi user diversity based on random beamforming and adaptive modulation MIMO-OFDM system is established. An resource allocation algorithm and simplified algorithm of adaptive multi user diversity combining random beamformer and linear QR receiver are proposed. The system BER performance is deduced when the system throughput is maximal. Simulation result shows that the algorithm can make the system performance approach that of eigen beamforming system even the user number is small. Multi user diversity with antenna allocation can achieve better performance than that of eigen beamforming system. Finally, adaptive subchannel coded modulation is adopted to improve system throughput and BER performance further.

Key words: MIMO-OFDM; adaptive modulation; multi user diversity

1 引言

多用户分集能利用不同用户信道衰落的独立性提高系统容量。在单入单出(SISO)多用户分集系统中, 发射机将资源分配给信道条件最好的用户, 从而使系统吞吐量达到最大^[1]。在[2, 3]中分别研究了多用户分集在 MIMO 多址信道和广播信道中的应用。在文献[4]中, 为实现在慢衰落信道中的多用户分集, 提出了一种随机波束成形技术, 增加信道的波动范围, 且将信号发射给信道矩阵与波束成形矩阵最匹配的用户。为获得更高的数据率, 这种方案被扩展到 MIMO 系统中^[5, 6]。

自适应调制能根据信道条件好坏调整数据速率, 已被应用到多用户分集系统^[7]、MIMO 系统^[8, 9]、蜂窝系

统^[10]、OFDM 系统^[11]及 MIMO-OFDM 系统^[12~14]中。在文献[5]中, 提出了 MIMO 系统中利用多用户分集的随机波束成形方案, 其中主要考虑窄带无线系统的情况, 而在宽带无线通信中, 符号周期变得越来越小, 因此系统信号受频率选择性衰落的影响, 该方案不再适用。

本文联合考虑多用户分集和自适应调制技术将[15]提出的可变速率方法推广到频率选择性衰落信道上, 建立基于随机波束成形和自适应调制的 MIMO-OFDM 系统的自适应多用户分集系统模型, 提出随机波束成形 QR 接收机的自适应多用户分集资源分配算法及其简化算法, 在最大化系统吞吐量条件下推导系统的误码性能。实验结果表明, 与文献[4, 5]中的 SVD 线性接收机相比, 本文提出的 QR 线性接收机即使用户数很

少或平均功率较大时, 系统的吞吐量也能很快收敛到特征波束成形系统的性能; 当用户数增加时, 将天线分给不同用户可以获得比特特征波束成形系统更好的性能; 在 MIMO-OFDM 系统中, 如果对每个子信道采用不同的编码调制方式, 当天线数或载波数较大时, 将会增加设备的复杂度, 因此本文采用子信道分组, 同组子信道采用相同调整方式的方法, 以简化系统结构。

2 系统模型

基于 MIMO-OFDM 系统的多用户分集系统框图如图 1 所示。考虑一个基站和多个移动终端的多用户通信系统, 设信道为频率选择性瑞利衰落信道, 且认为在一帧数据传输时间内, 信道状态保持不变; 发射天线和接收天线之间的多径数为 L , 每条信道的最大信道长度为 V , $g(t)$ 为发射符号的脉冲成形函数, 则在第 l 条信道上的 $g(t)$ 的抽样序列可表示为 $\{g_l(n), n = 0, \dots, V-1\}$; 设 MIMO-OFDM 系统的子载波个数为 N_c , 发射系统由 M_t 个 OFDM 发射器组成。每个 OFDM 发射器由相应的自适应编码调制器, 功率分配器, 及 IFFT 模块构成。对 (M_t, M_r) 的 MIMO 信道而言, 每个子载波的空频信道对应一个波束成形器, 一个空频信道由 M_t 个平行子信道组成。在接收端, 再通过 FFT 将各个子载波的信息分离出来, 并分别进行相应的解码及数据检测。设第 k 个用户的第 i 个子载波上的发射信号为 $x_k(i)$, 则在经过 FFT 处理后的接收信号向量可表示为:

$$\mathbf{r}_k(i) = \mathbf{H}_k(i) \mathbf{x}_k(i) + \mathbf{n}_k(i) \quad (1)$$

其中, $\mathbf{n}_k(i)$ 为独立同分布的复加性高斯白噪声向量 ($\mathbf{n}_k(i) \sim N(0, N_0 \mathbf{I}_{M_r})$)

$\mathbf{H}_k(i)$ 为第 i 个子载波对应的空频信道, 可表示如下:

$$\mathbf{H}_k(i) = \sum_{l=1}^{L-1} \left(\sum_{v=0}^{V-1} \beta_{l,i} \alpha_{R,l} \alpha_{T,l}^T \right) e^{-j2\pi v i / N_c} \quad (2)$$

其中, β_l 为第 l 条路径的衰落系数, $\alpha_{R,l}$ 和 $\alpha_{T,l}$ 分别为第

条路径的接收天线阵列响应向量和发射天线阵列响应向量。

3 随机波束成形和天线分配技术

在慢衰落信道中, 多用户分集只能获得有限的分集增益, 为了提高增益, 就必须增加信道的变化速度和波动范围^[3]。在每个空频信道的发射端采用随机波束成形技术, 就是为了增加空频信道的波动, 当随机波束成形矩阵和某用户的空频信道矩阵相匹配时, 信道的波动到达峰值, 则根据比例公平调度算法^[16], 发射机将资源分配给该用户。

用户 k 的第 i 个载波信道矩阵的奇异值 (SVD) 分解可表示为:

$$\mathbf{H}_k(i) = \mathbf{U}_k(i) \mathbf{\Lambda}_k(i) \mathbf{V}_k^H(i) \quad (3)$$

其中, \mathbf{U}_k 和 \mathbf{V}_k 为正交阵, $\mathbf{\Lambda}_k$ 为对角阵, 对角线元素为 \mathbf{H}_k 的奇异值。令 $\mathbf{V}_b^i (1 \leq i \leq N_c)$ 表示第 i 个载波空频信道的随机波束成形矩阵, \mathbf{V}_b^i 为随机矩阵 \mathbf{H}_b^i 的右奇异矩阵, \mathbf{H}_b^i 是与用户信道矩阵同分布的随机矩阵。基站向所有用户发送导频信号, 以测试用户的信道信息, 用户 k 的接收信号在 FFT 变换后, 第 i 个空频信道的接收信号可表示为:

$$\mathbf{Y}_k(i) = \mathbf{H}_k(i) \mathbf{V}_b^i \mathbf{X}_k(i) + \mathbf{n}_k(i) \quad (4)$$

在接收端, 可通过信道估计得到合成信道 $\mathbf{H}_k(i)$ \mathbf{V}_b^i , 并对接收信号进行相应的线性处理。接收信号经过线性处理后, 可表示为:

$$\hat{\mathbf{X}}_k(i) = \mathbf{Q}_k^H(i) \mathbf{Y}_k(i) \quad (5)$$

其中, $\mathbf{Q}_k(i)$ 为正交阵, 且 $\mathbf{H}_k(i) \mathbf{V}_b^i = \mathbf{Q}_k(i) \mathbf{r}_k(i)$, $\mathbf{r}_k(i)$ 为上三角矩阵。因此

$$\hat{\mathbf{X}}_k(i) = \mathbf{r}_k(i) \mathbf{X}_k(i) + \hat{\mathbf{n}}_k(i) \quad (6)$$

其中, $\hat{\mathbf{n}}_k(i) = \mathbf{Q}_k^H(i) \mathbf{r}_k(i)$, 其满足 $E(\hat{\mathbf{n}}_k(i) \hat{\mathbf{n}}_k^H(i)) = \sigma_n^2 \mathbf{I}$, 第 j 子信道的有效信噪比为:

$$\rho_k(i) = \frac{(\mathbf{r}_k^{jj}(i))^2}{\sigma_n^2} \quad (7)$$

其中, \mathbf{r}_k^{jj} 为矩阵 $\mathbf{r}_k(i)$ 的对角线元素。

将有效信噪比反馈到发射端, 发射端根据比例调度算法选择期望用户, 并利用有效信噪比对总功率进行功率分配, 则期望用户所获得的系统容量为:

$$C^T = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{M_t} \log_2(1 + p_j(i) (\mathbf{r}_k^{jj}(i))^2)}{KN_c} \quad (8)$$

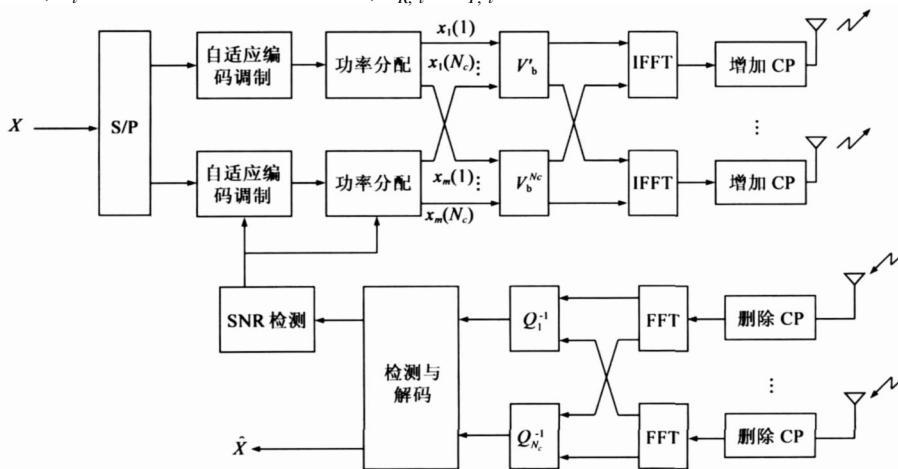


图 1 基于 MIMO-OFDM 系统的多用户分集系统模型

其中, $p_j(i) = \left[\mu - \frac{1}{(\tilde{r}^j(i))^2} \right]^+$, $\sum_j p_j(i) = \frac{P}{N_c}$, P 为总发射功率, K 为系统内的活动用户数.

在 MIMO-OFDM 信道中, 采用不同天线分配技术, 利用随机波束成形和 QR 接收机的多用户分集算法的步骤如下:

(1) 在发射端产生 N_c 个不同载波的随机波束成形矩阵, 在子信道间平均分配导频信号的发射功率, 将各个载波的频域发射符号向量分别和随机波束成形矩阵相乘.

(2) 将信号从不同的天线发射出去.

(3) 在接收端, 对每个载波的接收信号向量用 QR 接收机进行线性处理, 并计算每个子信道的有效信噪比.

(4) 将信噪比反馈到发射端.

(5) 设将 M_t 个天线分别分配给不同的用户, 这就需要根据反馈的有效信噪比对 M_t 个天线分别进行比例调度算法. 设第 m 根天线对应的用户为 k_m , 则:

$$k_m = \arg \max_k \left\{ \frac{R_{k,m}}{T_k} \right\} \quad (9)$$

其中, $R_{k,m}$ 表示第 m 根天线对应的用户 k 的不同载波子信道的传输速率和, T_k 表示用户 k 在过去一段时间的平均吞吐量. 由式(10), 发射机选出 M_t 个用户 (k_1, k_2, \dots, k_{M_t}), 每个天线的发射信号对应一个用户, 每个用户分配相同的发射功率. 如果每个用户分配的天线数大于 2, 则根据“灌水原理”进行天线间的功率分配.

(6) 将信号同时发射给 M_t 个期望用户.

(7) 每个用户采用 QR 接收机抑制其他用户的干扰信号, 提取自身的接收信号. 结合天线分配的多用户分集技术所能获得的系统吞吐量为:

$$C^{AT} = \frac{\sum_{i=1}^{M_t} \max_k \sum_{j=1}^{N_c} \log_2(1 + p_k^j(i) (\tilde{r}_k^j(i))^2)}{KN_c} \quad (10)$$

其中, $p_k^j(i)$ 为第 k 个用户的第 i 个载波的第 j 个空间子信道的发射功率.

4 自适应多用户分集技术

在多用户系统中, 用户有不同的服务要求, 如果对每个用户采用固定的编码调制方式, 不利于系统频带资源的有效利用. 因此将考虑在不同服务要求下的自适应编码调制技术^[7]. 利用接收机反馈的有效信噪比, 对用户的发射参数进行调整.

考虑离散速率和一定 BER 约束条件下的多用户分集系统的自适应编码调制方案. 采用固定编码速率为 1/2 的编码器, 通过删除码实现可变速率编码. 具体的编码调制方式见表 1.

表 1 各种调制方式的编码增益及吞吐量

编码速率	调制方式	d_{free}	吞吐量 (bits/s/Hz)
1/2	4QAM	1	1
2/3	8QAM	6	2
3/4	16QAM	5	3
4/5	32QAM	4	4
5/6	64QAM	4	5
6/7	128QAM	3	6
7/8	256QAM	3	7

令 $b_j(i), j = 1, \dots, M_t$, 表示分配给期望用户的第 i 个空频信道的第 j 根天线的比特数, 采用 QAM 调制方式的第 j 个子信道的误码率可表示为:

$$BER_j(i) \approx C \exp \left[\frac{-1.6 G_c^j(i) p_j(i)}{2 \bar{b}_j(i) - 1} \right] \quad (11)$$

其中, C 为常数, $G_c^j(i)$ 为第 j 个子信道的编码增益, $\bar{b}_j(i)$ 和 $p_j(i)$ 分别为第 i 个空频信道的第 j 子信道的有效信噪比和发射功率, 且 $\sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{M_t} p_j(i) = P$, P 为总发射功率. 子信道的误码率满足以下约束条件:

$$BER_j(i) \leq BER_{target} \quad (12)$$

第 i 个空频信道的第 j 个子信道的最大信息比特数可表示为:

$$\bar{b}_j(i) = floor \left[\log_2 \left(1 + \frac{-1.5 G_c^j(i) p_j(i)}{\ln(BER_{target}/C)} \right) - 1 \right] \quad (13)$$

其中, $floor(x)$ 表示不大于 x 的最大整数, 则系统的总

吞吐量为: $B_T = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{M_t} \bar{b}_j(i)}{N_c}$.

在总功率及误码率约束条件下的最大化系统吞吐量的子信道功率分配为:

$$p_j(i) = \left[\mu - \frac{1}{K \bar{b}_j(i)} \right]^+ \quad (14)$$

其中, $K = \frac{1.5 G_c}{\ln(BER/C)}$, $x^+ = \max(0, x)$.

在采用天线分配技术的系统中, 每个用户的误比特率都必须满足要求, 则系统所能获得的总吞吐量为获得资源的用户的吞吐量和:

$$B^{AT} = \frac{\sum_{i=1}^{M_t} \max_k \sum_{j=1}^{N_c} \bar{b}_j^k(i)}{N_c} \quad (15)$$

其中, $\sum_{i=1}^{N_c} \bar{b}_j^k(i)$ 表示分配到第 j 根天线的第 k 个用户获得的吞吐量.

简化算法:

为使最大化系统吞吐量, 需要对 $N_c M_t$ 个子信道进

行比特分配, 当 N_c 或 M_t 增加时, 系统的复杂度会大大增加. 简化算法主要采用对子信道分组的方法, 对同一组子信道分配相同比特数, 从而降低系统复杂度. 根据式(14)计算个载波分配的比特数, 将子信道按比特数排序, 使 $b_j(1) < b_j(2) < \dots < b_j(N_c), j = 1, \dots, M_t$. 设 S 个子信道为一组, 同一组中子信道比特数按从小到大的顺序表示为 $b_j(1), \dots, b_j(S)$, 为简化发射接收机的复杂度, 同一组子信道分配相同的比特数 b_j^s , 令 $s' = \max_s b_j(s) (S - s + 1)$, 则 $b_j^s = b_j(s')$.

5 性能分析

我们通过仿真实验来分析在 MIMO-OFDM 系统中的多用户分集系统的性能. 天线分配方案 1 是指将 4 个天线同时分配给 2 个用户, 天线分配方案 2 是指将 4 个天线同时分配给 4 个用户.

实验 1: 假定所有用户信道的信道模型如式(2)所示. 衰落系数服从方差为 1 的瑞利分布, 路径对应的发射方向角 θ_{r_i} 服从 $\left[-\frac{\pi}{6}, 0\right]$ 的均匀分布, 达到方向角 θ_{k_i} 服从 $\left[-\frac{\pi}{3}, 0\right]$ 的均匀分布, 路径时延 τ_i 服从均方根时延扩展为 $2\mu s$ 的均匀分布. 脉冲成形函数 $g(t)$ 为周期 $5\mu s$, 滚降系数 0.35 的升余弦函数. 路径长度 V 等于 3. 系统的子载波个数为 64. 系统允许的最大误码率为 10^{-3} . 多径数为 20, 接收平均信噪比为 12dB. 图 2 给出误码率一定条件下在不同天线配置系统((4, 4)和(2, 2))中, 基于 QR 线性接收机和采用天线分配的两种多用户分集系统中, 系统平均吞吐量和用户数的关系. 由图 2 可知, 在发射天线和接收天线都为 2 的系统中, 将天线同时分配给 2 个用户, 能获得更好的吞吐量性能. 而且, 在(2, 2)系统中, 基于 QR 接收机的系统能更快地收敛到特征波束成形系统. 在(4, 4)系统中, 将 4 个发射天线分别分给四个用户能获得更好的性能. 因为天线数越多, 系统能提供的自由度越大, 获得的分集增益也越大.

实验 2: 假定信道长度 $V=8$, 每个子信道所能分配的最大比特数为 8, 其余实验参数同实验 1. 在吞吐量一定条件下比较用户数分别为 16 和 100 时, 分别基于 QR 接收机的系统和采用天线分配系统, 系统的误比特率和平均信噪比的关系. 由图 3 可知, 采用天线分配方案 2 误码性能最佳, 天线分配方案 1 次之, 将所有天线分配给同一个用户的系统误码性能最差. 在采用天线分配的系统, 由于用户数越多, 系统提供的分集增益越大, 因此用户数为 100 的系统比用户数 16 的系统获得更好的误码性能.

实验 3: 假定信道长度 $V=8$, 每个子信道所能分配

的最大比特数为 8, 发射接收天线个数相等且 M_t 分别为 2 和 4, 用户数为 16, 其余实验参数同实验 1. 图 4 给出在吞吐量一定条件下比较当发射接收天线个数不同时, 在特征波束成形系统、基于 QR 接收机系统和采用天线分配的多用户系统中, 用户 1 的误比特率和平均信噪比关系. 由图 4 可知(4, 4)系统能获得更好的误码性能, 因为(4, 4)系统能提供更大的分集增益. 在(2, 2)系统中, 特征波束成形、基于 QR 接收机、采用天线分配(将两个天线分配给两个用户)的误码率曲线基本重合, 表明发射接收天线个数越少, 基于 QR 接收机系统的误码性能能越快收敛到特征波束成形系统的性能, 但是, 但天线数较少时, 采用天线分配方案无法为系统带来额外的增益.

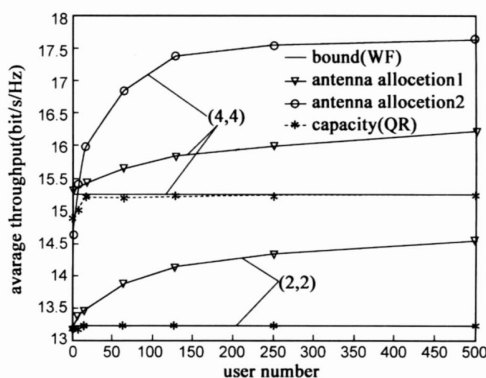


图 2 不同天线配置系统条件下, 系统平均吞吐量与用户数的关系比较

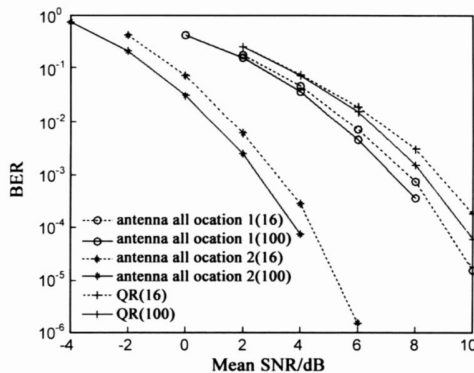


图 3 吞吐量一定条件下, 不同多用户分集系统的误比特率和平均信噪比的关系

6 结论

本文联合考虑多用户分集和自适应调制技术将可变速率方法推广到频率选择性衰落信道上, 建立基于随机波束成形和自适应调制的 MIMO-OFDM 系统的自适应多用户分集系统模型, 提出随机波束成形 QR 接收机的自适应多用户分集资源分配算法及其简化算法, 在最大化系统吞吐量条件下推导系统的误码性能. 实验结果表明, 与传统的 SVD 线性接收机相比, 本文提出

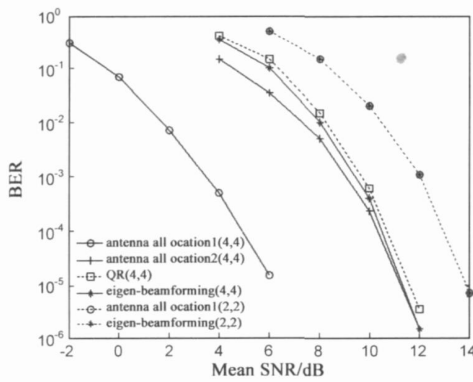


图4 吞吐量一定条件下,不同天线配置系统平均误比特率和平均信噪比的关系

的QR线性接收机即使在用户数很少或平均功率较大时,系统的吞吐量也能很快收敛到特征波束成形系统的性能;当用户数增加时,将天线分给不同用户可以获得比特征波束成形系统更好的性能;在MIMO-OFDM系统中,采用同组子信道以相同调整方式的分组方法,在允许的性能损失范围内,简化了系统结构。

参考文献:

- [1] R Knopp, P Humbler. Information capacity and power control in single cell multiuser communication [A]. In Proc of Int. conf. on Commu [C], 1995, 1: 331– 335.
- [2] Wonjong Rhee, Wei Yu, John M Cioffi. Utilizing multiuser diversity for multiple antenna systems [A]. IEEE wireless communication and networking conference [C], 2000, 1, 420– 425.
- [3] Robert W. Heath Jr, Manish Airy, Arogyaswami J. Paulraj. Multiuser diversity for MIMO wireless system with linear receiver [A]. IEEE conference on signals, systems and computers [C], 2001, 2, 1194– 1199.
- [4] Pramod Viswanath, David N C Tse, Rajiv Laroia. Opportunistic beamforming using dumb antennas [J]. IEEE Trans Inform. Theory, 2002, 48(6): 1277– 1294.
- [5] J Chung, C S Hwang, K Kim, Y K Kin. A random beamforming technique in MIMO systems exploiting multiuser diversity [J]. IEEE J selected areas on commun, 2003, 21(5): 848– 855.
- [6] L Dong, T Li, Y -F Huang. Opportunistic transmissions scheduling for multiuser MIMO systems [J]. IEEE icasp, 2003, 1: 65– 68.
- [7] Lan Tang, Shur xun Wang, Ying chang Liang. Variable rate adaptive modulation in MIMO systems exploiting multi user diversity [A]. In IEEE ICASSP2004 [C]. Canada, 2004. 693– 696.
- [8] Shengli Zhou, Georgios B Giannakis. Adaptive modulation for

multi antenna transmission with channel mean feedback [A].

IEEE ICC [C]. 2003, 4, 11– 15.

- [9] 贺志强, 王晓湘, 吴伟陵. 一种新的时变衰落信道下 MIMO 系统的功率分配与自适应调制算法 [J]. 电子学报, 2004, 32(9): 1556– 1559.
- [10] Severine Catreux, Peter F Driessen, and Larry J Greenstein. Data throughput using multiple input multiple output techniques in a noise limited cellular environment [J]. IEEE Transaction wireless commu, 2002, 1(2): 226– 235.
- [11] T Nakanishi, S Sampei, H Harada and N Morinaga. An OFDM based adaptive modulation scheme employing variable coding rate [J]. IEICE Transactions on Communications, 2005, E88 B(2): 526– 534.
- [12] J Gao, M Faulkner. On implementation of bit loading algorithm for OFDM systems with multiple input multiple output [A]. VTC2002 [C]. 2002, 1, 199– 203.
- [13] 徐超雄, 刘时进, 康瑞. 基于多用户 MIMO-OFDM 系统的子信道和功率分配算法 [J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(9): 63– 65.
- [14] 卢小峰, 朱光喜, 宁国勤, 韩锋. 一种自适应跨层空间子信道分配算法—基于多用户 MIMO/OFDM 系统 [J]. 计算机科学, 2006, 33(11): 10– 13.
- [15] 唐岚, 王树勋, 梁应敞. 在相关多入多出 (MIMO) 信道中的可变速率多用户分集技术 [J]. 电子学报, 2005, 33(4): 629– 633.
- [16] D N C Tse, et al. Transmitter directed, multiple receiver system using path diversity to equitably maximize throughput [P]. Patent filed, 1999.

作者简介:

胡封晔 男, 汉族, 1974 年 2 月生于河南原阳县, 2007 年在吉林大学通信与信息系统获工学博士学位, 吉林大学副教授, 硕士导师, 主要研究方向为移动通信中的信号处理; 承担各类科研项目 17 项, 获高等学校科学技术发明二等奖 1 项, 获吉林省科技进步一等奖 2 项, 发表学术论文 13 篇。

E-mail: hufengye@yahoo.com.cn.

王树勋 男, 1946 年生于吉林省长春市, 1970 年毕业于清华大学电机系, 1982 年在吉林工业大学电子工程系获工学硕士学位, 吉林大学教授、博士生导师, 主要研究方向为高阶统计量在数字信号处理中的应用及微计算机应用, 已出版著作 3 部, 发表论文近三百余篇。

孙晓颖 (通信作者) 男, 1969 年 8 月生于吉林, 2005 年在吉林大学通信与信息系统专业获工学博士学位。现为吉林大学副教授, 硕士导师, 主要研究向为无线通信理论及应用; 承担各类科研项目 16 项, 获高等学校科学技术发明二等奖 1 项, 获吉林省科技进步一等奖 2 项, 获第八届吉林省青年科技奖, 发表学术论文 21 篇。

E-mail: sunxy@jlu.edu.cn