



八波束 STBC-BF 发射方案中天线选择技术的应用

王曼, 战金龙

(西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121)

摘要: 提出了大规模 MIMO 系统空时编码结合特征波束成形 (STBC-BF) 方案中的天线选择技术。发射符号空时分组编码后经天线阵列加权, 形成特征波束, 利用天线选择技术对发射天线和接收天线进行选择, 接收端采用传统译码方法进行译码。该方案既可以获得空间分集增益和阵列增益, 又能减少射频链路的数目, 从而降低计算复杂度。仿真结果表明了该方案的有效性。

关键词: 大规模 MIMO; 波束成形; 空时编码; 天线选择

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017242

Application of antenna selection technology in eight-beam STBC-BF transmit scheme

WANG Man, ZHAN Jinlong

School of Telecommunication and Information Engineering,
Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China

Abstract: An antenna selection scheme of space-time block coding combined with eight-beamforming (STBC-BF) in massive MIMO system was proposed. Transmit symbols were coded by space-time block coder, then the coded symbols were weighted by antenna array form eight-beam. The antenna selection technology was used to select the transmitting antenna and the receiving antenna, traditional decoding method was performed at the receiver. The proposed scheme can not only obtain the space diversity gain and array gain, but also can reduce the computational complexity by reducing the number of the RF links. Simulation results confirm the validity of the proposed scheme.

Key words: massive MIMO, beamforming, space-time block coding, antenna selection

1 引言

随着人们对更高数据速率的需求, MIMO

(multiple input multiple output, 多输入多输出) 已经成为很多现代无线通信标准的关键技术。2010 年, 贝尔实验室的科学家 Marzetta 提出了大规模

收稿日期: 2017-06-06; 修回日期: 2017-08-01

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (No.2014ZX03003005-003); 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (No.2014AA01A705); 国家自然科学基金资助项目 (No.61501371); 陕西省自然科学基金资助项目 (No.2011JM8027)

Foundation Items: The National Science and Technology Major Project of China (No.2014ZX03003005-003), The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No.2014AA01A705), The National Natural Science Foundation of China (No.61501371), Shaanxi Provincial Natural Science Foundation of China (No.2011JM8027)

MIMO 系统^[1,2], 与传统的 MIMO 系统相比, 大规模 MIMO 是在基站端配置大规模的天线阵列来得到更大的无线数据流以及更好的连接可靠性, 通过大量天线数获得更多的独立空间数据流, 可以降低小区间和小区内用户间的干扰, 使得频谱效率得到数倍提高^[3-5]。

空时编码设计的目标就是以最简单的译码算法, 获得高的分集增益、编码增益和可能的最大吞吐量^[6], 空时编码虽然可以有效抵抗信道的深衰落, 但却无法有效抑制各种干扰。波束成形技术在增强期望信号、抑制用户间同信道干扰方面具有强大的优势, 但对信道的深衰落无能为力。因此, 将空时编码和波束成形技术有效地结合, 能够克服上述二者各自的缺点, 而且可以同时获得分集增益和阵列增益。

大规模 MIMO 的主要优点是在不增加额外发射功率和频谱资源的情况下, 可以获得更好的性能, 然而, 它的主要缺点是当使用大量的天线时, 不但需要额外的高成本射频模块, 如低噪放大器、下变频和模数转换器^[7], 还会使通信系统的计算复杂度大大增加。天线选择技术^[8-10]是在多根天线中选择一些信道质量较好的天线来进行数据传输或者数据接收, 将其他信道质量较差的天线舍弃, 在保证系统整体性能的情况下, 显著降低了复杂度和硬件成本, 同时仍然保持系统的多样性优势。参考文献[11]在分析了大规模 MIMO 情况下, 将发射端天线选择分别与 ZF-BF、MRT-BF 和 MMSE-BF 3 种方案相结合, 在保证良好性能的同时, 通过减少射频单元克服了系统的主要缺点。本文在大规模 MIMO 系统下, 将发射端天线选择 (transmit antenna selection, TAS) 技术和接收端天线选择 (receive antenna selection, RAS) 技术应用在八波束 STBC-BF 的方案中。

2 系统模型

根据天线选择的方法, 可分为发射端天线

选择和接收端天线选择, 即 TAS 与 STBC-BF 结合和 RAS 与 STBC-BF 结合, 如图 1 和图 2 所示。

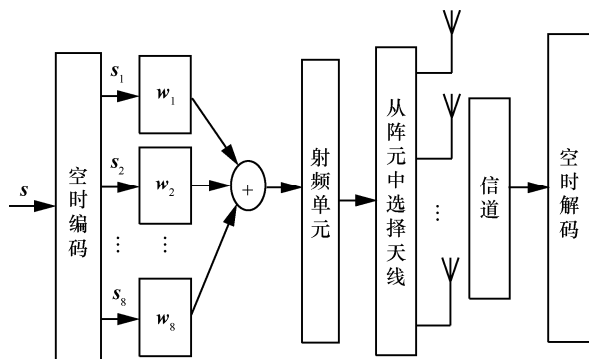


图1 TAS与STBC-BF结合模型

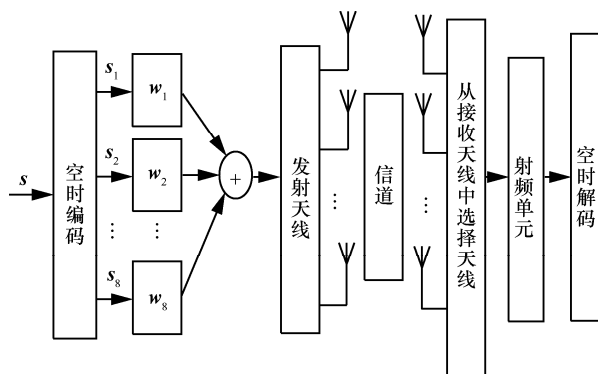


图2 RAS与STBC-BF结合模型

在系统模型中, 假设发射端天线阵是有 N_T 个阵元的均匀线阵, 接收端天线数为 N_r , 阵元间距 $d = \frac{\lambda}{2}$, 其中 λ 为波长。发射端只使用 N_F 个射频模块支持 N_T 根发射天线, 需要将 N_F 个射频模块有选择地映射到 N_T 根天线中的 N_F 根天线。而接收端从 N_r 根天线中选择 L_r 根天线, 数据流经过 L_r 个射频链路处理后进行解码。

2.1 八波束 STBC-BF

Alamouti 提出的空时编码方案是将符号流两两分组, 两个时隙内完成两个符号的发送, 即 Alamouti 空时编码方案^[6], 参考文献[12-14]都描述了两波束的 STBC-BF 方案。本文是将发射符号分为 8 个支流, 根据实正交编码矩阵^[15], 可得复



正交编码矩阵为:

$$X = [X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8]$$

$$= \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 \\ -x_2 & x_1 & x_4 & -x_3 & x_6 & -x_5 & -x_8 & x_7 \\ -x_3 & -x_4 & x_1 & x_2 & x_7 & x_8 & -x_5 & -x_6 \\ -x_4 & x_3 & -x_2 & x_1 & x_8 & -x_7 & x_6 & -x_5 \\ -x_5 & -x_6 & -x_7 & -x_8 & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ -x_6 & x_5 & -x_8 & x_7 & -x_2 & x_1 & -x_4 & x_3 \\ -x_7 & x_8 & x_5 & -x_6 & -x_3 & x_4 & x_1 & -x_2 \\ -x_8 & -x_7 & x_6 & x_5 & -x_4 & -x_3 & x_2 & x_1 \\ x_1^* & x_2^* & x_3^* & x_4^* & x_5^* & x_6^* & x_7^* & x_8^* \\ -x_2^* & x_1^* & x_4^* & -x_3^* & x_6^* & -x_5^* & -x_8^* & x_7^* \\ -x_3^* & -x_4^* & x_1^* & x_2^* & x_7^* & x_8^* & -x_5^* & -x_6^* \\ -x_4^* & x_3^* & -x_2^* & x_1^* & x_8^* & -x_7^* & x_6^* & -x_5^* \\ -x_5^* & -x_6^* & -x_7^* & -x_8^* & x_1^* & x_2^* & x_3^* & x_4^* \\ -x_6^* & x_5^* & -x_8^* & x_7^* & -x_2^* & x_1^* & -x_4^* & x_3^* \\ -x_7^* & x_8^* & x_5^* & -x_6^* & -x_3^* & x_4^* & x_1^* & -x_2^* \\ -x_8^* & -x_7^* & x_6^* & x_5^* & -x_4^* & -x_3^* & x_2^* & x_1^* \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, $X_i, i=1,2,\dots,8$ 是编码后的第 i 个支路输出。

在 TAS 与 STBC-BF 结合模型中, s 先经 STBC 后分为 8 个分支 $s_1, s_2, \dots, s_8$, 再分别经过波束成形权矢量 $w_1, w_2, \dots, w_8$, 加权后直接相加, 到达基站端通过所有的发射天线发送, 发送信号为:

$$S = s_1 w_1^H + s_2 w_2^H + \dots + s_8 w_8^H \quad (2)$$

其中, $w_1, w_2, \dots, w_8$ 可由下行链路信道相关协方差矩阵获得^[16]。

假设信道是平坦衰落信道^[17], 包含 L 条空间可分离的路径, 信道矩阵^[18]可以表示为:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1L} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r 1} & h_{N_r 2} & \dots & h_{N_r L} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, h_{il} 是第 l 条路径中从发射天线阵到第 i 根接收天线的复信道矩阵增益。信道矩阵 H 又可以定义为:

$$H' = [h'_1 \quad h'_2 \quad \dots \quad h'_{N_r}] \quad (4)$$

其中, $h'_i = \sum_{l=1}^L h_{il} a(\theta_l)$, θ_l 为波达角 (DOA),

$a(\theta_l)$ 为阵列导向矢量, 可表示为:

$$a(\theta_l) = \left[1, e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} \sin(\theta_l)}, \dots, e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} (M-1) \sin(\theta_l)} \right]^T \quad (5)$$

其中, d 为阵元间距, λ 为波长, M 是一个天线阵的阵元数。假设移动端为单天线用户, 则第 i 个移动端可接收到的信号为:

$$y_i = w_1^H \cdot h'_1 \cdot s_1 + w_2^H \cdot h'_1 \cdot s_2 + \dots + w_8^H \cdot h'_1 \cdot s_8 + n \quad (6)$$

其中, n 是加性高斯白噪声, 将 $w_k^H \cdot h'_k, k=1,2,\dots,8$ 看成虚拟信道, 接收端译码时用和 STBC 一样的译码方法。

2.2 天线选择算法

在 TAS 与 STBC-BF 结合模型中, 从 N_T 根发射天线中选择 N_F 根天线与射频单元连接, 选择后的有效信道为 H_s , H_s 是信道矩阵 H 的子集。将差错性能作为设计准则, 即选择发射天线以使差错概率最小, 令 $P_r(C_A \rightarrow C_B | H_s)$ 表示在给定信道 H_s 的条件下, 发射空时码字为 C_A 而解码为 C_B 的成对差错概率。对于信道 H_s , 空时编码的成对差错概率上限为^[7,11]:

$$P_r(C_A \rightarrow C_B | H_s) = Q \left(\sqrt{\frac{\rho \|H_s (C_A - C_B)\|_F^2}{2N_{RF}}} \right) \quad (7)$$

$$\leq \exp \left(-\frac{\rho \|H_s (C_A - C_B)\|_F^2}{4N_{RF}} \right)$$

其中, ρ 是信噪比, $C_A - C_B$ 为误差矩阵, 为了最小化差错概率, 应使 $\|H_s (C_A - C_B)\|_F^2$ 最大化, 假设 $h = H^T$, 即从矩阵 h 的 N_T 列中选出具有最大范数的 N_F 列作为选择的子集。算法具体描述如下。

步骤 1 对 h 中的每一列取范数 $norm(h'_i, fro)$, h_i 是 h 的第 i 列。

步骤 2 所得范数值存于矢量 ch 中, 即 $ch(i) = norm(h'_i, fro)$ 。

步骤 3 对 ch 中的范数值按升序排列:

$[val, index] = sort(ch, 'descend')$ 。

步骤 4 得出选择 N_{RF} 根天线的信道 $H_s = h(:, index([1:1:N_F]))$, 新的阵列导向矢量 $a_i(\theta_i) = a(\theta_i)(index(:, [1:1:N_F]))$ 。

当在接收端进行天线选择时, 从矩阵 h 的 N_r 行中选出具有最大范数的 L_r 行作为选择的子集。具体算法与发射端天线选择类似, 将选出的天线与射频单元连接, 接收端译码时采用和 STBC 一样的译码方法。

3 仿真结果与分析

系统仿真条件设置如下: 系统的信道环境为平坦衰落信道, 大尺度衰落时的路径损耗指数为 3.7, 小区半径为 1, (归一化) 调制方式为 QPSK。

八波束 STBC-BF 和发射端天线选择八波束 STBC-BF 两种情况下的误码率性能比较如图 3 所示。其中空间路径数 $L=8$, 阵元数为 198, 接收端为单天线, 采用天线选择时, 依据范数法从 198 根天线中选择 64 根天线, 未加天线选择时任用 64 根天线。从图 3 可以看出, 由于采用范数法进行天线选择时, 所选天线都是最高列范数对应的天线, 即信噪比最大的天线, 因而发射端天线选择八波束 STBC-BF 有更好的性能, 即不需要在发射端使用额外的 RF 模块, 就能获得更多的分集增益。

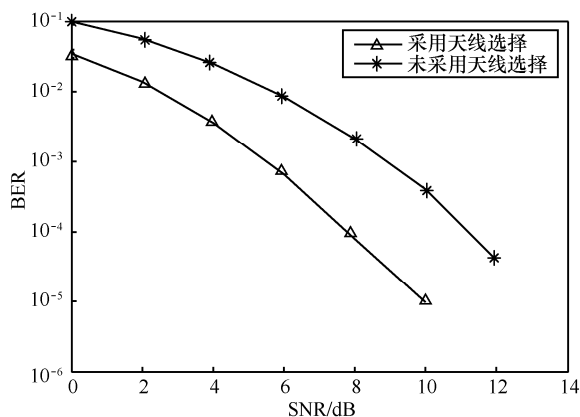


图 3 八波束 STBC-BF 和发射端天线选择八波束 STBC-BF 两种情况下的误码率性能比较

八波束 STBC-BF 和接收端天线选择八波束 STBC-BF 两种情况下的误码率性能比较如图 4 所示。其中, 空间路径数 $L=8$, 阵元数为 64, 接收端天线数为 4。当接收端天线选择时, 仍旧根据范数法从 4 根天线中选择 1 根接收天线, 而未采用天线选择技术时任选 1 根接收天线。从图 4 可以看出, 当误码率为 10^{-3} 时, 接收端天线选择技术与未采用天线选择技术相比有大约 2.5 dB 的增益, 所以在接收端使用天线选择同样可以获得更多的增益。

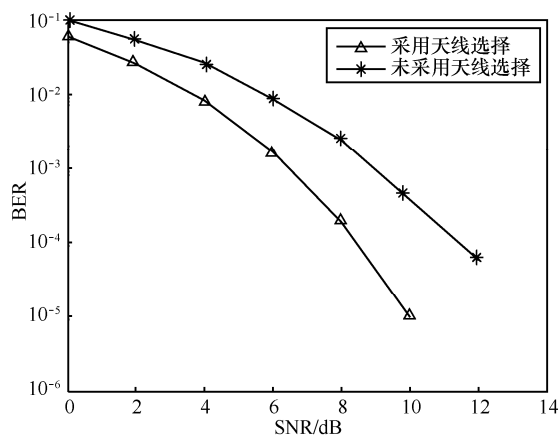


图 4 八波束 STBC-BF 和接收端天线选择八波束 STBC-BF 两种情况下的误码率性能比较

发射端和接收端联合采用天线选择、发射端采用天线选择、接收端采用天线选择和未采用天线选择 4 种情况下的误码率性能比较如图 5 所示。其中空间路径数 $L=8$, 阵元数为 198, 依据范数法, 当联合天线选择时, 发射端所选天线数为 64, 接收端所选天线数为 1; 当发射端单独选择时, 所选天线数为 64, 接收端随机配备 1 根天线; 当接收端单独选择时, 发射端随机配备 64 根天线, 接收端由范数法选择 1 根天线; 当未采用天线选择时, 发射端有 64 根天线, 接收端有 1 根天线。从图 5 可以看出, 不采用天线选择时的系统性能最差, 联合天线选择与发射端和接收端单独采用天线选择相比, 性能有所提高, 即在发射端和接收端同时采用天线选择既能获得更高的增益, 又能更多地减少射频元件。

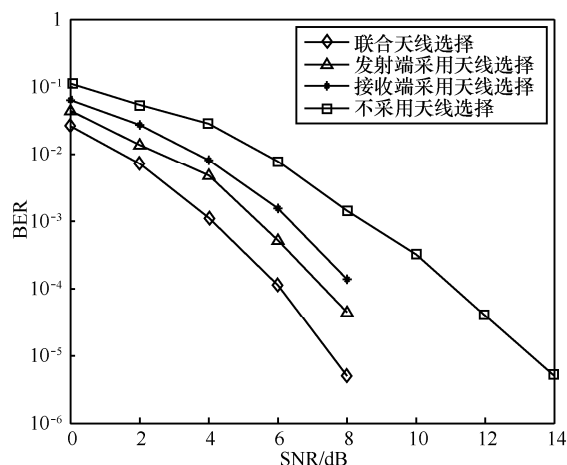


图5 4种情况下的误码率性能比较

在 TAS 与 STBC-BF 结合模型中, 依据范数法, 从 198 根发射天线中选择不同发射天线数的比较如图 6 所示。其中空间路径数 $L=8$, 接收端天线数为 1。从图 6 可以看出, 由于一些发射天线可能会引起病态矩阵, 虽然随着被选天线数的增加, 系统性能会不断提高, 但是被选天线数越多, 性能增加的速度就会变得越慢。

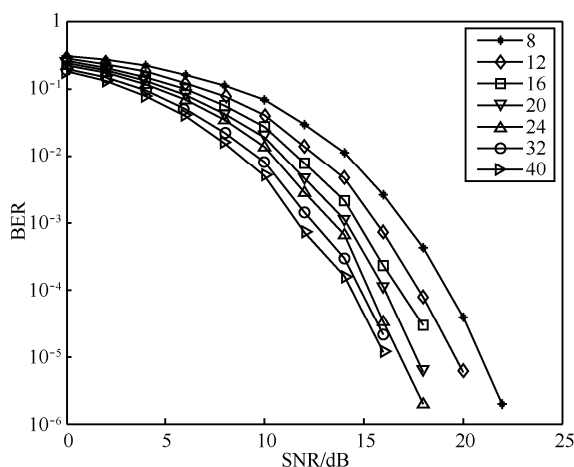


图6 从 198 根发射天线中选择不同发射天线数的比较

4 结束语

本文主要讨论了大规模 MIMO 系统中天线选择技术与八波束 STBC-BF 结合的方案, 在获得分集增益和阵列增益的情况下, 减少了射频模块的使用和系统复杂度, 节省了资源和费用。

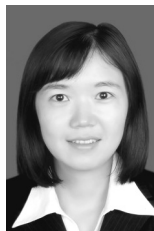
仿真结果表明, 在发射端和接收端同时使用天线选择技术时, 能提供更多的增益, 同时验证了随着发射天线数的增加, 系统性能增加的速度变慢。

参考文献:

- [1] MARZETTA T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590-3600.
- [2] 倪善金, 赵军辉. 5G 无线通信网络物理层关键技术[J]. 电信科学, 2015, 31(12): 48-53.
- [3] NI S J, ZHAO J H. Key technologies in physical layer of 5G wireless communications network[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(12): 48-53.
- [4] HOYDIS J, BRINK S T, DEBBAH M. Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: how many antennas do we need?[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(2): 160-171.
- [5] RUSEK F, PERSSON D, LAU B K, et al. Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(1): 40-60.
- [6] 高峰, 和凯, 宋智源, 等. 5G 大规模紧耦合阵列天线研究[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 36-41.
- [7] GAO F, HE K, SONG Z Y, et al. Research on large scale antenna arrays for 5G mobile communication technology[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 36-41.
- [8] 邵朝. MIMO 系统与空时编码—分集的理论与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [9] SHAO C. Theory and practice of MIMO system and space-time coding-diversity[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
- [10] 赵勇洙. MIMO-OFDM 无线通信技术及 MATLAB 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [11] ZHAO Y Z. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
- [12] MOLISCH A F, WIN M Z. MIMO systems with antenna selection[J]. IEEE Microwave Magazine, 2004, 5(1): 46-56.
- [13] SANAYEI S, NOSRATINIA A. Antenna selection in MIMO systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10): 68-73.
- [14] GOROKHOV A, GORE D A, PAULRAJ A J. Receive antenna selection for MIMO spatial multiplexing: theory and algorithms[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(11): 2796-2807.
- [15] MOUSSA K H, EL-KHAMY S E, EL-SHERIF A A. On the performance of massive multiuser MIMO with different transmit beamforming techniques and antenna selection[C]//2015 1st

- URSI Atlantic Radio Science Conference (URSI AT-RASC), May 16-24, 2015, Las Palmas, Spain. New Jersey: IEEE Press, 2015: 1-10.
- [12] ZHU F, LIM M S. Combined beamforming with space-time block coding using double antenna array group[J]. IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, 2004, 40(13): 811-813.
- [13] 王勇, 廖桂生, 叶子, 等. 天线子阵划分的 OSTBC 特征波束成形技术[J]. 西安电子科技大学学报, 2008, 35(6): 1003-1008.
- WANG Y, LIAO G S, YE Z, et al. Study of OSTBC and eigen-beamforming with antenna array groups[J]. Journal of Xiidian University, 2008, 35(6): 1003-1008.
- [14] 康涛, 战金龙. 大规模 MIMO 系统中的 STBC-BF 发射方案[J]. 电信科学, 2015, 31(11): 51-55.
- KANG T, ZHAN J L. A STBC-BF transmit scheme in massive MIMO system[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(11): 51-55.
- [15] TAROKH V, JAFARKHANI H, CALDERBANK A R. Space-time block codes from orthogonal designs[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1999, 45(5): 1456-1467.
- [16] LEI Z, CHIN F, LIANG Y C. Space-time block coding for switched beam systems[C]//Wireless Communications and Networking, March 16-20, 2003, New Orleans, USA, New Jersey: IEEE Press, 2003: 699-704.
- [17] BHATNAGAR M R, VISHWANATH R, BHATNAGAR V. Performance analysis of space-time block codes in flat fading MIMO channels with offsets[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2006, 2007(1): 1-7.
- [18] LAN P, LIU J, GU B, et al. A new antenna selection algorithm combined with beam space time block coding transmit scheme[C]//International Conference on Signal Processing, November 16-20, 2006, Beijing, China. New Jersey: IEEE Press, 2006: 349-352.

[作者简介]



王曼 (1991-), 女, 西安邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为宽带无线通信。



战金龙 (1979-), 男, 西安邮电大学通信与信息工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为大规模 MIMO 中的预编码技术、波束成形技术及信号检测技术等。