

基于码本的有限反馈非酉矩阵预编码多用户 MIMO 系统

方舒 李立华 张平

(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室 无线新技术研究所 北京 100876)

摘要: 该文提出了一种基于码本的有限反馈非酉矩阵预编码下行多用户 MIMO 系统。该方案根据用户反馈的信道信息 SINR 在发送端进行调度和预编码来提高系统容量。预编码的码本设计依据格拉斯曼空间装箱原理,并将码本中的向量按其相关性构成非酉矩阵来提高预编码增益和抑制多用户共道干扰。新方案反馈量少、复杂度低,在相同情况下比传统的单用户 MIMO 系统和基于码本的酉矩阵预编码多用户 MIMO 系统都具有更好的性能。

关键字: 多用户 MIMO; 非酉矩阵预编码; 格拉斯曼空间装箱原理; 有限反馈

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)10-2419-04

Non-Unitary Precoding Base on Codebook for Multi-user MIMO System with Limited Feedback

Fang Shu Li Li-hua Zhang Ping

(Key Laboratory of Universal Wireless Communication, Ministry of Education,

Wireless Tech. Innovation Institute, Beijing University of Posts and Telecom., Beijing 100876, China)

Abstract: A non-unitary precoding system based on codebook for multi-user MIMO downlink transmission with limited feedback is proposed in this paper. The proposed scheme will perform scheduling and precoding just according to the limited feedback channel information SINR of each user to enhance the system capacity. A precoder codebook design method is related to Grassmannian line packing criterion and the vectors from the Grassmannian codebook are grouped into non-unitary matrices according to their correlation coefficient, which aims to enhance the precoding gain and suppress the multi-user co-channel interference. It has the advantages of low feedback as well as low complexity and outperforms the traditional single user MIMO system and the unitary precoding system based on codebook for multi-user MIMO under the same situation.

Key words: Multi-user MIMO; Non-unitary precoding; Grassmannian line packing; Limited feedback

1 引言

MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)技术在支持高速数据传输,提高频谱利用率等方面具有其他技术所望尘莫及的优势,能在不增加带宽的情况下成倍地提高通信系统的容量和频谱利用率,成为下一代无线传输系统的关键技术。传统的MIMO技术基于点对点的单用户传输,例如基于空间分集的MIMO技术,如STC(Space-Time Coding)和基于空间复用的MIMO技术,如VBLAST(Vertical Bell Lab Layered Space-Time)。前者能有效抵抗衰落,并对空间信道具有较强的鲁棒性,但是在提升传输速率上有限,难以满足未来高速传输的需要^[1, 2];后者能支持空间并行传输因而具有较高的传输速率,但其在空间信道不理想时,如空间相关性较高时将失效,具有一定的局限性^[3, 4]。

随着多天线技术研究的深入, MIMO技术已从点对点的单用户系统扩展到了点对多点的多用户MIMO系统^[5]。多用

户的多天线配置带来许多好处:多天线具有分集增益可以提高误比特性能,多天线的复用增益使多用户的信道容量区域扩大,通常采用发送端预编码的MIMO技术。基于发送端预编码的MIMO技术利用空分多址(Spatial Division Multiple Access, SDMA)技术能在相同时间、频率和码域资源上传送多个用户的信息^[6],较单用户MIMO系统能大大提高其系统容量和频谱效率。基于预编码的MIMO技术结合了空间分集和空间复用的优势,对各种信道环境都有较好的适应性,通过空分多址接入技术能提高系统容量,增加系统对传输环境的鲁棒性。在MIMO系统中,当多个用户要共享同一时间和频率资源时,必然会引入多用户共道干扰(Co-Channel Interference, CCI),在这种情况下采用预编码技术不仅要获取较大赋形增益,同时还要降低多用户间的干扰。

从信息论角度, DPC(Dirty Paper Coding)理论证明,在带有干扰的系统中,如果发送端能够准确地获知干扰信号,在发送端通过某种预编码处理,可使得有干扰系统的信道容量与无干扰系统的信道容量相同^[7]。由于DPC理论很难应用到实际系统中,一些次优预编码技术应运而生^[5, 8-10]。一类是基于时实信道处理的预编码技术,如信道反转

2007-04-02 收到, 2007-09-24 改回

国家 863 计划项目(2006AA01Z260, 2007AA01Z261), 国家自然科学基金(60702051)和高等学校博士点基金项目(20070013028)资助课题

(channel inversion)^[5]、信道块对角化(Block Diagonalization, BD)^[8, 9]等,需要发送端获知全部或者部分信道状态信息(Channel State Information, CSI),此时信道信息的反馈量较大,不利于实际应用。另一类是基于码本的预编码技术,如基于傅里叶变换的酉矩阵码本^[10]预编码技术。基于码本的预编码技术在发送端和接收端都预先获知一固定码本,系统根据反馈的信道质量指示信息(Channel Quality Information, CQI)来从固定码本中选择合适的预编码向量对发送用户进行预编码,由于其反馈量小而具有更高实用价值。在3G标准演进3GPP LTE中,基于码本的发送预编码MIMO技术已经被采纳为备选方案^[11]。

本文提出的多用户MIMO方案是一种具有低复杂度、低反馈量、基于码本的非酉矩阵预编码多用户MIMO系统。根据有限反馈的信道信息SINR(Signal to Interference and Noise Ratio)在发送端进行调度和预编码来提高系统的吞吐量,有效地利用了多用户分集增益和预编码增益来提高系统性能。引入格拉斯曼(Grassman)预编码为各用户提供了较高的增益,并且依据格拉斯曼码本中的向量的相关性构成非酉预编码矩阵能有效抑制CCI,比传统的单用户MIMO系统和基于码本的有限反馈酉矩阵预编码多用户MIMO系统都具有更好的性能。

本文第2节给出了系统模型;第3节分别阐述了文献[10]中提出的酉矩阵预编码码本和格拉斯曼空间装箱原理;第4节是本文提出的基于码本的有限反馈非酉矩阵预编码多用户MIMO系统;第5节为本文的仿真结果;最后一部分为本文结论。

2 系统模型

假设多用户MIMO系统在基站端有 M 根发送天线、在移动台端有 N 根接收天线,共有 X 个用户用以调度。被调度的 $K(K \leq M)$ 个用户被预编码矩阵 \mathbf{w} 预编码后发送,如图1所示。

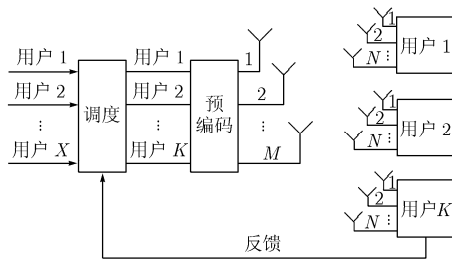


图1 多用户MIMO系统框图

为了简化分析,假设衰落是平坦的,则第 k 个用户接收到的信号可表示为

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{w} \mathbf{s} + \mathbf{n}_k, \quad k = 1, \dots, K \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \dots & h_{1,M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N,1} & \dots & h_{N,M} \end{bmatrix} \quad (2)$$

\mathbf{H}_k 为第 k 个用户的MIMO信道冲激响应; $h_{i,j}$ 为第 j 根发射天线到第 i 根接收天线的信道冲激响应,其包络服从独立同分布的Rayleigh衰落; \mathbf{y}_k 为第 k 个用户收到的信号; \mathbf{n}_k 为用户 k 所收到的加性高斯白噪声,服从 $\text{CN}(0, N_0)$ 的分布。

$$\mathbf{s} = [\sqrt{p_1} s_1 \quad \sqrt{p_2} s_2 \quad \dots \quad \sqrt{p_K} s_K]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{w} = [\mathbf{v}_1 \quad \mathbf{v}_2 \quad \dots \quad \mathbf{v}_K] \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K p_k = p_0 \quad (5)$$

p_k 为第 k 个数据流的发送功率; p_0 为所有数据流的发送总功率; \mathbf{s} 为发送信号向量,包含 K 个用户的数据流; \mathbf{w} 为 $M \times K$ 维的预编码矩阵,包含 K 个预编码向量 \mathbf{v}_i , $\|\mathbf{v}_i\|=1$; $[\cdot]^T$ 表示信道转置。

3 酉矩阵预编码码本及格拉斯曼空间装箱原理

(1)酉矩阵预编码码本 依据文献[10]产生的酉矩阵预编码码本为

$$\mathbf{E} = \{\mathbf{E}^0, \dots, \mathbf{E}^{L-1}\} \quad (6)$$

\mathbf{E}^l 为码本 \mathbf{E} 中第 $l+1$ 个预编码矩阵。

$$\mathbf{E}^l = [\mathbf{e}_0^{(l)} \quad \dots \quad \mathbf{e}_{M-1}^{(l)}] \quad (7)$$

$\mathbf{e}_m^{(l)}$ 为第 $l+1$ 个预编码矩阵中的第 $m+1$ 个预编码向量, M 为发送天线数。

$$\mathbf{e}_m^{(l)} = \frac{1}{\sqrt{M}} [u_{0m}^{(l)} \quad \dots \quad u_{(M-1)m}^{(l)}]^T \quad (8)$$

$$u_{nm}^{(l)} = \exp \left\{ j \frac{2\pi n}{M} \left(m + \frac{l}{L} \right) \right\} \quad (9)$$

$u_{nm}^{(l)}$ 为第 $l+1$ 个预编码矩阵中的第 $m+1$ 个预编码向量的第 $n+1$ 个元素。酉矩阵预编码码本的产生依据傅里叶变换,产生的各预编码矩阵中的向量两两正交,有 $\mathbf{E}_i \mathbf{E}_i^H = \mathbf{I}$,因此能有效抑制CCI。依据以上准则,能产生具有任意发送天线数 M 和任意预编码矩阵数 L 的码本。基站根据用户反馈的CQI信息选取要传送的用户并为用户从码本中选取合适的预编码矩阵进行发送赋形。

(2)格拉斯曼空间装箱原理 格拉斯曼空间 $G(m, n)$ 指所有 m 维欧氏空间 E^m 的 n 维子空间的集合^[12]。格拉斯曼空间装箱问题为:当 N_t 一定时,在 E^m 中找到含 N_t 个 n 维子空间的集合,使其是这个格拉斯曼空间的最佳近似。由于此处是为波束成型矢量设计预编码码本,因此 $n=1$;发送天线数为 M ,因此 $m=M$;因为信道冲激响为复数,所以 $E=C$ 。格拉斯曼装箱问题简化为在 C^M 中找出具有 N_t 条直线的集合,使得集合中任意两条直线的最小距离最大^[13]。

在 C^M 中找出 N_t 条直线,用 $M \times N_t$ 维的集合 $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1 \quad \mathbf{v}_2 \quad \dots \quad \mathbf{v}_{N_t}]$ 来表示, $\|\mathbf{v}_i\|=1$ 为 C^M 中的一个向量,对应了 C^M 中的一条直线。可以证明用有限的码本向量集合最大化发送预编码增益 $G_v(\mathbf{H}) = \arg \max_{1 \leq i \leq N} \|\mathbf{H} \mathbf{v}_i\|_2^2$ 时,即最大化码本中任意两条直线的最小距离 $d(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$ ^[13]。这里距离定义为两条直线的夹角,如下:

$$d(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = \sin(\theta_{1,2}) = \sqrt{1 - |\mathbf{v}_1^H \mathbf{v}_2|^2} \quad (10)$$

上述设计准则等价在 C^M 中找到一组向量 $\{\mathbf{v}_i\}_{i=1}^{N_t}$, 使得码本 \mathbf{V} 具有最大的 $\delta(\mathbf{V})$ 。

$$\delta(\mathbf{V}) = \min_{1 \leq k < l \leq N} \sqrt{1 - |\mathbf{v}_k^H \mathbf{v}_l|^2} \quad (11)$$

根据以上准则, 可以得到具有任意发送天线数 M 和 N_t 个向量数的 $M \times N_t$ 维的格拉斯曼码本。

4 基于码本的有限反馈非酉矩阵预编码方案

本文设计了一个包含 L 个预编码矩阵的码本 $\mathbf{W} = \{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_L\}$, 此码本对于发送端和接收端都是预先可知的。码本中的预编码矩阵 \mathbf{w}_l 通过在 $M \times N_t$ 维的格拉斯曼码本中选出 K 个向量构成, 由于码本中的各向量不正交, 因此构成的预编码矩阵为非酉矩阵, 有 $\mathbf{w}_l \mathbf{w}_l^H \neq \mathbf{I}$ 。对 $M \times N_t$ 维的格拉斯曼码本来说, 总共可以构成 $C_{N_t}^K$ 个不同的预编码矩阵, 将构成的矩阵依据 ρ 值进行排序, ρ 为预编码矩阵中向量的相关系数之和。

$$\rho = \sum_{i=1}^K \sum_{j=i+1}^K \mathbf{v}_i^H \mathbf{v}_j \quad (12)$$

选择 L 个预编码矩阵构成码本时, 优先选择具有较小 ρ 值的矩阵。因为具有较小 ρ 值的预编码矩阵, 将有利于抑制多用户的共道干扰 CCI。

对传统的单用户 MIMO 检测来说, 接收端会依据某种准则设计线性转换矩阵 \mathbf{G} , 使得变换后的信号

$$\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{G}\mathbf{y} \quad (13)$$

迫零准则(ZF)和最小均方误差(MMSE)是两种最常用的准则。接收机为了获得更好的性能, 通常使用 MMSE 准则。

对 MMSE 准则来说, 线性转换矩阵 \mathbf{G} 如下

$$\mathbf{G} = \left(\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{MN_0}{p_0} \mathbf{I}_M \right)^{-1} \mathbf{H}^H \quad (14)$$

$(\cdot)^{-1}$ 表示矩阵的逆, $(\cdot)^H$ 表示矩阵的共轭转置, \mathbf{I}_M 为 $M \times M$ 维的单位矩阵。对多用户 MIMO 系统来说, 经过预编码后第 k 个用户的信道矩阵为

$$\tilde{\mathbf{H}}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{w} \quad (15)$$

因此对采用 MMSE 准则的多用户 MIMO 系统来说, 第 k 个用户的线性转换矩阵为

$$\tilde{\mathbf{G}}_k = \tilde{\mathbf{h}}_k^H \left(\tilde{\mathbf{H}}_k \tilde{\mathbf{H}}_k^H + \frac{KN_0}{p_0} \mathbf{I}_M \right)^{-1} \quad (16)$$

$$\tilde{\mathbf{h}}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{v}_k = [\tilde{\mathbf{H}}_k]_k = [\mathbf{H}_k \mathbf{w}]_k \quad (17)$$

\mathbf{v}_k 为第 k 个用户的预编码向量, $[\cdot]_k$ 表示取矩阵的第 k 列。

第 k 个用户接收到的信号可表示为

$$\mathbf{y}_k = \sqrt{p_k} \mathbf{H}_k \mathbf{v}_k s_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \sqrt{p_i} \mathbf{H}_k \mathbf{v}_i s_i + \mathbf{n}_k \quad (18)$$

式(18)的中间部分为多用户的干扰, 最后一部分为噪声。依据 MMSE 准则得到的用户 k 的输出为

$$\hat{s}_k = \tilde{\mathbf{G}}_k \mathbf{y}_k \quad (19)$$

经 MIMO 检测后, 用户 k 的 SINR 为

$$\text{SINR}_k = \frac{p_k |\tilde{\mathbf{G}}_k \tilde{\mathbf{h}}_k|^2}{\sum_{i=1, i \neq k} p_i |\tilde{\mathbf{G}}_k \tilde{\mathbf{h}}_i|^2 + |\tilde{\mathbf{G}}_k|^2 N_0} \quad (20)$$

$$\text{SINR}_k = \frac{p_k |\tilde{\mathbf{G}}_k \mathbf{H}_k \mathbf{v}_k|^2}{\sum_{i=1, i \neq k} p_i |\tilde{\mathbf{G}}_k \mathbf{H}_k \mathbf{v}_i|^2 + |\tilde{\mathbf{G}}_k|^2 N_0} \quad (21)$$

从上式可知, 对用户 k 来说, 其 SINR 值不仅取决于自身的信道矩阵 \mathbf{H}_k , 还取决于选用的预编码向量 \mathbf{v}_k 及其他用户选用的预编码向量 \mathbf{v}_i , 一个预编码矩阵 \mathbf{w}_l 将对应 K 个 SINR 值。因此当各用户通过信道估计得到了信道矩阵 \mathbf{H}_k 后, 根据已知的预编码码本 $\mathbf{W} = \{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_L\}$, 可计算出 $K \times L$ 个 SINR 值, 用户将这些 SINR 的值反馈回基站, 以供基站进行调度。

据此, 本文提出了一种最大化系统容量的调度方法。发送端根据各用户反馈的 SINR 值和系统容量最大准则从等待调度的 X 个用户中选择 K 个用户, 并选择对应的预编码矩阵 \mathbf{w} , 使得系统具有最大吞吐量。对多用户 MIMO 系统来说, 其系统容量可表示为

$$C_{MU}(\text{SINR}) = \sum_{k=1}^K \log_2(1 + \text{SINR}_k) \quad (22)$$

最大化系统容量准则为

$$\mathbf{w} = \arg \max_{\mathbf{w} \in \mathbf{W}} C_{MU}(\text{SINR}) \quad (23)$$

其约束条件为 K 个用户对应相同预编码矩阵中的不同预编码向量, 如下

$$\mathbf{v}_k = [\mathbf{w}]_k \quad (24)$$

具体步骤如下:

(1) 根据上述准则构成预编码码本 $\mathbf{W} = \{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_L\}$;

(2) 各用户根据自己的信道矩阵和预编码码本计算出 $K \times L$ 个 SINR 的值, 将这些 SINR 的值反馈到基站;

(3) 基站将所有反馈信息收集起来, 并依据最大化系统容量准则选择 K 个用户和对应的预编码矩阵 \mathbf{w} , 并且每个用户对预编码矩阵 \mathbf{w} 中的预编码向量 $\mathbf{v}_k = [\mathbf{w}]_k$;

(4) 基站对这 K 个用户进行预编码之后发送。

5 仿真结果

仿真了本文所提方案和传统的单用户 MIMO 系统及酉矩阵预编码多用户 MIMO 系统在相同条件下的性能, 采用等功率分配, 其中酉矩阵和非酉矩阵预编码的多用户 MIMO 方案在发送端都采用系统容量最大准则进行调度。对基站端有多个用户等待调度的等功率分配单用户 MIMO 系统来说, 其系统容量^[14]可用以下式表示:

$$C_{SU} = \max_k \left[\sum_{i=1}^n \log_2 \left(1 + \frac{p_0}{N_0 M} \lambda_i^k \right) \right] \quad (25)$$

λ_i^k 为 $\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k$ 的第 i 个特征值, $n = \min\{M, N\}$ 。

根据 LTE 要求, 假设基站端有 2 根发送天线, 用户端有

2根接收天线,接收端采用MMSE检测, $p_0/N_0 = 5\text{dB}$, 基站有10个用户等待调度。为了得到具有较强干扰抑制能力的非酉预编码矩阵,本文引入了 $M=2$, $N_t=64$ 的格拉斯曼码本,由此构成的非酉预编码矩阵相关系数之和的量级在 $10e-2$ 左右。

图2和图3是单用户MIMO同两种多用户MIMO方案在不同 L 下的CDF (Cumulative Distribution Function) 统计结果。本方案在 $L=4$ 时比传统单用户MIMO方案提升了将近 1bps/Hz 的系统容量,随着 L 的增加,系统容量还会有提升,但此时的代价是反馈的增加。同时本方案比基于码本的非酉矩阵预编码多用户MIMO系统性能要好,原因在于两者在对噪声抑制相差不大的情况下,格拉斯曼码本中的预编码向量能提供更高的预编码增益。

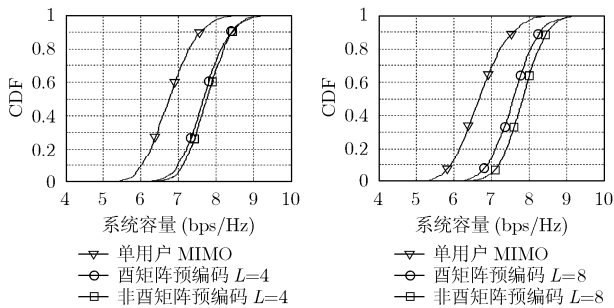


图2 单用户MIMO同多用户MIMO在 $L=4$ 下的CDF比较

图3 单用户MIMO同多用户MIMO在 $L=8$ 下的CDF比较

图4是3种方案在不同用户数等待调度时的平均系统容量比较。随着用户数的增加,系统容量也将随之提升。图5为3种方案在基站端有10个用户等待调度时的误码率性能比较。

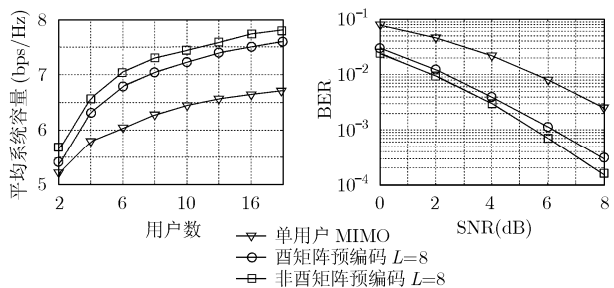


图4 3种方案在不同用户数下的平均系统容量

图5 3种方案的BER性能

6 结束语

本文提出了一种基于码本的有限反馈非酉矩阵预编码下行多用户MIMO系统。该方案将格拉斯曼空间装箱原理引入到码本设计中,并将格拉斯曼码本中的向量按相关性构成非酉预编码矩阵来提高预编码增益和抑制多用户干扰。该方案有效利用了多用户分集增益和预编码增益,在抑制多用户

干扰的同时,比传统单用户MIMO系统较大程度地提高了系统性能,并且具有反馈量少、复杂度低的优点。

参考文献

- [1] Jorswieck E A and Sezgin A. Impact of spatial correlation on the performance of orthogonal space-time block codes. *Communications Letters*, 2004, 8(1): 21-23.
- [2] Diggavi S N. On achievable performance of spatial diversity fading channels. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2001, 47(1): 308-325.
- [3] Tarasak P, Minn H, and Bhargava V K. Linear prediction receiver for differential space-time block codes with spatial correlation. *Communications Letters*, 2003, 7(11): 543-545.
- [4] Bolckei H, Gesbert D, and Paulraj A J. On the capacity of OFDM-based spatial multiplexing systems. *IEEE Trans. on Communications*, 2002, 50(2): 225-234.
- [5] Haustein T, von Helmlolt C, and Jorswieck E, et al. Performance of MIMO systems with channel inversion. *IEEE 55th VTC, Vancouver*, 2002, Vol. 1: 35-39.
- [6] Quentin Q H, Spencer, Peel C B, and Swindlehurst A L, et al. An introduction to the multi-user MIMO downlink. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42(10): 60-67.
- [7] Costa M. Writing on dirty paper. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1983, 29(3): 439-441.
- [8] 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.
- [9] Choi L U and Murch R D. A transmit preprocessing technique for multiuser MIMO systems using a decomposition approach. *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, 2004, 3(1): 20-24.
- [10] Samsung. Downlink MIMO for EUTRA. 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #43, Korea, November 2005, R1-051353.
- [11] 3GPP. Multiple Input Multiple Output (MIMO) antennae in UTRA (Release 7). TR 25.876, 2007.
- [12] Bachoc C. Linear programming bounds for codes in Grassmannian spaces. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2006, 52(5): 2111-2125.
- [13] Love D J, Heath R W, and Strohmer T. Grassmannian beamforming for multiple-input multiple-output wireless systems. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2003, 49(10): 2735-2747.
- [14] Chiurtu N and Rimoldi B. Varying the antenna locations to optimize the capacity of multi-antenna Gaussian channels. *ICASSP, Istanbul*, June 2000, Vol. 5: 3121-3123.

方舒: 女, 1981年生, 博士生, 研究方向为无线移动通信、MIMO。

李立华: 女, 1976年生, 副教授, 研究方向为移动通信、自适应技术、MIMO、OFDM等。

张平: 男, 1959年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信、信号与信息处理、调制与编码、码分多址通信等。