

## 一种基于线性离散码的发射天线选择方案

邓 单 朱近康

(中国科学技术大学个人通信与扩频实验室 合肥 230027)

**摘要:** 为了充分利用多天线系统的性能增益, 该文提出了一种基于线性离散码的发射天线选择(LDC-TAS)方案。在准静态信道环境下, 该文比较了所提方案的3种天线选择准则: 最大信道增益准则, 最大容量准则和最大化最小后验SNR准则。仿真数据显示, 在不同的调制方式如QPSK, 8PSK和16QAM环境下, 最大化最小后验SNR准则比其他两种准则表现出更好的性能。在相同的频谱效率下, 与BLAST-TAS相比, 所提方案表现出明显的分集增益; 在低信噪比环境下, 与STBC-TAS相比, 仍有一定的性能增益。

**关键词:** 天线选择; 线性离散码; 线性接收机

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)04-0942-04

## Transmit Antenna Selection for Linear Dispersion Codes

Deng Dan Zhu Jin-kang

(PCN & SS Lab, University of Science & Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** In an effort to utilize the advantage of using multiple antennas, transmit antenna selection for linear dispersion codes (LDC-TAS) is proposed in this paper. Three criteria are presented: maximum channel gain, maximum capacity and max-min post-SNR, for selecting the optimal transmit antennas when linear, coherent receiver is used over a slowly varying channel. Simulation results suggest that the max-min post-SNR criterion outperforms the other selection methods in a variety of modulation modes, such as QPSK, 8PSK and 16QAM. Compared with BLAST-TAS, under the same spectral efficiency, the proposed scheme shows significant diversity advantage. In low SNR environment, LDC-TAS is still better than STBC-TAS.

**Key words:** Antenna selection; Linear Dispersion Codes (LDCs); Linear receiver

### 1 引言

MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)系统与传统的SISO(Single-Input Single-Output)系统相比, 可以提供极大的容量增益<sup>[1]</sup>。假设只有接收端已知信道状态信息的条件下, 实际的MIMO调制方法一般分为两种: 分集与复用<sup>[2]</sup>。空时编码方案, 包括空时格形码(STTC)<sup>[3]</sup>和空时分组码(STBC)<sup>[4]</sup>, 通过精心设计的码字来使得分集增益最大化, 从而提供更可靠的信息传输能力。考虑到正交空时分组码<sup>[5]</sup>虽然达到了最大分集增益, 但却不能提供MIMO信道的全系统容量, Hassibi和Hochwald<sup>[5]</sup>提出了基于互信息量最大化设计的线性离散码(Linear Dispersion Codes, LDC)。Heath<sup>[6]</sup>随后提出了基于分集增益的线性离散码设计准则, 在容量最大化的前提下, 也能保证较大的分集增益, 使得系统性能得到一定的提高。

虽然MIMO系统可以提高系统容量, 改善通信质量, 但由于引入了多个射频链路, 在体积, 功耗和硬件成本上,

都提出了额外的要求。在寻求更为廉价方便地获取MIMO系统增益的过程中, 天线选择成为一种低成本低复杂度的实现方案<sup>[7]</sup>。为了更好地发掘和利用MIMO系统, 相关研究人员开始将天线选择方法应用于空时码系统和BLAST系统中。在文献[8]中, 作者给出了一种全面的分析在接收天线选择下的正交空时分组码性能的方法, 而对应的准正交空时分组码则在文献[9]中进行了比较。文献[10]提出基于BLAST的发射天线选择(BLAST-TAS)系统, 针对迫零(Zero-Force, ZF)接收机, 文章给出了3种天线选择准则。仿真表明, 这3种准则性能基本相同。空时编码系统虽然关注提高误码性能和分集能力, 但在容量方面远低于MIMO空间复用系统; 同时随着传输速率的提高, STBC系统的性能恶化极快。STTC则由于复杂度较高, 难以实现。而V-BLAST系统由于不能获得分集增益, 所以系统误码性能较差。

为了提高系统传输速率和分集增益, 本文提出基于线性离散码的发射天线选择(LDC-TAS)方案。这种系统方案适用于任何收发两端天线数目的配置情况, 在使收发两端信号互信息量最大的条件下, 提供分集能力。在准静态信道环境下, 基于线性接收机LDC系统, 我们比较了3种天线选择准则: 最大信道增益准则, 最大容量准则和最大化最小后验

2005-08-09 收到, 2005-12-26 改回

国家自然科学基金(60572066)和国家 863 计划快速启动项目(2005AA123920)资助课题

SNR准则。仿真数据显示,在不同的调制方式如QPSK, 8PSK和16QAM环境下,最大化最小后验SNR准则比其他两种准则表现出更好的性能。在相同的频谱效率下,与BLAST-TAS相比, LDC-TAS表现出明显的分集增益。在低信噪比环境下, LDC-TAS与STBC-TAS相比,仍有一定的性能增益。

本文结构安排如下:第2节简要介绍了线性离散码的编码方法。LDC-TAS的系统模型和相关信道假设在第3节进行了描述。在第4节中,我们详细推导了基于ZF接收机的LDC-TAS系统3种天线选择准则。第5节给出了我们的数值仿真结果,并做了简要的比较与分析。第6节为结束语。

## 2 线性离散码

线性离散码最早是以收发两端互信息量最大化为设计准则而提出的<sup>[5]</sup>。LDC编码器采用一系列基矩阵的线性组合来构造空时码字。假设 $\{s_n\}_{n=0}^{N-1}$ 是从特定星座图 $\mathcal{C}$ 中选择出的待发射的标量符号集合, $\{\mathbf{M}_n\}_{n=0}^{N-1}$ 是 $M \times T$ 基矩阵码字,并且基矩阵集合存储于收发两端。其中 $M$ 为实际使用的发射天线数, $T$ 为码字的持续时间。假定 $s_n$ 的均值与方差满足: $\varepsilon\{s_n\} = 0$ ,  $\varepsilon\{|s_n|^2\} = 1$ ,式中 $\varepsilon\{\bullet\}$ 为期望值。基矩阵同时满足功率限制条件

$$\text{tr}\{\mathbf{M}_n \mathbf{M}_n^H\} = \frac{T}{N} \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

对应于 $\{s_n\}_{n=0}^{N-1}$ 的发射码字可以通过基矩阵以 $s_n$ 为加权系数的线性组合来构造

$$\mathbf{S}(s_0, s_1, \dots, s_{N-1}) = \sum_{n=0}^{N-1} \{\mathbf{M}_n s_n\} \quad (2)$$

考虑 $M$ 个发射天线 $M_r$ 个接收天线的MIMO系统。经过匹配滤波和符号级采样后,在接收天线阵中的接收信号矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= \sqrt{E_s} \mathbf{H}_s \mathbf{S}(s_0, s_1, \dots, s_{N-1}) + \mathbf{V} \\ &= \sqrt{E_s} \mathbf{H}_s \sum_{n=0}^{N-1} \{\mathbf{M}_n s_n\} + \mathbf{V} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{Y}$ 是 $M_r \times T$ 的接收天线信号矩阵, $\mathbf{H}_s$ 是 $M_r \times M$ MIMO信道系数矩阵。 $\mathbf{V}$ 是 $M_r \times T$ 加性高斯白噪声(AWGN)矩阵,其中的各元素为独立同分布的复数域高斯随机变量,其分布为 $\text{CN}(0, N_0)$ 。 $E_s$ 为 $M$ 个发射天线上发射的总功率。接收天线信噪比SNR定义为: $\text{SNR} := E_s / N_0$ 。此时,系统的频谱效率定义为:

$$R = \frac{\log_2 |\mathcal{C}| \cdot N}{T} \quad (\text{b/s/Hz}) \quad (4)$$

式中 $|\mathcal{C}|$ 表示星座图 $\mathcal{C}$ 的势,即所有可能的星座图个数。

## 3 系统模型

基于LDC的发射天线选择系统(LDC-TAS)的结构框图如图1所示,该系统中存在一条从接收端到发射端的反馈链路。假定系统中存在 $M_t$ 个发射天线与 $M_r$ 个接收天线,而对每个LDC编码块,发射机只选择其中的 $M$ 个发射天线进行发射。令 $\mathbf{H}$ 为 $M_r \times M_t$ 信道系数矩阵,其各元素完全独立,且

分布均为 $\text{CN}(0,1)$ 。假设接收机已知理想的信道状态信息(CSI),并且接收端结合信道状态 $\mathbf{H}$ 和 $\{\mathbf{M}_n\}_{n=0}^{N-1}$ ,依据相应的选择准则完成接收天线的选择算法。令 $\mathbf{H}_s$ 为选择后的 $M_r \times M$ 信道矩阵,以函数形式表达为

$$\mathbf{h} : \mathcal{C}^{M_r \times M_t} \rightarrow \widehat{\mathbf{H}} = \{\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2 \dots \mathbf{H}_P\} \quad (5)$$

式中 $\widehat{\mathbf{H}}$ 是从 $\mathbf{H}$ 中任意选出 $M$ 列而构造出来的新的信道系数矩阵集合, $P$ 是天线子集 $\widehat{\mathbf{H}}$ 中所包含元素的数目。易得 $P = C_{M_t}^M$ ,接收端只需要反馈 $\log_2 P$ 个比特信息即可。本文中假设反馈链路完全无差错传输,并且由反馈而引起的时延可忽略。信道为准静态块衰落(quasi-static block-fading)信道,即信道在一个LDC编码块内保持恒定,在不同的编码块间信道实现完全独立。

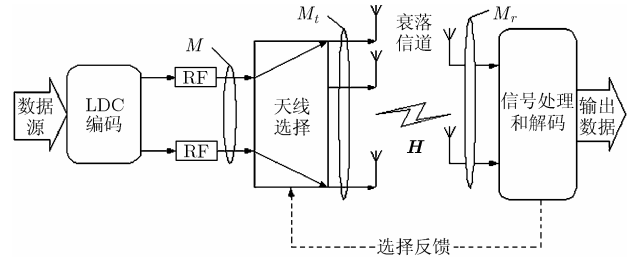


图1 基于LDC的发射天线选择系统(LDC-TAS)

## 4 LDC-TAS 天线选择准则

如上所述 $\mathbf{H}_s$ 是经过函数 $\mathbf{h}$ 从 $\mathbf{H}$ 中选择出来的有效信道系数矩阵

$$\mathbf{H}_s = \mathbf{h}(\mathbf{H}) \quad (6)$$

为了分析的方便,我们可以将式(3)中的输入输出关系改写为等效的矢量形式。定义线性变换矩阵(Linear Transformation Matrix, LTM)<sup>[6]</sup>

$$\chi := [\text{vec}(\mathbf{M}_0), \text{vec}(\mathbf{M}_1), \dots, \text{vec}(\mathbf{M}_{N-1})] \quad (7)$$

并将信道系数矩阵表达为

$$\widehat{\mathbf{H}}_s := \mathbf{I}_T \otimes \mathbf{H}_s \quad (8)$$

式中 $\text{vec}(\bullet)$ 是矢量化算子,它将矩阵的各列按先后顺序合并为一个新的矢量, $\otimes$ 为克罗内克(Kronecker)积。式(3)的两端进行矢量化操作,得

$$\mathbf{y} = \sqrt{E_s} \widehat{\mathbf{H}}_s \chi \mathbf{s} + \mathbf{v} = \sqrt{E_s} \widetilde{\mathbf{H}} \mathbf{s} + \mathbf{v} \quad (9)$$

式中 $\mathbf{y} := \text{vec}(\mathbf{Y})$ ,  $\mathbf{s} := [s_0, s_1, s_2, \dots, s_{N-1}]^T$ ,  $\mathbf{v} := \text{vec}(\mathbf{V})$ ,  $\widetilde{\mathbf{H}} := \widehat{\mathbf{H}}_s \chi$ 为 $M_r T \times N$ 的等效信道系数矩阵。

由上式可知,任何适用于BLAST的解码算法都可以用于LDC系统的解码。考虑到实际系统的复杂度,本文只对线性接收机进行考查。假设 $N \times M_r T$ 的均衡矩阵 $\mathbf{G}$ 与 $\mathbf{y}$ 相乘后,得到 $\mathbf{s}$ 的估计如下式:

$$\widehat{\mathbf{s}} = \mathbf{G} \mathbf{y} = \sqrt{E_s} \mathbf{G} \widetilde{\mathbf{H}} \mathbf{s} + \mathbf{G} \mathbf{v} \quad (10)$$

接收机可以通过 $\widehat{\mathbf{s}}$ 恢复出发射端的原始信息。对于迫零(ZF)接收机

$$\mathbf{G} = \widehat{\mathbf{H}}^+ \quad (11)$$

对于MMSE接收机

$$G = \left( \tilde{H}^H \tilde{H} + \frac{N_0}{E_s} I_N \right)^{-1} \tilde{H}^H \quad (12)$$

式中  $()^+$  为矩阵的伪逆,  $()^H$  为矩阵的共轭转置。限于篇幅, 本文中只讨论ZF接收机, 进一步的仿真结果表明: 对于MMSE接收机仍然存在类似的性能增益。

在准静态衰落信道环境下, 我们给出LDC-TAS系统中基于线性接收机可以采用的3种天线选择准则。

最简单的选择准则, 即在发射天线中选择信道增益最大的  $M$  个天线。

**选择1** 最大化信道增益 (maximum channel gain)

对式(5)集合  $\tilde{H}$  中的每个元素, 计算其相应的信道矩阵总功率, 选择具有最大信道功率的天线子集

$$H_s = \arg \max_{H_k \in \tilde{H}} [\text{tr}(H_k H_k^H)] \quad (13)$$

**选择2** 最大化容量 (maximum capacity) 对集合  $\tilde{H}$

中的每个元素, 根据式(9)计算其相应的等效信道系数矩阵, 并计算其对应的信道容量  $C(H_k)$

$$C(H_k) = \frac{1}{T} \log \det \left( I_{M,T} + \frac{E_s}{NN_0} \tilde{H}_k \tilde{H}_k^H \right) \quad (14)$$

式中  $\tilde{H}_k = \overline{H}_k \chi = (I_T \otimes H_k) \chi$ 。选择最大化容量所对应的天线子集

$$H_s = \arg \max_{H_k \in \tilde{H}} [C(H_k)] \quad (15)$$

**选择3** 最大化最小后验SNR (Max-Min post-SNR)

ZF接收机中  $N$  个复用子流所对应的后验SNR可以表达如下<sup>[10]</sup>:

$$\text{SNR}_n^{\text{ZF}}(H_k) = \frac{E_s}{NN_0 [\tilde{H}_k^H \tilde{H}_k]_{nn}^{-1}}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (16)$$

对集合  $\tilde{H}$  中的每个元素, 首先计算相应的  $N$  个复用子流中最小SNR, 选择使最小SNR最大化所对应的天线子集

$$H_s = \arg \max_{H_k \in \tilde{H}} [\min_n (\text{SNR}_n^{\text{ZF}}(H_k))] \quad (17)$$

### 5 仿真与分析

通过计算机仿真比较3种选择准则的性能。考虑4发2收的MIMO系统, 发射端只选择3根天线进行发射。本文所采用的LDC码是经过联合容量与误码率优化<sup>[6]</sup>, 由计算机搜索得到。本文中将LDC编码块发射符号数固定:  $N=3$ ; 我们讨论的LDC码字时间长度分别为  $T=2$  和  $T=3$ 。仿真中采用的调制方式包括QPSK, 8PSK和16QAM。性能比较的参数为误比特率(Bit Error Rate, BER)和误帧率(Frame Error Rate, FER), 其中每帧只包含一个LDC编码块。

采用QPSK调制,  $T=2$ 时, LDC-TAS系统的BER曲线和FER曲线分别为如图2和图3所示。3种选择准则所对应的性能曲线分别标注“sel1”, “sel2”和“sel3”; 而未标注选择方法的曲线表示随机选择, 即不进行选择的方案。从曲线比

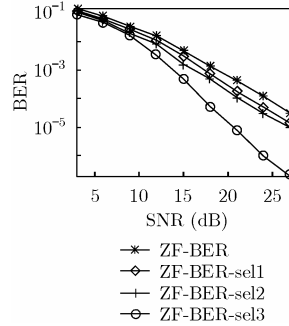


图 2 LDC-TAS 系统 BER 曲线,  $T=2$

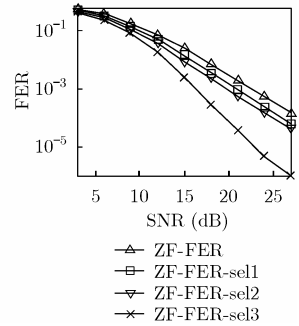


图 3 LDC-TAS 系统 FER 曲线,  $T=2$

较中容易看出, 3种选择方案与无选择方案相比, 都有一定的增益; 但选择3表现出最好的性能。当BER达到  $10^{-3}$  时, 与选择3相比, 选择2性能损失约2dB; 而选择1损失约3dB。同时, 选择1与无选择方案相比, 仍有1.5dB的性能增益。从BER曲线斜率看, 3种选择方案中, 只有选择3提供出额外的分集增益。

将LDC码字长度配置为  $T=3$ 。重复上述实验, 对应的BER性能曲线如图4所示。选择3与其它两种选择准则相比, 性能仍为优越。当BER达到  $10^{-4}$  时, 与选择3相比, 选择2性能损失约1.5dB; 而选择1有2.5dB的性能损失。

采用高阶调制方式时, 选择3仍然表现出较高的性能增益。当系统配置采用8PSK调制,  $T=2$ 时, 对应的BER曲线如图5所示。同样, 当BER达到  $10^{-3}$  时, 与选择2和选择1相比, 选择3的性能增益为2dB。当系统配置为16QAM调制,  $T=2$ 时, 如图6所示, 仍然存在类似的结果: 与其它两种选择方法相比, 选择3的性能增益约为2.5dB。

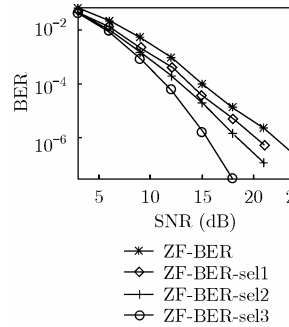


图 4 LDC-TAS 系统 BER 曲线,  $T=3$

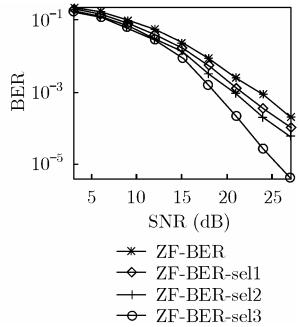


图 5 LDC-TAS 系统 BER 曲线, 8PSK

注意到选择3的选择方法是特别针对ZF接收机而设计的, 式(16)中的后验SNR是直接系统与BER相关的变量; 而其他两种选择方法则是基于一般的信道增益和容量理论, 并没有特别针对线性接收而设计。所以在ZF接收机条件下, 最大化最小后验SNR (Max-Min post-SNR) 准则具有最好的系统性能。

我们还比较了LDC-TAS, STBC-TAS和BLAST-TAS3种系统的误码性能。STBC-TAS采用4发2收, 8PSK调制, 发射端选择两根天线进行发射; LDC-TAS采用QPSK调制,  $T=2$ 。此时两种系统的频谱效率均为  $R=3$  b/s/Hz。

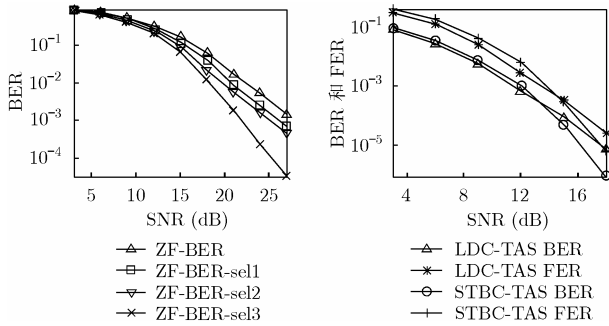


图6 LDC-TAS系统  
BER曲线, 16QAM

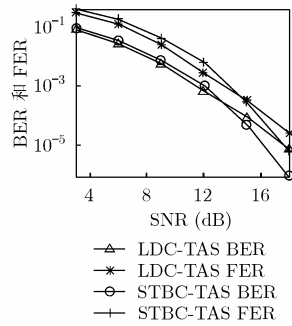


图7 LDC-TAS与  
STBC-TAS性能比较

采用最大似然解码方法, 根据选择1准则进行天线选择, 两种系统的BER与FER曲线如图7所示。当SNR低于14dB时, LDC-TAS性能优于STBC-TAS。当FER达到 $10^{-2}$ 时, LDC-TAS约有3dB的性能增益。但在高信噪比环境下, 由于STBC可以达到全分集增益, 性能好于LDC-TAS。

BLAST-TAS仍采用4发2收, QPSK调制, 发射端选择两根天线进行发射; LDC-TAS采用16QAM调制,  $T=3$ 。两种系统的频谱效率均为 $R=4$  b/s/Hz。采用ZF线性机, 根据选择3准则进行天线选择, 两种系统的BER与FER曲线如图8所示。在相同的频谱效率下, 与BLAST-TAS相比, LDC-TAS表现出明显的分集增益。当BER达到 $10^{-2}$ 时, LDC-TAS约有6dB的性能增益; 随着SNR的升高, 性能增益更高。

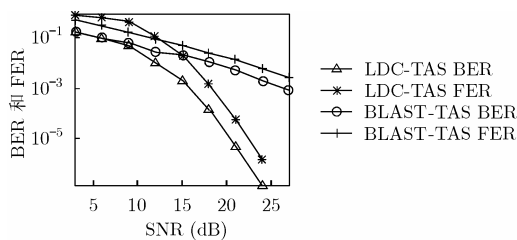


图8 LDC-TAS与BLAST-TAS性能比较

## 6 结束语

未来移动通信系统要求在保证容量的前提下, 以简单廉价的解决方案提供更为可靠的通信质量。LDC码以互信息最大化作为设计准则, 而发射天线选择可以提供额外的分集增益。本文提出的基于线性离散码的发射天线选择(LDC-TAS)方案结合了两者的优势, 既保证了高速率传输, 又充分利用了分集增益。天线选择系统减少了射频链路, 可以降低系统成本。在准静态信道环境下, 基于线性接收机LDC系统, 本文比较了3种天线选择准则: 最大信道增益准则, 最大容量准则和最大化最小后验SNR准则。仿真数据显

示, 在不同的调制方式如QPSK, 8PSK和16QAM环境下, 最大化最小后验SNR准则比其他两种准则表现出更好的性能。在相同的频谱效率下, 与BLAST-TAS相比, LDC-TAS表现出明显的分集增益。在低信噪比环境下, LDC-TAS与STBC-TAS相比, 仍有一定的性能增益。

## 参考文献

- [1] Telatar I E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *Euro. Trans. Telecommun.*, 1999, 10(6): 585-595.
- [2] Heath Jr R W and Paulraj A. Switching between spatial multiplexing and transmit diversity based on constellation distance. *Proc. AllertonConf. Commun. Cont. Comput.*, Illinois, Oct. 2000, 2386-2389.
- [3] Tarokh V, Seshadri N, and Calderbank A R. Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criterion and code construction. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1998, 44(2): 744-765.
- [4] Tarokh V, Jafarkhani H, and Calderbank A R. Space-time block codes from orthogonal designs. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1999, 48(5): 1456-1467.
- [5] Hassibi B and Hochwald B M. High-rate codes that are linear in space and time. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2002, 48(7): 1804-1824.
- [6] Heath R W Jr and Paulraj A J. Linear dispersion codes for MIMO systems based on frame theory. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2002, 50(10): 2429-2441.
- [7] Sanayei Shahab and Nosratinia Aria. Antenna Selection in MIMO Systems. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42(10): 68-73.
- [8] Zeng Xiang Nian and Ghayeb Ali. Performance bounds for space-time block codes with receive antenna selection. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2004, 50(9): 2130-2137.
- [9] Badic B, Fuxjaeger P, and Weinrichter H. Performance of quasi-orthogonal space-time code with antenna selection. *IEEE Electronics Letters*, 2004, 40(20): 1282-1284.
- [10] Heath R W, Sandhu Sumeet, and Paulraj Arogyaswami. Antenna selection for spatial multiplexing systems with linear receivers. *IEEE Communications Letters*, 2001, 5(4): 142-144.

邓 单: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为MIMO、空时编码。  
朱近康: 男, 1943年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为移动通信与个人通信、通信信号处理。