

# 空间复用系统在相关信道下的两步选择天线算法

冯兴乐 孙朝云 段宗涛

(长安大学信息工程学院, 陕西西安 710064)

**摘要:** 针对采用贝尔实验室垂直分层空时(V-BLAST)检测算法的空间复用系统存在信道相关的问题, 提出一种新的两步选择发射天线的准则, 首先利用信道矩阵奇异值确定有效发射天线数, 然后根据最低检测后信噪比确定发射天线和子数据流之间的映射关系。仿真结果表明两步选择准则能获得比已有算法更高的选择增益, 此外还分析并仿真了天线间距和角度扩展对符号向量错误概率的影响。

**关键词:** 天线选择; 空间复用; V-BLAST; 相关信道; 天线间距; 角度扩展

## A two-step antenna selection algorithm for spatial multiplexing in the presence of spatial fading correlation

FENG Xing-le SUN Zhao-yun DUAN Zong-tao

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** A two-step antenna selection algorithm is proposed for the spatial multiplexing system with the Vertical-Bell Labs Layered Space-Time (V-BLAST) nonlinear receiver in correlated channel. The basic idea is to separate the optimization into two steps, we first choose the optimal number of substreams in terms of the singular values of the channel matrix, then adapt the mapping of substreams to antennas according to the post-detection SNR. Simulation results illustrate that the proposed two-step selection criterion can obtain the greater selection gain than the existing singular value based selection criterion. Further, we analyze the effects of the angle spread and antenna spacing on the probability of vector symbol error.

**Key words:** antenna selection; spatial multiplexing; V-BLAST; correlated channel; angle spread; antenna spacing

## 1 引言

空间复用系统是一种以提高频谱效率为出发点的多输入多输出(MIMO)系统, 其理论容量与发射天线数和接收天线数的最小值呈线性增长关系, 然而上述结论成立的前提是各子信道之间相互独立。在实际的 MIMO 系统中, 由于天线阵元之间距离以及天线周围散射物数量的有限性, 使得各子信道之间的相关在所难免, 严重的信道相关使得 MIMO 系统不但不会因增加天线数量而增加容量, 而且还会增加子信道之间的相互干扰, 导致容量的下降。Gore D 等<sup>[1]</sup>指出: 合理选择天线不但不会造成容量的下降, 相反对于秩亏信道, 使用与信道矩阵秩相同数目的天线有助于提高系统容量。

在已有的天线选择算法中, 基于容量最大化的选择算法<sup>[1-4]</sup>主要针对采用最大似然检测算法的空间复用系统, 实现复杂度很高; 基于误码率最小化的算法<sup>[2][4]</sup>则针对采用线性检测或干扰抵消检测算法的系统。Heath R W 等<sup>[5]</sup>提出的

基于符号向量错误概率(VSER)最小化、基于最小信噪比最大化、基于奇异值的三种天线选择准则主要针对独立信道下的线性检测接收机, 检测时矩阵求逆的复杂度较高。Feng X L 等<sup>[6]</sup>提出的天线选择算法针对独立信道下采用垂直分层空时编码(V-BLAST)检测算法的接收机, 复杂度有所降低, 但同样没有考虑信道相关对系统性能的影响。本文是文献[5][6]工作的延续, 与上述文献的关系是: 首先用 V-BLAST 检测算法代替文献[5]中的线性检测算法, 同时参照文献[5]中关于将有效天线数目与映射关系的最优化分开处理的两步走策略; 其次采用更具实际意义的相关信道模型, 考虑天线间距和角度扩展对 VSER 的影响; 最后提出采用 V-BLAST 检测算法的空间复用系统在相关信道中的天线选择算法。

## 2 系统模型

### 2.1 MIMO 相关信道模型

考虑一个有  $M_r$  根发射天线和  $M_t$  根接收天线的 MIMO 信

收稿日期: 2007 年 8 月 1 日; 修回日期: 2008 年 5 月 12 日

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20070421101), 陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2007F11), 长安大学科技发展基金资助项目(07Z09)。

道,收发两端采用均匀线阵天线。在第  $m, k$  根天线收到的信号之间的相关系数为<sup>[7]</sup>

$$\rho_{m,k} = \int_0^{2\pi} e^{j\ell d_{m,k} \cos(\alpha-\phi)} p(\alpha) d\alpha, \quad \int_0^{2\pi} p(\alpha) d\alpha = 1 \quad (1)$$

其中  $d_{m,k}$  为天线  $m$  与天线  $k$  之间的距离,相邻天线的间距为  $d_s$ ;  $\ell = \omega/c$  为对应角频率  $\omega$  的波数;  $\phi$  是线性天线阵列的辐射方位角,对于收发两端天线阵轴平行的通信系统,  $\phi = \pi/2$ ;  $\alpha$  是入射平面波的方位角;  $p(\alpha)$  为方位角的概率分布,在典型的蜂窝移动通信系统中,通常认为方位角的概率分布服从宽度为  $2\sigma/\sqrt{3}$  的均匀分布或标准方差为  $\sigma$  的高斯分布,其中  $\sigma$  是角度扩展<sup>[8]</sup>。另外,由于接收天线和发射天线之间距离通常较远,可以假设接收天线之间的相关性不依赖于发射天线,反之亦然<sup>[9]</sup>。这样信道的相关矩阵就可以分解为  $M_t \times M_r$  维的发射相关矩阵  $\mathbf{R}_t$  和  $M_r \times M_r$  维的接收相关矩阵  $\mathbf{R}_r$ ,相关矩阵  $\mathbf{R}_t$  和  $\mathbf{R}_r$  中的元素可由式(1)计算得到。同时考虑发射相关和接收相关的信道模型为

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}_r \mathbf{H}_w \mathbf{R}_t \quad (2)$$

其中  $\mathbf{H}_w$  是  $M_r \times M_r$  维的矩阵,其元素是满足均值为 0,方差为 1 的独立同分布复高斯随机变量。

## 2.2 天线选择系统模型

包括天线选择的空间复用系统框图如图 1 所示。发射天线数  $M_t$ ,接收天线数  $M_r$ ,只有  $M(1 \leq M \leq M_t)$  个射频链路,需要从  $M_t$  根发射天线中选取  $M$  根有效天线用于发射,共有

$\binom{M_t}{M}$  种不同的发射天线组合方式,所有的天线子集用  $\mathbf{F}_M = \left\{ \mathbf{f}_{M,1}, \mathbf{f}_{M,2}, \dots, \mathbf{f}_{M,p}, \dots, \mathbf{f}_{M,\binom{M_t}{M}} \right\}$  表示,  $\mathbf{f}_{M,p}$  表示  $\mathbf{F}_M$  中的第  $p$  个

子集,也就是从  $M_t$  维的单位矩阵中抽取  $M$  列。例如  $\mathbf{f}_{2,2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  表示从所有的 3 根天线中选择第 1 和第 3 根天线。

假设发射端未知信道信息,接收端在已知信道信息的基础上根据天线选择算法求出最佳天线数  $M^*$  和最佳天线子集序号  $p^*$  后,经反馈链路通知发射端,以便在下一时刻按照新的天线子集发射信号,这种方法对于慢变信道是可行的。

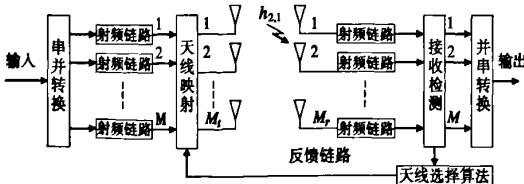


图 1 包括天线选择的空间复用系统框图

## 2.3 V-BLAST 检测算法

在一个符号周期内,  $R$  比特的数据被分为  $M$  个子数据流,每个子数据流包含  $R/M$  个比特,传输的总比特数  $R$  不随有效发射天线数  $M$  变化,  $M$  维的发射信号向量  $\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_M]^T$  在选定的  $M$  根发射天线上进行传送,各发射天线采用相同的调制制式和发射功率。在理想的同步条件下,信道输入输出关系可表示为

$$\mathbf{r} = \sqrt{\frac{E_t}{M}} (\mathbf{R}_r \mathbf{H}_w \mathbf{R}_t) \mathbf{f}_{M,p} \mathbf{b} + \mathbf{n} = \sqrt{\frac{E_t}{M}} \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{b} + \mathbf{n} \quad (3)$$

其中  $\mathbf{r}$  是  $M_r \times 1$  维的接收信号向量;  $E_t$  是总发射功率;  $\mathbf{n}$  为高斯白噪声;  $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{R}_r \mathbf{H}_w \mathbf{R}_t \mathbf{f}_{M,p}$  代表天线选择后的  $M_r \times M$  维信道矩阵。

在接收端采用基于迫零准则的 V-BLAST 检测算法<sup>[10]</sup>,假设检测顺序  $K = \{k_1, k_2, \dots, k_M\}$ , 第  $k_i$  支数据流经过  $i-1$  次干扰抵消后的检测后信噪比用下式表示:

$$\begin{aligned} \rho_{k_i}(M, p) &= \frac{E_t}{M \sigma_n^2 \left\| \left( \left[ \tilde{\mathbf{H}}_{k_{i-1}} \right]^+ \right)_{k_i} \right\|^2} \\ &= \frac{E_t}{M \sigma_n^2 \left\| \left( \left[ (\mathbf{R}_r \mathbf{H}_w \mathbf{R}_t \mathbf{f}_{M,p})_{k_{i-1}} \right]^+ \right)_{k_i} \right\|^2} \end{aligned} \quad (4)$$

( $\cdot$ )<sub>i</sub> 和 ( $\cdot$ )<sub>j</sub> 分别表示矩阵的第  $i$  列和第  $j$  行,  $\tilde{\mathbf{H}}_{k_{i-1}}$  表示将  $\tilde{\mathbf{H}}$  中第  $\{k_1, k_2, \dots, k_{i-1}\}$  列置零,  $[\cdot]^+$  表示 Moore-Penrose 伪逆运算,系统的误码性能由检测后信噪比  $\rho_{k_i}$  决定,因此系统性能取决于信噪比  $E_t/\sigma_n^2$ 、信道参数  $\mathbf{R}_r \mathbf{H}_w \mathbf{R}_t$  和天线选择策略  $\mathbf{f}_{M,p}$ 。

## 3 两步选择发射天线算法

天线选择算法的主要任务就是在接收端根据信道估计信息自适应调整有效发射天线数目  $M$ ,以及发射天线子集序号  $p$ ,也就是说,决定共用几根,以及具体是哪几根发射天线发送数据<sup>[11]</sup>。因为在空间复用系统中用户数据是并行传输,一旦某根发射天线上的数据流发生错误,这一时刻所有天线的数据均需重发,因此更关注符号向量错误概率,即  $R$  比特中至少有一个出错的概率。所以,天线选择的核心就是构造一个目标函数,优化目标是在数据速率一定的条件下使 VSER 最低,据此决定最佳子数据流数目  $M^*$  以及最佳映射关系的序号  $p^*$ ,最后将这两个优化值反馈到发射端。反馈业务量实际上很小,只有  $M_t$  (发射天线数) 比特,例如,反馈二进制比特流 10110 表示第 1,3,4 根天线为有效天线。为了实现天线选择,通常需要事先确定一个能客观反映 VSER 的目标函数,据此进行最优化选择,VSER 的高低则取决于目标函数的选取是否合理。通常,目标函数预测 VSER 越准确,据此进行天线选择后的实际 VSER 越低,相应地求解最佳值的算法越复杂,因此需要在复杂度和准确度之间取得折衷。

根据最邻近星座点联合界(NNUB)理论<sup>[12]</sup>,对于在高斯信道中传输的星座点数为M的信号,采用最大似然检测算法得到的错误概率为

$$P_e \leq N_e Q\left[\frac{d_{\min}}{2\eta}\right] \quad (5)$$

其中 $d_{\min}$ 表示对应某种调制制式的最小星座点距离, $N_e$ 表示星座图中平均最相邻星座点数目, $\eta$ 为噪声方差。考虑到该星座图中信号功率已归一化, $1/\eta$ 即为信噪比,在采用次序干扰抵消检测算法的空间复用系统中,错误概率主要由信噪比最小的子信道决定,因此 $\frac{d_{\min}}{2\eta}$ 就变为 $\sqrt{\frac{d_{\min}^2}{4 \max_{1 \leq i \leq M} \eta_i^2}} =$

$\sqrt{\min_{1 \leq i \leq M} \rho_{k_i} \frac{d_{\min}^2}{2}}$ ,另外,结合符号向量错误概率的定义,对于一

个给定的选择后信道矩阵 $\bar{H}$ 和总数据速率R,如果选择了 $M$ ( $1 \leq M \leq M_s$ )根发射天线且天线子集的序号为 $p(1 \leq p \leq \binom{M_s}{M})$ ,可以导出采用V-BLAST接收机的VSER上界公式

$$P_e \leq 1 - \left(1 - N_e(M, R) Q\left(\sqrt{\min_{1 \leq i \leq M} \rho_{k_i}(M, p) \frac{d_{\min}^2(M, R)}{2}}\right)\right)^M \quad (6)$$

其中 $\rho_{k_i}(M, p)$ 表示第 $k_i$ 支数据流的检测后信噪比, $Q(\cdot)$ 为互补高斯累积分布函数。我们注意到空间复用系统的性能取决于各子数据流的最低检测后信噪比 $\min_{1 \leq i \leq M} \rho_{k_i}(M, p)$ ,这样在不同的天线选择方案中, $M$ 和 $p$ 不同,最低检测后信噪比和VSER也会有所不同。为了降低算法复杂度,忽略不同调制制式下 $N_e(M, R)$ 的差异,根据式(6)中 $Q$ 函数里的内容(即最低检测后信噪比和最小星座点距离)进行优化,这样基于SNR的天线选择准则表示为:

$$\{M^*, p^*\} = \arg \max_{1 \leq M \leq M_s, 1 \leq p \leq \binom{M_s}{M}} \min_{1 \leq i \leq M} (d_{\min}^2(M, R) \rho_{k_i}(M, p)) \quad (7)$$

式(7)中选用 $\arg \max$ 是因为 $Q$ 函数是单调减函数,基于SNR的天线选择准则的效果都依赖于NNUB理论预测VSER的准确度。NNUB理论认为:噪声的扰动只会使接收信号误判为星座图中最相邻的星座点,但该结论成立的前提是噪声的扰动较小,因此,信噪比越大,噪声的扰动越小,NNUB预测VSER的准确度越高。尽管式(7)避免了式(6)中繁琐的 $N_e(M, R)$ 和 $Q$ 函数的计算,但是当发射天线数 $M_s$ 适中时,在所有可能的 $\binom{M_s}{M}$ 中搜索最佳值的工作量仍然很大,需要做 $2^{M_s} - 1$ 次计算。下面我们将借鉴文献[5]中提出的两步走策略降低天

线选择算法的复杂度。

令信道矩阵H的奇异值(按降序排列)分别为 $\lambda_1(H), \lambda_2(H), \dots, \lambda_M(H), \dots, \lambda_{M_s}(H)$ ,那么下式成立<sup>[5]</sup>

$$\lambda_M^2(H) \geq \lambda_M^2(HF_{M,p}) \geq \lambda_{M_s}^2(H) \quad (8)$$

式(8)中上界成立的条件是选择后的信道矩阵 $HF_{M,p}$ 包括的列向量为信道矩阵H的M个最大的奇异值对应的右奇异向量组成的矩阵,下界成立的条件是 $HF_{M,p}$ 包括的列向量为H的M个最小的奇异值对应的右奇异向量组成的矩阵。根据对V-BLAST检测算法的分析,其符号向量错误概率取决于最低的检测后信噪比,为了使VSER最低,需要使最低的检测后信噪比最大化,而最低的检测后信噪比又对应等效独立信道中的最小增益 $\lambda_M^2(HF_{M,p})$ ,用 $\lambda_M^2(HF_{M,p})$ 代替式(7)中的 $\min_{1 \leq i \leq M} \rho_{k_i}(M, p)$ 得到

$$\{M^*, p^*\} = \arg \max_{M, p} \lambda_M^2(HF_{M,p}) d_{\min}^2(M, R) \quad (9)$$

$d_{\min}^2(M, R)$ 是发射信号的最小星座点距离, $\lambda_M^2(HF_{M,p}) d_{\min}^2(M, R)$ 可看作是经过等效独立信道 $HF_{M,p}$ 后的接收信号的最小星座点距离,因此式(9)的含义就是通过合理选择 $M$ 和 $p$ ,使得经过信道后的接收信号的最小星座点距离最大化。为了降低搜索的复杂度,将上述最优化问题分为两部分。

第一步:确定有效天线数 $M^*$ 。根据式(8),在式(9)用 $\lambda_M(H)$ 代替 $\lambda_M(HF_{M,p})$ ,忽略 $p$ 的影响,式(9)变为

$$M^* = \arg \max_M \lambda_M^2(H) d_{\min}^2(M, R) \quad (10)$$

同时考虑到对于一个秩亏信道而言,在 $M > \text{rank}(H)$ 寻找最佳值是无意义的。进一步缩小 $M$ 的搜索范围,根据信道矩阵的奇异值在集合 $\{1, 2, \dots, \text{rank}(H)\}$ 中寻找最佳子数据流数目 $M^*$ ,式(10)变为

$$M^* = \arg \max_{1 \leq M \leq \text{rank}(H)} \lambda_M^2(H) d_{\min}^2(M, R) \quad (11)$$

第二步:确定最佳天线子集序号 $p^*$ 。根据式(11)确定有效发射天线数 $M^*$ 后,每根天线采用的调制制式就确定了(本文假设各发射天线的调制制式相同,均为 $2^{R/M}$ QAM), $d_{\min}^2(M, R)$ 是一确定值,在式(9)忽略 $d_{\min}^2(M, R)$ 的影响,同时用 $\min_{1 \leq i \leq M} \rho_{k_i}(M, p)$ 代替 $\lambda_M^2(HF_{M,p})$ ,就可根据检测后信噪比确定最佳的天线子集序号 $p^*$ 。

$$p^* = \arg \max_{1 \leq p \leq \binom{M_s}{M}} \min_{1 \leq i \leq M^*} \rho_{k_i}(M^*, p) \quad (12)$$

与文献[5]相比,第一步确定有效天线数的方法是相同的,但在第二步确定最佳映射关系时,本文使用最低检测后信噪比最大化准则,而文献[5]使用基于信道矩阵奇异值的优化准则。由于检测后信噪比比信道矩阵奇异值能更准确地预测VSER,因此本文提出的天线选择准则有望获得更好的系统性能。更为重要的是,在两步选择准则中选择最佳天线子集只

需要 $M_s + \left\lfloor \frac{M_s}{2} \right\rfloor - 2$ 次比较操作,其复杂度和发射天线数

呈线性增长关系。

#### 4 仿真实验与结果

本节通过蒙特卡罗仿真研究采用 V-BLAST 检测算法的空间复用系统中不同发射天线选择准则对应的 VSER。基本思路如下:由于角度扩展  $\sigma$  和天线间距  $d$ , 等信道参数影响相关系数(见式(1)(2)), 而信道相关矩阵又会影响检测过程中的检测后信噪比(见式(4)), 进而影响 V-BLAST 检测算法的性能(见式(6))。而天线选择算法就是根据信道信息合理选择天线, 具体讲就是根据信道矩阵的奇异值决定有效发射天线数  $M^*$ (式(11)), 根据检测后信噪比决定最佳天线子集序号  $p^*$ (式(12)), 以达到改善误码性能的目标。

仿真条件为:发射天线数  $M_r = 4$ , 接收天线数  $M_t = 4$ , 每使用一次信道发射比特数  $R = 8$ , 无信道编码, 发射总功率  $E_b = 1$  瓦。假设发射天线之间存在相关, 而接收天线不相关。(在移动通信系统的下行链路中, 由于基站周围散射物较少, 在半径为 1km 的小区基站处的角度扩展为  $2^\circ$ <sup>[13][14]</sup>, 存在较为严重的发射相关。另外基站端可以放置较多的天线, 存在天线选择的可能, 因此在本文中只考虑下行链路中基站一侧的发射天线选择, 即  $\mathbf{R}_r$  为单位矩阵  $I_{M_r}$ )。本文假设方位角的概率分布为宽度为  $2\sigma\sqrt{3}$  的均匀分布。

根据前面对 VSER 的推导过程, 决定 VSER 的因素包括:信道参数(式(1)中的天线间距  $d_{m,k}$  和入射波方位角的概率分布  $p(\alpha)$ ), 信噪比  $E_b/N_0$ (对应式(1)中的  $E_b/\sigma^2$ )和检测顺序。在后面的实验中主要讨论天线间距  $d$ (以载波波长数为单位)、角度扩展  $\sigma$  和信噪比对相关信道下的空间复用系统性能的影响, 图 2~图 4 分别为 VSER 随信噪比、发射角度扩展和发射天线间距变化的曲线。主要比较以下 3 种天线选择算法。

- 1) “无选择”指不进行天线选择的单纯空间复用系统的性能, 也就是所有的天线均用来传输数据;
- 2) “SVD 选择”是文献[5]提出的基于信道矩阵奇异值的天线选择准则;
- 3) “两步选择”是本文提出的根据公式(11)(12)选择最佳天线子集的算法。

从图 2 中可以看出:在角度扩展和天线间距固定的条件下, 随着信噪比的升高, 各种算法的 VSER 均呈下降趋势。在  $d_r = 10\lambda$ ( $\lambda$  为波长),  $\sigma = 2^\circ$ , VSER 为  $10^{-3}$  时, 两步选择算法比 SVD 选择算法有 0.5dB 的增益, 这是因为检测后信噪比比信道矩阵奇异值能更准确地预测 VSER。另外, 在两步选择算法中利用了 NNUB 原理, 该原理在信噪比较高时可以提供 VSER 的紧上界, 因此, 信噪比越高, 两步选择算法相对于 SVD 选择算法的优势越明显。

从图 3 中可以看出:在信噪比和天线间距固定的条件下, 随着发射角度扩展的增大, 各种算法的 VSER 均呈下降趋势,

且两步选择算法相对于 SVD 选择算法的优势更明显。在  $E_b/N_0 = 10\text{dB}$ ,  $d_r = 4\lambda$ ,  $\sigma < 4^\circ$  时, 两种选择算法的性能基本相同, 这是因为角度扩展较小时, 信道相关程度较高, 两种算法都选择 1 根有效天线数的可能性很大, 既然两种算法都是选择信道质量最好的一个子信道, 对应的 VSER 也就基本相同。但在  $\sigma > 4^\circ$  后, 两步选择算法比 SVD 选择算法的误码率略有降低, 这是因为角度扩展越大, 信道之间的相关性越小, 相关损耗越低, 有效信噪比越大, 而两步选择算法中的 NNUB 原理在信噪比较高时能提供 VSER 的紧上界, 能更准确地预测 VSER, 天线选择效果越好。在  $\sigma > 8^\circ$  后, 两种选择算法的性能达到一个相对稳定的状态, 这是因为此时的信道矩阵达到满秩, 算法选择全部的天线, 两根曲线之间的差别完全是由检测后信噪比比信道矩阵奇异值更能准确地预测 VSER。

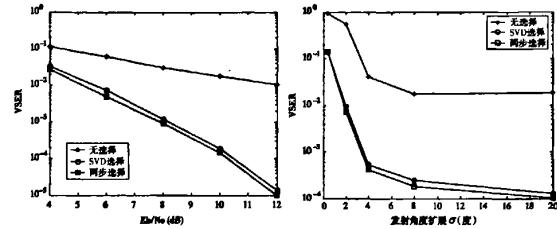


图 2  $M_r = M_t = 4, R = 8, d_r = 10\lambda, \sigma = 2^\circ$ , 天线选择算法性能比较

图 3  $M_r = M_t = 4, R = 8, E_b/N_0 = 10\text{dB}, d_r = 4\lambda, \sigma$ , 天线选择算法性能比较

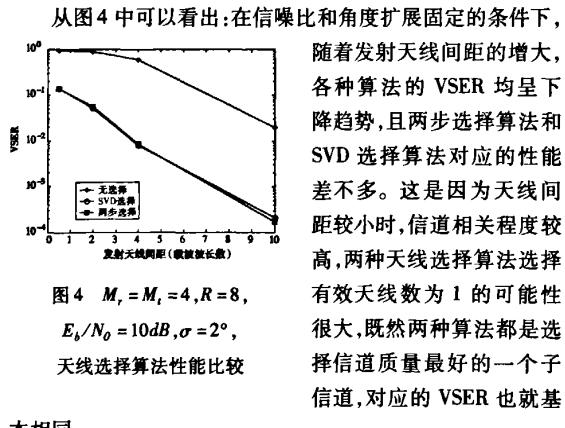


图 4  $M_r = M_t = 4, R = 8, E_b/N_0 = 10\text{dB}, \sigma = 2^\circ$ , 天线选择算法性能比较

本相同。

#### 5 结束语

昂贵的射频链路和信道相关是制约 MIMO 通信系统应用的重要因素, 研究一种既能保留多天线分集特性, 又具有低成本、低复杂度的天线子集选择算法很有意义。本文研究采用 V-BLAST 检测算法的空间复用系统中发射天线子集的最优化选择问题, 并提出一种新的天线选择准则, 子数据流的数目和子数据流到发射天线之间的映射关系分别由信道矩阵的奇异值和最低检测后信噪比决定, 并通过 Matlab 实验仿真了 VSER 随信噪比、角度扩展和天线间距变化的曲线。

可以看出:天线选择是一种能获得天线分集的简便办法,额外的可供选择的发射天线能改善V-BLAST接收机的性能,且本文提出的两步选择准则比已有算法能获得更高的选择增益。但本文研究的是采用均匀线阵的天线系统且假设波达方向角服从均匀分布,关于更复杂的信道模型中的天线选择算法还有待进一步研究。

#### 参考文献

- [1] D. Gore, R. Nabar, and A. Paulraj, "Selecting an optimal set of transmit antennas for a low rank matrix channel," [A]. *Proceeding of the 2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing* [C], Istanbul, Turkey, pp. 2785-2788, 2000.
- [2] R. W. Heath and A. Paulraj, "Antenna selection for spatial multiplexing systems based on minimum error rate" [A]. *Proceeding of the 2001 IEEE International Conference on Communications* [C], Helsinki, Finland, pp. 2276-2280, 2001.
- [3] R. S. Blum and J. H. Winters, "On optimum MIMO with antenna selection" [J]. *IEEE Communication Letters*, vol. 6, pp. 322-324, Aug, 2002.
- [4] R. W. Heath, J. S. Sandhu, A. Paulraj, "Antenna selection for spatial multiplexing systems with linear receivers" [J]. *IEEE Communication Letters*, vol. 5, pp. 142-144, May, 2001.
- [5] R. W. Heath, and D. J. Love, "Multi-mode antenna selection for spatial multiplexing systems with linear receivers" [J]. *IEEE Transaction on Signal Processing*, vol. 53, pp. 3042-3056, Aug, 2005.
- [6] X. L. Feng, S. H. Zhu, and P. Y. Ren, "Transmit antenna selection in the V-BLAST system" [J]. *Journal of electronics (China)*, vol. 24, pp. 510-514, Aug, 2006.
- [7] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications* [M]. New York, NY: Wiley, 1974.
- [8] C. Dimitry, R. F. Farrokh, L. Jonathan, et al. "Effect of antenna separation on the capacity of BLAST in correlated channels" [J]. *IEEE Communication Letters*, vol. 4, pp. 337-339, Nov, 2000.
- [9] A. Moustakas, H. Baranger, L. Balents, et al. "Communication through a diffusive medium: Coherence and Capacity" [J]. *Science*, vol. 6, pp. 2000, 287(1):287-290.
- [10] 冯兴乐 朱世华 武林俊. 基于自适应调制的改进型V-BLAST检测算法研究 [J]. 电子与信息学报, vol. 27, pp. 192-196, Feb, 2005.
- [11] 冯兴乐. V-BLAST 系统中链路自适应与检测算法研究 [D]. 西安: 西安交通大学博士学位论文, 2006.
- [12] J. Cioffi, Digital transmission [EB/OL]. Internet draft, <http://www.stanford.edu/class/ee379a/>, September 2006.
- [13] T. S. Chu, L. J. Greenstein, "A semiempirical representation of antenna diversity gain at cellular and PCS base stations" [J]. *IEEE Transaction on Communications*, vol. 45, pp. 644-646, June, 1997.
- [14] S. B. Rhee, G. I. Zysmna, "Result of suburban base station diversity measurements in the UHF band" [J]. *IEEE Transaction on Communications*, vol. 22, pp. 1630-1636, Oct. 1974.

#### 作者简介

冯兴乐(1971-),男,博士,讲师。研究方向:无线通信系统的信号处理。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>

---



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>