

新的 V-BLAST 系统次优天线选择

张晓格 徐澄圻

(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

摘要: 该文提出新的基于 ZF SIC 检测的 V-BLAST 系统次优天线选择准则: 最小化信道矩阵伪逆的最大行范数。基于贪婪选择思想, 发射天线选择采用使得该范数增加最小的递增选择策略, 接收天线选择采用使得该范数减少最大的递减选择策略。仿真表明所提出的新准则明显优于已有的最大第 1 检测层后处理信噪比准则, 且相应的快速选择算法可以获得最优的基于最大最小准则的全搜索选择的大部分分集增益, 而复杂度很低。

关键词: 无线通信; 天线选择; 贝尔实验室垂直分层空时; 干扰抵消; 贪婪算法

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)09-2183-05

New Sub-optimal Antenna Selection for V-BLAST Systems

Zhang Xiao-ge Xu Cheng-qi

(College of Communication and Information, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: A new antenna selection criterion for Vertical Bell Labs layered Space-Time (V-BLAST) systems based on Zero Forcing (ZF) Successive Interference Cancellation (SIC) detection, which is named minimizing the maximum row norm of the channel matrix, is proposed. Based on the greedy algorithm, incremental selection approach is used to minimize the increment of the norm step by step for transmit antenna selection, and decremental selection approach is used to maximize the decrement of the norm step by step for receive antenna selection. Simulations show the new criterion outperforms the existing so-called max-first layer criterion obviously, and the corresponding fast selection algorithm can obtain the most of the diversity benefit of the optimal exhaustive selection system based on the max-min criterion with a low complexity.

Key words: Wireless communication; Antenna selection; Vertical Bell Labs layered Space-Time (V-BLAST); Successive Interference Cancellation (SIC); Greedy algorithm

1 引言

研究表明, 瑞利衰落信道富散射环境下的 MIMO 系统在不增加带宽条件下, 可以显著提高通信系统的容量^[1]。贝尔实验室的 V-BLAST^[2,3] 就是这样一个值得关注的系统。对于该系统, 干扰抵消 (SIC)^[3] 检测兼顾性能和复杂度, 是当前研究的重点检测算法之一。从 SIC 的译码过程来看, 最先检测层的分集增益最低^[4], 越后的检测层分集增益越大。同时由于最先译出的符号要带入到后面检测层的译码之中, 所以 SIC 检测的性能很大程度上受到前若干检测层特别是第 1 层检测层的影响。为了提高系统性能, 前面若干检测层的分集增益应该增加。增加接收天线可以增加分集增益, 但这就要求使用与天线同样多的射频链路, 硬件成本较高。

解决办法之一是采用近来受到关注的天线选择技术。关于基于 SIC 检测的天线选择技术, 文献[5]提出了一种基于置换 QR 分解的 V-BLAST 发射天线

子集选择算法, 选择使最坏子流性能最优的天线子集; 文献[6]研究了 V-BLAST 接收天线选择, 结果表明采用最大最小后处理信噪比准则的接收天线选择可以获得使用全部接收天线时的分集增益; 文献[7]通过数学推导, 给出了 V-BLAST 发射天线选择可以获得的分集增益范围。文献[6,7]提出了两种选择准则: 最优的最大最小后处理信噪比和次优的最大第 1 检测层后处理信噪比。前者性能很好, 但复杂度也很高, 后者虽然复杂度较低, 但由于仅仅提高了第 1 检测层的分集, 性能受到很大限制^[7]。

考虑采用 ZF SIC 检测的 V-BLAST 系统, 本文提出一种新的次优天线选择准则, 即最小化信道矩阵伪逆的最大行范数。该准则考虑了所有检测层, 提高所有检测层的后处理信噪比下界, 因此性能优于最大第 1 检测层后处理信噪比准则。为避免全搜索选择, 基于贪婪选择思想^[8-12], 分别给出了发射天线和接收天线局部最优选择准则, 从而把全搜索选择问题简化为线性选择问题来处理。仿真表明基于该局部最优选择准则的快速发射和接收天线选择

算法可获得接近全搜索选择的性能,复杂度则随备选天线数量的增加而呈线性增加特性。

2 系统模型

考虑一个MIMO通信系统,发射射频链路为 L_s 组,接收射频链路为 L_r 组,系统模型为

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1)$$

$\mathbf{H} \in C^{L_r \times L_s}$ 是收发天线之间的信道矩阵,其元素假设为独立同分布的、均值为零和各维方差为0.5的复高斯随机变量,在一帧之内不变,各帧之间独立地变化。 $\mathbf{r} \in C^{L_r \times 1}$ 是接收信号。 $\mathbf{s} \in C^{L_s \times 1}$ 是发射信号,假定各发射符号具有单位能量。 $\mathbf{n} \in C^{L_r \times 1}$ 是均值为0,方差为 σ^2 的高斯白噪声。

对于ZF SIC检测,最优的检测顺序可如下确定^[3,13]:在第 i 检测阶段,被检测符号为

$$k_i = \arg \min_{j \in S_i} \|\mathbf{w}_{i,j}\| \quad (2)$$

其中 $S_i = \{1, 2, \dots, L_s\} - \{k_1, k_2, \dots, k_{i-1}\}$, $\mathbf{w}_{i,j}$ 表示第 i 检测阶段符号 s_j 的迫零矢量, S_i 表示第 i 检测阶段前还没有被检测的发射符号子集。不考虑错误传播,第 i 检测阶段的后处理信噪比可定义为^[3]

$$\rho_{k_i} = \frac{\langle |s_{k_i}|^2 \rangle}{\|\mathbf{w}_{i,k_i}\|^2 \sigma^2} \quad (3)$$

设发射端有 N_s 根备选天线,接收端有 N_r 根备选天线。用 $\Theta = \{c_1, c_2, \dots, c_u\}$ 表示 $u = C_{N_s}^{L_s}$ 种发射天线子集,或表示 $u = C_{N_r}^{L_r}$ 种接收天线子集。最大最小后处理信噪比选择准则^[6,7](简称最大最小准则)可如下表示:

$$c_{k_{\text{opt}}} = \arg \min_{c_k \in \Theta} \left(\max_{i=1, \dots, L_s} \left(\min_{j \in S_i} \|\mathbf{w}_{i,j}\| \right) \right) \quad (4)$$

次优的最大第1检测层后处理信噪比选择准则^[6,7](简称最大第1准则)可如下表示¹⁾:

$$c_{k_{\text{opt}}} = \arg \min_{c_k \in \Theta} \left(\min_{j \in S_1} \|\mathbf{w}_{1,j}\| \right) \quad (5)$$

3 新的次优选择准则

文献[3,13]提出了一个很有用的结论,即如果 s_j 同时属于 S_i 和 S_{i+1} ,则存在^[13]

$$\|\mathbf{w}_{i,j}\| \geq \|\mathbf{w}_{i+1,j}\| \quad (6)$$

由该结论可知,信道矩阵伪逆的最大行范数(即 $\max_{j \in S_1} \|\mathbf{w}_{1,j}\|$)是所有检测层迫零矢量范数的上界。如果能够有效降低 $\max_{j \in S_1} \|\mathbf{w}_{1,j}\|$ 的值,则所有检测层后处

理信噪比的下界将得到提高,从而间接地提高了各层后处理信噪比。若把 $\max_{j \in S_1} \|\mathbf{w}_{1,j}\|$ 作为衡量系统性能的近似尺度,则可提出一种新的次优的天线选择准则(简称最小最大行范数准则)为

$$c_{k_{\text{opt}}} = \arg \min_{c_k \in \Theta} \left(\max_{j \in S_1} \|\mathbf{w}_{1,j}\| \right) \quad (7)$$

4 天线选择

基于最小最大行范数准则的全搜索选择复杂度较高。贪婪选择被认为是有效的快速选择算法,其本质是采用局部最优选择代替全局最优选择,该选择思想得到了广泛关注^[8-12]。实现贪婪选择的关键是寻找局部最优选择准则。

4.1 发射天线选择

具有 m 根发射天线的原V-BLAST系统,在增加第 $m+1$ 根发射天线(设该天线发射的符号为 s_{m+1})后得到新的系统。由式(6)可知,新系统信道矩阵伪逆的最大行范数大于或等于原系统信道矩阵伪逆的最大行范数,即

$$\max_{j \in \{1, \dots, m, m+1\}} \|\mathbf{w}_{1,j}^{\text{new}}\| = \max_{j \in \{1, \dots, m\}} \|\mathbf{w}_{1,j}^{\text{old}}\| + \Delta, \Delta \geq 0 \quad (8)$$

注意到,式(8)类似于文献[8]中的等式(9)和文献[9]中的等式(3),因此可以采用类似的快速选择算法。由于式(8)的成立建立在系统存在分集的基础之上,即接收天线数量不低于发射天线数量,因此宜采用文献[8]中的递增选择算法,而不采用文献[9]中的递减选择算法^[10]。

在剩余的备选发射天线中,每次选择的1根发射天线应该使得新系统信道伪逆的最大行范数增加最少。设初始状态 $m=1$,则第 m 次选择时的局部最优选择准则为

$$k(m) = \arg \min_{\Omega_s} \Delta \quad (9)$$

其中, Ω_s 表示剩余的备选发射天线集,初始状态 $\Omega_s = \{1, 2, \dots, N_s\}$, $k(m)$ 表示第 m 次选择选中的发射天线序号。

计算迫零矢量范数通常需要已知该迫零矢量,而计算迫零矢量需要进行复杂度高的伪逆运算^[3]。本文采用相对简单的方法计算该范数。对于信道矩阵 \mathbf{H} , $(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}$ 的各对角项就是 \mathbf{H}^+ 各行范数的平方值^[6],因此可以通过计算 $(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}$ 的对角项的开方得到迫零矢量范数。由于采用递增选择方式,利用矩阵分块求逆公式^[14]还可以巡回计算对角项。具体算法可如下描述:

第1步 $\Omega_s = \{1, 2, \dots, N_s\}$ 。

第2步 (a) $m = 1$ 。

(b) 根据 $\mathbf{h}_{k(m)} = \arg \min_{i \in \Omega_s} (\mathbf{h}_i^H \mathbf{h}_i)^{-1}$ 选择第一根发

¹⁾文献[6]中的关于最大第1准则的文字表达有误,应该是最小化信道矩阵伪逆的最小行范数,其等式(8)中的 \max 应改为 \min 。

射天线, 其中 \mathbf{h}_i 表示 i 号发射天线对应的信道列向量。

(c) 计算 $(\mathbf{H}_m^H \mathbf{H}_m)^{-1}$, 其中 $\mathbf{H}_m = \mathbf{h}_{k(m)}$ 。

(d) 在 Ω_s 中去除选择的发射天线 $k(m)$ 。

第3步 (a) $m = m + 1$ 。

(b) 对所有 $i \in \Omega_s$, 利用矩阵分块求逆公式计算信道矩阵 $[\mathbf{H}_{m-1} \ \mathbf{h}_i]$ 的伪逆的最大行范数 $\text{MaxNorm}(i)$, 即 $([\mathbf{H}_{m-1} \ \mathbf{h}_i]^H [\mathbf{H}_{m-1} \ \mathbf{h}_i])^{-1} = \begin{bmatrix} (\mathbf{H}_{m-1}^H \mathbf{H}_{m-1})^{-1} + \mathbf{B} \mathbf{B}^H s & \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^H & s^{-1} \end{bmatrix}$ 。其中, $s = \mathbf{h}_i^H \mathbf{h}_i -$

$\mathbf{h}_i^H \mathbf{H}_{m-1} (\mathbf{H}_{m-1}^H \mathbf{H}_{m-1})^{-1} \mathbf{H}_{m-1}^H \mathbf{h}_i$, $\mathbf{B} = -(\mathbf{H}_{m-1}^H \mathbf{H}_{m-1})^{-1} \mathbf{H}_{m-1}^H \mathbf{h}_i / s$, 且 $\text{MaxNorm}(i)$ 就是 $([\mathbf{H}_{m-1} \ \mathbf{h}_i]^H [\mathbf{H}_{m-1} \ \mathbf{h}_i])^{-1}$ 最大对角项的开方值。

(c) 根据 $\mathbf{h}_{k(m)} = \arg \min_{i \in \Omega_s} \text{MaxNorm}(i)$ 选择第 m

根发射天线。

(d) 在已知 $(\mathbf{H}_{m-1}^H \mathbf{H}_{m-1})^{-1}$ 的基础上利用矩阵分块求逆公式计算 $(\mathbf{H}_m^H \mathbf{H}_m)^{-1}$, 其中 $\mathbf{H}_m = [\mathbf{H}_{m-1} \ \mathbf{h}_{k(m)}]$ 。

(e) 在 Ω_s 中去除选择的发射天线 $k(m)$ 。

第4步 重复第3步, 直到 $m = L_s$ 。

第5步 输出选择的发射天线子集。

4.2 接收天线选择

类似地, 具有 n 根接收天线的原 V-BLAST 系统, 在减少 1 根接收天线后得到新的系统, 则(推导略)

$$\|\mathbf{w}_{1,j}^{\text{new}}\| \geq \|\mathbf{w}_{1,j}^{\text{old}}\| \quad (10)$$

亦即

$$\max_{j \in S_1} \|\mathbf{w}_{1,j}^{\text{new}}\| = \max_{j \in S_1} \|\mathbf{w}_{1,j}^{\text{old}}\| + \Delta, \Delta \geq 0 \quad (11)$$

因此与发射天线选择相似, 快速接收天线选择可采用文献[9]中的递减选择算法。

5 性能和选择时间仿真

采用 Monte Carlo 方法来评价算法的性能, 包括基于最大最小准则的全搜索法, 基于最大第 1 准则的全搜索法, 基于最小最大行范数准则的全搜索法, 基于最小最大行范数准则的快速选择以及没有天线选择。QPSK 调制, 每帧 128 个符号, 超过 50000 个信道实现。以给定符号信噪比下的 SER (Symbol Error Ratio) 作为性能评价标准。为了直观地比较各种选择的复杂度, 进一步仿真了各种算法 1 次选择所需时间, 采用 AMD Athlon64 3000+ CPU, 双通道 1 Gb 内存的计算机, 软件为 Matlab7。所有仿真的发射射频链路为 4 组, 接收射频链路也为 4 组。

图 1 给出了 $N_s = 5$ 和 $N_s = 6$ 时的各种发射天线选择的性能比较。基于最大最小准则的全搜索法性

能最好, 基于最小最大行范数准则的全搜索法性能最接近基于最大最小准则的全搜索法, 明显优于基于最大第 1 准则的全搜索法。由于基于最大第 1 准则, 第 1 检测层的分集增益往往较大, 而其它层并没有明显获得天线选择带来的分集增益, 天线选择后的系统整体分集增益主要由最差的第 2 检测层决定^[7], 所以基于最大第 1 准则的全搜索法在性能上并不随着备选天线的增加而明显增加, 故 $N_s = 6$ 比 $N_s = 5$ 时的性能并没有明显增加, 它们的分集增益几乎一样 (高信噪比时 SER 曲线斜度几乎一样)。而基于最小最大行范数准则的全搜索法随着备选天线的增加而明显增加, $N_s = 6$ 时的性能比 $N_s = 5$ 时的性能增加很多, 这是因为该准则考虑了所有检测层, 保证了所有检测层具有较高的后处理信噪比。与基于最小最大行范数准则的全搜索法相比, 基于最小最大行范数准则的快速选择在性能上损失很有限, 基本上可以获得全搜索法的大部分分集增益。与基于最大最小准则的全搜索法相比, 快速选择的性能有一定损失, 因为最小最大行范数准则不能保证最小后处理信噪比最大, 而最小后处理信噪比主导系统的整体性能。

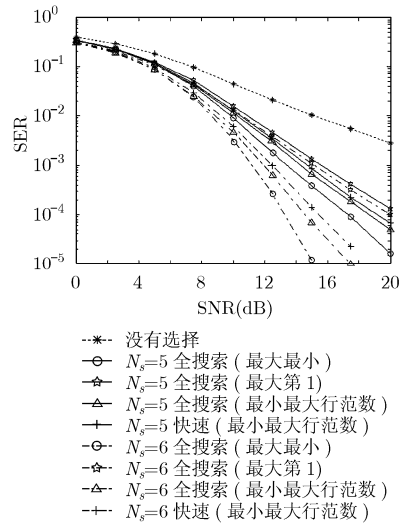


图1 发射天线选择算法性能比较

图 2 给出了 $N_r = 5$ 和 $N_r = 6$ 时的各种接收天线选择的性能比较。从仿真结果看, 和发射天线选择基本类似, 基于最大最小准则的全搜索法性能最好, 它的 SER 曲线和采用全部接收天线时的 SER 曲线斜度基本一致, 所以它获得的分集增益与采用全部接收天线时的系统分集增益几乎一样。基于最小最大行范数准则的全搜索法性能最接近基于最大最小准则的全搜索法, 明显优于基于最大第 1 准则的全搜索法。基于最小最大行范数准则的快速选择和基于最

小最大行范数准则的全搜索法的性能差距几乎可以忽略。类似于发射天线选择,基于最大第1准则的全搜索选择也只是提高了第1检测层的分集增益,性能仅优于没有天线选择。当 $N_r = 5$ 时,基于最大第1准则的全搜索选择可近似获得分集增益2(第1检测层分集为2,系统整体分集由分集最差的第2检测层主导),所以基于最大第1准则的全搜索选择的SER曲线和采用全部5根接收天线时(分集增益约为 $5-4+1=2$)的SER曲线斜度基本一致。当 $N_r = 6$ 时,基于最大第1准则的全搜索选择的分集增益仍约为2,而全部采用6根接收天线的系统分集增益约为 $3(6-4+1=3)$,所以两者的SER曲线斜度不一致。

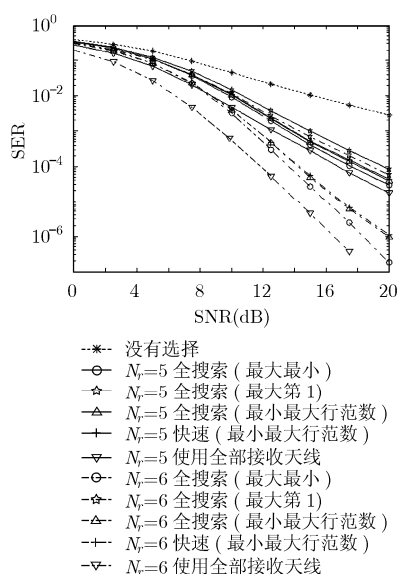


图2 接收天线选择算法性能比较

图3给出了各种发射天线选择以及接收天线选择算法在PC机上的实际选择时间。基于最大最小准则的全搜索法随着备选天线数量的增加,选择时间几何级数增长。基于最大第1准则的全搜索法和基于最小最大行范数准则的全搜索法的选择时间一样,由于也是全搜索法,所以选择时间随着备选天线数量的增加也明显增加,但由于每次选择搜索时范数计算的次数只有一次,所以复杂度还是明显低于基于最大最小准则的全搜索法。基于最小最大行范数准则的快速选择的选择时间非常低,复杂度曲线呈线性增加特性。备选天线数量较少时,快速选择并无明显优势,备选天线数量越多,其优势越明显。考虑到快速选择良好的性能,可以认为,在这些天线选择算法中,基于最小最大行范数准则的快速选择算法具有最佳的性能与复杂度折衷。

6 结论

本文首先分析了已有V-BLAST系统次优天线

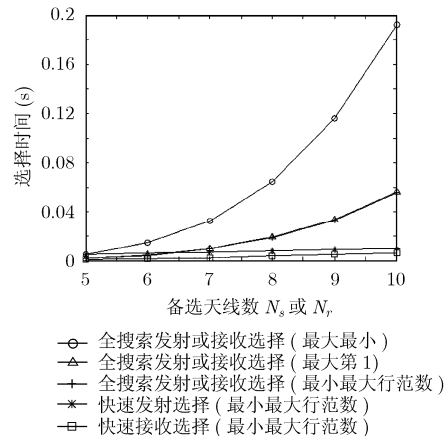


图3 天线选择算法的选择时间比较

选择准则的不足,提出了一种性能更好的次优天线选择准则:最小化信道矩阵伪逆的最大行范数。为了避免全搜索选择,进一步分别提出了基于该准则的发射和接收天线快速选择算法。通过仿真,比较了不同选择算法下的SER性能。结果表明,所提出的新准则明显优于原来的最大第1准则,且接近最优的最大最小准则,而基于新准则的快速选择算法在性能上接近基于新准则的全搜索法选择,也比较接近基于最大最小准则的全搜索法。同时,也仿真了不同选择算法所需要的时间。结果表明,基于新准则的快速选择算法随着备选天线数量的增加,其复杂度则呈线性增加特性,在备选天线数量较多时具有明显的低复杂度优势。

参考文献

- [1] Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *European Transactions on Telecommunications*, 2000, 10(6): 585-595.
- [2] Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. *Bell Labs Technical Journal*, 1996, 1(2): 41-59.
- [3] Wolniansky P W, Foschini G J, Golden G D, and Valenzuela R A. V-BLAST: An architecture for achieving very high data rates over the rich-scattering wireless channel. *URSI International Symposium on Signals, Systems, and Electronics*, Pisa, Italy, 1998: 295-300.
- [4] Choi Won-Joon, Negi Rohit, and Cioffi M. Combined ML and DFE decoding for the V-BLAST system. *IEEE International Conference on Communications*, Piscataway, USA, 2000: 1243-1248.
- [5] 李黎, 朱光喜, 肖啸, 刘建. 基于置换QR分解的V-BLAST天线子集选择. *通信学报*, 2006, 27(9): 21-33.
Li Li, Zhu Guang-xi, Xiao Xiao, and Liu Jian. Antenna subset selection for V-BLAST systems based on permutation and

- QR decomposition. *Journal on Communications*, 2006, 27(9): 21-33.
- [6] Lu Di and So K C. Performance based receive antenna selection algorithm for layered space-time system. Vehicular Technology Conference, Melbourne, Australia, 2006: 1645-1649.
- [7] Zhang Hong-yuan, Dai Huai-yu, Zhou Quan, and Hughes L. On the diversity order of spatial multiplexing systems with transmit antenna selection: A geometrical approach. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(12): 5297-5311.
- [8] Gharavi-Alkhansari M and Greshman A. Fast antenna subset selection in MIMO systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(2): 339-347.
- [9] Gorokhov A. Antenna selection algorithms for MEA transmission systems. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Orlando, Florida, USA, 2002: 2857-2860.
- [10] Lin Zhi-wei, Premkumar A B, and Madhukumar A S. Least squares-based receive antenna selection for MIMO spatial multiplexing systems with linear receivers. *IEEE Communications Letters*, 2006, 10(4): 254-256.
- [11] Lan Peng, Liu Ju, Gu Bo, and Zhang Wei. Receive antenna subset selection based on orthogonal components. *Journal of Electronics (China)*, 2007, 24(1): 119-121.
- [12] 郑武, 张海滨, 宋文涛, 刘兴钊. 接近最优的编码系统的发送天线子集选择算法. *电子与信息学报*, 2007, 29(9): 2173-2176.
- Zheng Wu, Zhang Hai-bin, Song Wen-tao, and Liu Xing-zhao. Near optimal transmit antenna subset selection algorithms for coded MIMO systems. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(9): 2173-2176.
- [13] Kim Young-Doo, Kim Inhyoung, Choi Jihoon, Ahn Jae-Young, and Lee Yong H. Adaptive modulation for MIMO systems with V-BLAST Detection. Vehicular Technology Conference, Jeju, Korea, 2003, 2: 1074-1078.
- [14] Meyer C D. Matrix analysis and applied linear algebra. Philadelphia: SIAM, 2000: 123-124.
- 张晓格: 男, 1975年生, 讲师, 博士, 研究方向为通信信号处理和MIMO技术.
- 徐澄圻: 男, 1943年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信息论与编码理论和通信信号处理.