

低复杂度的分组检测空时接收机

王中鹏^{**} 吴伟陵^{**}

^{*}(浙江科技学院计算机系 杭州 310012)

^{**}(北京邮电大学信息工程学院 北京 100876)

摘要: V-BLAST 接收机是提高无线通信系统传输数率的有效技术,但由于该算法存在大量的求伪逆、迫零和排序,算法的复杂度高,限制了它在实际中的应用;线性迫零(ZF)接收机和最小均方误差(MMSE)接收机复杂度低,但性能差。该文提出了一种分组检测空时接收机,组内采用串行干扰抵消接收,与 V-BLAST 接收机相比,降低了算法的复杂度。仿真结果表明:所提出的基于 MMSE 准则下的分组检测空时接收机的性能明显好于基于迫零准则的 V-BLAST 接收机。

关键词: 无线通信,多输入多输出,分层空时编码,V-BLAST

中图分类号: TN92, TN911.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)10-1616-04

The Low Complexity of Group Detecting Layered Space-Time Receiver

Wang Zhong-peng^{**} Wu Wei-ling^{**}

^{*}(Department of computer, Zhejiang university of science and technology, Hangzhou 310012, China)

^{**}(Information Engineering School, Beijing University of Post and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract V-BLAST receiver is effective technique in achieving high data rate in wireless communications. However, the complexity of V-BLAST is very high because much time must be consumed in performing linear nulling, successive interference canceling and sorting, and the application of V-BLAST is limited. The complexity of the ZF receiver and MMSE receiver is low, but performance is worse than V-BLAST. In this paper, a new layered space-time receiver is proposed using two stage successive interference canceling, and the complexity of new scheme is very low compared with the V-BLAST. The simulation results indicate that the performance of the proposed receiver based on MMSE is outperforms ZF V-BLAST receiver.

Key words Wireless communications, MIMO, Layered space-time codes, V-BLAST

1 引言

未来通信系统应该能够提供高质量、高速率、高可靠的多种业务服务。信息理论的研究结果表明:在存在丰富散射的无线信道,收发两端均采用多天线,加上合适的信号处理技术,系统的容量可以获得提高。为了获得这种潜在的容量增加, Foschini 等提出了分层空时码(BLAST)^[1], 1998 年 Wolniansky 等人提出了垂直-贝尔实验室分层空时码(V-BLAST)体系结构^[2], 随后 Golden 等人提出了 V-BLAST 检测算法^[3], 这种算法引入了多用户检测中的串行干扰抵消思想,但这种算法的主要缺点是:当发射天线数是 n_T 时,算法需对信道矩阵求伪逆,且进行排序,每次得到一个迫零向量,干扰抵消后得到新的信道矩阵,再重复以前的操作,一共进行 n_T 次。当发射天线数很大时,算法复杂度非常高,

限制了算法在实际中的应用。

本文首先介绍了主要几种分层空时信号算法及其优缺点,并基于 V-BLAST 干扰抵消算法,提出了低复杂度的两级串行干扰抵消空时接收接收机。每级只检测 $n_T/2$ 个数据流(从 n_T 个数据流中选信噪比最好的 $n_T/2$ 个数据流),并对性能进行了分析和仿真评估。最后是总结。

2 系统模型

考虑一基带 MIMO 系统,有 n_T 根发射天线和 n_R 根接收天线,发射信号通过平坦瑞利衰落信道。系统框图如图 1 所示。系统的输入输出关系为

$$\mathbf{r} = \sqrt{E_s/n_T} \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{w} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{s} = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_{n_T}]^T$ 是 $n_T \times 1$ 维的发射信号矢量;
 $\mathbf{r} = [r_1 \ r_2 \ \dots \ r_{n_R}]^T$ 是 $n_R \times 1$ 维的接收信号矢量;

2004-04-28 收到, 2005-01-06 改回
国家 863 计划 (2001AA123016) 和国家自然科学基金(60172051)资助课题

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n_T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n_R 1} & \cdots & h_{n_R n_T} \end{pmatrix} \quad (2)$$

h_{ij} 表示从第 j 根发射天线到第 i 根接收天线的信道传输系数, 信道 \mathbf{H} 中的系数是零均值, 每维方差为 0.5 的复高斯随机变量; $\mathbf{w} = [w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_{n_R}]^T$ 是接收噪声矢量, 满足 $\mathcal{E}\{\mathbf{w}\mathbf{w}^H\} = N_0 \mathbf{I}_{n_R}$, \mathcal{E} 是求均值, N_0 是噪声的功率谱密度, \mathbf{I}_{n_R} 表示单位阵; E_s 是平均发射符号能量。

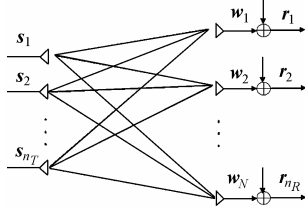


图 1 MIMO 系统框图

3 检测算法

分层空时检测算法可基于两个准则: 一是迫零(ZF)准则, 二是最小均方误差(MMSE)准则, 下面先介绍几种检测算法。

3.1 ZF 接收机

空时 ZF 接收机是最简单的一种空时信号处理接收机, 检测的信号为

$$\hat{\mathbf{s}} = \sqrt{n_T/E_s} (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{r} = \mathbf{s} + \sqrt{n_T/E_s} (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{w} \quad (3)$$

假设接收端完全已知信道 \mathbf{H} 。实际可以通过发射端发送导频序列来估计。 $\hat{\mathbf{s}}$ 是信号 \mathbf{s} 的估计值, 我们假定 $n_R \geq n_T$, 并且信道矩阵 \mathbf{H} 是列满秩的, 迫零接收机将信道矩阵去耦, 处理成 n_T 个并行的加性噪声标量信道。很显然, 接收机的噪声被放大了, 迫零降低了接收机的复杂度, 但接收机是次最优的, 系统的性能有所下降。ZF 接收机等效于把 MIMO 无线链路分解为 n_T 个并行数据流, 每个链路的分集增益和阵列增益都和 $n_R - n_T + 1$ 成正比。

3.2 MMSE 空时接收机

ZF 接收机完全抵消了不同天线间的干扰, 分离了不同的数据流, 但是以噪声的增加为代价的。而 MMSE 接收机以 MMSE 为准则, 它平衡了 MSI 和噪声增强, 使总的误差最小。因此, MMSE 接收机优于 ZF 接收机。在 MMSE 准则下, 有 $\mathbf{G}_{\text{MMSE}} = \arg \min_{\mathbf{G}} \mathcal{E}\{\|\mathbf{G}\mathbf{r} - \mathbf{s}\|_F^2\}$, \mathcal{E} 表示求均值。利用正交性原理, $\mathcal{E}\{(\mathbf{G}\mathbf{r} - \mathbf{s})\mathbf{r}^H\} = \mathbf{0}_{n_T, n_R}$, \mathbf{G}_{MMSE} 容易得到:

$$\mathbf{G}_{\text{MMSE}} = \sqrt{n_T/E_s} \left(\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{n_T}{\rho} \mathbf{I}_{n_T} \right)^{-1} \mathbf{H}^H, \text{ 其中 } \rho = E_s/N_0。检测的信号为$$

$$\hat{\mathbf{s}} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{n_T}{\rho} \mathbf{I}_{n_T})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{r} \quad (4)$$

3.3 ZF V-BLAST 接收机

在 ZF 准则和 MMSE 准则的基础上, 引入多用户检测技术的 V-BLAST 接收机以复杂度的增加提高了系统的性能, 分别称为 ZF V-BLAST 接收机和 MMSE V-BLAST 接收机。下面是基于 ZF 准则的 V-BLAST 算法:

假设接收端可以准确估计信道信息, 信号检测顺序为 k_1, k_2, \dots, k_{n_T} , 其中 k_1, k_2, \dots, k_{n_T} 是 $1, 2, \dots, n_T$ 的一个置换。

初始化 用 \mathbf{H}^+ 表示信道矩阵 \mathbf{H} 的伪逆, 令 $i=1$, $\mathbf{r} = \mathbf{r}_1$, $\mathbf{G}_1 = \mathbf{H}^+$, $\mathbf{H}^+ = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H$, $k_1 = \arg \min_j \|(\mathbf{G}_1)_j\|^2$, k_1, k_2, \dots, k_{n_T} 是符号的判决顺序。

递归 $\mathbf{w}_{k_i} = (\mathbf{G}_i)_{k_i}$, 用得到的加权向量 \mathbf{w}_{k_i} 对每个接收天线的信号进行加权处理得到第 k_i 个信号的估计量 $y_{k_i} = \mathbf{w}_{k_i}^T \mathbf{r}_i$, 然后判决 $\hat{s}_{k_i} = Q(y_{k_i})$, 再干扰抵消得到 $\mathbf{r}_{i+1} = \mathbf{r}_i - \hat{s}_{k_i} (\mathbf{H})_{k_i}$, 得到新的矩阵 $\mathbf{G}_{i+1} = \mathbf{H}_{k_i}^+$, $k_{i+1} = \arg \min_{j \in \{k_1, \dots, k_i\}} \|(\mathbf{G}_{i+1})_j\|^2$, $i \leftarrow i+1$, 再重复上述步骤。这样可判决出所有的信号, 其中 $\mathbf{H}_{k_i}^+$ 是将 \mathbf{H} 的 k_1, k_2, \dots, k_i 列置零后的伪逆阵。

3.4 基于并行干扰抵消的 V-BLAST 接收机

这种方法在文献[4]中有介绍。基于并行干扰抵消的 V-BLAST 接收机不能从检测排序中获得增益, 求出信道矩阵的伪逆 \mathbf{G} , 伪逆的维数是 $n_T \times n_R$, 在第 0 级, 同时检测出所有层的信号得

$$\hat{\mathbf{a}} = \mathbf{G}\mathbf{r} \quad (5)$$

$\hat{\mathbf{a}}$ 是从所有层检测出的信号矢量。我们称为这级为第 0 级。接下来再进行第 1 级干扰取消过程, 即去除其他 $n_T - 1$ 层的干扰, 接收信号经过第 1 级干扰取消后的信号为

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{r} - \sum_{j \neq k} \hat{a}_j (\mathbf{H})_j \quad (6)$$

其中 \mathbf{r}_k 是干扰取消所有(除第 k 层)层干扰后的信号矢量, $(\mathbf{H})_j$ 表示信道矩阵的第 j 列, \hat{a}_j 是被检测的第 j 层的符号, 即是估计信号矢量中的第 j 个符号。

在第 1 级时, 重新求出新的置零矩阵(即对删除第 k 列外的所有列后形成的矩阵求伪逆), 因此得到的置零矩阵实际是 $1 \times n_R$ 行矢量。得到的置零矩阵为 $\mathbf{G}_k = \mathbf{C}\mathbf{H}_k^+$, 其中 \mathbf{C} 是干扰抵消因子。用 \mathbf{G}_k 去乘 \mathbf{r}_k , 再判决, 则恢复了发射矢量 \mathbf{s} 的所有元素。可连续进行 N 次并行干扰抵消, 从而实现 N 级并行干扰抵消接收。

该算法的优点是不需要排序操作, 不需要多次对信道矩阵求伪逆, 但性能不如串行干扰抵消接收机。基于并行干扰抵消的 V-BLAST 接收机同样也有两种准则, 即基于迫零(ZF)

和最小均方误差(MMSE)准则,分别称为 MMSE-PIC 和 ZF-PIC 接收机。

3.5 提出的分组检测空时接收机方案

我们对串行V-BLAST接收算法作如下调整:接收机接收到信号为 $\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{w}$, 第一次求出信道矩阵的伪逆 \mathbf{G} , 对得到伪逆矩阵中的行向量按其范数从小到大进行排序, 按照行范数最小准则, 得到第一组要检测的 $n_r/2$ 个数据流, 在第一组检测时, 不再重新求伪逆, 组内采用串行干扰抵消, 并移去对应被检测的第 $i \in n_r$ 个数据流的信道矩阵 i 列。第一组检测后, 得到新的信道矩阵 \mathbf{H}_1 , 第二次求伪逆, 再重复第一组的检测操作。

V-BLAST算法修正后, 复杂度大大降低, 一共只求两次逆。当组内检测的数据流数为1时, 该算法退化为常规的V-BLAST算法, 组内检测的数据流的数目, 可根据接收机的性能要求确定。所提出的检测算法同样可基于MMSE准则和ZF准则, 将基于ZF准则的接收机称为ZF-group-V-BLAST, 将基于MMSE准则的接收机称为MMSE-group-V-BLAST。下面对所提出的分组检测算法进行仿真评估。

4 仿真结果和分析

4.1 仿真结果比较

考虑一平坦瑞利衰落信道下的MIMO系统, 采用QPSK调制, 发射天线数和接收天线数均为4, 对上述几种算法和所提出的方案进行仿真分析。考虑到并行干扰抵消接收机要求硬件比串行干扰抵消接收机复杂, 下面的仿真中, 并行干扰抵消接收机采用一级。图2是上述所有算法在MMSE准则下的误码率性能仿真结果。从图中可看出, 所提出的分组检测方案MMSE-group-V-BLAST明显好于MMSE接收机和MMSE-PIC接收机, 在误码率为 10^{-3} 数量时, MMSE-PIC接收机与MMSE接收机相比可获得2dB左右的增益, 而我们建议的方案可获得9dB左右的增益, 其中MMSE-V-BLAST接收机的性能最好, 优于MMSE-group-V-BLAST接收机2dB左右, MMSE接收机的性能最差, 复杂度最低。

图3是上述所有算法在ZF准则下的性能仿真结果。从仿真结果可看出, 在ZF准则下, ZF-V-BLAST接收机的性

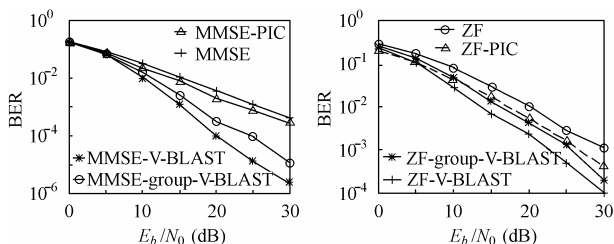


图2 BER-SNR 特性

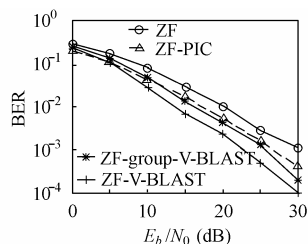


图3 BER-SNR 特性

能最好, 在误码率为 10^{-3} 数量级, 优于ZF-group-V-BLAST接收机3dB左右, 而ZF-group-V-BLAST优于ZF-PIC接收机1dB左右, ZF接收机的性能最差。

图4是MMSE-group-V-BLAST接收机与ZF-V-BLAST、MMSE-V-BLAST接收机的比较结果。从图中可看出, MMSE-group-V-BLAST接收机明显好于ZF-V-BLAST接收机, 在误码率为 10^{-3} 数量时, 与ZF-V-BLAST接收机相比可获得5dB左右的增益, 其中MMSE-V-BLAST接收机的性能最好, 优于MMSE-group-V-BLAST接收机2dB左右。

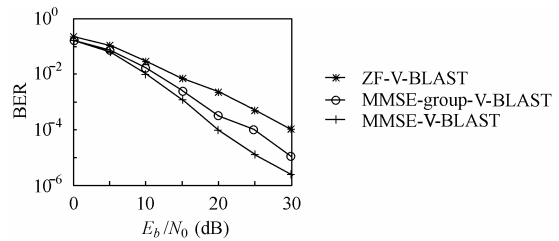


图4 BER-SNR 特性

4.2 算法复杂度比较

在复杂度上, 我们所建议的分组检测算法由于减少了求伪逆的次数, 与V-BLAST接收机相比明显降低, 以4发4收MIMO系统为例, 如将要检测的数据流分成两组, 求伪逆的次数由原来的4次降为2次, 因此也减小了接收机的运算处理时延, 但这是以一定的性能损失换取算法复杂度的降低的, 当组内要检测的数据流数目为1时, 分组检测接收机既退化为经典的V-BLAST接收机。ZF接收机和MMSE接收机的复杂度低, 但性能差。

本文提出的分组检测空时接收机在组内仍然采用串行干扰抵消方法, 在算法复杂度方面与ZF-PIC和MMSE-PIC相比没有优势, 但性能好于并行干扰抵消接收机。并行干扰抵消ZF-PIC和MMSE-PIC接收机引入了多用户的并行干扰抵消思想, 不需要排序, 不需要多次求伪逆操作, 因此算法复杂度低, 在处理给定数据流的符号时, 其它数据流的干扰是同时抵消的, 所有数据流的干扰抵消是并行处理的, 因此信号处理时延小; 缺点是冒着错误抵消其它数据流的干扰, 误码率性能不如串行干扰抵消接收机, 要达到串行干扰抵消V-BLAST接收机性能需要多级并行干扰抵消信号处理^[5], 要求硬件资源多, 而串行干扰抵消接收机是逐级干扰抵消的, 硬件资源少, 实现相对简单。

5 结束语

本文对几种常用的分层空时信号处理算法进行了分析和仿真评估, 针对V-BLAST算法复杂度高时延长的缺点,

提出了一种复杂度低的分组检测空时接收机, 减小了系统的时延。仿真结果表明: 所提出的 MMSE-group-V-BLAST 接收机的性能明显好于 ZF 准则下的 V-BLAST 接收机。在实际应用时可根据接收机的性能要求来选取组内的数据流数, 折中考虑接收机的复杂度和性能, 因此在 MIMO 系统中, 文中所提出的算法有很好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Foschin G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas[J]. *Bell labs Technical Jurnal*, 1966, 1(2): 41 – 59.
 - [2] Wolniansky P W, Foschini G J, Golden G D, *et al.*. V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel [J]. *IEEE ISSSE, USA, IEEE press*, 1998: 230 – 235.
 - [3] Golden G D, Foschini G J, *et al.*. Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture [J]. *Electronics Letter*, 1999, 35(1): 14 – 16.
 - [4] Sellathurai M, Haykin S. A simplified diagonal blast architecture with iterative parallel-interference cancellation receivers. *IEEE international conference on Communications, Helsinki, Finland, 2001, vol.10: 3067 – 3071.*
 - [5] 陶小峰, 俞追专, 秦海燕, 张平. V-BLAST 的并行译码. *电子学报*, 2003, 31(7): 990 – 993.
- 王中鹏: 男, 1966 年生 讲师, 研究方向为 MIMO 无线通信系统自适应均衡.
- 吴伟陵: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会信息论分会主任委员, 主要研究方向为信息论、信息处理、移动通信等.