

一种新的基于噪声预测的部分判决反馈 MIMO 接收算法

倪兴^① 王晓湘^① 杜娟^{①②}

^①(北京邮电大学信息工程学院 北京 100876)

^②(北京移动通信有限责任公司 北京 100053)

摘要: 传统垂直-贝尔实验室分层空时结构(V-BLAST)系统采用全排序判决反馈(ODF)算法,能提高线性接收机性能,但也增加系统复杂度。该文在分段检测理论基础上,提出一种改进的采用噪声预测技术的部分判决反馈(PDF)接收算法。它基于MMSE准则,将接收到信号分为两段,只进行一次判决反馈操作,与传统重复排序判决反馈算法相比,大大降低了接收机计算复杂度。仿真结果表明SUI-3信道中天线数为2发4收,误码率为 10^{-4} 量级的情况下,其性能与V-BLAST相比只下降了0.6 dB左右,但要明显好于线性接收机以及其他改进型MMSE算法,有2~3dB左右的增益。

关键词: 多输入多输出天线系统; 噪声预测; 部分判决反馈; MMSE; V-BLAST

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)01-0052-03

A Noise-Predictive Partial Decision-Feedback Detection for MIMO Systems

Ni Xing^① Wang Xiao-xiang^① Du Juan^{①②}

^①(School of Information Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

^②(Beijing Mobile Communication Co., Ltd., Beijing 100053, China)

Abstract: The traditional Vertical-Bell Laboratory layered Space-Time(V-BLAST) systems adopt an Ordered Decision-Feedback(ODF) detection strategy, which can significantly outperform the liner detector, however, it increases the computational complexity. Based on the conception of segmented detection, an improved noise-predictive Partial Decision-Feedback(PDF)detector is proposed, it introduces the MMSE principle and divides the receive signals into two segments. Since only feeding back the decision once, the MMSE-PDF detector reduces complexity significantly compared to the conventional ODF detector. The simulation results show that in the condition of SUI-3 channel model, 2 transmission antennas and 4 receive antennas, in the 10^{-4} level, compared with the complicated V-BLAST system, the novel receiver only suffers 0.6dB loss, however, it has more or less 2~3 dB performance gains compared with the linear and other improved receiver based on the MMSE principle.

Key words: MIMO; Noise-predictive; Partial decision-feedback; MMSE; V-BLAST

1 引言

无线链路收发两端都采用多天线的MIMO技术可以成倍地提高无线信道容量,在不增加带宽和天线发送功率的情况下,频谱利用率可以成倍地提高^[1],因此成为目前无线移动通信领域研究的热点方向。最大似然译码是MIMO系统的一种最优解决方案,但是其算法复杂度与发送天线个数成指数级增长,很难应用于实际之中。V-BLAST排序判决反馈(ODF)结构^[2],提高了接收机性能,但缺点是算法需要对信道矩阵 \mathbf{H} 求 n_t 次伪逆及排序,当天线数目 n_t 很大时,算法复杂度将非常高。线性接收算法只需要进行简单的矩阵-向量乘法,当直接估计而不是通过计算信道估计值来求得信道伪

逆矩阵时,其复杂度要低于最简单的ODF接收机^[2],但代价是牺牲接收机性能。

结合分段检测概念,本文给出了一种基于MMSE准则改进的采用噪声预测技术^[3]的部分判决反馈(MMSE-NP-PDF)接收算法,它将接收到的信号分为两段,只进行一次信道矩阵求逆和排序运算,与V-BLAST结构相比,大大降低了接收机计算复杂度。仿真证明这种方法具有很好的性能和低复杂度,在实际应用中是对二者的一种有效折中方式。

2 MIMO 系统模型

设定MIMO系统具有 n_t 个发送天线, n_r 个接收天线,采用空时编码的离散时间复基带线性系统模型,结构如图1示,每个符号周期系统接收向量 \mathbf{r} 可以表示为

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

其中 \mathbf{H} 表示 $n_r \times n_t$ 维的信道响应复系数矩阵; \mathbf{x} 表示 $n_t \times 1$ 维发送信号列向量; \mathbf{n} 表示 $n_r \times 1$ 维接收机噪声列向量,且

2006-06-02 收到,2006-10-26 改回

教育部留学回国人员启动基金,国家自然科学基金(60372099)和国家863项目(2006AA01Z258)资助课题

其分量都是均值为 0 的独立同分布高斯随机变量,实部与虚部相互独立,且具有相同的方差。

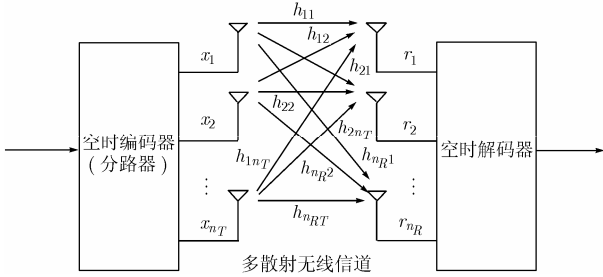


图1 MIMO 系统收发信号模型

3 传统接收算法介绍

3.1 线性接收机

线性接收过程如图 2 示,对接收信号向量 \mathbf{r} 进行变换,如下式:

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{r} = \mathbf{W}\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{W}\mathbf{n} \quad (2)$$

其中 \mathbf{W} 是系数加权矩阵,发送信号向量通过判决 $\hat{\mathbf{d}} = Q(\mathbf{y})$ 得到。

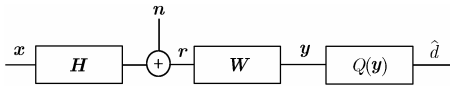


图2 线性接收机

对于迫零(ZF)算法, $\mathbf{W} = \mathbf{H}^\dagger$, 其中 $\mathbf{H}^\dagger = (\mathbf{H}^H\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^H$ 表示 \mathbf{H} 的 Moore-Penrose 广义逆, 假设 $n_r \geq n_t$ 且 \mathbf{H} 是列满秩阵, 则迫零接收机将信道矩阵去耦, 处理成 n_t 个并行加性噪声标量信道, 由于接收机增强噪声, 导致系统性能下降。对于最小均方误差算法, 以 MMSE 为准则平衡 MSI 和噪声增强, 使总误差最小, 其目标函数 $\arg \min_{\mathbf{W}} E[\|\mathbf{X}_t - \mathbf{W}\mathbf{r}_t\|^2]$ 为凸函数, 求其梯度得到系数矩阵最优解为

$$\mathbf{W} = (\mathbf{H}^H\mathbf{H} + \sigma^2\mathbf{I}_{n_r})^{-1}\mathbf{H}^H \quad (3)$$

3.2 V-BLAST 接收机

V-BLAST 接收机由排序, 干扰抑制, 干扰抵消 3 部分组成。首先对所有的分层信号排序, 找出信号最强的分层, 然后根据不同线性准则如 ZF, MMSE 进行干扰抑制和分层信号恢复, 亦即抑制其他信号对该层的干扰, 从而估计出此分层的信号, 最后从总的接收信号中抵消已检测出的分层信号, 如此连续迭代直至检测出全部分层信号, 具体算法参见文献[1]。

4 新的 MMSE-NP-PDF 接收机

噪声预测部分判决反馈接收算法(MMSE-NP-PDF)是在分段检测^[4]理论上扩展的。分段检测把接收信号分两组, 第1组利用ML准则检测, 将第1组信号于干扰抵消后, 再利用次最优准则检测另一组接收信号。MMSE-NP-PDF在这两部分都是利用线性检测, 规定第1组只有1个信号, 利用

MMSE准则将具有最小MSE的接收信号作为首先检测对象, 然后将其干扰抵消掉, 同时利用噪声预测^[3]的方法, 判决出其他接收信号。

首先, 根据式 (1), 式 (2) 有 $\mathbf{y} = \mathbf{x}' + \mathbf{n}'$, 其中 $\mathbf{y} = [\mathbf{y}_1 \ \mathbf{y}_2 \ \dots \ \mathbf{y}_{n_t}]^T$, $\mathbf{n}' = [\mathbf{n}'_1 \ \mathbf{n}'_2 \ \dots \ \mathbf{n}'_{n_t}]^T = \mathbf{W}\mathbf{n}$, 此时 \mathbf{n}' 已经不是白噪声, 其自相关矩阵为

$$\begin{aligned} E(\mathbf{n}'\mathbf{n}'^H) &= E[\mathbf{W}\mathbf{n}(\mathbf{W}\mathbf{n})^H] \\ &= E(\mathbf{n}\mathbf{n}^H)\mathbf{W}\mathbf{W}^H = \sigma_n^2\mathbf{W}\mathbf{W}^H \end{aligned} \quad (4)$$

将式(3)代入, 此时

$$\begin{aligned} E(\mathbf{n}'\mathbf{n}'^H) &= \sigma_n^2\mathbf{W}\mathbf{W}^H \\ &= \sigma_n^2(\mathbf{H}^H\mathbf{H} + \sigma^2\mathbf{I}_{n_r})^{-1}\mathbf{H}^H\mathbf{H}(\mathbf{H}^H\mathbf{H} + \sigma^2\mathbf{I}_{n_r})^{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

信道系数加权矩阵 \mathbf{W} 模值最小行所对应的符号为最先检测信号对象, 即 $i_1 = \arg \min_{j \in \{1, 2, \dots, n_t\}} \|\mathbf{w}_j\|^2$, 其中 \mathbf{w}_j 是 \mathbf{W} 第 j 行。有 $\hat{\mathbf{d}}_{i_1} = Q(\mathbf{y}_{i_1}) = Q[(\mathbf{W})_{i_1} \mathbf{r}]$, 然后通过判决出的 $\hat{\mathbf{d}}_{i_1}$ 得到对应噪声采样, 即

$$\mathbf{n}_{i_1} = \mathbf{y}_{i_1} - \hat{\mathbf{d}}_{i_1} \quad (6)$$

根据噪声采样相关性, 我们令 $q_v(\mathbf{y}_{i_1} - \hat{\mathbf{d}}_{i_1})$ 表示 \mathbf{n}_{i_1} 的预测值, 即

$$\mathbf{n}_{i_1} = q_v(\mathbf{y}_{i_1} - \hat{\mathbf{d}}_{i_1}) \quad (7)$$

其中 q_v 表示预测系数, $v > 1$ 。MMSE-NP-PDF 接收机在判决之前先从 \mathbf{y}_{i_1} 中减去预测噪声采样 \mathbf{n}_{i_1} , 即

$$\hat{\mathbf{d}}_{i_1} = Q\{\mathbf{y}_{i_1} - \mathbf{n}_{i_1}\} \quad (8)$$

将式(7)代入, 易得

$$\hat{\mathbf{d}}_{i_1} = Q\{\mathbf{y}_{i_1} - q_v(\mathbf{y}_{i_1} - \hat{\mathbf{d}}_{i_1})\} \quad (9)$$

第 i_1 个信号的噪声方差减小为

$$\begin{aligned} E[\|\mathbf{n}_{i_1} - q_v\mathbf{n}_{i_1}\|^2] &= E[\|\mathbf{w}_{i_1}\mathbf{n} - q_v\mathbf{w}_{i_1}\mathbf{n}\|^2] \\ &= \sigma_n^2\|\mathbf{w}_{i_1} - q_v\mathbf{w}_{i_1}\|^2 \end{aligned} \quad (10)$$

当 $q_v\mathbf{w}_{i_1}$ 是 \mathbf{w}_{i_1} 到 \mathbf{w}_{i_1} 扩展子空间投影时, 噪声方差具有最小值, 此时预测系数 q_v 为

$$q_v = \mathbf{w}_{i_1}^H\mathbf{w}_{i_1} / \|\mathbf{w}_{i_1}\|^2 \quad (11)$$

下面给出 MMSE-NP-PDF 具体算法流程及复杂度分析。

MMSE-NP-PDF 流程	复杂度
(B-1) $\mathbf{W} = (\mathbf{H}^H\mathbf{H} + \sigma^2\mathbf{I}_{n_r})^{-1}\mathbf{H}^H$	$O(n_t^3)$
(B-2) $i_1 = \arg \min_{j \in \{1, 2, \dots, n_t\}} \ \mathbf{w}_j\ ^2$	$(2n_r - 1)n_t$
(B-3) $\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{r}$	$(2n_r - 1)n_t$
(B-4) $\hat{\mathbf{d}}_{i_1} = Q(\mathbf{y}_{i_1})$	
(B-5) $\mathbf{n} = (\mathbf{y}_{i_1} - \hat{\mathbf{d}}_{i_1}) / \ \mathbf{w}_{i_1}\ ^2$	2
当 $v = 2, 3, \dots, n_t$	
(B-6) $q_v = \mathbf{w}_{i_1}^H\mathbf{w}_{i_1}$	$(2n_r - 1)(n_t - 1)$
(B-7) $\hat{\mathbf{d}}_{i_1} = Q\{\mathbf{y}_{i_1} - q_v\mathbf{n}\}$	$2n_t - 2$

假设系统接收端理想信道估计, 传统 V-BLAST 算法进

行干扰删除后需要重复对新系数阵 \mathbf{W} 求逆排序, 因而具有 $O(n_i^4)$ 复杂度; 本文提出 MMSE-NP-PDF 仅需在最初求得原始系数阵 \mathbf{W} , 随后运算复杂度与线性接收级别相同, 所以相比 V-BLAST 要简化很多。同时, 下面的仿真中还针对 MMSE 的一种改进方式, 即单次排序 MMSE 算法进行了比较。

5 仿真结果与分析

本文对 MMSE-NP-PDF 和其他传统算法进行了蒙特卡罗仿真和性能比较。假设接收端实现精确同步并进行理想信道估计, 采用准静态平坦衰落信道和环境比较恶劣的 SUI-3^[5] 信道两种模型。天线数分别为 4T4R 和 2T4R, 采用 QPSK 调制方式。把每信息 bit 能量固定为 1, 干扰噪声是均值为 0, 方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。

图3表明无论在上述哪种信道中新的 MMSE-NP-PDF 都明显好于线性接收算法而接近高复杂度的 V-BLAST 接收算法。图4给出在 SUI-3 信道中, 分别对应 2T4R 和 4T4R, MMSE-NP-PDF 与其他基于 MMSE 准则接收算法性能比较结果, 由于获得分集增益所以 2T4R 性能好于 4T4R。以 2T4R 为例, 在 10^{-4} 量级时, MMSE-NP-PDF 相比线性和单次排序算法有 2~3 dB 左右增益, 而且只比 MMSE-V-BLAST 算法牺牲了 0.6 dB 左右的性能, 但是在复杂度方面具有很大的优势。图5给出 MMSE-NP-PDF 与文献[6]中提到关于 ZF 相关算法的比较结果, 同样以 2T4R 为例, 在 10^{-4} 量级时 MMSE-NP-PDF 相比之下能够有 2dB 的增益, 性能得到提高的代价

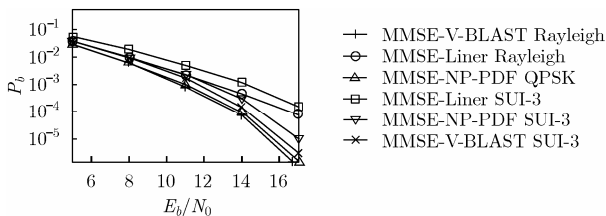


图3 不同信道条件下接收算法比较

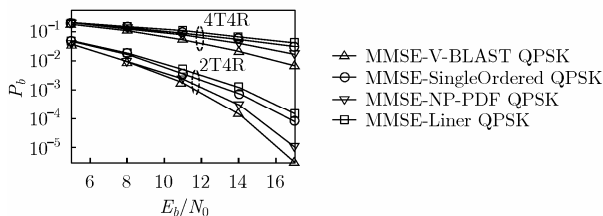


图4 SUI-3 中不同 MMSE 算法比较

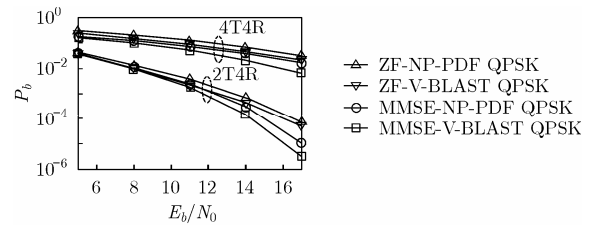


图5 SUI-3 中不同线性准则的 NP-PDF 和 V-BLAST 算法比较

是仅增加了有限的复杂度。综上可见 MMSE-NP-PDF 具有很好的接收性能, 同时又有效降低传统 V-BLAST 系统复杂度, 所以具有广泛实用价值。

参考文献

- [1] Foschini G J. Layered space-Time Architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas. *Bell Labs Tech. J.* 1996, 1(2): 41-59.
- [2] Foschini G J, Golden G, and Valenzuela R. Simplified processing for wireless communication at high spectral efficiency. *IEEE J. Select. Areas Comm.*, 1999, 17(11): 1841-1852.
- [3] Waters D W and Barry J R. Noise-predictive Decision-feedback detection for multiple-Input multiple-output channels. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2005, 53(5): 1852-1859.
- [4] Choi W J, Negi R, and Cioffi J M. Combined ML and DFE Decoding for the V-BLAST System. *IEEE International Conference on Communications[C]*, Piscataway, June 2000, Vol. 3: 1243-1248.
- [5] Erceg V, Hari K V S, and Smith M S, *et al.* Channel Models for Fixed Wireless Applications. *IEEE 802.16.3 Task Group Contributions 2001*, Feb 2001.
- [6] Waters D W and Barry J R. Partial decision-feedback detection for multiple-input multiple-output channels. *IEEE ICC 2004, Paris, France, June 2004*, Vol. 5: 20-24.

倪 兴: 男, 1980 年生, 硕士, 研究方向为 MIMO 空时二维信号处理技术。

王晓湘: 女, 1969 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信息与通信理论、下一代网络技术、移动定位。

杜 娟: 女, 1980 年生, 工程师, 研究方向为下一代移动通信关键技术。