

一种低复杂度近最佳的 MIMO 信号检测算法

刘金铸¹ 薛婷²

摘要

在多输入多输出(MIMO)系统的信号检测算法中,最大似然(ML)算法具有最佳检测性能,但因其复杂度随天线数及调制阶数的增加呈指数增加而不实用.排序干扰逐次消除的最小均方误差(MMSE-OSIC)算法具有很低的复杂度,但因迭代检测过程中的差错传播使得检测性能与最佳检测相比有很大差距.针对以上算法的缺点,提出了一种低复杂度近最佳的 MIMO 信号检测算法,该算法对 MMSE-OSIC 算法的检测顺序进行调整,首先通过比较信道逆矩阵行向量的范数确定最弱信号层,对该发射信号的所有可能值进行遍历搜索,在保证最弱信号层尽可能正确检测的前提下,对剩余信号层采用 MMSE-OSIC 算法检测.理论分析及仿真结果表明,该算法有效抑制了迭代检测过程中的差错传播,几乎达到了最佳检测性能,同时具有较低的复杂度,在检测性能与复杂度之间给出了很好的折衷.

关键词

多输入多输出;干扰逐次消除;最小均方误差;最大似然;检测顺序

中图分类号 TN911.7

文献标志码 A

收稿日期 2012-04-28

资助项目 江苏省工业支撑计划(BE2011195)

作者简介

刘金铸,男,博士,副教授,研究方向为宽带无线数字通信. jzliu21@163.com

1 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 南京,210044

2 南京信息工程大学 信息与控制学院,南京, 210044

0 引言

多输入多输出(MIMO)技术能够利用空间复用增益来提高信道容量,利用空间分集增益来提高信道可靠性,降低误码率.垂直分层空时码结构(VBLAST)是贝尔实验室提出的一种编译码都易于实现的典型 MIMO 结构.该结构将数据流进行串并变换和调制后由多副天线发射出去,接收端天线收到的是来自各发射天线发射信号的混叠,发射信号之间存在干扰,因此检测算法的设计是 MIMO 技术发展的关键环节.传统的信号检测算法中,最佳检测——ML 算法因其搜索路径的数目随着调制阶数和天线数的增加呈指数增加,这种遍历式搜索因其计算复杂度太高而在实际系统中难以实现.实际中常用的 2 种次最佳线性检测算法:迫零(ZF)算法和最小均方误差(MMSE)算法,结构简单并且易于实现,但检测性能与最大似然(ML)算法有很大的差距^[1].文献[2]提出了一种通过增加一个判决反馈结构,将 ML 和排序干扰逐次消除(OSIC)算法结合起来降低检测复杂度的算法,但差错传播依然存在.文献[3-4]提出了有效避免码间干扰和差错传播的方法,但检测性能与 ML 相比有较大差距.为了解决上述矛盾,本文结合 ML 遍历搜索的思想和 MMSE-OSIC 检测算法,同时调整 MMSE-OSIC 的迭代检测顺序,得到了一种低复杂度近最佳的检测算法,称之为改进的 MMSE-OSIC 算法.

1 MIMO 系统模型

假设 MIMO 系统有 M 副发射天线和 N 副接收天线($N \geq M$),信道为准静态平坦衰落信道.在此结构下,定义 t 时刻从发射天线 j 到接收天线 i 的信道响应为 $h_{ij}(t)$,则接收天线 i 的接收信号表达式为

$$r_i(t) = \sum_{j=1}^M h_{ij}(t) \cdot s_j(t) + n_i(t), \quad i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

其中 $s_j(t)$ ($j = 1, \dots, M$) 是 t 时刻的发射信号, $r_i(t)$ ($i = 1, \dots, N$) 是 t 时刻的接收信号, $h_{ij}(t)$ 是发射天线到接收天线之间的增益,彼此独立,服从均值为 0 方差为 1 的复高斯分布, $n_i(t)$ 是服从均值为 0, 方差为 σ^2 的加性复高斯白噪声.将式(1)写成矢量形式,即为 MIMO 系统的数学模型:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}, \quad (2)$$

其中 \mathbf{r} 、 \mathbf{s} 和 \mathbf{n} 分别是接收信号矢量、发射信号矢量和加性复高斯白噪

声矢量, \mathbf{H} 是 $N \times M$ 维的信道增益矩阵.

2 MIMO 检测算法

本文简要讨论 MIMO 系统的 ML 检测算法和 MMSE-OSIC 检测算法,然后在此基础上提出一种低复杂度近最佳的检测算法.

2.1 ML 检测算法

在最小差错概率意义下,对式(2)采用 ML 算法是最佳检测算法.若信号星座点有 L 个,那么 M 副发射天线上的信号矢量 \mathbf{s} 的所有可能的星座点组合有 L^M 种,这些星座点组合构成的集合即为 C ,那么 ML 算法表示为

$$\hat{\mathbf{s}} = \operatorname{argmin} \|\mathbf{r} - \mathbf{H}\mathbf{s}\|^2, \quad \mathbf{s} \in C, \quad (3)$$

式(3)中, $\|\cdot\|^2$ 表示 2 范数,随着调制阶数 L 增加和发射天线数目 M 增加,搜索路径 L^M 呈指数形式增加,计算复杂度很大.

2.2 MMSE-OSIC 检测算法

该算法是在 MMSE 检测的基础上加上非线性反馈,按照接收信号中不同发射天线的信号功率从强到弱进行递归抑制和消除干扰.算法描述如下.

初始化:

$$i = 1, \quad \mathbf{G} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \sigma^2 \mathbf{I}_M)^{-1} \mathbf{H}^H.$$

迭代过程:

$$k_i = \operatorname{argmin} \|(\mathbf{G}_i)_j\|^2,$$

$$\mathbf{y}_{k_i} = (\mathbf{G}_i)_{k_i} \mathbf{r}_i,$$

$$\hat{\mathbf{s}}_{k_i} = Q(\mathbf{y}_{k_i}),$$

$$\mathbf{r}_{i+1} = \mathbf{r}_i - \mathbf{H}_{k_i} \hat{\mathbf{s}}_{k_i},$$

$$\mathbf{G}_{i+1} = (\mathbf{H}_{k_i}^H \mathbf{H}_{k_i} + \sigma^2 \mathbf{I}_{N-i+1})^{-1} \mathbf{H}_{k_i}^H,$$

$$i = i + 1. \quad (4)$$

其中 $(\mathbf{G}_i)_j$ 表示矩阵 \mathbf{G}_i 的第 j 行, k_i 是首先被检测的信号层, $Q(\cdot)$ 表示根据发射信号的星座集合对检测信号进行量化判决, \mathbf{r}_i 表示第 i 次迭代时所用的接收信号,则 $\hat{\mathbf{s}}_{k_i}$ 是天线 k_i 的发射信号, \mathbf{H}_{k_i} 是矩阵 \mathbf{H} 的 k_i 列, \mathbf{H}_{k_i} 是将矩阵 \mathbf{H} 的 k_1 到 k_i 列都变成零向量后得到的.重复以上步骤,直到 $i = N + 1$ 时,所有信号被检测出来.

2.3 改进的 MMSE-OSIC 算法

ML 算法具有最佳的检测性能,但是其搜索路径数目太大导致复杂度过高,如果能够有效减少 ML 的搜索路径数,就可以在保证性能逼近 ML 检测性能的同时,降低 ML 算法的复杂度. MMSE-OSIC 算法是在消除其他天线干扰和放大噪声之间进行折衷处理的算法,其检测性能与 ML 相比有很大差距,但计

算复杂度低.为此,本文提出了将信号分成两部分进行检测的思路,结合两种算法的优点,得到改进的 MMSE-OSIC 算法.

所提算法的主要思想是:在 MMSE-OSIC 算法检测后的信噪比公式为

$$\rho_i = \frac{\sigma_s^2}{\|\mathbf{G}_i\|^2 \sigma_n^2} \sim \frac{1}{\|\mathbf{G}_i\|^2}. \quad (5)$$

式(5)中 σ_s^2 表示发射信号能量, σ_n^2 表示噪声能量,信噪比 ρ_i 只与 \mathbf{G}_i 的范数成反比,而系统性能主要由信噪比决定,传统的检测算法的排序准则是先检测信噪比最强的信号,从而减少该层信号对剩余信号层的干扰. MMSE-OSIC 算法公式由(4)可知是先检测信道逆矩阵行向量的范数 \mathbf{G}_i 最小的信号层(ρ_i 最大),将它从接受信号中删除.但考虑到 ρ_i 较小的信号出错的可能性更大,如果能够正确检测出最弱信号层,这样就能抑制差错传播,提高系统检测性能.因此改变 MMSE-OSIC 算法的检测顺序,选择优先检测 ρ_i 最小的信号层(最弱信号层),计算表达式为:

$$k_i = \operatorname{argmax} \|(\mathbf{G}_i)_j\|^2. \quad (6)$$

利用式(6)检测出最弱信号层后,遍历搜索最弱信号的可能值,在保证最弱信号层尽可能被正确检测出来的前提下,再依照排序串行干扰抵消的最小均方误差检测方法,对剩余信号层进行检测,这样可以提高系统性能,降低检测复杂度.从矩阵论的意义出发,正确检测出范数最大的一列,将其删除,这样信道矩阵 \mathbf{H} 各列之间的相关度就降低很多.这里需指出的是,如何确定哪一种取值是正确的检测信号值,是通过比较遍历搜索各种信号取值情况得到的误差度量值 ζ 来判断,计算式为

$$\zeta = \|\mathbf{r} - \mathbf{H}\mathbf{s}\|^2. \quad (7)$$

改进的 MMSE-OSIC 检测框如图 1 所示.

3 仿真结果及分析

3.1 仿真环境

使用 Matlab 仿真平台,仿真采用 4×4 MIMO 结构,发送端为 $[0, 1]$ 序列,信道为准静态瑞利平坦衰落信道,信道矩阵元素的实部和虚部是独立同分布的复高斯随机变量,添加高斯白噪声,且每个用户发射功率相等的状态信息.图 2 采用 BPSK 调制方式,图 3 采用 QPSK 调制方式,信噪比范围为 $0 \sim 20$ dB,每隔 4 dB 检测 1 次,帧长 $L = 200\ 000$.用 MMSE-OSIC、改进的 MMSE-OSIC 和 ML 算法进行检测译码,最后以 SNR(dB)为横坐标绘出的误比特率曲线.

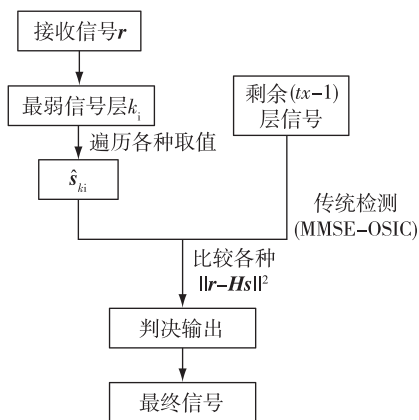


图1 改进的MMSE-OSIC检测框

Fig. 1 Block diagram of improved MMSE-OSIC algorithm

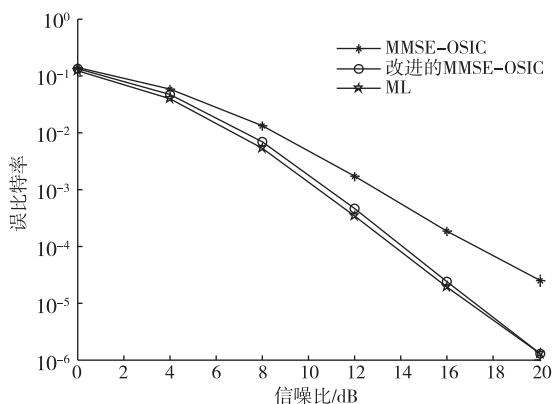


图2 MMSE-OSIC、改进的MMSE-OSIC和ML检测(BPSK调制)性能比较

Fig. 2 Performance comparison of MMSE-OSIC, improved MMSE-OSIC and ML detection (BPSK modulation)

3.2 仿真结果

3.3 仿真结果分析

图2为MMSE-OSIC、改进的MMSE-OSIC和ML检测(BPSK调制)性能比较,图3为MMSE-OSIC、改进的MMSE-OSIC和ML检测(QPSK调制)性能比较.仿真没有加入信道编码,根据新的排序方法得到的改进的MMSE-OSIC算法仿真结果与传统的MMSE-OSIC和ML算法对比如下.

在不同的调制方式下,就检测性能方面而言,改进的MMSE-OSIC算法与ML算法相比,二者基本吻合并且非常逼近最佳检测.改进的MMSE-OSIC检测性能明显优于MMSE-OSIC.由图2可见:在误码率为 10^{-6} 数量级时,改进的MMSE-OSIC算法和ML算法的信噪比大约都为20 dB,在误码率为 10^{-5} 级别时,改进的MMSE-OSIC算法比MMSE-OSIC算法的

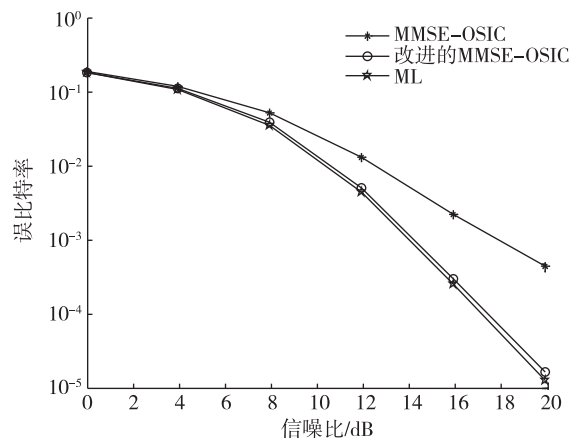


图3 MMSE-OSIC、改进的MMSE-OSIC和ML检测(QPSK调制)性能比较

Fig. 3 Performance comparison of MMSE-OSIC, improved MMSE-OSIC and ML detection (QPSK modulation)

信噪比提高了大约4 dB.由图3可见:在信噪比为20 dB时,ML和改进的MMSE-OSIC的误比特率大约都为 10^{-5} 数量级,而MMSE-OSIC的误比特率明显低于 10^{-4} 数量级.结合图2和图3可知:在其他仿真条件都相同的前提下,选择不同的调制方式得到的系统检测性能就不同.BPSK的误比特性能明显优于QPSK,调制阶数 L 值越大,误码率越高,这是因为调制阶数 L 越大,信号星座点之间的距离越近,信号发生差错的概率也越大,误比特率也就越高.

在计算复杂度方面,由于ML检测的搜索路径与调制阶数和发射天线数相关,且随着二者增加呈指数增加,所以计算复杂度通常会很大,图2采用BPSK调制方式,发射天线数目是4,则ML算法需要对16种组合进行遍历计算,而改进的MMSE-OSIC只是对其中一层信号的两种取值情况进行遍历,剩余信号层使用MMSE-OSIC算法检测.图3是采用QPSK调制,ML算法需要的搜索路径是256条,而改进的MMSE-OSIC只需对其中一层信号进行4种取值的遍历,剩余信号层采用MMSE-OSIC检测,这样可以达到以较低的复杂度换取系统性能明显改善的效果.

4 结束语

MIMO技术会在未来移动通信宽带无线移动和无线接入融合的系统中得到广泛研究和应用,本文在研究了MIMO系统中ML和MMSE-OSIC检测算法的基础上,提出了一种低复杂度近最佳的检测算法.仿真结果表明改进的MMSE-OSIC在相同误码率的情况下算法复杂度较低,在信噪比一定的情况下

误码率较低,并且算法的检测性能逼近最佳检测,符合系统实时性的要求.该算法特别适合调制阶数低,天线数目较多的场合.如何将多种技术有效结合起来进一步提高系统性能降低计算复杂度的检测算法将成为未来研究的重点.

参考文献

References

- [1] 方会妮,卢建军,战金龙. V-BLAST 系统检测算法比较 [J]. 西安邮电学院学报,2011,16(3):26-29
FANG Huini, LU Jianjun, ZHAN Jinlong. On detection algorithms for V-BLAST systems [J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2011, 16(3): 26-29
- [2] Choi W J, Nei R, Cioffi J M. Combined ML and DFE decoding for the V-BLAST system [C]//IEEE ICC, 2000: 1243-1248
- [3] 李小蓓,王杰令,张永顺.一种 V-BLAST 系统的高性能联合检测算法 [J]. 系统仿真学报,2009,21(5):1387-1389
LI Xiaobei, WANG Jiuling, ZHANG Yongshun. Joint detection algorithm for V-BLAST system with higher performance [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(5):1387-1389
- [4] Hung C Y, Chung W H. An improved MMSE-based MIMO detection using low-complexity constellation search [C]//IEEE Globecom Workshops, 2010:746-750
- [5] 刘丽,汪晋宽,闫冬梅,等.一种改进的 MIMO 系统串行干扰消除检测算法 [J]. 东北大学学报:自然科学版,2011,32(4):493-495
LIU Li, WANG Jinkuan, YAN Dongmei, et al. An improved SIC detection algorithm for MIMO systems [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2011, 32(4):493-495
- [6] Chen W B, Zhang X P, Li W. Reduced complexity ML detection algorithm for V-BLAST architectures [C]//Asia-Pacific Conference on Computational Intelligence and Industrial Applications, 2009:190-193
- [7] 赵飞,王炎.一种新的 QR-SIC-MSD 联合 MIMO 信号检测算法 [J]. 数据采集与处理,2010,25(4):500-504
ZHAO Fei, WANG Yan. New QR-SIC-MSD joint MIMO signal detection algorithm [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2010, 25(4):500-504
- [8] 张建忠,李宏伟,邓冬虎.一种改进的垂直分层空时码检测算法 [J]. 信息与控制,2011,40(5):583-587
ZHANG Jianzhong, LI Hongwei, DENG Donghu. An improved detection algorithm for vertical bell labs layered space-time coding [J]. Information and Control, 2011, 40(5):583-587

MIMO signal detection algorithm with low-complexity and near-optimal-performance

LIU Jinzhu¹ XUE Ting²

1 School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 School of Information and Control, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract In the signal detection algorithms for multiple input multiple output (MIMO) system, maximum likelihood (ML) detection offers the optimal performance while it encounters difficulties in practical system because of its computational complexity, which is increased exponentially with the number of antennas and modulation order. Minimum mean square error-ordered successive interference cancellation (MMSE-OSIC) algorithm has low complexity, but comparing with the optimal detection, its detection performance has a substantial margin due to error propagation in the progress of iterative detection. For dealing with the above algorithms' shortcoming, a new detection algorithm with low-complexity and near-optimal-performance is proposed. The algorithm makes readjustments of decoding order in MMSE-OSIC algorithm, which begins with the determination of the weakest emission signal layer by comparing the maximum norm of row vectors, then makes exhaustive search on this transmitted signal; on the premise of the correct detection of weakest signal as possible, MMSE-OSIC algorithm is used for the detection of the remaining signal layers. Theoretic analysis and simulation results show that the algorithm can effectively strain error propagation in the progress of iterative detection and nearly reach optimal performance at low computational complexity. An appropriate trade-off between detection performance and computation complexity is obtained by this improved algorithm.

Key words multi input mult output; successive interference cancellation; minimum mean square error; maximum likelihood; decoding order