

An Improving Algorithm for MIMO Detection*

Li Xiao^{1,2,3}, Yanjun Hu¹, Xiaoguang Ge^{2,3}

¹Key Laboratory of Intelligent Computing & Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei

²Shanghai Research Center for Wireless Communications, Shanghai

³Key Laboratory of Wireless Sensor Network & Communication, Shanghai Institute of
Microsystem and Information Technology, Shanghai

Email: xiaoli19870512@163.com

Received: Sep. 15th, 2011; revised: Oct. 2nd, 2011; accepted: Nov. 1st, 2011.

Abstract: The existing ML (Maximum Likelihood) detection algorithm is of high complexity, and the traditional detection algorithm doesn't have very excellent performance. According to this problem, we propose a new detection algorithm in this paper. The new detection algorithm combined with ZF-OSIC and ML detection algorithms, and to search by limiting the possible values for the transmitted signal within a certain range with ZF-OSIC (Force Zero-Ordered Successive Interference Cancellation), rather than traverse all possible values. The simulation results show that selecting the appropriate search range can make BER performance be most close to the ML performance while its complexity being reduced.

Keywords: ZF; MMSE; ZF-OSIC; ML

一种改进的 MIMO 检测算法*

肖莉^{1,2,3}, 胡艳军¹, 葛晓光^{2,3}

¹安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 合肥

²上海无线通信研究中心, 上海

³中国科学院无线传感网与通信重点实验室, 上海

Email: xiaoli19870512@163.com

收稿日期: 2011 年 9 月 15 日; 修回日期: 2011 年 10 月 2 日; 录用日期: 2011 年 11 月 1 日

摘要: 本文针对现有的 ML(Maximum Likelihood)检测算法复杂度高, 而传统检测算法性能不是很优的问题, 提出了一种新的检测算法。新的检测算法结合 ZF-OSIC 和 ML 检测算法, 根据 ZF-OSIC(Force Zero-Ordered Successive Interference Cancellation)把发射信号的可能值限制在一定的范围内进行搜索, 而不是对所有可能值的遍历。仿真结果表明, 选择合适的搜索范围可以使 BER 性能在最接近 ML 性能的同时复杂度也得到了降低。

关键词: 迫零检测; 最小均方误差检测; 排序的迫零检测算法; 最大似然检测算法

1. 引言

多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术通过在无线通信系统收发两侧同时配置多个天线, 能够在不增加带宽的情况下成倍提高系统的数据传输速率和传输质量, 是无线通信领域的一个重大突破, 已经吸引了人们广泛的研究兴趣。然而, 正是由于 MIMO 系统具有多个发射和接收天线, 才使

得天线之间的干扰相应的增大, 因此在接收端就需要一种良好的信号检测算法将发射信号最可能准确地检测出来, 检测出的信号是否准确也极大程度的影响了通信系统质量的好坏, 所以良好的信号检测算法是确保 MIMO 发挥其优越性的关键所在。

由文献[1-5]知, ZF-OSIC 检测的性能相对 ML 还有差距, 而文献[3,4]中 ML 检测算法复杂度又很大, 无法实际应用, 本文针对这种情况, 提出了一种新的检测算法。这种检测算法根据文献[6,7]中传统的排序

*基金支持: 国家重大专项(2009ZX03003-009), 本文得到国家自然科学基金目(601071168)和安徽大学“211 工程”学术创新团队基金资助。

迫零(ZF-OSIC)检测算法进行改进,通过 ZF-OSIC 对发射信号进行预估计,之后根据预估计值在星座点内的位置对发射信号的可能范围进行限制,然后在限制的范围内进行搜索,找到此时发射信号的可能值,实现了复杂度和性能之间的一个折中。

2. 系统的模型

本文采用的系统模型如图 1^[1]所示,设此 MIMO 发射系统有 N_t 个发射天线, N_r 个接收天线,数据流经编码调制后,分别从发射天线发射出去,在接收端,经过和发射端相反的过程,最后在 N_r 个接收天线接收。

则第 r 个接收天线接收到的信号^[8]为:

$$Y_r = \sum_{t=1}^{N_t} H_{rt} X_t + N_r \quad (1)$$

在公式(1)中, X_t 表示第 t 个发射天线发送的信号, N_r 表示第 r 个接收天线接收到的均值为 0, 方差为 σ^2 的加性高斯白噪声, $Y_r = [Y_1, Y_2, \dots, Y_{N_r}]^T$, $H_{r,t}$ 表示第 t 个发射天线到第 r 个接收天线的频响特性。

公式(1)可简写为:

$$Y = HX + N \quad (2)$$

公式(2)^[9-11]中, H 为 $N_r \times N_t$ 的 MIMO 信道的频响特性, $X = [X_1, X_2, \dots, X_{N_t}]^T$ 是 N_t 个天线的发射信号矩阵,通过一定的检测算法,对接收端接收到的信号进行检测,从而得到 N_t 个发射信号的估计值即恢复出发射的数据流。

3. 基于 ZF-OSIC 改进的检测算法

文献[3,4]中 ML 检测算法由于是根据 $\hat{X} = \underset{X \in \Phi}{\operatorname{argmin}} \{ \|Y - HX\|^2 \}$ 对发射信号在空间范围内所有可能值进行的搜索,所以使得系统性能最优的同时,系统的复杂度也最大,可以达到 M^{N_t} (M 表示每个发射天线上星座点的个数)。如果我们可以找到一种方法使

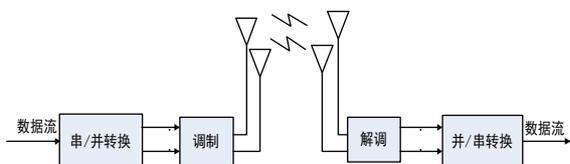


Figure 1. The MIMO system structure schematic drawing
图 1. MIMO 系统结构示意图

发射信号的范围限定在一定的范围内,而不是对每根天线内的所有星座点构成的空间维进行遍历,那么就可以降低算法的复杂度。于是,这里可以先通过一种方法对发射信号进行预估计,得到每根天线上发射信号的可能值,然后就可以以此估计值为基础,在其附近的一定范围内进行搜索,那么就可以降低算法复杂度的同时,性能也会较预采用的检测算法更优。文献[6,7]中 ZF-OSIC 检测算法相对于某一根发射天线上发送的子信息流,把其它天线上面的信号看作干扰,在接收端乘以一个迫零滤波器,把干扰从被检测信号中滤去,这种检测算法相对于传统的 ZF 和 MMSE 检测算法来讲性能较优,所以这里选择使用 ZF-OSIC 进行发射信号的预估计。具体介绍如下。

3.1. 发射信号的预估计

首先对发射信号进行预估计,这是整个算法的基础,如果发射信号估计的比较精确,那么在之后相同大小的范围内进行搜索时的结果就会更优,从文献[4]可知,传统的检测算法中 ZF-OSIC 检测算法性能较优,所以这里选用 ZF-OSIC 检测算法进行发射信号的预估计。

具体步骤如下:

(一) 根据公式(3)计算滤波矩阵 $G_{\text{新}}$ 的值,之后计算 $G_{\text{新}}$ 的二范数 $\|G_{\text{新}}\|^2$,找到使得 $\|G_{\text{新}}\|^2$ 取得最小值时滤波矩阵的行数

$$k_i (k_i = \arg \min_i \|G_{\text{新}}\|^2, i \in \{1, 2, \dots, N_t\})$$

$$G_{\text{新}} = (H^H H)^{-1} H^H \quad (3)$$

式中 H 为 $N_r \times N_t$ 的 MIMO 信道频响特性。

(二) 根据公式(4)和公式(5),检测出第一个发射信号。

$$\hat{X}_{k_i} = G_{\text{新}k_i} Y \quad (4)$$

$$X_{k_i} = Q(\cdot) \quad (5)$$

其中 $G_{\text{新}k_i}$ 表示 $G_{\text{新}}$ 的第 k_i 行行向量, X_{k_i} 表示第 k_i 根发射天线上的发射信号估计值。

(三) 假设上一步检测结果是正确的,那么在下一个信号进行检测时先把上一个信号的影响消除掉,产生一个新的系统,即公式(6)。

$$\hat{Y} = Y - H_{k_i} X_{k_i} = \hat{H} \hat{X} + N \quad (6)$$

式中的 H_{k_i} 表示信道矩阵 H 的第 k_i 列, 即第 k_i 根发射天线到所有接收天线的信道响应。 \hat{H} 表示 H 中去掉第 k_i 列后新的等效矩阵。 \hat{X} 表示 X 去掉第 k_i 根发射天线上信号后的等效发射信号, \hat{Y} 表示去掉第 k_i 层符号的等效接收信号, 这一步称为干扰消除。接着返回步骤(一), 重复进行检测, 直到所有的发射信号都被检测出来为止, 记为 $X_{\text{预}}$ 。

3.2. 发射信号限制在一定范围内的搜索

根据 $X_{\text{预}}$ 和每根天线上星座点的分布, 把每根天线上的范围限制在其估计值附近的一个半径为 R 的圆里, 而不是星座点上面的所有值。同样, 对于其它的发射天线也采用相同的方法, 那么, 就是在这样一个限制范围后的空间维内进行搜索, 而不是所有星座点构成的空间维遍历搜索, 所以, 复杂度相对于 ML 检测算法降低了。

具体步骤如下:

(一) 对每一根天线上的发射信号范围进行限定, 使得 $\hat{X}_{i\text{预}} \in \pi R^2, (i=1, 2, \dots, N_t)$, πR^2 为预估计值周围半径为 R 的圆, 这样所有发射天线上限制范围后的搜索值记为 $\Delta = \hat{X}_{1\text{预}}, \hat{X}_{2\text{预}} \dots \hat{X}_{N_t\text{预}}$ 。

(二) 在上面新得到的搜索范围 Δ 内, 根据公式(7) 进行搜索。

$$\hat{X}_{\text{值}} = \underset{\hat{X} \in \Delta}{\operatorname{argmin}} \left\{ \left\| Y - H\hat{X} \right\|^2 \right\} \quad (7)$$

4. 系统性能仿真及复杂度分析

4.1. 系统性能仿真

考虑一个天线配置为 2×2 的 MIMO 系统, 接收端分别采用 ZF、MMSE、ZF-OSIC、ML 和改进的检测算法, 这里采用 matlab 软件进行仿真, 源信号采用 QPSK 和 16QAM 两种不同的调制, 空间复用方式, 不添加任何信道编码, Rayleigh 衰落 MIMO 系统。

通过仿真验证比较, 结果如图 2 图 3。

从仿真结果可以看出, 对于同种调制方式来讲, 误码率 $ML \leq \text{改进的算法} < ZF\text{-OSIC} < MMSE < ZF$ 检测算法, ML 是最优的检测算法, ZF、MMSE 和 ZF-OSIC 的性能逐渐接近 ML 的性能曲线。对于改进的检测算法, 当采用 16QAM 调制的时候可以选择在半径为 $1.5 \cdot \sqrt{2/5}$ 的圆内进行搜索检测, 这样可使得

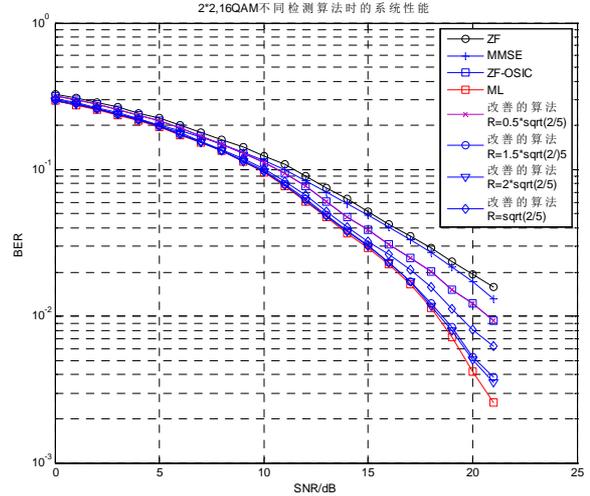


Figure 2. 2×2 16QAM performance simulation diagram under different detection algorithm
图 2. 2×2 16QAM 调制不同检测算法时的系统性能

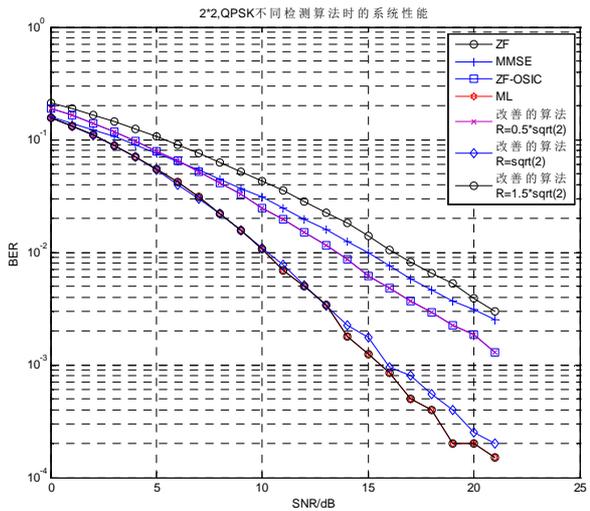


Figure 3. 2×2 QPSK performance simulation diagram under different detection algorithm
图 3. 2×2 QPSK 调制不同检测算法时的系统性能

系统性能接近 ML 的检测性能, 并且在 BER 为 10^{-2} 时, 改进的算法相对于 ZF-OSIC 算法有了约 4 dB 的提高。当采用 QPSK 调制的时候可以选择在半径为 $\sqrt{2}$ 的圆内进行搜索检测, 可使得系统的性能接近 ML 检测的性能, 并且在 BER 为 10^{-3} 时, 改进的算法相对于 ZF-OSIC 算法有了约 5 dB 的提高。所以选择合适的搜索圆, 可使得系统性能很接近 ML 检测算法。

4.2. 复杂度分析

对于采用 2×2 的 MIMO, QPSK 调制时, 圆半径

取 $R = 1.5 \cdot \sqrt{2}$ 时, 每根天线上平均包含 4 个星座点, 此时算法复杂度与 ML 算法复杂度一样, 性能同 ML 检测算法的性能; 对于 $R = \sqrt{2}$ 时, 每根天线上平均包含 3 个星座点, 算法复杂度为 $O(3^2)$, 性能和 ML 算法性能相近; 对于 $R = 0.5 \cdot \sqrt{2}$ 时, 每根天线上平均包含 1 个星座点, 算法复杂度为 $O(1^2)$ 性能同预检测算法 ZF-OSIC, 与 ML 复杂度对比如表 1。

对于采用 2*2 的 MIMO, 16QAM 调制时, 圆半径取 $R = 2 \cdot \sqrt{2/5}$ 时, 每根天线上平均包含 7.78 个星座点, 算法复杂度为 $O(7.78^2)$, 性能同 ML 检测算法的性能; 对于 $R = 1.5 \cdot \sqrt{2/5}$ 时, 每根天线上平均包含 5.78 个星座点, 算法复杂度为 $O(5.78^2)$, 性能和 ML 算法性能也很相近; 对于 $R = \sqrt{2/5}$ 时, 每根天线上平均包含 3.8 个星座点, 算法复杂度为 $O(3.8^2)$, 性能较预检测算法 ZF-OSIC 还是较优, 但不如 ML 检测算法; 对于 $R = 0.5 \cdot \sqrt{2/5}$ 时, 每根天线上平均包含 1 个星座点, 算法复杂度为 $O(1^2)$, 性能与预检测算法 ZF-OSIC 是一样的, 与 ML 复杂度对比如表 2。

从上面的仿真结果和复杂度分析可以看出, 对于 QPSK 调制的时候, 只要选择在估计值附近的 $\hat{X}_{i_{\text{预}}} \in \pi(\sqrt{2})^2, (i = 1, 2 \dots N_r)$ 的圆内, 就可以实现和 ML 检测算法一样的性能, 对于 2*2 的 MIMO 复杂度仅为原来的 $\frac{3^2}{4^2} = \frac{9}{16}$, 4*4 的 MIMO 复杂度仅为原来的 $\frac{3^4}{4^4} = \frac{81}{256}$, 实现了性能和复杂度之间的折中。对于 16QAM 调制的时候, 只要选择在估计值附近的 $\hat{X}_{i_{\text{预}}} \in \pi((1.5 \cdot \sqrt{2/5})^2), (i = 1, 2 \dots N_r)$ 的圆内, 就可以

Table 1. The complexity comparison of different circle radius when 2*2 QPSK

表 1. 2*2 QPSK 时, 不同圆半径时复杂度比较

圆半径	ML 复杂度	改进算法的复杂度
2 sqrt(2)	$O(16)$	$O(16)$
1.5*sqrt(2)	$O(16)$	$O(16)$
sqrt(2)	$O(16)$	$O(9)$
0.5*sqrt(2)	$O(16)$	$O(1)$

Table 2. The complexity comparison of different circle radius when 2*2 16QAM

表 2. 2*2 16QAM 时, 不同圆半径时复杂度比较

圆半径	ML 复杂度	改进算法的复杂度
2 sqrt(2/5)	$O(256)$	$O(60.5284)$
1.5*sqrt(2/5)	$O(256)$	$O(33.4084)$
sqrt(2/5)	$O(256)$	$O(14.44)$
0.5*sqrt(2/5)	$O(256)$	$O(1)$

实现和 ML 检测算法一样的性能, 对于 2*2 的 MIMO 复杂度仅为原来的 $\frac{5.78^2}{16^2} = \frac{33.4084}{256}$, 4*4 的 MIMO 复杂度仅为原来的 $\frac{5.78^4}{16^4} = \frac{924.67079056}{65536}$, 所以也实现了性能和复杂度之间的折中。

5. 结论

MIMO 技术以其容量大、频谱利用率高等优点受到很大的关注, 同时检测算法也成为业界关注的热点, 但是最优的检测算法 ML 复杂度很高, 无法大规模的应用到实际中。ZF、MMSE 这两种线性检测算法以及 ZF-OSIC 虽然复杂度不是很高, 但性能也不是很优, 本文提出了一种新的检测算法, 在 ZF-OSIC 的基础上进行改进, 使每根天线上的搜索范围限制在一定圆内进行搜索, 复杂度远小于 ML 检测算法。选择合适的圆半径性能逼近 ML 的性能, 实现了性能和复杂度的一个折中, 所以对以后 MIMO 的应用有一定的参考价值。

6. 致谢

写到这里, 论文也要结束了, 这篇论文能够完成首先要感谢我的导师胡艳军教授, 是胡老师申请的国家自然科学基金项目(601071168)和安徽大学“211 工程”学术创新团队基金的资助给论文的研究提供了条件, 谢谢胡老师对我论文问题的不懈解答, 您严谨的治学态度和渊博的知识永远是我学习的楷模。

同时, 我还要感谢我的实习单位上海无线通信研究中心, 在实习过程中有幸参与国家重大专项(2009ZX03003-009), 在这个过程中同学和朋友们也给了我很大的帮助, 使我逐渐的进步, 从而也让我对自己的专业有了更深的了解, 再次感谢你们。

参考文献 (References)

- [1] 沙福海. MIMO 系统的检测算法研究[D]. 南京理工大学, 2010.
- [2] 申雅峰. MIMO 检测算法的研究与实现[D]. 西安电子科技大学, 2010.
- [3] 王利永. MIMO 检测算法的研究与实现[D]. 西安电子科技大学, 2010.
- [4] 许鹏飞. TD-LTE 系统 MIMO 检测技术研究[D]. 西安电子科技大学, 2010.
- [5] Y. Jiang, M. K. Varanasi and J. Li. Performance analysis of ZF and MMSE equalizers for MIMO systems: An in-depth study of the high SNR regime. IEEE Information Theory Society, 2011, 57(4): 2008-2026.

- [6] G. D. Golden, C. J. Foschini and R. A. Valenzuela. Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture. *IEEE Institution of Engineering and Technology*, 2002, 35(1): 14-16.
- [7] S. B. Cai, Z. M. Duan and J. Gao. Comparison of different virtual MIMO detection schemes for 3GPP LTE. *IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, Beijing, 2009.
- [8] X. G. Zhang, C. Q. Xu. A New OSIC detection algorithm for V-BLAST systems. *IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, Shanghai, 2007.
- [9] M. A. Shah, B. Mennenga and G. Fettweis. Iterative soft-in soft-out sphere detection for 3 GPP LTE. *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, Taipei (Chinese), 2010.
- [10] P. Bhagawat, R. Dash and G. Choi. Dynamically reconfigurable soft output MIMO detector. *IEEE International Conference on Computer Design (ICCD)*, Lake Tahoe, 2008.
- [11] S. K. Mohammed, A. Chockalingam and B. S. Rajan. A low-complexity Near-ML performance achieving algorithm for large MIMO detection. *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Toronto, 2008.