

# 一种低复杂度的近似最大似然 MIMO 检测算法

陈雯柏<sup>1</sup>, 李 卫<sup>2</sup>, 张小频<sup>3</sup>

(1. 北京信息科技大学 自动化学院, 100192 北京; 2. 中国电子工程设计院, 100840 北京;  
3. 北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室, 100876 北京)

**摘 要:** 为保证无线传感器网络协作式 V-BLAST 传输中, 在较高的检测性能的前提下大大降低算法复杂度, 提出一种低复杂度的近似最大似然检测算法. 将传统的 V-BLAST 算法性能最好一层解的邻域作为候选判决集合, 并以此邻域内每一个符号作为初始值进一步采用传统的 V-BLAST 算法反馈判决其他层的符号, 采用最大似然准则对候选向量进行判断. 该方法有效减小了最大似然检测算法检测向量的数目, 降低了算法的复杂度. 仿真结果表明该算法具有良好的综合性能.

**关键词:** 最大似然检测; 排序连续干扰抵消; 垂直分层空时码; 多输入多输出; 无线传感器网络  
**中图分类号:** TN92      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2012)05-0140-04

## Complexity reduction ML detection algorithm for MIMO system

CHEN Wen-bai<sup>1</sup>, LI Wei<sup>2</sup>, ZHANG Xiao-pin<sup>3</sup>

(1. Automation School, Beijing Information Science and Technology University, 100192 Beijing, China;  
2. China Electronics Engineering Design Institute, 100840 Beijing, China; 3. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts & Telecommunications, 100876 Beijing, China)

**Abstract:** Aiming at reducing the computational complexity greatly and achieving high detection performance in cooperative MIMO-based WSN, a new complexity reduction ML detection algorithm is proposed. Using conventional V-BLAST algorithm, the best performance layer is found, and the neighborhood is considered to be candidate set. Regard the every symbol in the candidate set as initial value, we adopt V-BLAST algorithm again to detect the symbol of other layers. At last, we use the maximum likelihood criterion to judge the candidate vector. Because the number of constellation point in the maximum likelihood detection algorithm is reduced effectively, the complexity of the algorithm decrease greatly. The simulation results show that the proposed scheme obtains good comprehensive performance.

**Key words:** maximum likelihood detection; OSIC detection; V-BLAST; MIMO; Wireless Sensor Networks

多发送多接收天线 (MIMO) 技术被认为是下一代移动通信系统的关键技术之一, 它使得在不增加带宽的情况下能够成倍地提高通信系统的容量与频谱利用率成为现实<sup>[1-2]</sup>. 将 MIMO 技术引入无线传感器网络, 可利用其分集增益性能来克服信道衰落; 亦可利用其复用增益性能来提高信息速率. 这两方面均有利于提高传感器网络的能

效, 延长传感器网络的生命期<sup>[3-4]</sup>. J. N. Laneman 等<sup>[3]</sup>建立了协作式 MIMO 技术的端到端传输容量及能耗分析模型, Shuguang Cui<sup>[4]</sup>, Xiaohua Li<sup>[5-6]</sup>以及 S. K. Jayaweera<sup>[7]</sup>等则提出了无线传感器网络中基于 STBC、V-BLAST 空时处理的协作式 MIMO 传输方案, 这对于存在多径衰落的无线传感器网络监测应用中的节省能耗尤为有效.

贝尔实验室垂直结构分层空时码 (V-BLAST) 是一种重要的未编码分层空时码结构<sup>[8-9]</sup>. 基于 V-BLAST 的协作式 MIMO 传输, 发送端数据采集节点同时独立地向接收端发射各自感知信息, 汇聚节点根据自身天线接收到信号与辅助节点接收的信号, 选用合适的解码算法得到

收稿日期: 2011-01-20.

基金项目: 北京市属高校人才强教深化计划项目 (PHR201008434; PHR201106131; PHR201107218).

作者简介: 陈雯柏 (1975—), 男, 讲师, 博士;

张小频 (1955—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 陈雯柏, chenwb@bistu.edu.cn.

数据采集节点各自发射的信号. 研究设计高 BER 性能,低计算复杂度的信号检测算法对无线传感器网络的节能传输具有重要意义.

常用的 V-BLAST 译码检测算法主要有线性接收算法、排序干扰抵消算法<sup>[10]</sup>、QR 分解算法<sup>[11]</sup>与 MMSE 算法<sup>[12]</sup>等. 最大似然 (MLD) 检测是最优的 V-BLAST 译码算法,但具有指数复杂度. 利用好 ML 检测机制的优异性能,并且与其他检测方法如 QR、MMSE 等方法进行不同程度的结合,减小算法复杂度是 ML 实用化的一个重要方法. 文献[13-17]等沿这一思路进行了研究. 综合考虑检测性能和算法复杂度,本文提出一种新的低复杂度的 V-BLAST 最大似然检测算法.

1 MIMO 系统信道模型

如图 1 所示,点到点的 MIMO 系统信道模型,具有  $n_T$  根发送天线, $n_R$  根接收天线. 准静态衰落信道条件下, $t$  时刻接收机收到的信号向量可表示为

$$\mathbf{r}_t = \mathbf{H}\mathbf{x}_t + \mathbf{n}_t.$$

式中:  $\mathbf{r}_t$  表示  $n_R \times 1$  的接收信号向量;  $\mathbf{x}_t$  是  $n_T \times 1$  的发送信号矢量;  $\mathbf{H}$  是  $n_R \times n_T$  维信道响应矩阵,其第  $i, j$  分量  $h_{ij}$  代表第  $j$  发射天线至第  $i$  接收天线衰落特性,  $h_{ij}$  为均值为 0 方差为 1 复高斯随机变量;  $\mathbf{n}_t = [n_t^1, n_t^2, \dots, n_t^{n_R}]^T$  代表接收机输入噪声向量,其各个分量为独立高斯随机变量,均值为 0, 方差为  $\sigma_n^2$ . 为了便于计算,发射符号功率被归一化为 1,即  $E\{\mathbf{x}_t \mathbf{x}_t^H\} = \mathbf{I}_m$  和  $E\{\mathbf{n}_t \mathbf{n}_t^H\} = \sigma_n^2 \mathbf{I}_n$ .

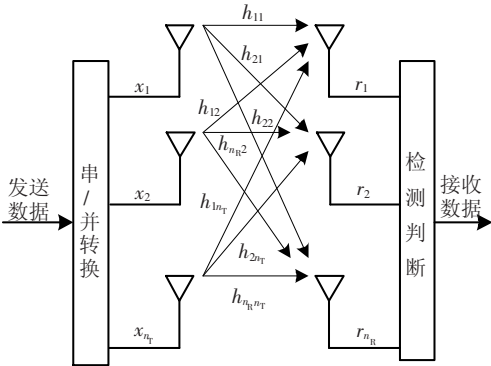


图 1 MIMO 系统模型

2 V-BLAST 的传统译码算法 OSIC

V-BLAST 的传统译码算法 OSIC 可以描述如下. 初始化:  $i = 1$ ,

$$\mathbf{G}_1 = \mathbf{H}^+.$$

迭代过程:

$$\mathbf{s}_i = \arg \min_{j \notin \{s_1, s_2, \dots, s_{i-1}\}} \|(\mathbf{G}_i)_j\|^2, \quad (1)$$

$$\mathbf{W}_{s_i} = (\mathbf{G}_i)_{s_i}, \quad \mathbf{y}_{s_i} = \mathbf{W}_{s_i}^T \mathbf{r}_i,$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{s_i} = Q(\mathbf{y}_{s_i}), \quad \mathbf{r}_{i+1} = \mathbf{r}_i - \hat{\mathbf{x}}_{s_i}(\mathbf{H})_{s_i},$$

$$\mathbf{G}_{i+1} = \mathbf{H}_{s_i}^+, \quad i = i + 1.$$

式中:  $\mathbf{H}^+$  表示  $\mathbf{H}$  的 Moore-Penrose 广义逆; 式(1)给出了干扰抵消的顺序,它根据每次迭代的广义逆矩阵接收列矢量信号能量来进行排序. 这种排序是一种本地最优化方法.  $\mathbf{H}_{s_i}^+$  表示令  $s_1, s_2, \dots, s_i$  列为 0 得到的矩阵的广义逆;  $(\mathbf{G}_i)_{s_i}$  表示矩阵  $\mathbf{G}_i$  的第  $i$  行;  $Q(\cdot)$  函数表示依据星座图对检测信号进行硬判决解调. MMSE 检测与干扰抵消组合可得到类似上述 OSIC-ZF 算法迭代结构,并取得相对更好性能效果.

3 低复杂度的近似 ML 检测算法

3.1 算法描述

最大似然检测算法的基本思想是将接收信号和所有可能的发射信号进行比较,根据最大似然原理估计发射信号. 若信号星座包含  $C$  个星座点,  $m$  个发射天线上的信号矢量  $\mathbf{x}$  的所有可能组合构成的集合记作  $C^m$ ,共包含  $C^m$  种可能组合. ML 检测可表示为

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}_j \in C^m} \|\mathbf{r} - \mathbf{H}\mathbf{x}_j\|^2.$$

当星座数目  $C$  比较大或者当发射天线数增加时,ML 算法的复杂度会极大提高. 减少最大似然算法复杂度的思路是减少判决集合中元素的数量. 对于  $C^m$  集合( $m$  为发射天线的数量) 其维数是  $m$ ,每维中的元素数为  $C$ .

本文提出的低复杂度的近似 ML 检测算法是只对一个发射天线中  $C$  个星座点中的若干来作为子集来进行最大似然判决. 首先利用 V-BLAST 的传统译码算法 OSIC 性能最好解的邻域作为候选判决集合,这个候选邻域集合如图 2 所示. 以该层候选邻域集合中的每一可能解为基础,采用 V-BLAST 算法来获得其他层的候选解,具体的实现方式在图 3 中描述.

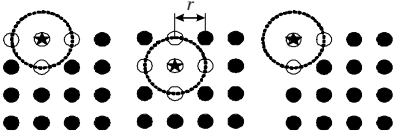


图 2 星座点子集

图 2 中有五星的星座点表示 V-BLAST 算法性能最好解. 虚线圆内所包含的星座点为性能最好解的一种邻域. 图中可以看出,某个最好解邻域的星座点的数目由两个因素决定:邻域圆的半径的大小以及这个最好解在星座图中的位置. 当最好解在星座图的角上时,其邻域只包含两个星座点;当最好解位于非 4 个角上的边时,其邻域上共有 3 个星座点;当最好解位于内部时共有 4 个星座点.

对于图 1 所示的 MIMO 系统,提出算法的实现方式如图 3 所示. 图中第一个框图中的  $x_k^1, x_k^2, \dots, x_k^W$  为一个维度上的最大似然候选判决集合,其中  $W$  为邻域中星座点的数目,  $k$  为 V-BLAST 算法中性能最好解所在的层数(一般为最后一层,即  $m$  层). 图 3 中算法的步骤可具体说明如下.

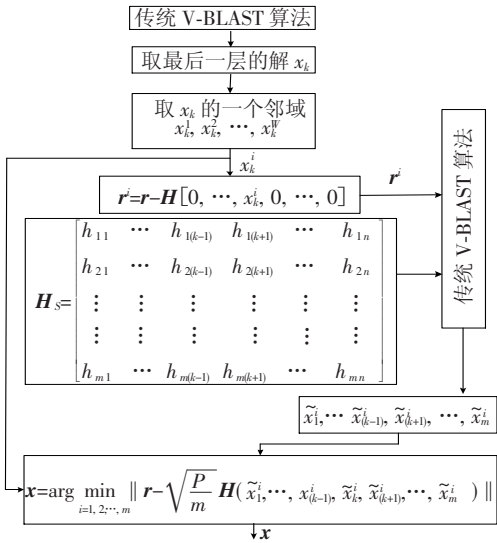


图 3 算法实现框图

第一步:利用传统的 V-BLAST 算法求出各层的解.  
第二步:确定最后一层解的一个邻域为新算法的候选集合.  
第三步:从候选集合中取出一个元素  $x_k^i$ .  
第四步:在接收向量  $\boldsymbol{r}$  中抵消掉  $x_k^i$  引起的干扰的影响而获得一个新的向量  $\boldsymbol{r}^i$ ,这个过程可以用式(2)表示为

$$\boldsymbol{r}^i = \boldsymbol{r} - \boldsymbol{H}[0, \dots, x_k^i, 0, \dots, 0]. \quad (2)$$

第五步:去掉信道传输矩阵  $\boldsymbol{H}$  的第  $k$  列向量得到一个缩减了的信道传输矩阵  $\boldsymbol{H}_s$ .  
第六步:根据新的接收向量  $\boldsymbol{r}^i$  和缩减了的传输矩阵  $\boldsymbol{H}_s$  利用传统的 OSIC 算法检测  $\tilde{x}_1^i, \dots, \tilde{x}_{(k-1)}^i, \tilde{x}_{(k+1)}^i, \dots, \tilde{x}_m^i$  的估计值. 此时,相当于对  $m-1$  根发射天线  $n$  根接收天线的 MIMO 系统进行判决检测.  
第七步:根据  $x_k^i$  的不同取值,即  $x_k^1, x_k^2, \dots, x_k^W$ , 可按照步骤三到步骤六得到一簇解,即

$$\begin{aligned} &\tilde{x}_1^1, \dots, \tilde{x}_{(k-1)}^1, \tilde{x}_{(k+1)}^1, \dots, \tilde{x}_m^1, \\ &\tilde{x}_1^2, \dots, \tilde{x}_{(k-1)}^2, \tilde{x}_{(k+1)}^2, \dots, \tilde{x}_m^2, \\ &\dots \\ &\tilde{x}_1^W, \dots, \tilde{x}_{(k-1)}^W, \tilde{x}_{(k+1)}^W, \dots, \tilde{x}_m^W. \end{aligned}$$

第八步:用第七步的解利用最大似然准则来判决输出:

$$\boldsymbol{x} = \arg \min_{i=1, 2, \dots, m} \|\boldsymbol{r} - \sqrt{P/m} \boldsymbol{H}(\tilde{x}_1^i, \dots, \tilde{x}_{(k-1)}^i, x_k^i, \dots, \tilde{x}_m^i)\|.$$

$$\tilde{x}_{(k+1)}^i, \dots, \tilde{x}_m^i) \|.$$

3.2 算法复杂度分析

对于  $m \times n$  的 MIMO 多天线系统,传统 V-BLAST 算法的乘法运算量为  $m^2 n^2 + 2nm^3 + 3.75m^4$ ; B. Hassibi<sup>[18]</sup> 提出的快速平方根算法的乘法运算量为  $2m^3/3 + 7nm^2 + 2n^2 m$ ; J. Benesty 提出的快速递归算法<sup>[19]</sup>,将传统 V-BLAST 算法的算法复杂度降低到了  $2m^3/3 + 3m^2 n$ . 文献[20] 提出的改进的快速递归算法复杂度为  $m^2 n/2 + 2m^3/3$ . 这里按 J. Benesty 提出的快速递归算法进行算法复杂度分析讨论.  
第一步中,利用传统的 V-BLAST 算法求出各层的解,其运算量为  $2m^3/3 + 3m^2 n$ . 第二步中,选择了最后一层解的一个邻域内的  $W(W \in [1, C])$  个星座点作为候选集合. 第四步中,对于每一个候选星座点  $x_k^i$ ,抵消掉该信号干扰后  $(m-1) \times n$  的 MIMO 系统采用传统的 V-BLAST 算法译码出  $\tilde{x}_1^i, \dots, \tilde{x}_{k-1}^i, \tilde{x}_{k+1}^i, \dots, \tilde{x}_m^i$ ,其计算量为  $2(m-1)^3/3 + 3(m-1)^2 n$ . 第七步中,采用最大似然准则进行判决,需  $W \times (m+1)n$  乘法.

因此,这里提出的低复杂度的近似最大似然解调算法的运算复杂度为

$$W[2(m-1)^3/3 + 3(m-1)^2 n + n(m+1)] + 2m^3/3 + 3m^2 n.$$

考虑到图 2 所示星座点子集,对于 16QAM 调制方式,取半径  $r = 1$  时的 3 种情况,候选包含 3、4、5 个星座点的概率分别是 1/4、1/4、1/2. 因此这里取  $W$  的均值为  $\bar{W} = 17/4$ ,则  $4 \times 4$  的 MIMO 系统,新算法的平均乘法运算为 856 次,而传统的 OSIC 算法为 235 次,若进行传统最大似然检测,其乘法运算次数为  $C^m n(m+1) = 1\,310\,720$  次. 可见,这里提出的低复杂度的近似最大似然检测算法的复杂度大约是传统的 OSIC 算法的 3.6 倍左右,但远低于最大似然检测算法.

表 1 给出了采用 16QAM 调制时,提出的新算法与其他算法的复杂度比较,在与 OSIC 算法比较复杂度时,分别采用了快速平方根运算和快速递归运算两种方法进行比较.

天线数量	提出的算法		OSIC 算法		ML 算法
	快速平方根运算	快速递归运算	快速平方根运算	快速递归运算	
	快速平方根运算	快速递归运算	快速平方根运算	快速递归运算	
$n = m = 4$	2 496	856	619	235	1 310 720
$n = m = 5$	3 539	1 788	1 208	458	31 457 280
$n = m = 6$	6 526	3 238	2 088	792	704 643 072

4 系统仿真实验

为了便于比较,针对  $4 \times 4$  MIMO 系统,在

16QAM 调制方式下分别进行了传统的 OSIC 检测算法、ML 检测算法、以及本文提出的低复杂度的近似 ML 检测算法的仿真实验,仿真结果如图 4 所示。

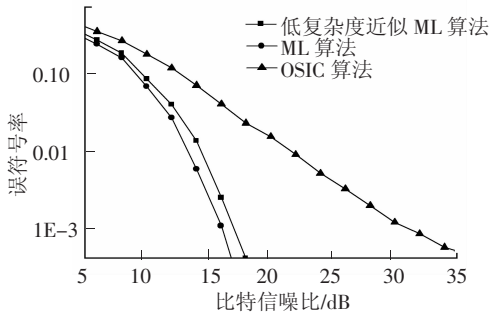


图 4 各种算法性能比较

由图 4 可知,在平均误符号率为 0.1% 时,本文提出的低复杂度的近似 ML 算法较传统的 OSIC 算法性能要高 10 dB 以上.虽然该算法性能要略低于传统的 ML 检测算法,但其复杂度要低很多.可见,其在检测性能和算法复杂度方面取得了良好的平衡。

## 5 结 论

1) 本文结合传统译码 OSIC 算法,提出一种低复杂度的近似最大似然检测算法。

2) 该算法对传统的 V-BLAST 算法与最大似然检测算法进行了有效整合.通过采用传统的 V-BLAST 算法性能最好一层解的邻域作为候选判决集合,并以此邻域内每一个符号作为初始值进一步采用传统的 V-BLAST 算法反馈判决其他层的符号.最后采用最大似然准则对候选向量进行判断。

3) 本文算法有效减小了最大似然检测算法检测向量数,因此降低了算法的复杂度。

## 参考文献:

- [1] FOSCHINI G J, GANS M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas [J]. *Wireless Personal Communications*, 1998 (6): 311 – 335.
- [2] PAULRAJ A. Introduction to space time wireless communication[M]. London: Cambridge University Press, 2003.
- [3] LANEMAN J N, WORNELL G W. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(10): 2415 – 2425.
- [4] CUI Shuguang, GOLDSMITH A J, AHMAD B. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(6): 1089 – 1098.
- [5] LI Xiaohua. Energy efficient wireless sensor networks with transmission diversity[J]. *IEEE Electronics Letters*, 2003, 39(24): 1753 – 1755.

- [6] LI Xiaohua, CHEN Mo, LIU wenyu. Application of ST-BC-encoded cooperative transmissions in wireless sensor networks[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, 12(2): 134 – 137.
- [7] JAYAWEERA S K, CHEBOLU M L. Virtual MIMO and distributed signal processing for sensor networks-an integrated approach[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC 05)*. Seoul, Korea: IEEE Press, 2005: 1214 – 1218.
- [8] RALEIGH G G, CIOFFI J M. Spatio-temporal coding for wireless communications[J]. *IEEE Trans Communications*, 1998, 46(3): 357 – 366.
- [9] TAROKH V, SESHADRI N, CALDERBANK A R. Space-time codes for high data rate wireless communications; Performance criterion and code construction[J]. *IEEE Trans Information Theory*, 1998, 44: 744 – 765.
- [10] 丁子哲, 张贤达. 基于串行干扰消除的 V-BLAST 检测[J]. *电子学报*, 2007, 35(6): 19 – 24.
- [11] 陈亮, 李建东. 新型基于 QR 分解的低复杂度 MIMO 迭代接收机[J]. *电子学报*, 2007, 35(6): 25 – 29.
- [12] SCHMIDT D, JOHAM M, DIETRICH F A, *et al.* Complexity reduction for MMSE multi-user spatial-temporal Tomlinson-Harashima precoding [C]//*Proc ITG Workshop on Smart Antennas*. Duisburg, Germany: [s. n.], 2005: 1 – 9.
- [13] 程文驰, 张海林. 逼近最大似然 (ML) 性能的降维 VBLAST 检测算法[J]. *中国科学: 信息科学*, 2010, 40(8): 1106 – 1112.
- [14] 潘文, 蒋占军, 杜正峰. BLAST 结构 ML 检测简化方法分析[J]. *中国科学 E 辑: 信息科学*, 2008, 38(8): 1277 – 1283.
- [15] 苏昕, 孙永军, 易克初. 一种结合 ML 检测的高性能 V-BLAST 系统[J]. *西安电子科技大学学报*, 2005, 32(3): 344 – 347.
- [16] 王海红, 王欣, 魏急波. 4 × 4 V-BLAST 系统分组最大似然检测算法[J]. *信号处理*, 2010, 26(3): 369 – 374.
- [17] 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.
- [18] HASSIBI B. An efficient square-root algorithm for blast [C]//*IEEE Intl Conf Acoustic Speech, Signal Processing*. Istanbul: Turkey Press, 2000: 5 – 9.
- [19] BENESTY J, HUANG Y, CHEN J. A fast recursive algorithm for optimum sequential signal detection in a BLAST system[J]. *IEEE Trans Signal Process*, 2003, 51(7): 1722 – 1730.
- [20] SHANG Yue XIA Xianggen. An improved fast recursive algorithm for V-BLAST with optimal ordered detections [C]//*IEEE International Conference on Communications*. Beijing, China: [s. n.], 2008: 756 – 760.

(编辑 杨 波)