

文章编号:1671-6833(2011)01-0107-05

ML-OSIC 检测的快速递归算法

张端金, 赵金平, 蒋 静

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对垂直分层空时(V-BLAST)结构, 研究 MIMO-OFDM 系统的信号检测问题. 根据矩阵伪逆的递推关系, 提出了一种基于最大似然-排序串行干扰抵消(ML-OSIC)算法的简化处理方案, 依次计算每一次迭代的迫零加权矩阵和加权向量. 与传统的 ML-OSIC 算法相比, 笔者给出的快速递归算法既可以基本保证检测算法的最优性, 又能获得更快的处理速度和更低的计算复杂度.

关键词: 检测算法; V-BLAST; 递归算法; ML-OSIC

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A

0 引言

随着无线通信业务不断扩大, 如何提高通信系统的容量和频谱利用率, 已成为一个具有挑战性的研究课题^[1]. 多输入多输出(MIMO)技术在不增加带宽的情况下, 可以显著改善通信系统的性能. MIMO 系统可以增加信道容量, 从而提高数据吞吐量, 提高了数据传输的可靠性, 降低传输的误码率, 而且不需要增加可用带宽或者提高发射功率.

1996年, 贝尔实验室的 Foschini 等人提出的分层空时码(BLAST: Bell Laboratories Layered Space Time 结构)分为对角结构(D-BLAST: Diagonal BLAST)和垂直结构(V-BLAST: Vertical BLAST)^[2]. V-BLAST 是一种空间决策反馈检测算法, 该算法的预处理涉及到 M (M 为发射天线数)次矩阵 Moore-Penrose 广义逆的运算, 运算复杂度较高^[3-4]. 根据不同的加权矩阵计算方法, 又可分为迫零串行干扰相消(ZF-SIC)算法和最小均方误差串行干扰相消(MMSE-SIC)算法^[5]. 正交频分复用(OFDM)技术是一种具有高效频谱利用率的信号传输方案. MIMO 通信系统结合 OFDM 技术不仅能进一步提高频谱效率, 还具有良好的抗多径干扰能力, 是未来移动通信系统的发展方向^[6-7]. 因此, 基于 V-BLAST 的 MIMO-OFDM 系统信号检测技术, 具有广泛的应用前景.

然而, 传统的检测算法需要进行多次矩阵伪逆运算, 计算量很大. 因此, 如何降低算法的复杂度已成为新的研究方向之一, 目前已取得较大进展. 从符号错误概率角度考虑, 最大似然检测(ML: Maximum Likelihood)算法为检测信号的最优方式, 排序串行干扰抵消算法(OSIC: Ordered Successive Interference Cancellation)虽然降低了复杂度, 但其性能和 ML 相比有一定的差距. Choi 等^[8]在 ZF-DFE 算法的基础上, 给出 ML-DFE (Decision Feedback Equalization)算法, 它以较低的复杂度提高前 L 个分层的检测性能, 改善系统的整体误比特性能, 但在 ML-DFE 算法中存在层间的判决反馈结构, 误差扩散依然存在. 文献[9]中提出了一种次优的联合检测算法(ML-OSIC), 既减少了 ML 算法的搜索次数, 避免了层间干扰和误码扩散, 又保证了性能上与 ML 算法接近, 优于 ML-DFE 算法. 这些算法虽然改善了算法的检测性能, 但算法的复杂度仍然偏高^[10]. 文献[11-12]中的快速递归算法是现有的最优算法中复杂度最低的.

笔者针对检测算法的复杂度问题, 研究一种简化处理方案. 利用矩阵的广义逆递推关系^[11-13], 根据前一次迭代获得的迫零加权矩阵和加权向量, 得到下一次迭代的迫零加权矩阵和加权向量, 给出一种新型的快速递归 ML-OSIC 算法. 与现有的 V-BLAST 检测、ML-OSIC 算法相比, 所提算法在保证最优性能的前提下, 具有更低

收稿日期: 2010-09-03; 修订日期: 2010-10-16

基金项目: 河南省教育厅自然科学基金资助项目(2010A510017); 郑州大学研究生教育基金资助项目(2009164)

作者简介: 张端金(1966-), 男, 湖北荆州人, 郑州大学教授, 博士, 研究方向为现代信号处理, 检测与估计, E-mail: djzhang@zzu.edu.cn.

的计算复杂度.

1 系统模型

MIMO-OFDM 系统 V-BLAST 的检测原理^[9-10]是:在系统的发送端,发送序列 $\{X_i\}_{i=1,2,\dots,m}$ 经快速傅氏逆变换 IFFT 变换后,插入循环前缀(+CP),然后以 $\{\tilde{X}_i\}_{i=1,2,\dots,m}$ 的形式,通过第 i 根发射天线进行发送.而在系统的接收端,第 j ($j=1,2,\dots,n$) 根接收到的序列为 $\{\tilde{Y}_j\}_{j=1,2,\dots,n}$,对其进行去 CP(循环前缀),然后再经快速傅氏逆变换 FFT,得到接收序列 Y_j ($j=1,2,\dots,n$),然后再对所有的接收序列所构成的 $\{Y_j\}_{j=1,2,\dots,n}$ 进行 V-BLAST 检测,从而得到最终的接收序列 $\{\hat{X}_i\}_{i=1,2,\dots,m}$.

以 \tilde{X} 表示 $\{\tilde{X}_i\}_{i=1,2,\dots,m}$, \tilde{Y} 表示 $\{\tilde{Y}_j\}_{j=1,2,\dots,n}$,而 $H=(h_{i,j})_{n \times m}$ 为 $n \times m$ 的信道矩阵,元素 $h_{i,j}$ 是从第 j 根发射天线到第 i 根接收天线的信道传输系数.假设该系统中发送天线之间、接收天线之间均完全不相关,且发送的数据之间也互相独立.为了表述简便,假定接收机已实现了准确的定时和符号同步,定义 \tilde{N} 是加性白高斯噪声矢量,其均值为 0,方差为 σ^2 ,则下式成立:

$$\tilde{Y} = H \cdot \tilde{X} + \tilde{N} \quad (1)$$

图 1 所示为一个 m 个发射天线、 n 个接收天线的 MIMO-OFDM 系统基于 V-BLAST 技术进行信号检测的原理框图^[6].可知,对整个 MIMO-OFDM 系统 V-BLAST 的检测可通过对其各个子载波信道进行 V-BLAST 检测来实现^[7].若 K 为多载波传输的子载波数,则 MIMO-OFDM 系统中的 V-BLAST 检测实际上就是 k 个 $m \times n$ 信道的 V-BLAST 检测的总和.

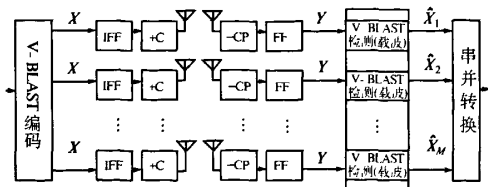


图 1 MIMO-OFDM 系统 V-BLAST 检测框图

Fig. 1 Block diagram of the V-BLAST detection for MIMO-OFDM system

2 ML-OSIC 算法

由文献[9]可知,ML-OSIC 检测算法是在

ML 算法的基础上,有效地结合了 OSIC 算法,既减少了 ML 算法的搜索次数,降低了 ML 算法的复杂度,保持层间相互独立,避免了层间干扰和误码扩散,又保证了性能上与 ML 算法接近.

为了便于分析算法的计算复杂度,现对文献[9]的 ML-OSIC 算法步骤,重新整理.

初始化:令 $y_1 = y, H_1 = H, i = 1$

1) 计算第 i 次的迭代加权矩阵,令加权矩阵 $W_i = H_i^+$;

2) 分别计算表示信噪比最大的符号所对应的 H_i 和 H 的列序号 p_i 和 k_i ;

3) 确定基准点 x^k , 令

$$k_i = \arg \min_j \| (H_i^+)_j \|^2 \quad (2)$$

4) 如果 $i > 1$,则执行下一步,否则执行 10);

5) 令 $k_i = \arg \min_{j \in \{k_1, \dots, k_{i-1}\}} \| (H_i^+)_j \|^2 \quad (3)$

6) 令第 i 次迭代的加权向量 w_i 为 W_i^H ,则 w_i^H 即是 W 的第 p_i 行;

7) 计算第 i 次迭代的判决统计量 \tilde{x}_{k_i} :

$$\tilde{x}_{k_i} = w_i^H y_i;$$

8) 对 \tilde{x}_{k_i} 进行应判决,得到判决值 $\hat{x}_{k_i}^{k_i}$;

9) 如果 $i < m$,则执行下一步,否则,执行 12);

10) 计算 $y_{i+1} = y_i - h_{k_i} \hat{x}_{k_i}^{k_i}$,将 h_{k_i} 从 H_i 中删除,得到矩阵 H_{i+1} ;

11) 令 $i = i + 1$,然后返回 1);

12) 令 $\hat{x}_m = s_m$,对 s_m 进行 ML 检测判决,判决值 \hat{s} 为:

$$\hat{s} = \arg \min_{i \in s_m} \| y - Hs \| \quad (4)$$

式中: H_i^+ 表示矩阵 H_i 的加号伪逆; H_i 表示从 H 中去掉 $h_{k_1}, h_{k_2}, \dots, h_{k_{i-1}}$ 等列后得到的 $n \times (m - i + 1)$ 维矩阵,其中 $i = 2, 3, \dots, m$; QPSK 调制时, s_m 为: $[s_1^1, s_1^2, \dots, s_1^m]^T, [s_2^1, s_2^2, \dots, s_2^m]^T, [s_3^1, s_3^2, \dots, s_3^m]^T, [s_4^1, s_4^2, \dots, s_4^m]^T$ 的集合; p_i 是加权矩阵 W_i 中最小 Frobenius 范数的行序号,并且 p_i 和 k_i 满足关系式 $k_i = (\Omega_i)_{p_i}$,此处 $(\cdot)_i$ 表示向量的第 i 个元素;向量 $\Omega_1 = [1, 2, \dots, m]^T$,向量 Ω_i 表示从 Ω_{i-1} 中删除值为 k_{i-1} 的元素所形成的向量,其中 $i = 2, 3, \dots, m$.

该算法以 4 发 6 收天线系统, QPSK 调制方式为例,检测性能有了很大的提高,但由于需要多次计算矩阵的广义逆,导致其复杂度较高.在保证算法误码率不变的情况下降低算法的复杂度,笔者给出一种改进算法.

3 快速递归 ML - OSIC 算法

3.1 基本公式

文献[13]依据矩阵求伪逆的计算方法—Greville 递推法,给出求初始加权矩阵 W_1 的计算方法,再由文献[11]给出的定理,推导出计算扩展加权矩阵 W_i 的递推公式。

扩展加权矩阵的计算递推过程如下:

$$\text{当 } i=1 \text{ 时, } W_1 = H_1^* \quad (5)$$

其中 H_m^* 可由以下递推公式得到: $H_1^* = h_1^*$; $H_i^* = \begin{bmatrix} H_{i-1}^* - d_i b_i^H \\ b_i^H \end{bmatrix}$; $d_i = H_{i-1}^* h_i$, $c_i = h_i - H_{i-1} d_i$, 当 $c_i \neq 0$ 时, $b_i^H = c_i^*$; 当 $c_i = 0$ 时, $b_i^H = (1 + d_i^H d_i)^{-1} d_i^H H_{i-1}^*$ 。

当 W_i 取 $W_i (i=2, 3, \dots, m)$ 时, 若 $\gamma_i = 0$,

$$W_i = V_{i-1} - V_{i-1} w_{i-1} w_{i-1}^H \quad (6)$$

$$\text{若 } \gamma_i \neq 0, W_i = V_{i-1} + \frac{1}{\gamma_i} V_{i-1} h_{k_{i-1}} w_{i-1}^H \quad (7)$$

其中 $\gamma_{i-1} = 1 - w_{i-1}^H h_{k_{i-1}}$, V_{i-1} 为删除 W_{i-1} 的第 p_{i-1} 行后得到的矩阵, w_{i-1} 为 W_{i-1}^H 的第 p_{i-1} 列, 也就是第 $i-1$ 次迭代的加权向量。

当 $i=M$ 时, 若 $\|H_m\|^2 \neq 0$, 则

$$W_m = H_m^H / \|H_m\|^2 \quad (8)$$

$$\text{若 } \|H_m\|^2 = 0, \text{ 则 } W_m = 0 \quad (9)$$

3.2 算法步骤

ML-OSIC 检测算法中的矩阵求伪逆运算结合以上简单的伪逆递推方法, 依次计算每一次迭代的迫零加权矩阵和加权向量, 得到快速递归 ML-OSIC 算法。

初始化: 令 $y_i = y$, $H_1 = H$, $\Omega_1 = [1, 2, \dots, m]^T$, $i=1$ 。

1) 计算扩展加权矩阵 W_i , 分为以下 3 种情况: 如果 $i=1$, 则利用递推公式(5)计算 W_1 , 然后执行步骤 2; 如果 $2 \leq i \leq m-1$, 则利用递推公式(6)和(7)计算 W_i , 然后执行步骤 2; 如果 $i=m$, 则利用递推公式(8)和(9)计算 W_m , 然后执行 2)。

2) 确定 p_i 和 k_i , 此步骤分以下两种情况: 当 $i \leq m-1$ 时, 令 p_i 为 W_i 的所有行中 Frobenius 范数最小的行的序号, $k_i = (\Omega_i)_{p_i}$, 执行 3); 当 $i=m$ 时, 令 $p_i = 1$, $k_i = \Omega_m$, 然后执行 3)。

3) 确定基准点 x^{k_i} , 分两种情况: 当 $i=1$ 时, 依据公式(2)计算, 然后执行 8); 当 $i>1$ 时, 根据公式(3)进行计算, 执行 4)。

4) 取出 W_i^H 的第 p_i 列作为第 i 次迭代的加权

向量 W_i ;

5) 计算第 i 次迭代的判决统计量:

$$\hat{x}_{k_i} = w_i^H y_i;$$

6) 对 \hat{x}_{k_i} 进行硬判决, 可以得到对应的判决值 $\hat{x}_m^{k_i}$;

7) 若 $i < m$, 则执行下一步骤; 否则算法执行步骤 9;

8) 计算 $y_{i+1} = y_i - h_{k_i} \hat{x}_m^{k_i}$, 从 Ω_i 的元素中删除 k_i , 得到 Ω_{i+1} , 从 H_i 中删除它的第 k_i 列, 得到矩阵 H_{i+1} ;

9) 令 $i = i+1$, 然后返回步 1);

10) 令 $\hat{x}_m = s_m$, 利用公式(4)进行 ML 算法计算, 得到判决向量 \hat{s} 。

4 算法的性能及复杂度分析

4.1 算法性能

所提算法是在未改变原算法原理的基础上采用的一种简单计算方法的方案, 理论上与原有算法具有相同的性能。

同时, 在实际系统中, 信号处理器的计算精度有限, 造成了计算结果数值不稳定。但是实际通信系统的天线数目一般较少, 新算法的递推次数也就相应的很少, 从而也避免了当递推次数过大时造成计算结果数值不稳定的问题。

4.2 算法复杂度

可以从两个方面分析所提算法的计算复杂度, 一是各步骤所需要的加法和乘法的次数多少, 二是 ML 的搜索次数。运算的次数少, 复杂度就低; ML 的搜索次数越小, 复杂度越低。

计算 1) 时, 要用到的实数加法次数为:

$$10m^2n - 2m^2 - 2mn - 18n + 3, \text{ 实数乘法次数为:}$$

$$10m^2n + 2mn - 20n. \text{ 相应的, 计算用到的复数加法}$$

$$\text{次数和复数乘法次数分别为: } \frac{5}{2}m^2n - m^2 - \frac{3}{2}mn$$

$$- 4n + \frac{3}{2}, \frac{5}{2}m^2n + \frac{1}{2}mn - 5n.$$

计算 2) 时, 用到的实数加法次数为 $2(m-i+1)n$, 实数乘法次数为 $2(m-i+1)n-1$, 其中 $i=1, 2, \dots, m-1$ 。计算 5) 时要用到的实数加法次数和实数乘法次数依次为 $4n$ 和 $4n-2$; 计算 8) 时用到的实数加法次数和实数乘法次数均为 $4n$; 计算 10) 时算法的复杂度体现为 ML 的搜索次数, 笔者算法进行 ML 数据采集的层数为 1, 因此该算法进行 ML 的搜索次数仅为 2^Q , Q 为调制阶数。其它步骤的操作复杂度可以忽略。

综上所述,笔者的快速迭代 ML-OSIC 算法需要总的复数加法次数为:

$$\frac{11}{4}m^2n - m^2 + \frac{3}{4}n - \frac{3}{2}m - \frac{11}{2}n + 2$$

复数乘法次数为:

$$\frac{11}{4}m^2n + \frac{11}{4}mn - \frac{13}{2}n$$

然而,依据 ML-OSIC 检测算法的步骤,其复杂度体现在复数加法次数为:

$$\frac{3}{2}m^3 + \frac{5}{2}m^2n - 4m^2 + \frac{5}{2}mn - m - n,$$

复数乘法次数为:

$$\frac{7}{6}m^3 + 3m^2n - 2m^2 + 4mn - \frac{1}{6}m - n$$

该算法的复杂度 $O(m^4)$ 的数量级,复杂度要远高于笔者所提算法表 1 为两种算法运算量.从表 1 可以看出,快速递归 ML-OSIC 算法在计算时所需的运算量均低于 ML-OSIC 检测算法,而且天线数目越少,优势更明显.更直观的分析如图 2、图 3 所示.

表 1 两种算法的运算量比较

Tab.1 Computation comparison of the two algorithms

M	ML-OSIC	改进算法	ML-OSIC	改进算法
	加法次数	加法次数	乘法次数	乘法次数
2	16	7.5	39	20
3	61.5	48.5	127	79.5
4	152	137	294.2	194
5	302.5	289.5	565.4	380
6	528	522.5	965.7	654
7	843.5	852.5	1.520 1e+003	1.032 5e+003
8	1 264	1 296	2.253 7e+003	1532
9	1.869 5e+003	1.804 5e+003	3.191 4e+003	2 169
10	2.589 5e+003	2 480	4.358 3e+003	2960

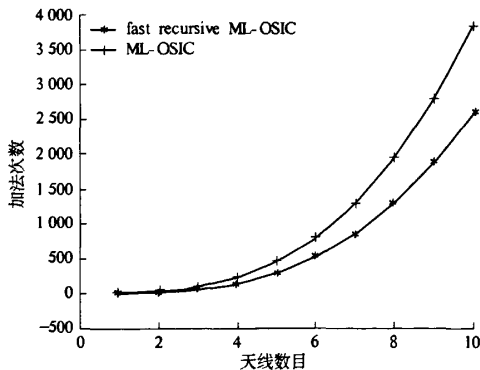


图 2 加法运算次数

Fig.2 Number of addition operations

考虑发射与接收天线数目相同,比较两种算法的加法次数及乘法次数可知,运算量均随着天线数目的增加而变大;本算法随着天线数目的增加,其复杂度增加幅度低于 ML-OSIC 检测算法.例如,当 $m=n=6$ 时,新算法的运算次数要比 ML-OSIC 的运算次数少 400 次左右.本算法在保证算法检测性能的前提下,ML 搜索次数不变,所需的复数乘法和加法次数都低于文献[9]的算法,

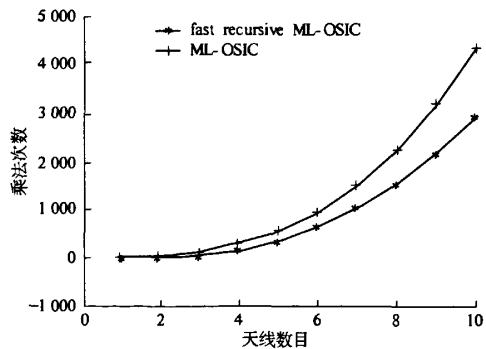


图 3 乘法运算次数

Fig.3 Number of multiplication operations

复杂度降低 30%.

5 结论

依据矩阵广义逆,提出了一种快速递归检测算法.该算法降低了原 ML-OSIC 算法的计算复杂度,在基本保证算法性能的前提下获得较低的运算量.而且实际系统的天线数目一般很少,新算法的递推次数有限,具有较高的数值稳定性.

参考文献:

- [1] 兰洋,程时昕. 联合 ML 和 OSIC 的 VBLAST 解码算法[J]. 电路与系统学报, 2004, 9(2): 31-34.
- [2] HE G H, YU W, ZHOU Z C. Reduced complexity detection for V-BLAST systems: from theory to practice[C]// Proc 2006 Int. Conf. Communications, Circuits Systems, Piscataway: IEEE, 2006(4): 2549-2553
- [3] 刘谦雷,杨绿溪,许道峰. 用于 MIMO 信号检测的降低复杂度 V-BLAST 算法[J]. 通信学报, 2007, 28(9): 40-45.
- [4] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [5] ZHU W, KIM S, JIN J Y, et al. Improved detection algorithm based on interference cancellation in MIMO systems[C]// Proc 6th Int. Conf. ITS Telecommunications, Piscataway: IEEE, 2006: 577-581.
- [6] LIU Q L, YANG L X. A simplified method for V-BLAST detection in MIMO OFDM communication [C]// Proc Joint Conf. of 10th Asia-Pacific Conf. Communications and 5th Int. Symp. Multi-Dimensional Mobile Communications, Piscataway: IEEE, 2004(1): 30-33.
- [7] GIANCASPERO L, AGAROSI L, PALTENGI G. Co-channel interference cancellation based on MIMO OFDM systems[J]. IEEE Wireless Communications, 2002, 9(6): 8-17.
- [8] CHOI W J, ROHIT N, CIOFFI J M. Combined ML and DFE decoding for the V-BLAST System[C]// Proc 2000 Int. Conf. Communications, Piscataway: IEEE, 2000(3): 1243-1248
- [9] 汪蓓,朱琦. MIMO-OFDM 系统中一种改进的 V-BLAST 检测算法[J]. 信号处理, 2009, 25(9): 1409-1413.
- [10] 张金荣,王东,曹长修,等. 一种空间相关的 Nakagami 衰落下 MIMO-OFDM 系统误码率计算方法[J]. 郑州大学学报:工学版, 2007, 28(2): 73-76
- [11] BENESTY J, HUANG Y T, CHEN J D. A fast recursive algorithm for optimum sequential signal detection in a BLAST system [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2003, 51(7): 1722-1730.
- [12] HASSIBI B. A fast square-root implementation for BLAST[C]// Proc 34th Asilomar Conf. Signals, Systems Computers, Los Alamitos: IEEE CS, 2000, 2: 1255-1259.
- [13] 罗振东,赵明,刘思杨,等. 一种新型的快速递归 V-BLAST 检测算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(7): 1546-1550.

Fast Recursive Algorithm for ML-OSIC Detection

ZHANG Duan-jin, ZHAO Jin-ping, JIANG Jing

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The problem of signal detection for MIMO-OFDM system by using V-BLAST is studied. A simplified treatment options based on ML-OSIC (maximum likelihood-ordered successive interference cancellation) algorithm is proposed in terms of a simple recursive relationship of computing pseudo inverses, so that the new zero-forcing (ZF) weight matrix and the corresponding ZF weight vector can be directly obtained by previous iteration value. Compared with the traditional ML-OSIC algorithm, the proposed fast recursive detection algorithm can not only guarantee the optimal detection performance, but also get faster processing speed and lower computational complexity.

Key words: detection algorithm; V-BLAST; recursive algorithm; ML-OSIC