

V-BLAST 系统中一种近似最佳列表检测算法

王海红 成文婧 王欣 魏急波

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 针对 V-BLAST 系统, 提出一种近似最佳列表检测算法。该列表检测算法通过调节列表维数参数在检测性能和计算复杂度之间实现了较好的折衷。此外, 给出了一种不同于 OSIC 算法的检测排序方法, 进一步提高了检测性能。仿真和复杂度比较结果表明, 在不相关和空间相关性较强的信道下, 该列表检测算法均显著优于 OSIC 算法, 甚至接近 ML 算法的性能, 实现了性能和复杂度较好的折衷, 是一种实用的选择。

关键词: V-BLAST 系统; 排序连续干扰抵消 (OSIC) 算法; QRD-M 算法; 列表检测算法
中图分类号: TN911-3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2010)07-1021-06

A Near Optimal List Detection Algorithm in VBLAST Systems

WANG Hai-hong CHENG Wen-jing WANG Xin WEI Ji-bo

(Department of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A near optimal list detection algorithm is proposed for V-BLAST systems. The trade-off between performance and complexity of the proposed list algorithm can be adjusted through setting the parameter P, which is the list dimension of the tree searching. Furthermore, a different detection ordering method from OSIC algorithm is proposed, which can greatly improve detection validity. Simulation results and complexity analysis show that list detection algorithm evidently outperforms OSIC algorithm and is even close to ML detection performance under both uncorrelated and highly correlated channels and achieves a good trade-off between performance and complexity. It is a preferable practicable choice.

Key words: V-BLAST system; ordered successive interference cancellation (OSIC) algorithm; QR decomposition and M algorithm; list detection algorithm

1 引言

V-BLAST (Vertical Bell Labs Layered Space-Time) 是一种空分复用 MIMO 系统^[1], 它具有频谱效率高、实现简单等特点, 已经得到了广泛的应用。本文将针对 V-BLAST 系统的检测算法进行研究。

理论上, 需要采用 ML 检测算法才能较完整地获得 V-BLAST 系统所蕴含的巨大信道容量。然而, ML 检测算法的计算复杂度是随着发送符号矢量的维数 (即发送天线数目) 和调制星座点数目呈指数增长, 限制了它的实用化。为了降低 ML 算法的复杂度, 球形译码 (SD) 算法被引入 V-BLAST 系统的检测中。它能获得 ML 检测性能, 但其平均复杂度是个依赖于信道实现的随机变量, 通常而言, SD 本质上仍然具有指数复杂度^[2]。为此, 人们转向寻找能应用于实际 V-BLAST 系统的准最佳检测方案。

相当多的研究集中于寻找较低复杂度的算法来尽可能多地获得 V-BLAST 系统带来的性能增益。其中最典型的的就是 Bell 实验室的学者 Golden 等人提出的排序连续干扰抵消 (OSIC) 检测算法^[3]。OSIC 算法具有较低复杂度和较好检测性能, 文献[3]证明了其能够获得大约 60% 的 MIMO 信道容量。然而, OSIC 算法不能获得全分集增益, 其性能与 ML 算法相比仍然有较大差距。为了减小与 ML 算法的性能差距, QRD-M 算法被引入 V-BLAST 系统^[4]。QRD-M 检测算法通过结合 QR 分解和 M 算法来简化 QRD-ML 检测的树搜索过程, 获得的性能与 ML 算法是可比的。但是, 对于大星座调制, 为了获得近 ML 性能, 需要设置一个较大的 M 值, 从而导致其复度过高^[5]。因此, 需要研究既有较强检测性能又有适中复杂度的检测算法。

本文提出了一种接近最佳 ML 性能、与 OSIC 复杂

度相当的列表检测算法。该算法在不显著增加复杂度的前提下,能保证检测符号获得较高的分集,从而提高了系统的检测性能。为了获得更好的检测性能,本文考虑了子层检测排序问题;出于不同的应用环境和目的,本文讨论了算法的衍生变异问题;最后,本文还给出了所提列表检测算法的计算复杂度表达式。仿真和复杂度比较结果表明,提出的列表检测算法明显优于ZF-OSIC算法,甚至接近ML检测的性能;与QRD-M算法相比,提出的列表检测算法具有更好的性能,同时具有更低的复杂度;此外,该列表检测算法对MIMO信道的空间相关也具有较强的鲁棒性。总之,本文提出的列表检测算法实现了性能和复杂度之间较好的折衷,是一种较好的实用选择。

后续内容安排:第2节介绍系统模型;第3节对OSIC等检测算法获得的分集增益和复杂度进行了概括;第4节首先给出了列表检测算法,其次讨论了子层的检测排序问题,再次讨论了算法的衍生变异问题,最后给出了算法的计算复杂度;第5节给出了算法的性能仿真;最后为结论。

2 系统模型

V-BLAST系统模型如图1表示,系统包含 N 根发送天线和 M 根接收天线($M \geq N$),输入的串行数据流经串并变换分为 N 个子数据流,称之为分层,每根发送天线对应一个分层。在接收端,每根接收天线接收来自 N 根发送天线的符号,然后送入V-BLAST检测器进行信号检测,从而得到发送符号的估计值。

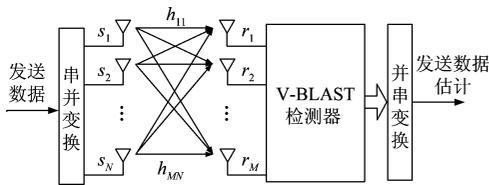


图1 V-BLAST系统模型

在该系统中,假设信道为准静态瑞利平坦衰落信道,即在一帧传输时间内信道矩阵 \mathbf{H} 保持不变,并假设接收端已知信道状态信息。同时还假定接收端已实现了准确的定时和载波同步。接收符号矢量和发送符号矢量的关系为:

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

其中 $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_N]^T \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 表示 N 根发送天线所发送的符号矢量,并且对每个天线的平均发送功率进行归一化,即 $E\{\mathbf{s}\mathbf{s}^H\} = \mathbf{I}_N$; $\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_M]^T \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 表示 M 维接收符号矢量; $\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_M]^T \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 表示零均值复高斯白噪声矢量,其协方差矩阵为 $E\{\mathbf{n}\mathbf{n}^H\} = \sigma_n^2 \mathbf{I}_M$; \mathbf{H}

表示MIMO信道矩阵,其元素 h_{ji} ($i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, M$)表示发送天线 i 到接收天线 j 间的信道衰落系数。

为了描述具有空间相关性的MIMO信道,本文采用广泛应用的Kronecker模型^[6], (1)式中的信道矩阵表示为:

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}_r^{1/2} \mathbf{H}_w \mathbf{R}_t^{1/2} \quad (2)$$

其中 \mathbf{H}_w 是一个 $M \times N$ 维矩阵,由相互独立同分布的随机变量组成,每个元素的概率分布为 $CN(0, 1)$; \mathbf{R}_t 与 \mathbf{R}_r 分别表示发送和接收相关矩阵。根据文献[6]给出的相关信道模型,发送相关矩阵 \mathbf{R}_t 和接收相关矩阵 \mathbf{R}_r 可以被建模为空间相关系数($0 \leq \rho_t, \rho_r \leq 1$)的函数。应用文献[6]中的定义, $N \times N$ 维的发送相关矩阵 \mathbf{R}_t 如式(3)中Toeplitz矩阵给出,

$$\mathbf{R}_t = \begin{bmatrix} 1 & \rho_t & \rho_t^4 & \cdots & \rho_t^{(N-1)^2} \\ \rho_t & 1 & \rho_t & \cdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \rho_t \\ \rho_t^{(N-1)^2} & \cdots & \rho_t^4 & \rho_t & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

相应的定义对系数为 ρ_r 的 $M \times M$ 维接收相关矩阵 \mathbf{R}_r 同样成立。通过假定 $\rho_t = \rho_r = \rho$,相关信道模型可作进一步简化。由于只有一个参数变量 ρ ,这样非常利于从数学上比较空间相关性对MIMO系统的影响。

3 OSIC等检测算法性能和复杂度概括

本节主要对OSIC等检测算法的性能和复杂度进行概括总结,从而为第4节的列表检测算法的提出作理论铺垫。

为了表征V-BLAST各种检测算法的性能,本节首先引入检测算法能获得的分集增益概念。Tarokh在关于空时编码的经典文献中给出了分集增益确切的定义,并指出空分复用MIMO系统的最大可用分集为接收天线数目 M ^[7]。对于分集增益的物理意义可以这样理解:在双对数坐标(SER -vs- SNR)曲线上,分集增益描述了系统的渐近错误概率随着信噪比而下降趋势的快慢,具体体现为错误概率曲线的斜率。通常,假设某种检测算法的SER以 $SNR^{-\delta}$ ($\delta \leq M$)的趋势衰减,我们就说此检测算法可以获得 δ 阶分集^[8]。

进行精确的计算复杂度分析是一项比较困难的工作,一般只能给出计算复杂度的量级描述。本节只给出了几种检测算法的复杂度,仅统计了复数乘法的数量。

ZF、ZF-OSIC、ML和QRD-M四种算法的获得分集和计算复杂度归纳在表1中。

表 1 几种检测算法的获得分集和计算复杂度

算法	获得分集	计算复杂度	备注
ZF	$M-N+1$	$4N^3+2N^2M+NM$	[9]
ZF-OSIC	$\geq M-N+1$	$N^4+\left(\frac{5}{2}+\frac{2}{3}M\right)N^3+\left(\frac{7}{2}+M\right)N^2+\frac{1}{3}MN$	[9]
ML	M	$\Omega^N M(N+1)$	[9]
QRD-M	随 M_{best} 变化	$\left(\frac{N^2}{2}+\frac{3N}{2}-2\right)M_{best}^2+2M_{best}+\left(2NM^2+\frac{M^2}{3}-N\right)$	[4] [5]

4 近似最佳列表检测算法

QRD-M 算法具有指数增长的复杂度,为了接近 ML 性能,需要较大的 M 值,而这导致了较大的复杂度代价。对于较小的 M 值,性能的改善与 OSIC 算法相比不是太大。在本节,我们提出了一种较低复杂度、接近 ML 检测性能的列表检测算法。

提出的列表检测算法是 OSIC 检测算法与 ML 检测算法的一种组合算法。众所周知,OSIC 检测的性能比线性检测要好得多,但与 ML 检测相比差距仍然非常大。在进行 OSIC 检测时,系统性能主要由第 1 层被检测符号决定的,并且对该层符号的误判还会引起误码传播,直接影响到其它未检测层符号的检测正确性。虽然 OSIC 检测算法已根据检测后信噪比对各层符号的检测作了最佳排序,有效地提高检测性能,但从表 1 我们知道 OSIC 算法在检测第 1 层符号时,其分集仍然是最小的,尤其在空间相关 MIMO 信道条件下,判决准确性更得不到保证,错误传播的概率还是比较大的。ML 检测算法就不存在这种问题,对于各层符号的检测(各层符号联合检测)都能保证获得系统的最大分集,因此我们考虑将 OSIC 和 ML 这两种算法结合起来。

本节安排如下:在 4.1 节简要描述了列表检测算法,在 4.2 节讨论了子层检测排序问题,在 4.3 节讨论了算法的衍生变异问题,最后在 4.4 节给出了算法的计算复杂度。

4.1 列表检测算法

对于系统模型(1)表示的接收符号矢量,我们并不立即对其进行检测,而是为待检测的第一层符号(在 4.2 节讨论如何确定第一待检测子层)建立一个候选符号列表。例如,我们可以在列表中包含所有星座点,即列表大小等于星座点数目 Ω 。

从列表选取一个候选符号,我们假设它是第一待检测子层发送符号。基于这个假设,我们可以应用 OSIC 检测算法对剩余子层进行检测。在所有层符号检测完后,我们将基于假设的第一子层符号与剩余子层已检测符号合并成发送符号矢量估计值。然后我们

计算出该假设候选符号所对应估计值的度量值。度量是基于欧氏距离代价函数:

$$\Psi = \|\mathbf{r}-\mathbf{H}\mathbf{c}\|^2 \quad (4)$$

其中 \mathbf{c} 表示假设候选符号对应的发送符号矢量估计值。

从列表选取另一个候选符号,继续一次新的假设。经过类似的检测和度量值计算,然后与上一次度量值进行比较。从列表中删除具有较大度量值的假设候选符号,并丢弃其对应的发送符号矢量估计值。

继续上述过程,直至列表中仅剩一个候选符号。那么,这个剩余候选符号所对应的发送符号矢量估计值作为最终检测结果。

从列表检测的上述详细步骤可以看出,第一检测子层符号的估计值是在星座中候选,能够获得最大分集 M 。假设在 OSIC 检测中每一层都没出现错误,则列表检测算法所有子层获得的分集增益分别为 $M, M-N+2, \dots, M$ 。与 OSIC 检测相比,原来有可能带来错误传播且性能最弱的第一检测子层现在变成了与 ML 检测具有相同分集的最可靠子层。由于第一检测子层的可靠性,对剩余子层的 OSIC 检测能获得 $M-N+2$ 的分集,相比只用 OSIC 检测又增加了一个分集。总之,分集的增加和错误传播概率的减小显著提高了列表检测的性能。

4.2 算法的检测排序

与 OSIC 检测类似,列表检测的子层检测排序与信道矩阵(如果采用 MMSE-OSIC 检测,还须考虑噪声方差)有关。应该注意到,列表检测的最佳排序与 OSIC 检测的最佳排序是不同的。这是因为列表检测的第一检测子层不再是最弱层。实际上,无论何种信道条件,第一检测子层都是最可靠的、具有全分集的 ML 检测层。因此,第一检测子层应该选择对应于 OSIC 检测中最差子信道那层,从而为后续的 OSIC 检测保留较好的子信道。第一子层检测完后,剩余子层按照 OSIC 检测进行排序检测。

子层排序概括如下:

(1)通过应用 OSIC 检测的排序方法,选择具有最小检测后信噪比的最差子层作为第一检测子层。根据文献[3],第 k_i 层检测后的信噪比为

$$POST-SNR_{k_i} = \frac{E\{\|s_{k_i}\|^2\}}{\sigma_n^2 \|\mathbf{w}_{k_i}\|^2} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{w}_{k_i} = (\mathbf{G})_{k_i}$, $(\mathbf{G})_{k_i}$ 表示 \mathbf{G} 的第 k_i 行。对于 ZF-OSIC 检测,均衡矩阵 $\mathbf{G} = \mathbf{H}^\dagger = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H$,而对于 MMSE-OSIC 检测,均衡矩阵为 $\mathbf{G} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \sigma_n^2 \mathbf{I}_N)^{-1} \mathbf{H}^H$ 。

(2)继续按照 OSIC 检测的排序方法,在剩余子层中根据最大检测后信噪比确定最佳检测子层,迭代检

测多次,直至检测出所有子层。

4.3 算法的衍生变异

出于不同的应用环境和目的,提出的列表检测算法可以衍生出一些变异算法。在本节中,我们针对大星座调制、大发送天线数目和相关 MIMO 信道这三种情形提出了两种变异的列表检测算法。

对于大星座调制(例如 64QAM 甚至 256QAM),此时系统的计算复杂度是我们主要关心的问题。文献[10]提出的预处理技术可以使得列表变小,从而减小了计算复杂度。在初始阶段,我们可以应用线性检测或 OSIC 检测获得发送符号矢量的初步估计值。然后基于一定准则在初步估计值中选择某一层作为下一阶段的第一检测层,而候选符号列表可以设置为仅包含上述选择层估计值的相邻星座点(包括估计值本身)构成的集合。通过预处理技术,列表检测可以在一个较小的列表上进行,显著降低了计算复杂度。然而,这也会引起系统的检测性能一定程度的恶化。

对于较大发送天线数目这种情形,如果对于复杂度的约束不是很严格,或者是小星座调制(如 QPSK、BPSK)时,列表可以进一步扩展。也就是说,列表大小不一定限制为仅包含对应于第一检测子层的一维星座点数目;列表也可以是二维的或者更高维的,其中每一维对应于一个检测子层。基于二维(或高维)列表的变异算法以复杂度的增加为代价进一步提高了检测符号的分集,从而提高了系统的整体检测性能。对于相关 MIMO 信道,二维(或高维)列表检测算法可以获得对空间相关更强的鲁棒性。

至此,给出列表检测算法具体流程。

假设是 P 维列表检测,而列表的每维中包含所有星座点,即有 P 个子层进行 ML 检测,剩余 $N-P$ 个子层进行 OSIC 检测。可以按如下步骤进行:

(1) 子层排序

为了阐述方便,式(1)的系统模型重新写为

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{Q}\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{s} + \mathbf{n} = \bar{\mathbf{H}}\bar{\mathbf{s}} + \mathbf{n} \quad (6)$$

其中 \mathbf{Q} 是置换矩阵,它是根据 4.2 子层排序方法获得的, $\bar{\mathbf{H}} = \mathbf{H}\mathbf{Q}$ 是置换后信道矩阵, $\bar{\mathbf{s}} = \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{s}$ 是置换后发送符号矢量。

将 $\bar{\mathbf{H}}$ 和 $\bar{\mathbf{s}}$ 分别写成块矩阵的形式,有

$$\bar{\mathbf{H}} = [\bar{\mathbf{H}}_1 : \bar{\mathbf{H}}_2] \quad (7)$$

$$\bar{\mathbf{s}} = [\bar{\mathbf{s}}_1^T : \bar{\mathbf{s}}_2^T]^T \quad (8)$$

其中, $\bar{\mathbf{H}}_1 \in \mathbb{C}^{M \times P}$ 由 $\bar{\mathbf{H}}$ 的前 P 列组成, $\bar{\mathbf{s}}_1 \in \mathbb{C}^P$ 由 $\bar{\mathbf{s}}$ 的前 P 行组成, $\bar{\mathbf{s}}_1$ 从包含 Ω^P 个候选值的列表中进行候选。

(2) 干扰抵消

令 $\bar{\mathbf{s}}_1^{(k)}$ 表示列表中第 k ($1 \leq k \leq \Omega^P$) 个候选值,对其进行干扰抵消,有

$$\mathbf{r}^{(k)} = \mathbf{r} - \mathbf{H}_1 \bar{\mathbf{s}}_1^{(k)} \quad (9)$$

(3) OSIC 检测

对 $\bar{\mathbf{s}}_2$ 进行 OSIC 检测,当采用 ZF-OSIC 检测时有

$$\hat{\bar{\mathbf{s}}}_2^{(k)} = \text{ZF-OSIC}(\bar{\mathbf{r}}^{(k)}, \bar{\mathbf{H}}_2) \quad (10)$$

而当采用 MMSE-OSIC 检测时有

$$\hat{\bar{\mathbf{s}}}_2^{(k)} = \text{MMSE-OSIC}(\bar{\mathbf{r}}^{(k)}, \bar{\mathbf{H}}_2, \sigma_n^2) \quad (11)$$

(4) 合并

将 $\bar{\mathbf{s}}_1^{(k)}$ 和 $\hat{\bar{\mathbf{s}}}_2^{(k)}$ 合并起来,则有

$$\hat{\bar{\mathbf{s}}}^{(k)} = \left[(\hat{\bar{\mathbf{s}}}_1^{(k)})^T, (\hat{\bar{\mathbf{s}}}_2^{(k)})^T \right]^T \quad (12)$$

(5) 最小欧氏距离计算和最终判决

对 Ω^P 个 $\hat{\bar{\mathbf{s}}}^{(k)}$ 进行欧氏距离计算,并找出具有最小欧氏距离的 $\hat{\bar{\mathbf{s}}}^{(\hat{k})}$,其中,

$$\hat{k} = \arg \min_k \left\{ \left\| \mathbf{r} - \bar{\mathbf{H}} \hat{\bar{\mathbf{s}}}^{(k)} \right\|^2 \right\} \quad (13)$$

则列表检测最终判决为:

$$\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{Q} \hat{\bar{\mathbf{s}}}^{(\hat{k})} \quad (14)$$

4.4 计算复杂度分析

由于 P 个层在列表中候选,所以最终有 Ω^P 个候选发送符号矢量。对于式(9)的干扰抵消,需 $M\Omega^P$ 次复数乘法;结合表 1 知对于(10)的 ZF-OSIC 检测,需

$$\left[(N-P)^4 + \left(\frac{5}{2} + \frac{2}{3}M \right) (N-P)^3 + \left(\frac{7}{2} + M \right) (N-P)^2 + \frac{1}{3}M(N-P) \right]$$

Ω^P 次复数乘法;而对于式(13)的欧氏距离计算,需 $M(N+1)\Omega^P$ 次复数乘法。因此,未排序的基于 ZF-OSIC 检测的列表检测算法的总复杂度为

$$\left\{ MP + \left[(N-P)^4 + \left(\frac{5}{2} + \frac{2}{3}M \right) (N-P)^3 + \left(\frac{7}{2} + M \right) (N-P)^2 + \frac{1}{3}M(N-P) \right] + M(N+1) \right\} \Omega^P \quad (15)$$

第 5 节的性能仿真主要考虑了 $P=1$ 时基于 ZF-OSIC 检测的排序方法,通过观察式(5)知,我们只需找出均衡矩阵 $\mathbf{G} = \mathbf{H}^\dagger = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H$ 中行范数最大的信道矩阵 \mathbf{H} 对应的那一行作为第一检测层即可。计算 \mathbf{G} 需要 $4N^3 + 2N^2M$ 次复数乘法,而计算行范数需要 NM 次复数乘法。

5 性能仿真和复杂度比较

系统仿真参数为:4 发 4 收、4 发 6 收和 6 发 6 收 V-BLAST 系统,调制方式为 QPSK,仿真信道均采用准

静态瑞利平坦衰落信道。假设接收端确知信道状态信息,且能够保证精确同步。仿真中加入了空间相关性的影响,发送及接收相关矩阵采用式(3)的指数相关矩阵。此外,信噪比定义为 $SNR = E\{\|\mathbf{H}\mathbf{s}\|^2\} / E\{\|\mathbf{n}\|^2\}$, 算法性能以误比特率(BER)来衡量。

图2研究了信噪比 $SNR = 20dB$ 时4发4收V-BLAST系统ZF-OSIC、QRD-M、ML和本文提出的列表检测($P=1$ 和 $P=2$)等算法在不同相关系数 ρ 下的BER性能。可以看出,一维List算法性能明显优于ZF-OSIC算法,而排序一维List算法优于未排序一维List算法,且与ML算法性能差距较小。

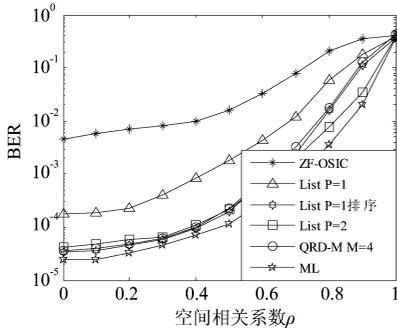


图2 4发4收系统20dB时各种算法随相关系数变化的BER性能曲线

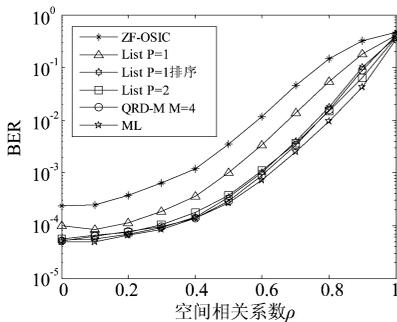


图3 4发6收系统15dB时各种算法随相关系数变化的BER性能曲线

图3研究了信噪比 $SNR = 15dB$ 时4发6收V-BLAST系统ZF-OSIC、QRD-M、ML和本文提出的列表检测($P=1$ 和 $P=2$)等算法在不同相关系数 ρ 下的BER性能。随着接收天线数目的增加,各种算法的分集得到了显著增加,BER性能都有所提升。从图中可以看出:一维List算法性能明显优于ZF-OSIC算法,而排序一维List算法优于未排序一维List算法,且与ML算法性能差距较小。

为了研究本文算法在较大天线数目下的检测性能,图4给出了6发6收QPSK调制V-BLAST系统在信噪比为 $SNR = 20dB$ 时ZF-OSIC、QRD-M、ML和本文提

出的列表检测($P=1$ 和 $P=2$)等算法在不同空间相关系数 ρ 下的BER性能。可以看出,排序的一维List算法显著优于未排序一维List算法,且在低相关情形下好于QRD-M与二维List算法。

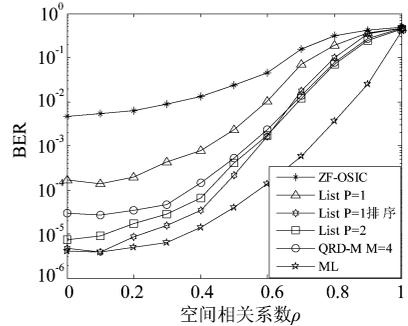


图4 6发6收系统20dB时各种算法随相关系数变化的BER性能曲线

图5给出了在不同天线配置情形下QPSK调制V-BLAST系统中ZF-OSIC、QRD-M、ML和本文提出的列表检测($P=1$ 和 $P=2$)等算法的计算复杂度。因为每种算法的开销是基于硬件实现的,为此,我们只统计算法的复数乘法数量来提供一个粗略的复杂度估计。可以看出,列表检测算法的复杂度相比ML算法有着显著的降低,比ZF-OSIC算法稍大,但以复杂度的增加换取了较大的性能改善。此外,在 $P=1$ 时,与QRD-M算法相比,提出的排序列表算法具有更好的性能,同时具有更低的复杂度。总之,本文算法实现了性能和复杂度之间较好的折衷,是一种较好的实用选择。

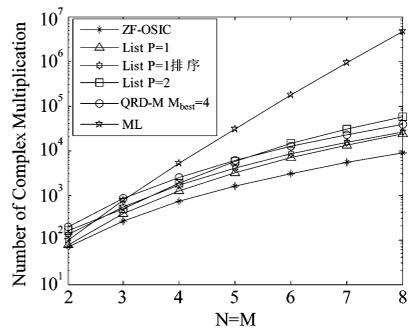


图5 不同天线配置情形下各种算法复杂度曲线

6 结束语

本文提出了一种接近最佳ML性能的列表检测算法。该算法在不显著增加复杂度的前提下,能保证检测符号获得较高的分集,从而提高了系统的检测性能。为了获得更好的检测性能,本文考虑了子层检测排序问题;出于不同的应用环境和目的,本文讨论了算法的衍生变异问题;最后,本文还给出了所提列表检测算法的计算

复杂度表达式。仿真和复杂度比较结果表明,提出的列表检测算法明显优于 ZF-OSIC 算法,甚至接近 ML 检测的性能;与 QRD-M 算法相比,提出的列表检测算法具有更好的性能,同时具有更低的复杂度;此外,该列表检测算法对 MIMO 信道的空间相关也具有较强的鲁棒性。总之,本文提出的列表检测算法实现了性能和复杂度之间较好的折衷,是一种较好的实用选择。

参考文献

- [1] G. J. Foschini. Layered space-time architecture for wireless communication in fading environment when using multiple antennas [J]. Bell Labs Technical Journal, 1996, vol. 1, no. 2:41-59.
- [2] J. Jalden and B. Ottersten. An exponential lower bound on the expected complexity of sphere decoding. in Proc. IEEE ICASSP2004 [C], Montreal Canada, May. 2004: 393-396.
- [3] G. D. Golden, G. J. Foschini, R. A. Valenzuela, and P. W. Wolniansky. Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture [J]. Electronics Letters, 1999, vol. 35, no. 1:6-7.
- [4] W. H. Chin. QRD Based Tree Search Data Detection for MIMO Communication Systems [A]. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) [C], Stockholm, Sweden, 2005, 3:1624-1627.
- [5] 熊春林. MIMO 系统的信号检测及迭代接收技术研究 [D]. [博士论文]. 长沙:国防科学技术大学, 2009.
- [6] L. G. Barbero and J. S. Thompson. Performance of the complex sphere decoder in spatially correlated MIMO channels [J]. IET Commun., 2007, vol. 1, no. 1:122-130.
- [7] V. Tarokh, N. Seshadri, A. R. Calderbank. Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1998, vol. 44, no. 2:744-765.
- [8] L. Zheng and D. N. C. Tse. Diversity and Multiplexing: A Fundamental Tradeoff in Multiple-Antenna Channels [J]. IEEE Trans. on Information Theory, May 2003, vol. 49, no. 5:1073-1096.
- [9] K. Adnan, N. Muhammad, and I. S. Syed. A particle swarm algorithm for symbols detection in wideband spatial multiplexing systems [A]. GECCO '07 [C], London UK, July 2007:63-69.
- [10] B. Kim and K. Choi. A Very Low Complexity QRD-M Algorithm Based on Limited Tree Search for MIMO Systems [A]. in Vehicular Technology Conference. VTC Spring 2008 [C], May 2008:1246-1250.

作者简介



王海红(1984-),男,硕士研究生,研究方向为 MIMO 系统的检测技术。

成文婧(1985-),女,博士研究生,研究方向为空时编码和检测技术。

王欣(1980-),男,博士,讲师,研究方向为多天线系统中的编码及检测技术。

魏急波(1967-),男,教授,博士生导师,研究方向为通信信号处理与通信网络。