

基于空间交替广义最大似然的低复杂度列表检测

景常乐¹, 王欣¹, 魏急波¹, 陈彬¹, 吴世奇²

(1. 国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中国西南电子技术研究所, 四川 成都 610036)

摘要:针对 V-BLAST 系统, 提出了一种低复杂度的空间交替广义最大似然 (SAGL) 列表检测算法。该算法的子检测器由简化最大似然 (SML) 检测器和连续干扰抵消 (SIC) 检测器组成。传统 SIC 算法每次只能对单一符号进行检测, 而所提算法则利用相邻符号进行联合滑动检测, 可以获得更高的分集增益。此外, 所提 SAGL 算法对检测结果进行迭代修正来进一步提升检测性能。分析与仿真结果表明, 与传统列表检测算法相比, 所提 SAGL 列表检测算法以少许复杂度的增加为代价显著提升了检测性能。

关键词: MIMO; 列表检测; SAGL 算法; 连续干扰抵消

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

Space alternating generalized maximum-likelihood based low-complexity list detection algorithm

JING Chang-le¹, WANG Xin¹, WEI Ji-bo¹, CHEN Bin¹, WU Shi-qi²

(1. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: A space-alternating generalized maximum-likelihood (SAGL) list detection algorithm with lower-complexity for V-BLAST systems was proposed. The sub-detector involved in the proposed list detection algorithm consisted of simplified maximum-likelihood (SML) detectors and successive interference cancellation (SIC) detectors. The proposed algorithm could utilize adjacent symbols to realize joint-sliding detection to achieve higher diversity gain, while the traditional SIC algorithm was only able to detect a single symbol each time. Moreover, the proposed SAGL algorithm could further iteratively improve the detection results. Analysis and simulation results present the corresponding enhanced performance at the cost of slightly increased complexity, compared with the traditional list detection algorithm.

Key words: MIMO, list detection, SAGL algorithm, successive interference cancellation

1 引言

多输入多输出 (MIMO) 技术通过在发射与接收端配置多根天线, 能够提高数据传输速率和频谱利用率。在 V-BLAST 系统中, 信号检测是 MIMO 技术实现的最大瓶颈之一。通过穷举搜索, 最大似然 (ML) 检测能够获得最优性能, 实现全分集增益。然而, ML 检测的复杂度随着天线数增加呈指数级增长, 因此难以实用。线性检测和 SIC 检测的复杂度虽低, 但其性能与 ML 检测存在较大差距。因此, 人们提出了多种近似最优或

次优的检测算法^[1], 主要包括树搜索检测^[2,3], 格基约减辅助的检测^[4-6]、列表检测^[1]。树搜索检测算法能够实现接近 ML 检测的性能^[3], 但其复杂度仍然较高。格基约减算法作为一种矩阵预处理算法, 可以显著改善传统低复杂度检测算法的性能, 但也显著增加了检测复杂度。以 SIC 作为子检测器的列表检测算法在检测性能与复杂度之间取得了较好的折中, 但其检测性能与 ML 检测仍有差距。文献[7]将广义空间交替 EM(SAGE)算法^[8]应用于列表检测, 改善了列表检测性能。然而, 该算法每次对单一符号进行检测或修正, 没有充

收稿日期: 2015-07-07; 修回日期: 2016-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61401492)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61401492)

分利用符号间的相关特性，导致其性能较差。由上可知，研究具有低复杂度和优异性能的检测算法仍然是 MIMO 系统有待解决的问题。

本文提出了一种基于空间交替广义最大似然的低复杂度列表检测算法，相比传统列表 SIC 检测，该算法复杂度稍有增加，但获得显著的性能提升。首先，本文提出了一种低复杂度列表检测算法，子检测器为改进的 SML-SIC 检测，它由简化最大似然(SML)检测器和连续干扰抵消(SIC)检测器组成。SML 检测器为基于列表的二维 MIMO 检测器，它以更低的复杂度达到和二维 ML 检测相同的性能。改进的 SML-SIC 检测每次用 SML 检测器对 2 个符号进行检测，输出第 1 个符号的检测结果，并选取离第 2 个检测结果最近的一些节点作为下一次 SML 检测的候选星座点，然后用 SML 检测器对下一个符号进行检测。相比传统 SIC 每次只能对单一符号进行检测，改进算法利用相邻符号联合滑动检测，使每个符号获得更高的分集增益。另外，在空间交替广义 EM 算法的基础上，提出了空间交替广义最大似然(SAGL)算法，它对输入的初始值进行空间交替迭代更新，使其收敛到误差矢量平方和更小的输出值。SAGL 算法可以对传统 MIMO 检测结果进行迭代修正，获得比 SAGE 更好的性能改善。最后，将提出的 SAGL 算法应用于提出的列表检测算法中，利用 SAGL 算法对所提出的列表检测的候选结果进行修正，可以进一步改善所提出的列表检测性能。分析与仿真结果表明，提出的基于空间交替广义最大似然的列表检测算法，可以获得接近 ML 检测的性能，其复杂度远低于 QRM-MLD 检测^[9,10]，且在 QRM-MLD 检测每层保留较少节点时，性能优于 QRM-MLD。

2 系统模型

2.1 MIMO 系统模型

考虑具有 N_t 根发送天线和 N_r ($N_r \geq N_t$) 根接收天线的 MIMO 系统。 H 为 $N_r \times N_t$ 维的复衰落信道矩阵。令 s 表示 $N_t \times 1$ 维的发送复信号矢量，每个发送天线的平均发送功率归一化为 1，即 $E\{ss^H\} = I_{N_t}$ ，那么 $N_r \times 1$ 维的接收信号矢量 y 可表示为

$$y = Hs + n \quad (1)$$

其中， n 表示 N_r 个接收天线上方差为 s_n^{-2} 的加性高斯噪声矢量， $E\{nn^H\} = s_n^{-2} I_{N_r}$ 。假设信道矩阵 H 的元素是方差为 1 的独立高斯随机变量，且信道信息在接收端完全已知。

2.2 ML 检测

最优 ML 检测算法搜索信号集 \mathcal{O}^{N_t} 中的所有点，找到使下式最小的点 \hat{s}_{ML}

$$\hat{s}_{ML} = \arg \min_{s \in \mathcal{O}^{N_t}} \|y - Hs\| \quad (2)$$

ML 检测能够获得全接收分集增益，但由于要遍历搜索所有可能的发送信号，使其计算复杂度随着天线数及调制阶数的增加呈指数级增加。

2.3 SIC 检测

信道矩阵 H 可以分解为 $H = QR$ ，其中， Q 是 $N_r \times N_r$ 的酉矩阵，即 $Q^H Q = I$ 。 R 是 $N_r \times N_t$ 的上三角矩阵。用 Q^H 左乘接收信号 y ，式(1)则为

$$\mathcal{Y} = Q^H y = Q^H (Hs + n) = Rs + h \quad (3)$$

其中， $h = Q^H n$ ，由于 Q 是酉矩阵，噪声项 h 的统计特性保持不变。

在 SIC 检测中，首先，对 s_{N_t} 进行检测， $\hat{s}_{N_t} = Q \left(\frac{\mathcal{Y}_{N_t}}{R_{N_t, N_t}} \right)$ ， $Q(\cdot)$ 表示依据星座图对检测结果做出硬判决，可以看出这个检测过程不包含其他干扰。然后，当该符号被检测出来后，从接收信号矢量中减去此符号的影响，并对下一个符号进行检测，直到所有符号被检测出来。SIC 检测存在误码传播，为解决这个问题，可以对检测符号进行排序，从而减少误码传播的影响。

2.4 基于列表的 SIC 检测

SIC 检测中最先检测的符号可靠性很低，这导致错误传播，使检测性能较差。为了减弱误码传播的影响，可以选择多个候选符号建立一个判决列表，使最先检测的符号受到保护。这种检测算法即为基于列表的 SIC 检测，其算法流程如下。

第 1 步 对信道矩阵进行排序的 QR 分解，得到酉矩阵 Q 和上三角矩阵 R 。QR 分解过程中，按照 R 矩阵的对角线元素从小到大排序，然后从第 N_t 个符号开始检测。如果列表长度等于星座点数量 $|\mathcal{O}|$ ，那么第一层完全受到保护，则排序时 R 矩阵的第 N_t 列对角线元素最小，其他 $N_t - 1$ 列按照 R 对角元素从小到大排序。

第 2 步 选择列表长度 $q(q \leq |\mathcal{O}|)$ ，并对 s_{N_i} 建立长度为 q 的候选列表 $\{s_{N_i}^{(1)}, s_{N_i}^{(2)}, \dots, s_{N_i}^{(q)}\}$ 。列表由信号集中的与 \hat{s}_{N_i} 最接近的 q 个元素组成，其中，

$$\hat{s}_{N_i} = \frac{\mathcal{Y}_{N_i}}{R_{N_i, N_i}}$$

第 3 步 从接收矢量 \mathcal{Y} 中减去候选列表中每一个 $s_{N_i}^{(j)} (j = 1, \dots, q)$ ，得到 q 个消除 s_{N_i} 影响的剩余残差矢量列表 $\{\mathcal{Y}^{(1)}, \mathcal{Y}^{(2)}, \dots, \mathcal{Y}^{(q)}\}$ 。

$$\mathcal{Y}^{(j)} = \mathcal{Y} - R_{N_i} s_{N_i}^{(j)}, 1 \leq j \leq q \quad (4)$$

第 4 步 将 $\mathcal{Y}^{(1)}, \mathcal{Y}^{(2)}, \dots, \mathcal{Y}^{(q)}$ 输入子检测器，得到其余 $N_i - 1$ 个符号的检测结果 $\{\bar{s}^{(1)}, \bar{s}^{(2)}, \dots, \bar{s}^{(q)}\}$ 。令 $s^{(j)} = [\bar{s}^{(j)}; s_{N_i}^{(j)}] (j = 1, 2, \dots, q)$ 组成检测结果的候选列表 $\{s^{(1)}, s^{(2)}, \dots, s^{(q)}\}$ 。其中，子检测器为 SIC 检测。

第 5 步 从列表 $\{s^{(1)}, s^{(2)}, \dots, s^{(q)}\}$ 中选取与 \mathcal{Y} 距离最近的点作为最终的检测输出，即

$$\hat{s} = \arg \min_{s^{(j)} \in \{s^{(1)}, s^{(2)}, \dots, s^{(q)}\}} \|\mathcal{Y} - R s^{(j)}\|^2 \quad (5)$$

对于列表检测，列表长度越长，检测性能越好，但复杂度也会越高；另外，子检测器对列表检测性能有很大影响，子检测器的性能越好，列表检测的检测性能也相应越好。

3 基于空间交替广义最大似然的列表检测

3.1 列表检测

基于列表的 SIC 检测可以减弱传统 SIC 检测的误码传播，但当发送天线数较多时，其性能与 ML 性能仍然存在很大差距。因此，提出一种改进的 SML-SIC 检测，并将其作为列表检测的子检测器，获得比基于列表的 SIC 检测更好的性能。相比 SIC 算法每次只对一个符号检测，改进的 SML-SIC 检测算法利用相邻符号联合滑动检测，每个符号获得更高的分集增益。改进算法每次用 SML 检测器对 2 个符号进行检测，输出第 1 个符号的检测结果，并选取离第 2 个检测结果最近的一些节点作为下一次检测的候选星座点，然后用 SML 检测器对下一个符号进行检测。本文提出的改进的 SML-SIC 检测原理框如图 1 所示。

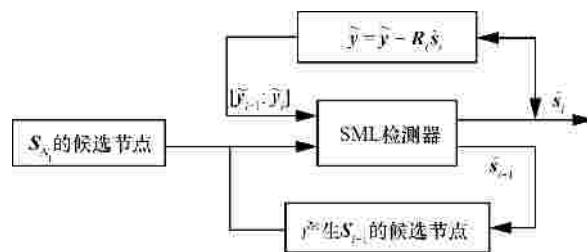


图 1 改进的 SML-SIC 算法的原理

SML 检测器将 2×2 ML 检测的搜索空间从二维降为一维。 2×2 ML 检测器必须在 $|\mathcal{O}|^2$ 个候选发送符号矢量确定的搜索空间中进行最佳发送符号矢量搜索。假设发送符号矢量为 $[s_1, s_2]^T$ ， s_1 和 s_2 分别表示第 1 根发送天线和第 2 根发送天线上的符号，它们之间相互独立。简化最大似然检测算法中，搜索空间中的候选发送符号矢量减少为 $m(m \leq |\mathcal{O}|)$ 个。首先，对 s_2 建立长度为 m 的候选列表，对 m 个可能的 s_2 通过干扰抵消方法计算相应的 s_1 ，这样，搜索空间就由 m 个候选发送符号矢量构成；最后，计算接收符号矢量与信道矩阵和搜索空间中每一个候选发送符号矢量乘积的欧氏距离 $\|\mathcal{Y} - R s^{(j)}\|$ ，并找出具有最小欧氏距离的发送符号矢量，即得到最佳发送符号矢量 $[\hat{s}_1, \hat{s}_2]^T$ 。

改进的 SML-SIC 检测步骤如下。

- 1) 选取候选星座点数 m ，并取信号集 \mathcal{O}_{N_i} 中离 \hat{s}_{N_i} 最近的 m 个节点 $\{s_{N_i}^{(1)}, s_{N_i}^{(2)}, \dots, s_{N_i}^{(m)}\}$ 作为候选信号节点，其中， \hat{s}_{N_i} 为 s_{N_i} 的 SIC 检测结果。置 $l = N_i$ 。
- 2) 如果 $l = 1$ ，则停止，否则用 SML 检测器对 $[s_l, s_{l-1}]^T$ 进行检测，得到检测结果 $[\hat{s}_l, \hat{s}_{l-1}]^T$ ，将 \hat{s}_l 作为第 l 个符号的最终检测结果，且在 \mathcal{Y} 中减去 \hat{s}_l 的影响，并选取信号集 \mathcal{O}_{l-1} 中离 \hat{s}_{l-1} 最近的 m 个节点作为候选信号节点 $\{s_{l-1}^{(1)}, s_{l-1}^{(2)}, \dots, s_{l-1}^{(m)}\}$ ，用于 SML 检测器对下一个符号进行检测。
- 3) 假设 $l = 2$ ，将 SML 的检测结果 $[\hat{s}_2, \hat{s}_1]^T$ 都作为最终检测结果。置 $l = l - 1$ ，转步骤 2)。

上面算法中的 SML 检测，也可采用更高维的 ML 检测器，每次对更多的符号进行检测，维数越高，性能越好，但复杂度也越高。本文算法中采用二维的 ML 检测器，并基于列表思想把搜索空间降为一维，达到较低的复杂度。

3.2 空间交替广义最大似然算法

文献[7]将空间交替迭代广义 EM 算法用于列表

检测中，进一步改善列表检测性能。SAGE 算法辅助的 MIMO 检测将高维信号检测问题转化为一系列独立的一维信号检测问题，每次迭代基于 EM 准则只对单个符号进行检测校正，这个过程忽略了发送符号间的干扰，没有很好地利用信号矢量各符号之间的相关性，无法获得较好的检测修正效果。

本文对 SAGE 算法进行改进，提出空间交替广义最大似然算法，可对传统 MIMO 检测结果进行交替迭代修正，使输入值收敛到更加接近于 ML 检测的输出值，提出的算法获得比 SAGE 算法更好的性能改善。SAGL 算法中的“广义最大似然”检测器在子掩空间对部分符号进行 ML 联合检测更新。“子掩空间”是检测空间的一个低维子空间，并且这个子空间不去考虑其他已检测的错误符号对其造成的干扰，然而这种干扰并没有消除，只是在子掩空间将其“掩盖”掉，因此将这种子空间定义为“子掩空间”，子掩空间中进行的“最大似然”检测称为“广义最大似然 (GML)”检测。

SAGL 算法中用 ML 准则替代 EM 准则，将高维信号检测问题转化为一系列独立的二维信号检测问题，每次迭代用 GML 检测器对 2 个符号进行检测修正。相比 SAGE 算法，这可以减小其他符号对待修正符号的干扰影响，从而改善算法的检测修正性能。此外，ML 准则在 MIMO 检测中具有更大的优势，SAGL 算法基于最大化受约束的似然函数思想，利用了信号矢量各符号间的相关性，采用低维 ML 检测器进行多符号联合检测修正，可获得更好的检测修正效果。

下面简单介绍提出的 SAGL 算法过程。引入中间变量 z ，式(1)系统模型可以等价

$$z = \mathbf{h}_i s_i + \mathbf{h}_j s_j + \mathbf{n}$$

$$= [\mathbf{h}_i, \mathbf{h}_j] \begin{bmatrix} s_i \\ s_j \end{bmatrix}, 1 \leq i, j \leq N_t \quad (6)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{z} + \sum_{v=1, v \neq i, j}^{N_t} \mathbf{h}_v s_v \quad (7)$$

其中， \mathbf{h}_i 为信道矩阵 \mathbf{H} 的第 i 列。令 $f(z; s_i, s_j)$ 表示以 s_i, s_j 为参数 z 的似然函数， $\hat{s}^{(k)}$ 表示第 k 次迭代对 s 的估计。则

$$[\hat{s}_i; \hat{s}_j]_{\text{ML}} \triangleq \max_{s_i, s_j \in \Omega} f(z; s_i, s_j) = \min_{s_i, s_j \in \Omega} \left\| z - [\mathbf{h}_i, \mathbf{h}_j] \begin{bmatrix} s_i \\ s_j \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (8)$$

SAGL 算法过程如下。

初始化 $\hat{s}_i^{(0)}, 1 \leq i \leq N_t$;

第 $k+1$ 次迭代： $i = 1 + [k \bmod N_t], j = N_t - [k \bmod N_t]$;

计算

$$\mathbf{z} = \mathbf{y} - \sum_{v=1, v \neq i, j}^{N_t} \mathbf{h}_v s_v^{(k)} \quad (9)$$

则

$$[s_i; s_j]^{(k+1)} = \min_{s_i, s_j \in \Omega} \left\| z - [\mathbf{h}_i, \mathbf{h}_j] \begin{bmatrix} s_i \\ s_j \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (10)$$

对所有 $1 \leq v \leq N_t$ ，且 $v \neq i, j$ ，都有 $\hat{s}_v^{(k+1)} = \hat{s}_v^{(k)}$ 。

在上面的 GML 检测中，可用 $n \times n (1 \leq n \leq N_t)$ 的 ML 检测器对 n 个符号联合修正， n 越大，性能越好，但复杂度也越高。取 $n=2$ ，可以采用 SML 检测器，使算法复杂度较低。SAGL 算法的复杂度和 SAGE 算法基本相同，每一次迭代复杂度为 $O(N_t^2)$ ，且收敛速度较快。

3.3 基于 SAGL 的列表检测

前面提出的空间交替广义最大似然算法可对 MIMO 检测结果进行迭代修正，使输入值收敛到误差矢量平方和更小的输出值，从而改善检测性能。在第 1 节提出的列表检测算法可以获得比传统列表 SIC 检测算法更好的性能，然而，当系统维数过高时，所提列表检测算法与 ML 检测性能仍有差距。因此，本文将提出的 SAGL 算法与所提出的列表检测算法相结合，可以进一步改善所提出的列表检测性能，这即为基于空间交替广义最大似然的列表检测算法。

4 结果分析

4.1 BER 性能

本节对不同系统和不同调制方式的算法性能进行仿真，比较提出的列表检测算法和类似算法的 BER 性能。在仿真中，所有信道系数都服从独立的瑞利衰落。

图 2 为提出算法对 4×4 MIMO 系统 8-PSK 调制时的 BER 性能，其中， $m=4$ ，QRM-MLD 算法中的 q 代表每层保留的路径数。从图中可以看出，基于列表的 SIC 检测获得比 SIC 检测更好的性能。在相同的列表长度下，相比基于列表的 SIC 检测，提出的列表检测获得显著的性能提升。另外，SAGL

和 SAGE 算法进一步改善了列表检测的性能, 基于 SAGL 的列表检测获得比基于 SAGE 的列表检测更好的性能。当 $q=4$ 时, 相比基于列表的 SIC 检测, 基于 SAGL 的列表检测在 $BER=10^{-4}$ 时获得 4 dB 的性能提升。另外, 当 $q=8$ 时, 基于列表的 SIC 检测与 ML 检测在 $BER=10^{-5}$ 时仍有 0.5 dB 的差距, 但本文算法可以完全达到 ML 性能。

图 3 为本文算法对 4×4 MIMO 系统 16-QAM 调制时的 BER 性能, 其中, $m=8$ 。可以看出, 当 $q=8$ 时, 基于 SAGL 的列表检测算法在 $BER=10^{-4}$ 获得比基于列表的 SIC 检测好 4 dB 的性能增益。另外, 当 $q=16$ 时, 基于列表的 SIC 检测与 ML 检测仍有较小的差距, 但所提算法可以完全达到 ML 性能。当 $q=4$ 和 $q=8$ 时, 基于 SAGL 的列表检测性能比 QRM-MLD 更好。

图 4 为本文算法对于 8×8 MIMO 系统 16-QAM 调制时的 BER 性能, 其中 $m=8$ 。和图 2 不同, 当 $q=16$ 时 基于 SAGL 的列表检测性能在 $BER=10^{-5}$

时比 QRM-MLD 差 1 dB, 但相比基于列表的 SIC 检测, 基于 SAGL 的列表检测算法在 $BER=10^{-5}$ 时仍获得 2 dB 的性能提升。

另外, 本文算法中的 SML 检测可采用更高维的 ML 检测器, 维数越高, 算法性能越好, 但复杂度也会越高。对于 4×4 MIMO 系统, 本文算法中采用一维搜索的 SML 检测器已经可以达到 ML 性能。然而, 对于 8×8 MIMO 系统, 算法中采用一维搜索的 SML 检测器达不到 ML 性能, 但已经取得较好的检测性能, 如果将算法中的 SML 检测改为更高维的 ML 检测, 如基于列表的 3×3 MIMO 检测, 就可能达到 ML 性能。

4.2 复杂度比较

考虑乘法、除法和平方根运算的数量, 不同检测算法和复杂度如表 1 所示^[11,12], 表中, M 代表 QRM-MLD 算法每层保留的路径数, q 为列表检测算法的列表长度, m 为改进的 SML-SIC 算法中的候选星座点数, k 为 SAGE 或 SAGL 算法的迭代次数。

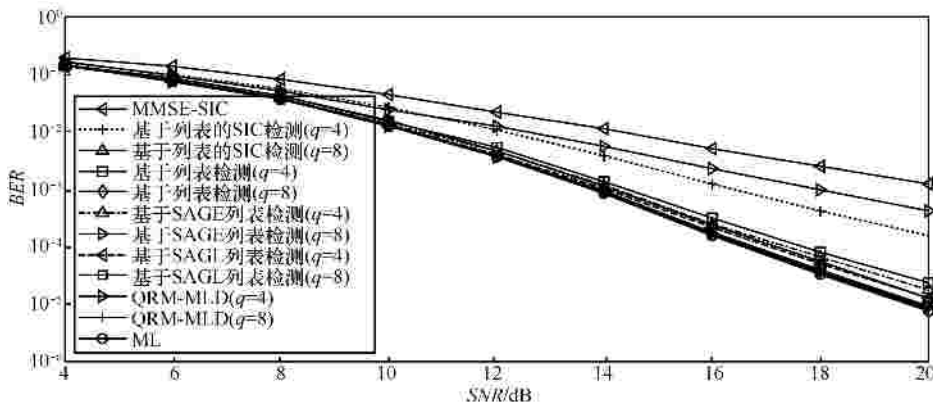


图 2 不同检测器对 4×4 MIMO 系统 8-PSK 调制时的 BER 性能

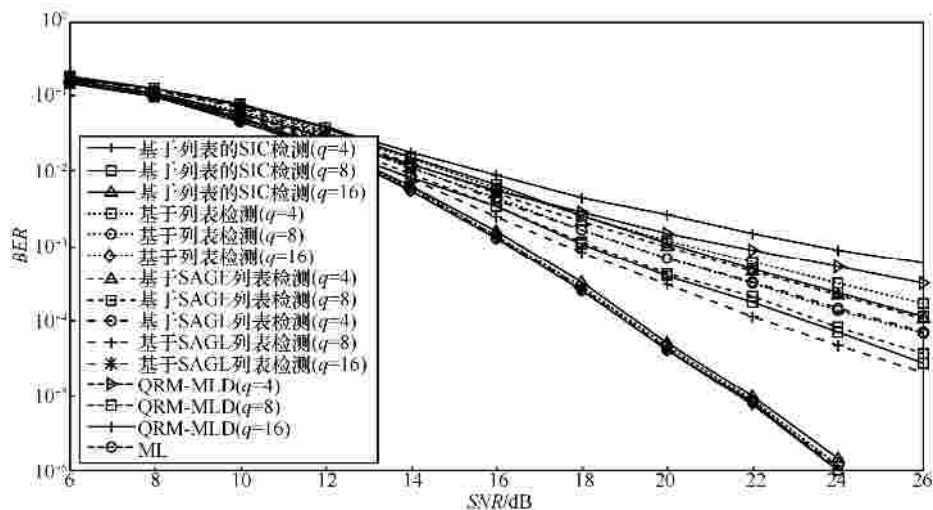


图 3 不同检测器对 4×4 MIMO 系统 16-QAM 调制时的 BER 性能

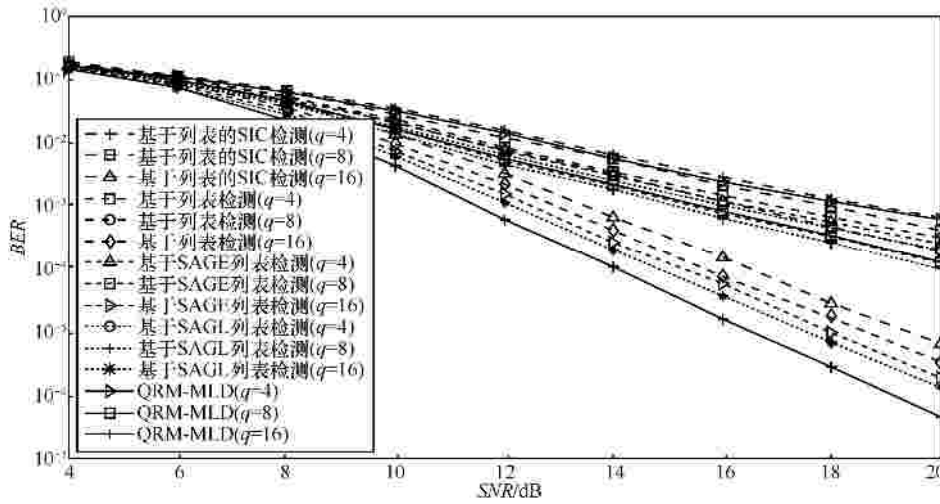


图 4 不同检测器对 8×8 MIMO 系统 16-QAM 调制时的 BER 性能

表 1 不同检测算法的复杂度比较

检测算法	步骤	乘法数量	除法数量	平方根数量
QRM-MLD	QR 分解	$8N_r N_t^2$	$4N_r^2$	$2N_t$
	$\mathcal{Y} = \mathcal{Q}^H \mathbf{y}$	$4N_r N_t$	0	0
	路径扩展	$2M(\Omega N_t^2 + 3 \Omega N_t - 4 \Omega + 2)$	0	0
基于列表的 SIC 检测	信道矩阵 H 排序	$4N_r N_t^2 + 2N_r N_t$	0	0
	QR 分解	$8N_r N_t^2$	$4N_r^2$	$2N_t$
	$\mathcal{Y} = \mathcal{Q}^H \mathbf{y}$	$4N_r N_t$	0	0
	SIC 检测器	$2(N_t^2 - N_t)$	$2(N_t - 1)$	0
	ML 检测	$q(2N_t^2 + 3N_t)$	0	0
基于 SAGL 的列表检测	信道矩阵 H 排序	$4N_r N_t^2 + 2N_r N_t$	0	0
	QR 分解	$8N_r N_t^2$	$4N_r^2$	$2N_t$
	$\mathcal{Y} = \mathcal{Q}^H \mathbf{y}$	$4N_r N_t$	0	0
	改进的 SML-SIC	$2(N_t^2 + 6mN_t - 6m - N_t)$	$2m(N_t - 1)$	0
	SAGE 算法	$k(4N_r N_t + 8N_r - 4N_t)$	k	0
	SAGL 算法	$k(4N_r N_t + 16mN_t - 8N_t)$	km	0
	ML 检测	$q(2N_t^2 + 3N_t)$	0	0

对于 16QAM 调制，不同检测算法的复杂度如图 5 所示，其中， $p=16, m=8$ 。从图中可以看出，相比基于列表的 SIC 检测，提出算法的乘法、除法和平方根总数量稍有增加，但其远少于 QRM-MLD 的数量。

5 结束语

本文提出一种基于 SAGL 的低复杂度列表检测算法，获得接近 ML 的检测性能。首先提出改进的 SML-SIC 检测算法，每次用 SML 检测器对

2 个符号进行检测并产生下一次 SML 滑动检测的候选列表；然后将本文算法作为列表检测的子检测器，获得比基于列表的 SIC 检测更好的性能。另外，SAGL 算法可对传统 MIMO 检测结果进行修正，在每次迭代过程中，用最大化受约束的对数似然比对 2 个符号进行检测校正，使误差矢量平方和更小。SAGL 算法将输入的初始值收敛到误差矢量平方和更小的输出值。将 SAGL 算法应用于提出的列表检测中，即为基于 SAGL 的列表检测。

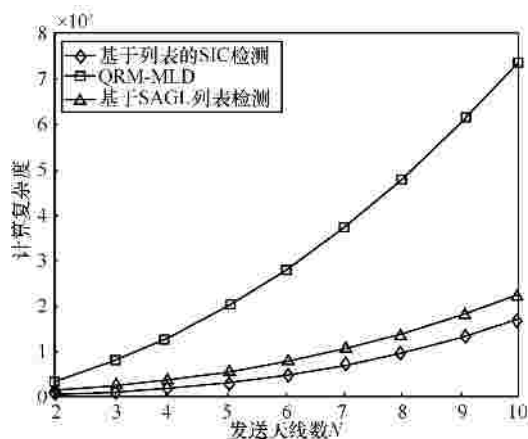


图 5 不同检测算法的计算复杂度比较

相比基于列表的 SIC 检测，SAGL 列表检测算法复杂度稍有增加，但获得更好的检测性能。另外，本文算法复杂度远低于 QRM-MLD，但获得接近 QRM-MLD 的检测性能。

参考文献：

[1] TSE D, VISWANATH P. Fundamentals of wireless communication[M]. Cambridge University Press, 2005.

[2] BARBERO L G, THOMPSON J S. Performance analysis of a fixed complexity sphere decoder in high dimensional MIMO systems[C]/Proc IEEE ICASSP '06. Toulouse, France, c2006: .

[3] KIM H, PARK J, LEE H, et al. Near-ML MIMO detection algorithm with LR-aided fixed-complexity tree searching[J]. IEEE Communications Letts, 2014, 18(12):2221-2224.

[4] SENNING C, BRUDERER L, HUNZIKER J, et al. A lattice reduction aided MIMO channel equalizer in 90 nm CMOS achieving 720 Mbit/s[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: Regular Papers, 2014. 61(6):1-12.

[5] CHEN C, SHEEN W. A new lattice reduction algorithm for LR-aided MIMO linear detection[J]. IEEE Transactions on Wireless communications, 2011, 10(8):2417-2422.

[6] ZHAO K, DU S. Full-diversity approximated lattice reduction algorithm for low complexity MIMO detection[J]. IEEE Communications Letts, 2014, 18(6):1079-1082.

[7] XIE Y, LI Q, GEORGHIADIS C N. On some near optimal low complexity detectors for MIMO fading channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(4):1182-1186.

[8] FESSLER J A, HERO A O. Space-alternating generalized expectation-maximization algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(10):2664-2677.

[9] KIM K J, ILTIS R A . Joint detection and channel estimation algorithms for QS-CDMA signals over time-varying channel[J]. IEEE Transactions on Communication, 2002, 50:845-855 .

[10] KAWAI H, HIGUCHI K, MAEDA N, et al. Likelihood function for QRM-MLD suitable for soft decision Turbo decoding and its performance for OFCDM MIMO multiplexing in multipath fading chan-

nel[J]. IEICE Transactions on Communication, 2005, 88(1):47-57.

[11] ZHANG W, MA X, SWAMI A. Designing low-complexity detectors based on Seysen's algorithm[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2010, 9(10):3301-3311.

[12] ZU K, DE LAMARE R. Low-complexity lattice-reduction-aided regularized block diagonalization for MU-MIMO systems[J]. IEEE Communications Letts, 2012, 16(6):925-928.

作者简介：



景常乐 (1991-)，男，甘肃泾川人，国防科学技术大学硕士生，主要研究方向为 MIMO 检测。



王欣 (1980-)，男，陕西汉中，博士，国防科学技术大学讲师，主要研究方向为通信信号处理与通信系统。



魏急波 (1967-)，男，湖北汉川人，国防科学技术大学教授、博士生导师，主要研究方向为通信信号处理与通信网络。



陈彬 (1988-)，男，江西上饶人，国防科学技术大学博士生，主要研究方向为 MIMO 检测、大规模 MIMO 与物理层安全技术。



吴世奇 (1983-)，男，四川犍为人，中国西南电子技术研究所高级工程师，主要研究方向为宽带无线通信系统与信号处理技术。