

## 空间相关环境下一种稳健的 V-BLAST 迭代检测算法

景小荣<sup>①</sup> 周正中<sup>①</sup> 张天骐<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

<sup>②</sup>(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

**摘要:**利用 Householder 变换,并结合 WY 表示形式,该文首先提出一种修正的 Householder QR 分解(M-H-QRD)算法,与排序 QRD(S-QRD)检测算法相比: M-H-QRD 检测算法在空间相关信道环境下具有稳健的数值特性;然后以此为基础,提出了一种基于 M-H-QRD 的 V-BLAST 迭代检测算法。仿真结果表明:在空间相关信道环境下,该算法比 S-QRD 检测算法、M-H-QRD 检测算法在性能上具有明显的改善;与标准的 V-BLAST 算法相比,在高信噪比范围,迭代检测算法取得了与标准的 V-BLAST 算法几乎同等的性能,在中低信噪比范围,迭代检测算法优于标准的 V-BLAST 检测算法,同时数值特性比标准的 V-BLAST 检测算法更为稳健。

**关键词:** V-BLAST 系统; 迭代检测; 空间相关信道; 数值稳健性

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1410-05

## A Robust Iterative Detection Algorithm for V-BLAST over Spatially Correlated Channels

Jing Xiao-rong<sup>①</sup> Zhou Zheng-zhong<sup>①</sup> Zhang Tian-qi<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

<sup>②</sup>(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** Utilizing the Householder transformation, and combining with the WY representation, a Modified Householder QR-Decomposition (M-H-QRD) algorithm is proposed firstly. In contrast to the sorted QRD (S-QRD) detection algorithm, the M-H-QRD detection algorithm has robust numerical property. Then an iterative detection algorithm for V-BLAST is proposed based on M-H-QRD. The simulation results show that the iterative detection algorithm can achieve obvious performance improvement over the S-QRD detection algorithm and the M-H-QRD detection algorithm. In contrast to the standard V-BLAST algorithm, the iterative detection algorithm has almost the same detection performance as it for high SNR, and outperforms it in the moderate and low SNR region with more robust numerical property.

**Key words:** V-BLAST system; Iterative detection; Spatially correlated channels; Numerical robustness

### 1 引言

在独立的瑞利衰落信道环境,多输入多输出(MIMO)技术可以成倍地提高通信系统的频谱利用率<sup>[1]</sup>。垂直分层空时结构(V-BLAST)<sup>[2]</sup>,作为 MIMO 技术的一种实现方案,由于结构简单易于实现,受到各国学者的极大关注。在 V-BLAST 的发射端,信源输出的原始比特数据流经串/并转换,形成多路并行比特数据,每路比特数据经过调制,形成数据符号,然后被送入相应的发射天线,每路数据符号称为一传输层,接收端根据接收天线阵列接收到的并行信号,采用标准的 V-BLAST 检测算法<sup>[2]</sup>来恢复对应发射天线上的数据符号,然后经过解调、并/串转换,恢复出原始比特数据

流。

对于收发天线数目较大的系统, V-BLAST 检测算法的复杂度相当可观,因此, Wübben 等人提出了一种基于修正 Gram-Schmidt(MGS)算法实现的、低复杂度的 S-QRD 检测算法<sup>[3]</sup>,该算法在相对较低信噪比下的检测性能与标准的 V-BLAST 算法一致,但随着信噪比的提高,它们之间的性能差距有扩大的趋势。在实际中,由于受空间限制,收发天线数目较少的 V-BLAST 系统,将具有更高的实用价值,因此本文主要针对这类系统。对于收发天线数较少的 V-BLAST 系统,从理论上讲,最大似然(ML)或者球形译码(SD)算法<sup>[4]</sup>是最优的,但对于高阶调制系统,它们的计算复杂度相当高。而 V-BLAST 检测算法与 S-QRD 检测算法,它们的计算复杂度几乎与调制方式无关,且相对来说都较低。但是,这两种算法最初都是基于独立衰落信道环境的假设提出

2008-08-04 收到, 2008-12-04 改回

国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院 NSAF 联合基金项目(10776040)资助课题

的,在实际的无线通信环境中,由于本地散射体的局域分布和天线阵元之间的有限距离等因素,MIMO 信道的各子信道间很难满足独立衰落假设,而是存在相关性。信道相关性的存在,不但削弱了系统从信道获得的空间分集增益<sup>[5]</sup>,使得 V-BLAST 检测算法与 S-QRD 检测算法的性能下降,而且很容易导致数值不稳定,数值不稳定的原因可借助信道矩阵的条件数来分析。由于信道实现的随机性,MIMO 信道矩阵  $\mathbf{H}$  的条件数  $\text{Cond}(\mathbf{H}) (> 1)$  为一随机变量,除非特殊情况,很难取得  $\text{Cond}(\mathbf{H})$  概率分布的解析表达式。相比独立衰落信道环境,在空间相关信道环境,MIMO 信道矩阵的实现样本中,具有较大条件数的概率要比独立衰落信道环境高,并且随着空间相关性增强,该概率也随之增加。由文献[2]知:V-BLAST 检测算法需要计算信道矩阵  $\mathbf{H}$  的伪逆,而伪逆运算对矩阵的条件数十分敏感,当伪逆运算作用于具有较高条件数的信道矩阵时,很容易导致数值不稳定<sup>[6]</sup>;另外,当采用 MGS-QRD 算法对信道矩阵  $\mathbf{H}$  进行 QRD 时, $\mathbf{Q}$  矩阵的正交化误差等于机器精度  $\varepsilon$  与信道矩阵条件数  $\text{Cond}(\mathbf{H})$  之积,而采用基于 Householder 变换实现的 QRD(H-QRD),其对应的  $\mathbf{Q}$  矩阵的正交化误差仅为  $\varepsilon$ <sup>[6]</sup>,这意味着对于空间相关信道矩阵,H-QRD 具有稳健的数值特性,但对于 MGS-QRD,特别当其作用于具有较高条件数的信道矩阵时,很容易导致数值不稳定。S-QRD 只是 MGS-QRD 的一种推广,因此二者具有类似的数值特性。

针对数值稳定性问题,文中采用 Householder 变换,并结合 WY 表示形式,提出了一种修正的 H-QRD 分解算法(M-H-QRD),在空间相关信道环境中,与 S-QRD 检测算法相比:基于 M-H-QRD 的 V-BLAST 检测算法(简称 M-H-QRD 检测算法)在有限数值精度下,具有稳健的数值特性;在浮点机器精度,尽管 S-QRD 检测算法与 M-H-QRD 检测算法性能一致,但是,与标准的 V-BLAST 算法相比,特别是较高信噪比情况下,性能差距在 2dB 左右,因此提出了一种以 M-H-QRD 为基础的迭代检测算法:通过迭代来提高各检测层的分集增益从而提高检测的可靠度,进而减小了层间误符号传播,新算法在高信噪比情况下,取得了与 V-BLAST 同等的性能,在中低信噪比情况下,优于标准的 V-BLAST 算法。

## 2 系统与信道模型

### 2.1 系统模型

考虑具有  $t$  根发射天线和  $r$  根接收天线的 V-BLAST 系统( $t \leq r$ ),假设接收端与发射端处于理想的同步状态。记  $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_r]^T$  为接收信号矢量,  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_t]^T$  为发射符号矢量,其中分量  $x_i \in \Psi$  ( $\Psi$  代表调制符号集合),假设各分量相互独立,平均符号能量记为  $E_s$ 。在某一离散时刻,发射符号矢量  $\mathbf{x}$  与接收到的基带信号矢量  $\mathbf{y}$  之间的关系可用下式来表示:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中  $\mathbf{H}$  为符合平坦衰落规律的 MIMO 相关信道矩阵,即在  $L$  个符号周期内,信道的变化可忽略不计; $\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_r]^T$  代表  $r$  维零均值复高斯噪声矢量,满足关系  $E(\mathbf{n}\mathbf{n}^H) = \sigma_n^2 \mathbf{I}_r$ 。文中定义输入信噪比  $\text{SNR} = (t \cdot E_s) / \sigma_n^2$ 。

### 2.2 相关信道模型

相关信道矩阵  $\mathbf{H}$  可在独立衰落信道矩阵  $\mathbf{H}_w$  模型的基础上引入信道的相关性来得到<sup>[7]</sup>:

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

其中相关矩阵  $\mathbf{R}_r$  和  $\mathbf{R}_t$  中的元素可定义为  $[\mathbf{R}_r]_{m,n} = \rho((n-m)\Delta_r, \bar{\theta}_r, \delta_{\theta-r})$ ,  $[\mathbf{R}_t]_{m,n} = \rho((n-m)\Delta_t, \bar{\theta}_t, \delta_{\theta-t})$ , 其中  $\Delta_r$ ,  $\bar{\theta}_r$  和  $\delta_{\theta-r}$  分别表示相邻接收天线之间的相对间距、平均到达角和散射体相对接收天线的角度扩展。类似地,  $\Delta_t$ ,  $\bar{\theta}_t$  和  $\delta_{\theta-t}$  分别表示相邻发射天线之间的相对间距、平均发射角和散射体相对发射天线的角度扩展。根据部分假设<sup>[7]</sup>,  $\rho((n-m)\Delta, \bar{\theta}, \delta_\theta)$  可用下式来近似:

$$\rho((n-m)\Delta, \bar{\theta}, \delta_\theta) = \exp(-1/2[2\pi(m-n)\Delta \sin(\bar{\theta})\delta_\theta]^2 - j2\pi(m-n)\Delta \cos(\bar{\theta})) \quad (3)$$

## 3 修正的 Householder QR 分解(M-H-QRD)及其性能分析

S-QRD 算法,因计算高效在独立衰落信道环境得到广泛的引用<sup>[8,9]</sup>,但在相关信道环境下,该算法容易导致数值不稳定,因此本节利用 Householder 变换,并结合 WY 表示形式<sup>[10]</sup>,提出了一种修正的 Householder QR 分解(M-H-QRD)算法,在有限数值精度下,与 S-QRD 算法相比,M-H-QRD 算法具有稳健的数值特性。

### 3.1 M-H-QRD 检测算法

M-H-QRD 算法通过对信道矩阵的列向量重新排列,期望 QRD 后,  $\mathbf{R}$  矩阵主对角线元素的绝对值具有从上而下递增的特点,即期望重新排列后的各待检符号层的后检测信噪比由上而下逐渐增大,实际上,一次 QR 分解无法取得这种结果,尽管如此,与基本的 QRD 检测算法相比,该算法在一定程度上也减小了层间的误符号传播;另外,M-H-QRD 算法采用 WY 表示形式来计算最终的  $\mathbf{Q}$  矩阵,从而避免了计算一系列 Householder 矩阵之积,提高了计算效率,但数值特性保持不变<sup>[10]</sup>。

首先给出 Householder 变换的定义,然后给出 M-H-QRD 检测算法的具体步骤。

**Householder 变换** 对于任意不为零的矢量  $\mathbf{a} = [a_1, \dots, a_K]^T \in \mathcal{C}^K$  ( $\mathcal{C}$  表示复数集),满足  $\mathbf{a}_1 = |a_1| e^{i\theta}$ , 其中  $\theta \in \mathcal{R}$  ( $\mathcal{R}$  表示实数集),存在复 Householder 变换矩阵  $\mathbf{B} = \mathbf{I}_K - \beta \mathbf{v}\mathbf{v}^H$ , 其中  $\mathbf{v} = \mathbf{a} \pm e^{i\theta} |a_1| \mathbf{e}_1$ ,  $\beta = 2/\mathbf{v}^H \mathbf{v}$ ,  $\mathbf{e}_1$  为  $K$  维坐标向量(除第 1 个元素为 1 外,其余元素为 0),使得  $\mathbf{B}\mathbf{a} = \mp e^{i\theta} |a_1| \mathbf{e}_1$ ,  $\mathbf{v}$  中正负号的选择应使  $|\mathbf{v}|$  最大,文中以  $[\mathbf{v}, \beta] = \text{House}(\mathbf{a})$  标记。

M-H-QRD 检测算法的具体步骤如下(为便于表述,部分采用 MatLab 标记):

输入  $\mathbf{H}, \mathbf{y}$

部分 1 M-H-QRD 过程

初始化  $\begin{cases} \mathbf{R} = \mathbf{H}, & \mathbf{s} = [1, 2, \dots, t] \\ \mathbf{m}(l) = \|\mathbf{R}(:, l)\|^2, & l = 1, 2, \dots, t \end{cases}$

步骤 1 令  $i = 1$ 。

步骤 2 令  $k_i = \arg \min_{j=i, \dots, t} \mathbf{m}(j)$ , 交换矩阵  $\mathbf{R}$  的第  $i$  列和第  $k_i$  列, 即:  $\mathbf{R}(:, i) \Leftrightarrow \mathbf{R}(:, k_i)$ , 并分别交换矢量  $\mathbf{s}$  与  $\mathbf{m}$  中第  $i$  个和第  $k_i$  个元素, 即  $\mathbf{s}(i) \Leftrightarrow \mathbf{s}(k_i)$ ,  $\mathbf{m}(i) \Leftrightarrow \mathbf{m}(k_i)$ 。

步骤 3 根据  $[\mathbf{v}_i, \beta_i] = \text{House}(\mathbf{R}(i:r, i))$ , 第  $i$  个 Householder 变换矩阵  $\tilde{\mathbf{H}}_i = \mathbf{I}_{r-i+1} - \beta_i \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H$ 。同时定义扩展 Householder 矢量  $\bar{\mathbf{v}}_i = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ \mathbf{v}_i^T]^T$ 。如果  $i = 1$ , 令

$\mathbf{Y} = \bar{\mathbf{v}}_i$ ,  $\mathbf{W} = -\beta_i \bar{\mathbf{v}}_i$ ; 否则定义矩阵  $\mathbf{G} = -\beta_i (\mathbf{I}_r + \mathbf{W} \mathbf{Y}^H) \bar{\mathbf{v}}_i$ , 令  $\mathbf{Y} = [\mathbf{Y} \ \bar{\mathbf{v}}_i]$ ,  $\mathbf{W} = [\mathbf{W} \ \mathbf{G}]$ 。

步骤 4 更新矩阵  $\mathbf{R}$ :  $\mathbf{R}(i:r, i:t) = \tilde{\mathbf{H}}_i \mathbf{R}(i:r, i:t)$ 。

步骤 5 更新矢量  $\mathbf{m}$ :  $\mathbf{m}(j) = \mathbf{m}(j) - |\mathbf{R}(i, j)|^2$ ,  $j = i+1, i+2, \dots, t$ 。

步骤 6 如果  $i = t$ , 转至步骤 7; 否则  $i = i+1$ , 转至步骤 2。

步骤 7 输出:  $\mathbf{Q} = \mathbf{I}_r + \mathbf{W} \mathbf{Y}^H$ ,  $\mathbf{R}$  及  $\mathbf{s}$ 。

注意 为便于后面表述, 用函数  $[\mathbf{Q} \ \mathbf{R} \ \mathbf{s}] = \text{M-H-QRD}(\mathbf{H})$  标记上述的 M-H-QRD 过程。

部分 2 检测过程

步骤 8 令  $\tilde{\mathbf{Q}} = \mathbf{Q}(1:t, :)$ , 则有  $\tilde{\mathbf{y}} = \tilde{\mathbf{Q}}^H \mathbf{y}$ 。

步骤 9

$\begin{cases} \text{for } k = t : -1 : 1 \\ \hat{\mathbf{x}}(k) = \min_{x \in \psi} |\tilde{\mathbf{y}}(k) - \sum_{j=k+1}^t \mathbf{R}(k, j) \hat{\mathbf{x}}(j) - \mathbf{R}(k, k) x|^2 \\ \text{end for} \end{cases}$

步骤 10 最终检测到的符号矢量  $\hat{\mathbf{x}}$  可根据记录有符号置换信息的矢量  $\mathbf{s}$ , 通过调整符号矢量  $\hat{\mathbf{x}}$  中元素的次序来确定, 即  $\hat{\mathbf{x}}(\mathbf{s}(k)) = \hat{\mathbf{x}}(k)$ , 其中  $k = 1, 2, \dots, t$ 。

### 3.2 M-H-QRD 检测算法与 S-QRD 检测算法之间的性能对比

在本小节, 将 M-H-QRD 检测算法和 S-QRD 检测算法作以对比, 从算法流程上来看, 这两种检测算法的本质区别在于采用了不同的 QRD 算法, 尽管 M-H-QRD 检测算法在步骤 3, 采用  $\mathbf{W} \mathbf{Y}$  表示形式, 以递推的方式来计算最终的  $\mathbf{Q}$  矩阵, 与原始的 H-QRD 相比, 计算量大幅度下降, 但就整个算法的计算复杂度来说, 仍略高于 S-QRD 检测算法, 但远低于标准的 V-BLAST 检测算法, 不过对于收发天线数目较小的 V-BLAST 系统来说, 这三种检测算法的计算复杂度本来就很低, 所以文中对它们的计算复杂度对比不作考虑。如果从纯数学的角度来讲, M-H-QRD 与 S-QRD 是等价的, 因此, 在浮点精度下, 基于这两种 QRD 实现的检测算法,

具有同样的符号错误率(SER); 但是在实际的通信系统中, 由于硬件设计尺寸和功耗的限制, 只能采用有限字长来实现, 因此, 文中重点考察了这两种检测算法在有限字长精度下的特性, 以及与空间相关强度的关系。

**3.2.1 浮点数的有限字长(FWL)表示** 在实际硬件实现过程中, 由于硬件设计尺寸和功耗的限制, 只能采用 FWL 来表示对应的浮点数, 形式如图 1 所示, 其中包括符号比特位、整数比特位和小数比特位 3 部分。文中符号比特和整数比特位数和用  $W_i$  表示, 小数部分所用比特位数用  $W_f$  表示, 因此总字长  $TWL = W_i + W_f$ , 图 1 所能表示的浮点数的动态变化范围为:  $-2^{W_i - W_f - 2} \sim 2^{W_i - W_f - 2}$ , 精度  $\zeta = 2^{-(W_f - 1)}$ 。

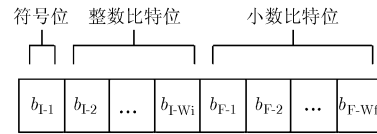


图 1 浮点数的有限字长表示

**3.2.2 性能对比** 考虑一个 4 发 4 收的 V-BLAST 系统, 并选取如下的物理参数来构建空间相关信道: 收发天线阵均采用均匀线阵, 阵元间相对距离  $\Delta_r = \Delta_t = 0.25$ ; 发射天线阵的平均发射角与接收天线阵的平均到达角相等,  $\bar{\theta}_t = \bar{\theta}_r = 45^\circ$ ; 发射天线阵和接收天线阵的角度扩展相等,  $\delta_{\theta-t} = \delta_{\theta-r} = \{90^\circ, 60^\circ, 40^\circ\}$ ; 由式(3)可知: 满足此物理条件的信道环境, 相邻天线间的相关系数的绝对值  $\alpha = |\rho(\Delta, \bar{\theta}, \delta_\theta)| \approx \{0.2, 0.5, 0.7\}$ , 分别对应弱相关, 中等相关和强相关 3 种信道环境。借助于计算机仿真进行性能对比, 调制方式采用 16QAM,  $L = 100$ 。

本文首先给出 M-H-QRD 检测算法和 S-QRD 检测算法在浮点机器精度下的仿真结果, 如图 2 所示, 从图上可看出: 在浮点机器精度下, 二者具有同样的检测性能。对于 FWL 精度下的性能仿真, 为了尽可能减小来自接收天线噪声的影响, 图 3 仅给出最高信噪比(SNR=40dB)对应的结果。对于 FWL 中  $W_i$  的选择, 经过多次验证, 选择  $W_i=8$  已经足够可靠, 而精度主要由小数部分所用比特位数决定, 对于小数部分所需比特位数  $W_f$ , 本文选择其取值介于 8~18。可以看出, 当  $W_f$  足够大时, S-QRD 检测算法和 M-H-QRD 检测算法具有共同的符号差错平台(error floor), 该差错平台正好等于对应信噪比在浮点机器精度下的误符号率(SER), 但是 M-H-QRD 检测算法到达差错平台所需的  $W_f$  明显低于 S-QRD 检测算法所需, 从图 3 可进一步看出: M-H-QRD 检测算法对于这 3 种空间相关情况下, 到达差错平台所需的  $W_f$  基本保持恒定( $W_f \approx 12$ ), 而 S-QRD 检测算法到达差错平台所需的  $W_f$  不但大于 M-H-QRD 检测算法所需, 而且随着信道相关性增加呈现增长的趋势, 因此, 在 FWL 精度下, M-H-QRD 检测算法对于相关信道环境具有稳健的数值特性。从硬件设计的角度来考虑, 在不降低性能的前提下,

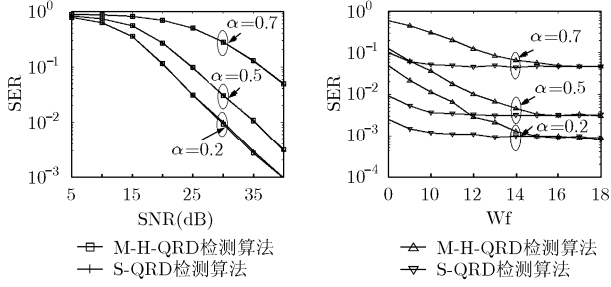


图2 浮点机器精度下的性能对比曲线(16-QAM)

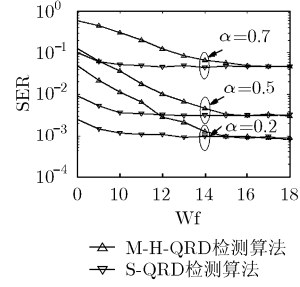


图3 FWL精度下的性能对比曲线(SNR=40dB,  $W_i=8$ , 16-QAM)

应该选择尽可能短的字长,因为硬件复杂度和功耗几乎随字长的增加线性增加<sup>[11]</sup>,因此M-H-QRD检测算法更适宜在定点结构下实现。

#### 4 基于M-H-QRD的V-BLAST迭代检测算法

从上节的性能对比中可以看出M-H-QRD检测算法在相关信道环境下具有稳健的数值特性,因此更适宜在相关信道环境中应用。然而,M-H-QRD检测算法,与基本的QRD检测算法一样,都是利用低分集增益的符号层的判决作为反馈量,进而逐层检测具有高分集增益的符号层,因此该算法并没有充分利用多天线提供的分集增益信息,导致系统的性能在很大程度上取决于最先检测符号的可靠程度。本文从提高各待检符号层的分集增益出发,提出了一种基于M-H-QRD的V-BLAST迭代检测算法。

基于M-H-QRD的V-BLAST迭代检测算法步骤如下( $H_k$ 表示消去矩阵 $H$ 中的第 $k$ 列):

输入  $H, y$

初始化 采用M-H-QRD检测算法(步骤1~步骤9),得到符号矢量 $\hat{x}$ 及矢量 $s^{(0)}$

步骤1 令 $\hat{x}^{(0)}(1) = \hat{x}(1)$

迭代过程

步骤2 令 $y^{(0)} = y - H(:, s^{(0)}(1))\hat{x}^{(0)}(1), H^{(0)} = H_{s^{(0)}(1)}$

步骤3 for  $j = 1, 2, \dots, t-1$

(a)  $[Q^{(j)} R^{(j)} s^{(j)}] = M-H-QRD(H^{(j-1)});$

(b)采用类似于M-H-QRD检测算法中的步骤8~步骤9,

得到检测序列 $\hat{x}^{(j)}(k), k = 1, \dots, t-j$ ,仅保留 $\hat{x}^{(j)}(1)$ ;

(c)更新接收矢量及信道矩阵:

$$y^{(j)} = y^{(j-1)} - H^{(j-1)}(:, s^{(j)}(1))\hat{x}^{(j)}(1), H^{(j)} = H_{s^{(j)}(1)}^{(j-1)}$$

end for

步骤4 更新 $\hat{x}^{(0)}(1)$ :

$$\hat{x}^{(0)}(1) = \max_{x \in \psi} \left\| y - \sum_{j=1}^{t-1} H^{(j-1)}(:, s^{(j)}(1))\hat{x}^{(j)}(1) - H(:, s^{(0)}(1))x \right\|$$

步骤5 根据 $s^{(0)}, s^{(1)}, \dots, s^{(t-1)}$ 及 $\hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(1)}(1), \dots, \hat{x}^{(t-1)}(1)$ ,通过适当的置换操作,得到最终检测符号矢量 $\hat{x}$ 。

从上述迭代检测过程可以看出:新算法多次采用

M-H-QRD检测算法,每次都是利用具有最高分集增益的符号层的判决作为反馈,来更新接收矢量及信道矩阵,因此该算法充分利用了多天线系统提供的分集信息。另外,由系统模型知:信道在 $L$ 个符号周期内保持不变,因此在 $L$ 个符号周期内,只需进行 $t$ 次M-H-QRD,分别针对 $r \times t, r \times (t-1), \dots, r \times 1$ 维信道矩阵。同时由3.2.2小节知:M-H-QRD具有稳健的数值特性,而上述V-BLAST迭代检测算法以M-H-QRD为核心,因此,该迭代检测算法同样也具有稳健的数值特性。

#### 5 性能评估

本节采用与3.3.2小节同样的信道物理参数及仿真条件,对基于M-H-QRD的V-BLAST迭代检测算法进行性能仿真,仿真结果如图4所示。为便于比较,图中同时给出了标准的V-BLAST检测算法、M-H-QRD检测算法在空间相关信道环境下的性能曲线。从图中可以看出:在相对较低的信噪比下,标准的V-BLAST检测算法与M-H-QRD、S-QRD检测算法具有同样的检测性能(同时参考图2),但随信噪比增大,性能差距逐渐增大,这点与文献[3]相同。但是基于M-H-QRD的V-BLAST迭代检测算法,在同等程度的空间相关信道环境下,明显优于M-H-QRD检测算法与S-QRD检测算法(同时参考图2);与标准的V-BLAST算法相比,在高信噪比情况下,迭代检测算法取得了与标准的V-BLAST检测算法几乎同等的性能,但对于中低信噪比情况,迭代检测算法优于标准的V-BLAST检测算法,这表明:基于M-H-QRD的V-BLAST迭代检测算法能使空间相关信道下的V-BLAST系统的检测性能得到一定程度上改善,同时也使系统的数值稳健性得到增强。

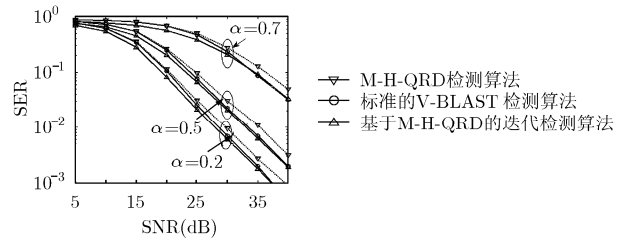


图4 基于M-H-QRD的V-BLAST迭代检测算法(16-QAM)

#### 6 结束语

针对MIMO相关信道环境,本文首先提出了一种数值稳健的QRD算法—M-H-QRD算法,重点考察了M-H-QRD检测算法与S-QRD检测算法在有限数值精度下的性能差别。然后以M-H-QRD为核心,提出了一种V-BLAST迭代检测算法,与M-H-QRD、S-QRD检测算法相比,迭代检测算法具有明显的性能优势,特别是对于中低信噪比,甚至优于标准的V-BLAST算法的性能。这些结论对于设计实际的V-BLAST接收机,具有一定的参考价值。下一步笔者希望

在条件具备时,能够在真正的硬件平台上验证上述算法。

### 参考文献

- [1] Biglieri E and Calderbank R, *et al.* MIMO Wireless Communications [M]. London: Cambridge University Press, 2007: 24-30.
- [2] Wolniansky P W, Foschini G J, and Golden G D. V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel [C]. IEEE ISSSE-98, Pisa, Italy, 1998: 295-300.
- [3] Wübben D and Rinas J, *et al.* Efficient algorithm for decoding layered space-time codes [J]. *Electronics Letter*, 2001, 37(22): 1348-1350.
- [4] Jaldén J and Ottersten B. On the complexity of sphere decoding in digital communications [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2005, 53(4): 1474-1484.
- [5] Rezki Z and Haccoun D, *et al.* Impact of spatial correlation on the finite-SNR diversity-multiplexing tradeoff [J]. *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, 2008, 7(4): 1184-1189.
- [6] Golub G H and Van Loan C F. Matrix Computations [M]. London: John Hopkins University Press, 1996, Chapter 5.
- [7] Bolcskei H and Borgmann M, *et al.* Impact of the propagation environment on the performance of space-frequency coded MIMO-OFDM [J]. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 2003, 21(3): 427-439.
- [8] Jung H and Cha J, *et al.* Efficient transmit power allocation and feedback reduction algorithm for SQRD based V-blast systems [C]. IEEE PIMRC-2007, Athens Greece, 2007: 1-5.
- [9] Lee Hyunseok and Jeon Hyoungsook, *et al.* Signal detection using log-likelihood ratio based sorting QR decomposition for V-BLAST systems [C]. IEEE VTC-2007, Dublin Ireland, 2007: 1881-1885.
- [10] Bischof C H and Van Loan C F. The WY representation for products of Householder matrices [J]. *SIAM J. Sci. and Stat. Comp.*, 1987, 8: 2-13.
- [11] Kim S and Kum Ki-Il, *et al.* Fixed-point optimization utility for c and c++ based digital signal processing programs [J]. *IEEE Trans. on Circuits Syst. II*, 1998, 11(45): 1455-1464.

景小荣: 男, 1974年生, 博士生, 研究方向为多天线系统的信号检测及信道估计.

周正中: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 主要的研究领域为通信信号处理.

张天骐: 男, 1971年生, 教授, 主要研究方向为通信信号处理、自适应信号处理及神经网络等.