

## 一种组合的 LSD 和 DFE V-BLAST 检测算法

肖海勇 毕光国 金秀峰

(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

**摘要:** 在多天线系统中, BLAST 是提高系统通信容量的有效方式。最简单的空间复用方式是 V-BLAST, 它的检测算法相对简单, 有 ZF-DFE, MMSE-DFE, ML 和 ML-DFE 等检测算法。该文在这几种算法的基础上, 讨论了改进 ML-DFE 性能的方法, 给出了 ZF 和 MMSE 方式的组合 LSD 和 DFE 检测算法。仿真表明 LSD 算法只需输出 3 个检测结果, 在复杂度增加不多的条件下, 就可以获得大的性能改进, 而 MMSE 方式的算法较 ZF 算法有更好的性能。

**关键词:** 列表球形译码; ZF-LSD-DFE 算法; MMSE-LSD-DFE 算法; V-BLAST

**中图分类号:** TN92

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2007)01-0143-05

## Combined LSD and DFE Detection for V-BLAST

Xiao Hai-yong Bi Guang-guo Jin Xiu-feng

(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** BLAST can effectively increase information rate in multi-antenna system. The simplest space multiplex method is V-BLAST, which has simple detection algorithm such as ZF-DFE, MMSE-DFE, ML and ML-DFE etc. This paper discussed methods to improve the ML-DFE algorithm, proposed combined LSD and DFE detection algorithm based on ZF and MMSE criteria. Simulation results show that large performance improvement can be obtained when the LSD algorithm output only 3 detection results, and the algorithm based on MMSE criteria has better performance than based on ZF criteria.

**Key words:** LSD; ZF-LSD-DFE algorithm; MMSE-LSD-DFE algorithm; V-BLAST

### 1 引言

随着无线通信的发展, 人们对容量的需求越来越大, 而无线频谱资源是有限的, 因此如何提高频谱资源的利用率成为研究的重点。在这样的背景下, 多天线系统(MIMO)由于其大容量特性, 日益得到人们的重视。所谓多天线系统是指发送端和接收端都使用多个天线的无线信道。一种获得 MIMO 信道容量的有效方式是空间复用, 最简单的复用方式是 V-BLAST<sup>[1]</sup>。要在系统中使用 V-BLAST, 就需要使用合适的检测算法, 在最初提出 V-BLAST 的文献[1]中采用了一种排序判决反馈(DFE)的迫零(ZF)算法进行检测, 这种算法复杂度低, 但是性能有限。与 ZF-DFE 类似, 还有一种采用 MMSE 准则的 MMSE-DFE 算法<sup>[2]</sup>, 性能较 ZF-DFE 有较大改进。而最佳的检测方法最大似然(ML)检测复杂度太高。需要寻找性能较 DFE 为好, 同时复杂度又不致增加太多的检测方法。

本文给出了一种采用组合的列表球形译码(LSD)<sup>[3]</sup>和判决反馈(DFE)对 V-BLAST 进行检测的算法, 并在 ZF 算法的基础之上给出了一种新的用 MMSE 准则进行预处理,

LSD 检测后再进行 DFE 的检测算法。算法首先对符号检测顺序进行排序, 得到检测所需的上三角矩阵后, 对其中  $l$  个发送数据进行 LSD 检测, LSD 检测给出离接收信号最近的  $P$  个结果, 然后分别用这  $P$  个结果进行 DFE 以检测剩下的发送信号, 从中选择最好的作为最终检测结果。ZF 和 MMSE 两种方法的区别在于反馈系数不同, 同时对检测顺序进行排序的排序算法也不同。仿真表明, LSD 算法只需输出 3 个检测结果就可以获得较大的性能改进。

### 2 系统模型

考虑一有  $m$  个发送天线,  $n$  个接收天线且  $n \geq m$  的平坦衰落 MIMO 系统。假设接收端知道信道信息。发送端首先将单个的信源数据流分流为  $m$  个子数据流, 每个数据流独立调制后在其相应天线上发送。接收端的数据由  $n$  个天线上的接收数据组成, 一个符号间隔内的接收数据可写为

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

其中  $\mathbf{H}$  为  $n \times m$  的信道矩阵, 其元素是独立同分布的均值为 0 方差为 1 的复高斯随机变量,  $\mathbf{s}$  为  $m \times 1$  维的取自 QAM 星座的发送数据矢量, 而  $\mathbf{n}$  为  $n \times 1$  维的加性高斯白噪声, 每一维是方差为  $\sigma_n^2$  的 0 均值复高斯分布。由于矩阵  $\mathbf{H}$  的元素服从相互独立的复高斯分布, 满秩的概率为 1, 有相关列

的可能性可以忽略不计。

式(1)可等价的写成下式:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{r}} &\triangleq \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{r}^T) & \text{Im}(\mathbf{r}^T) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{H}) & -\text{Im}(\mathbf{H}) \\ \text{Im}(\mathbf{H}) & \text{Re}(\mathbf{H}) \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{s}} + \tilde{\mathbf{n}} \\ &= \tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{s}} + \tilde{\mathbf{n}}\end{aligned}\quad (2)$$

式中  $\tilde{\mathbf{s}} \triangleq \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{s}^T) & \text{Im}(\mathbf{s}^T) \end{bmatrix}^T$ ,  $\tilde{\mathbf{n}} \triangleq \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{n}^T) & \text{Im}(\mathbf{n}^T) \end{bmatrix}^T$ , 而  $\text{Re}(x)$  和  $\text{Im}(x)$  分别表示变量  $x$  的实部和虚部。设  $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{Q}\mathbf{R}$  为其 QR 分解,  $\mathbf{Q}$  的列相互正交且模为 1,  $\mathbf{R}$  为上三角阵, 将式(2)两边同乘以  $\mathbf{Q}^T$  得

$$\mathbf{y} \triangleq \mathbf{Q}^T \tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{Q}^T \tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{s}} + \mathbf{Q}^T \tilde{\mathbf{n}} = \mathbf{R}\tilde{\mathbf{s}} + \boldsymbol{\eta}\quad (3)$$

由于  $\mathbf{Q}^T$  的正交归一性,  $\boldsymbol{\eta}$  与  $\tilde{\mathbf{n}}$  服从相同的分布, 方差为  $\sigma_n^2/2$ 。在信号  $s$  取自 QAM 调制时, 可针对式(3)采用球形译码(Sphere Decoding, SD)对  $\tilde{\mathbf{s}}$  进行最大似然检测。

### 3 V-BLAST 的判决反馈(DFE)检测

最简单的 V-BLAST 检测器是线性检测器(如 ZF 和 MMSE 检测器), 但是线性检测器性能非常有限, 且无法获得接收天线分集, 改进其性能的方法是采用排序的判决反馈(DFE)检测器。

#### 3.1 ZF-DFE 检测器

V-BLAST 可以在对信道矩阵  $\mathbf{H}$  进行 QR 分解后采用 ZF-DFE 检测。但是 DFE 检测器由于错误传播的影响, 头几个检测符号的准确性会严重影响随后符号的检测, 因此需要对检测顺序进行排序以每次检测都在所有未检测符号中选择可提供最可靠性能的符号检测, 与之对应  $\mathbf{H}$  需要进行相应的列排序。假设最佳的列排序为置换  $\pi$ , 那么  $\pi$  可由如下算法递归  $m$  次确定<sup>[1,4]</sup>:

设  $S_k$  表示尚未确定位置的列指标集, 那么对  $k$  由  $m$  到 1,  $\pi(k)$  依次由下式确定

$$\pi(k) = \arg \max_{j \in S_k} \left\{ \mathbf{h}_j^H \left[ \mathbf{I} - \mathbf{H}_{k,j} (\mathbf{H}_{k,j}^H \mathbf{H}_{k,j})^{-1} \mathbf{H}_{k,j}^H \right] \mathbf{h}_j \right\}\quad (4)$$

$\mathbf{h}_j$  表示  $\mathbf{H}$  的第  $j$  列, 而  $\mathbf{H}_{k,j}$  表示由  $i \in S_k - \{j\}$  的列  $\mathbf{h}_i$  构成的  $n \times (k-1)$  维的矩阵。

记排序后的矩阵为  $\mathbf{H}'$ , 其 QR 分解为  $\mathbf{H}' = \mathbf{Q}\mathbf{R}$ , 用  $\mathbf{Q}^H$  乘以接收信号得

$$\mathbf{y} \triangleq \mathbf{Q}^H \mathbf{r} = \mathbf{Q}^H \pi(\mathbf{H})\pi(\mathbf{s}) + \mathbf{Q}^H \mathbf{n} = \mathbf{R}\mathbf{t} + \tilde{\mathbf{n}}\quad (5)$$

式中  $\mathbf{t} = \pi(\mathbf{s})$ , 由于  $\mathbf{R}$  是上三角阵, 信号  $\mathbf{t}$  可采用回代的 DFE 方式按照第  $m$  个到第 1 个元素的顺序解调

$$\bar{t}_k = \text{demod} \left( \left[ y_k - \sum_{i=k+1}^m \mathbf{R}_{k,i} \cdot \bar{t}_i \right] / r_{k,k} \right)\quad (6)$$

式中  $\text{demod}(x)$  表示 QAM 解调, 即将  $x$  判为与其距离最近的星座点。 $\bar{\mathbf{s}} = \pi^{-1}(\bar{\mathbf{t}})$  即为发送信号  $s$  的检测结果。

#### 3.2 MMSE-DFE 检测器

由于 ZF 检测算法会放大噪声, 其性能不够理想, 更好的检测方式是采用 MMSE 算法。为了避免过多的放大噪声, 这种算法采用使噪声和干扰总和最小的加权检测系数。同

样, 在使用 MMSE-DFE 检测的 V-BLAST 中也需要对检测顺序进行排序使得每次都对可提供最可靠性能的符号进行检测, 以减轻错误传播的影响。采用 MMSE-DFE 进行排序检测的算法如下<sup>[2]</sup>:

设  $S_k$  表示尚未确定位置的列指标集,  $\mathbf{H}_k$  表示由  $i \in S_k$  的列  $\mathbf{h}_i$  构成的  $n \times k$  维的矩阵, 那么对  $k$  由  $m$  到 1,  $\pi(k)$  和矩阵  $\mathbf{Q}$  由如下步骤前 4 步递归地确定, 最后 1 步确定矩阵  $\mathbf{R}$ 。

$$(1) \text{ 计算矩阵 } \mathbf{V} = \left( \frac{m}{\text{SNR}} \mathbf{I} + \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k \right)^{-1}。$$

$$(2) \pi(k) = \arg \min_i \{ \mathbf{V}_{i,i} \}。$$

$$(3) \text{ 计算矩阵 } \left[ \mathbf{H}_k^T \sqrt{\frac{\text{SNR}}{m}} \mathbf{I} \right]^T \text{ 的广义逆 } \mathbf{C}_k =$$

$$\left[ \left[ \mathbf{H}_k^T \sqrt{\frac{\text{SNR}}{m}} \mathbf{I} \right]^T \right]^\dagger。$$

(4) 令矩阵  $\mathbf{Q}$  的第  $k$  列等于  $\mathbf{C}_k$  第  $\pi(k)$  行的头  $n$  个元素的共轭转置。

(5) 令  $\mathbf{R} = \mathbf{Q}^H \pi(\mathbf{H})$ ,  $\pi(\mathbf{H})$  表示对  $\mathbf{H}$  进行相应的列置换。

在将接收信号乘以矩阵  $\mathbf{Q}^H$  后有  $\mathbf{y} \triangleq \mathbf{Q}^H \mathbf{r} = \mathbf{Q}^H \pi(\mathbf{H})\pi(\mathbf{s}) + \mathbf{Q}^H \mathbf{n} = \mathbf{R}\mathbf{t} + \tilde{\mathbf{n}}$ , 可利用  $\mathbf{y}$  和矩阵  $\mathbf{R}$  的上三角部分对信号进行 DFE 检测, 其过程与 ZF-DFE 相同。

上面的 ZF-DFE 使用了信道  $\mathbf{H}$  的 QR 分解, MMSE-DFE 也使用了一种下三角部分很小的近似 QR 分解, 而球形译码中也需要对信道进行 QR 分解, 但是分解的对象是实矩阵  $\tilde{\mathbf{H}}$ 。为此可将 DFE 检测器中的信道改用  $\tilde{\mathbf{H}}$ , 只是这时式(6)中不再是 QAM 解调, 应改用 PAM 解调。为便于球形译码和 DFE 检测的联合使用, 后面 DFE 检测器中的矩阵列排序和 QR 分解都针对  $\tilde{\mathbf{H}}$  进行。上面所给出的排序算法复杂度较高, 文献[2]中给出了一种低复杂度的排序算法。

### 4 V-BLAST 的组合 LSD 和 DFE 检测算法 (LSD-DFE)

如前所述, 头几个检测符号的准确性对采用 DFE 检测的 BLAST 性能非常重要。虽然对符号检测顺序进行排序后可以提高检测性能, 但是由于头几个检测符号获得的接收分集非常有限, 尤其是最先检测的符号没有任何接收分集, 因此性能提高得有限。如果设法提高头几个符号的分集, 就可以提高它们检测的准确性, 后检测的符号由于获得的分集多于先检测的符号, 只要 DFE 过程中没有错误, 性能要优于先检测的符号, 这样整个系统的性能都会得到改进。另一方面采用最大似然检测(ML)的 V-BLAST 能够获得所有的分集, 有着最好的性能, 但是复杂度随天线数的增加快速增长, 尽管可以采用球形译码进行 ML 检测, 复杂度仍然太高。一种提高 DFE 检测性能同时又不提高太多复杂度的方法是采

用组合的ML检测和DFE检测(ML-DFE)。对最先检测的几个符号(不妨设为 $l$ 个)采用ML检测提高其准确性,同时由于该ML检测只对较少的符号进行,复杂度又不至太高。其过程如下<sup>[5]</sup>:

首先对信道 $\mathbf{H}$ 的列进行排序,然后进行QR分解,用分解后的 $\mathbf{Q}$ 矩阵对接收信号进行变换,由于变换后信号的最后 $l$ 个信号只含有 $l$ 个发送符号的信息,不受其它 $2m-l$ 个PAM符号的干扰,因此可以用 $\mathbf{R}$ 矩阵右下角的 $l \times l$ 矩阵和对应信号进行ML检测,然后对其余的符号用DFE进行检测。

上面的ML-DFE检测算法得到了ML检测和DFE检测之间一个性能和复杂度的折中,那么有没有可能在复杂度提高不多的条件下进一步提高其性能呢?

ML-DFE算法在对头 $l$ 个符号进行ML检测的时候,只使用了 $l$ 个接收数据,其它数据信息并没有得到利用,因此检测的准确性相对于针对所有数据采用ML检测显然会有所降低。不妨称这种对部分符号进行ML检测的算法为部分最大似然(Part ML, PML)检测。PML的检测结果和ML检测对应符号的结果未必相同,进行DFE检测时会降低性能。但是要想得到头几个符号的ML检测结果又必须对所有数据同时进行ML检测。由于ML检测给出的是与接收信号欧氏距离最近的矢量星座点,而PML检测中计算的距离只是矢量星座点与接收信号之间的欧氏距离在一个信号子空间上投影的长度,欧氏距离最小的矢量星座点该投影的长度未必最小,但是有理由相信较PML的长度不会大很多,应该也是距离最小的点之一。因此如果在PML检测的过程中增加输出结果,同时给出离这 $l$ 个接收数据最近的 $P$ 组符号,然后对这 $P$ 组符号分别进行DFE检测,从中选择最好的结果应该能够提高检测的性能(LSD-DFE)。另一方面看,增加输出也会增加其中包含这 $l$ 个发送符号正确检测的概率。仿真表明,ML检测过程中只要输出3个符号就可以获得较大的性能改进。

采用ZF算法的LSD-DFE的BLAST检测算法(ZF-LSD-DFE)过程如下:

步骤1 采用式(4)对信道 $\tilde{\mathbf{H}}$ 的列向量进行排序,计算过程对 $k$ 从 $2m$ 到1进行,设排序后的结果为 $\mathbf{H}'$ ,相应的

排列为 $\pi$ 。

步骤2 对矩阵 $\mathbf{H}'$ 进行QR分解, $\mathbf{H}' = \mathbf{Q}\mathbf{R}$ ,并用 $\mathbf{Q}^H$ 乘接收信号得 $\mathbf{y} \triangleq \mathbf{Q}^H \mathbf{r} = \mathbf{R}\pi(\tilde{\mathbf{s}}) + \boldsymbol{\eta} = \mathbf{R}\tilde{\mathbf{t}} + \boldsymbol{\eta}$ ,式中 $\tilde{\mathbf{t}} \triangleq \pi(\tilde{\mathbf{s}})$ 。

步骤3 记 $\mathbf{R}$ 右下角 $l \times l$ 的子阵为 $\mathbf{L}$ ,那么有 $\mathbf{y}_{2m-l+1:2m} = \mathbf{L}\tilde{\mathbf{t}}_{2m-l+1:2m} + \boldsymbol{\eta}_{2m-l+1:2m}$ ,对方程进行LSD得到 $\tilde{\mathbf{t}}_{2m-l+1:2m}$ 的 $P$ 个最可能的检测结果。

步骤4 对这 $P$ 个结果分别采用DFE检测剩下的 $2m-l$ 个PAM符号,得到 $P$ 个检测结果 $\tilde{\mathbf{t}}^{(p)}, p=1,2,\dots,P$ 。

步骤5 由式 $\tilde{\mathbf{t}} = \min_{s^{(p)}} \left\{ \left\| \mathbf{r} - \mathbf{H}\tilde{\mathbf{t}}^{(p)} \right\|^2 \right\}$ 得到排序的检测结果,对其进行逆排序得到发送信号 $\tilde{\mathbf{s}}$ 的最终检测结果 $\tilde{\mathbf{s}} = \pi^{-1}(\tilde{\mathbf{t}})$ 。

上述检测过程的复杂度随 $l$ 和 $P$ 的增加而增加,改变 $l$ 和 $P$ 的取值可在复杂度和性能之间进行折中调节。LSD算法由文献[3]给出。

由于MMSE-DFE检测的性能较ZF-DFE为好,因此把上面检测步骤中第1,2步换成MMSE-DFE检测的排序过程和相应的 $\mathbf{Q}$ 矩阵和 $\mathbf{R}$ 矩阵,可以得到一种检测性能更好的算法(MMSE-LSD-DFE)。但是这里的 $\mathbf{Q}$ 矩阵和 $\mathbf{R}$ 矩阵不是严格的QR分解,同时 $\mathbf{R}$ 矩阵并不是上三角阵,但是在检测过程中只使用了其上三角部分,在信噪比较大时,其对角线以下的元素很小。由于检测过程中忽略了 $\mathbf{R}$ 对角线以下的元素,检测并不是最大似然的,尽管如此,MMSE的优势仍然是明显的,仿真表明在上述的组合算法中采用MMSE算法较ZF算法有更好的性能。

## 5 复杂度分析

这一节简单分析DFE检测器,ML检测器及组合的LSD和DFE检测器的复杂度,只计算乘除运算的复杂度。

在块衰落(block fading)信道中(信道在一个数据块内保持不变,不同块之间的信道衰落系数相互独立),数据的检测过程通常分为两个步骤:预处理过程和检测过程。预处理过程包括一个数据块中只需进行一次的操作,而检测过程对每个符号间隔发送的数据进行检测。在一个block的长度比较大时,复杂度主要由检测过程的计算量决定。表1给出了各种算法两个阶段的复杂度。

表1 算法复杂度比较

	预处理	检测
ZF-DFE	$(16/3)m^3 + 56m^2n + 16mn^2$	$(2m+1)2m/2$
MMSE-DFE	$(16/3)m^3 + 60m^2n + 16mn^2 + 2mn$	$(2m+1)2m/2$
ZF-LSD-DFE	$(16/3)m^3 + 56m^2n + 16mn^2$	$O(l^3) + P(4m^2 - l^2 + 2m - 1)/2 + P(2m+1)2n$
MMSE-LSD-DFE	$(16/3)m^3 + 60m^2n + 16mn^2 + 2mn$	$O(l^3) + P(4m^2 - l^2 + 2m - 1)/2 + P(2m+1)2n$
SD	$3(2m)^2 2n - (2m)^3$	$O((2m)^3)$

由表 1 可以看出 ZF-DFE 和 ZF-LSD-DFE 检测器的预处理复杂度相同, 因为采用的是相同的预处理算法<sup>[2]</sup>, 而 MMSE-DFE 和 MMSE-LSD-DFE 算法的预处理也可以用文献<sup>[2]</sup>中的方法进行, 只是增加了  $\mathbf{Q}^H$  与  $\pi(\mathbf{H})$  相乘的复杂度  $(2m+1)2m2n/2$  (只需计算上三角部分)。而采用 SD 算法的 ML 检测预处理可以不排序, 只对矩阵进行 QR 分解即可, 采用 Givens rotation 算法的 QR 分解计算量为  $3(2m)^2 2n - (2m)^3$  <sup>[6]</sup>。

检测阶段, ZF-DFE 和 MMSE-DFE 算法复杂度相同, 只需  $(2m+1)2m/2$  次乘除运算。SD 算法复杂度在高信噪比时为  $O((2m)^3)$  量级<sup>[7]</sup>, 而 ZF-LSD-DFE 和 MMSE-LSD-DFE 算法的复杂度都为  $O(l^3) + P(4m^2 - l^2 + 2m - l)/2 + P(2m+1)2n$ , 其中的  $O(l^3)$  为 LSD 的复杂度(虽然 LSD 较 SD 算法复杂度为高, 但是增加的复杂度不多, 仍然为三次方的复杂度<sup>[3]</sup>, 这是因为 LSD 算法只是 SD 算法在搜索过程中保持对距离最小的  $P$  个结果进行追踪)。而式中的项  $P(4m^2 - l^2 + 2m - l)/2$  和  $P(2m+1)2n$  分别为 DFE 和  $\min_{s^{(p)}} \left\{ \left| \mathbf{r} - \mathbf{H} \mathbf{s}^{(p)} \right|^2 \right\}$  的计算量。

由上述分析可以看出, 在预处理阶段 ZF/MMSE-DFE 检测器和 ZF/MMSE-LSD-DFE 检测器较采用 SD 算法的 ML 检测器有大的复杂度, 但是预处理在一个数据块中只需进行一次, 不是主要的复杂度, 复杂度主要来自于检测阶段。在检测阶段, DFE 检测器复杂度最低, 仅为二次方项, SD 检测器复杂度最高, 为  $2m$  的三次方项, 而 LSD-DFE 检测器在  $l$  和  $P$  不是太大时实现了两者之间复杂度的折中, 改变  $l$  和  $P$  的取值可在复杂度和性能之间进行调节。

## 6 性能仿真

这一节给出上述检测算法的性能仿真结果。仿真中采用 16QAM 调制, 接收端使用理想的信道信息。作为对比, 还给出了排序的 ZF-DFE 和 MMSE-DFE 及 SD 算法的性能曲线。每个数据块的帧长为 130 (信道使用 130 次), 信道为一帧内保持不变且帧与帧之间相互独立的块衰落信道。曲线中的每个仿真点都保证有至少 1000 个错误比特, 仿真的帧数由程序据此自动确定。

图 1 给出了  $m=n=4$  的 V-BLAST 系统 ZF-LSD-DFE 和 MMSE-LSD-DFE 检测算法的性能曲线。仿真中的参数设置为  $l=4$ ,  $P$  分别为 1, 3, 10; 图 2 给出了  $6 \times 6$  V-BLAST 系统的性能曲线(其它仿真参数与图 1 相同); 图 3 为  $6 \times 6$  V-BLAST 性能曲线采用  $l=6$  的 LSD-DFE 算法, 其它参数与图 2 相同。当  $P$  为 1 时, ZF-LSD-DFE 成为文献<sup>[5]</sup>中的 ML-DFE 算法。

从图中可以看出, 在  $10^{-3}$  附近 LSD 的输出结果数  $P$  只从 1 增加到 3 就可以得到绝大部分的性能增益, 且较  $P=1$  时的 ML-DFE 算法<sup>[5]</sup> 性能改进超过 2dB, 进一步增

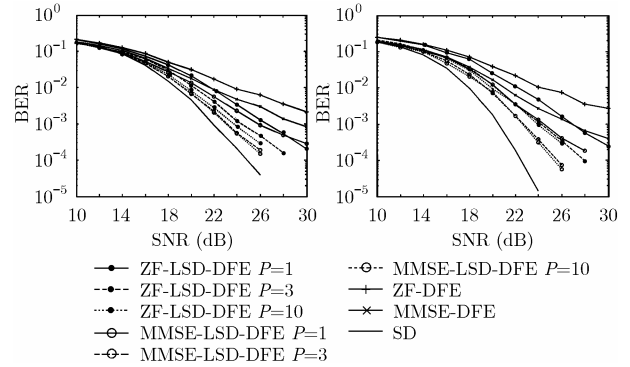


图 1  $4 \times 4$  V-BLAST 系统分别采用 ZF-LSD-DFE 和 MMSE-LSD-DFE 算法的性能曲线

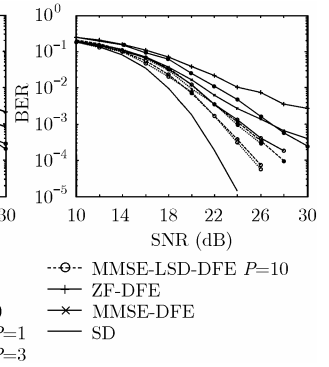


图 2  $6 \times 6$  V-BLAST 系统分别采用 ZF-LSD-DFE 和 MMSE-LSD-DFE 算法的性能曲线

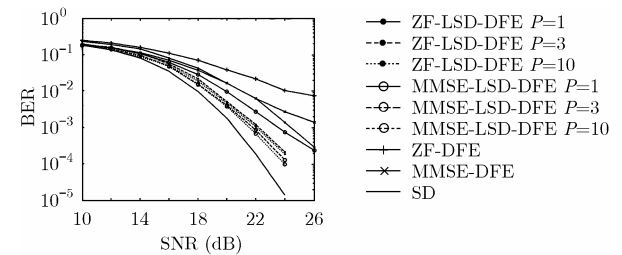


图 3  $6 \times 6$  V-BLAST 系统分别采用 ZF-LSD-DFE 和 MMSE-LSD-DFE 算法的性能曲线,  $l$  大小为 6

加  $P$  获得的增益很小。MMSE-LSD-DFE 算法在  $P=1$  时有出现 error floor 的趋势, 这是因为该算法只使用了矩阵  $\mathbf{R}$  的上三角部分, 不是最大似然的,  $P$  增加时该趋势消失。 $P=3$  时 MMSE-LSD-DFE 较 ZF-LSD-DFE 有大约 1~2dB 的改进, 同时在  $10^{-3}$  附近与最大似然的 SD 算法只差 1~2dB。比较图 1, 图 2 可看出在  $m$  和  $n$  增加而  $l$  保持不变时 MMSE-LSD-DFE 和 ZF-LSD-DFE 性能差增加, 这是因为对 DFE 检测方式 MMSE 算法有较好的性能, 采用 DFE 方式检测的符号数增加时 MMSE 算法的优越性能体现出来; 另一方面, 比较图 2, 图 3 可看出在  $m$  和  $n$  不变而增加  $l$  的大小时两种算法的差距缩小, 这是因为头  $l$  个 LSD 方式检测的符号分集增加, 检测的性能改进, 而分集增加时算法的作用减小, 两者的差距缩小。进一步增加  $l$  导致 LSD 复杂度增加。所有这些仿真揭示了  $l$  取 4~6,  $P$  取 3 的 MMSE-LSD-DFE 算法是检测 V-BLAST 系统一种较好的选择。

## 7 结束语

本文在 ZF-DFE, MMSE-DFE, ML 和 ML-DFE 等 V-BLAST 检测算法的基础上, 提出了先对部分符号 LSD 检测, 而后对剩余符号进行 DFE 检测的 ZF-LSD-DFE 和 MMSE-LSD-DFE 算法。仿真结果表明 LSD 算法只需输出 3 个结果就可获得较大的性能增益, 而 MMSE-LSD-DFE 算法较 ZF-LSD-DFE 有着更优的性能, 采用  $l$  取 4~6, LSD 输出个数  $P$  取 3 的 MMSE-LSD-DFE 算法不仅有好的性能, 同时复杂度也不太高, 是一种较好的实用选择。

## 参 考 文 献

- [1] Worniansky P W, Foschini G J, and Golden G D, *et al.* V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel. *IEEE ISSSE'98*. Pisa, Italy, Sept. 1998, 1: 295–300.
- [2] Hassibi B. An efficient square-root algorithm for BLAST. in *Proc. IEEE Intl. Conf. Acoustic, Speech, Signal Processing*, Istanbul, Turkey, June 2000: 5–9.
- [3] Hochwald B M and ten Brink S. Achieving near-capacity on a multiple-antenna channel. *IEEE Trans. Comm.*, 2003, 51(3): 389–399.
- [4] Foschini G J, Golden G D, and Valenzuela R A, *et al.* Simplified processing for high spectral efficiency wireless communication employing multi-element arrays. *IEEE J.SAC*, 1999, 17(11): 1841–1852.
- [5] Choi W, Negi R, and Cioffi J M. Combined ML and DFE decoding for the V-BLAST system. in *Proc. ICC 2000*, New Orleans, LA, 2000: 1243–1248.
- [6] Golub G H and Van Loan C F. *Matrix Computations*, 3rd ed., Baltimore and London: The Johns Hopkins University Press. 1996, chapter 5.
- [7] Hassibi B and Vikalo H. On the expected complexity of sphere decoding. in *Proc. Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, 2001: 1051–1055.
- 肖海勇: 男, 1977年生, 博士, 研究方向为信道编码和多天线系统.
- 毕光国: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为超宽带通信和未来无线通信技术.
- 金秀峰: 男, 1977年生, 博士, 研究方向为多天线系统、OFDM和超宽带通信.