

基于串行干扰消除的 V-BLAST 检测

丁子哲, 张贤达

(清华大学自动化系, 北京 100084)

摘要: 贝尔实验室分层空时结构(BLAST)是实现多输入多输出(MIMO)无线通信系统空时复用并获得容量增益的一种重要技术. 本文将以垂直 BLAST(V-BLAST)为主要对象, 综述基于串行干扰消除的 V-BLAST 检测算法及相应的复杂度和误码性能, 并对其发展作了有关展望.

关键词: MIMO; V-BLAST; 串行干扰消除; 最优排序

中图分类号: TN911.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 6A-019-06

V-BLAST Detection Based on Successive Interference Cancellation

DING Zi-zhe, ZHANG Xian-da

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Bell Laboratory Layered Space-Time (BLAST) architecture is one of the most promising technologies for the space time multiplexing and achieves capacity gain in multiple input multiple output (MIMO) systems. This paper presents a survey and review on the vertical BLAST (V-BLAST), concentrating on the detection schemes based on successive interference cancellation and their complexity evaluation and error performance analysis.

Key words: MIMO; V-BLAST; successive interference cancellation; optimal ordering

1 引言

多输入多输出(MIMO: multiple input multiple output)系统, 通过在发射端和接收端分别装配多个天线, 可以在具有充足散射路径的无线环境中极大地提高信道容量, 因此在近几年来受到了通信学界的广泛关注, 成为该领域的热点问题^[1-4]. 简而言之, MIMO 系统实际上是在传统的时间维度和频率维度上, 增加了“空间”这一新的维度, 来提高系统性能并增加处理的灵活性.

众所周知, 无线通信最关心的问题就是如何在恶劣的传输环境和有限的频谱资源条件下提供尽可能好的系统性能. 而 MIMO 系统的出现正为此带来了新的思路和契机. 归纳起来, MIMO 的最大优势在于, 通过收发两端的多天线配置和收发通信方案的设计, 来获得空间分集增益以对抗无线信道的衰落, 并获得容量增益(使信道容量随天线数目呈线性增长)以提高频谱的利用效率. 从不同的目的出发, MIMO 技术可以大致分为两类: 延时分集^[5]、空时块码^[6,7]和空时格形码^[8,9]等通过最大化分集增益来提高发射功率的有效性; 而传输速率的增加则要依靠贝尔实验室分层空时结构(BLAST: Bell Laboratory Layered Space-Time)^[10-14], 包括对角 BLAST(D-

BLAST)、水平 BLAST(H-BLAST)和垂直 BLAST(V-BLAST)三种不同的方案.

其中, V-BLAST 被公认为是当前最有实用前景的技术, 已在贝尔实验室成功获得了硬件实现, 其频谱利用率高达 40bits/s/Hz^[13,14]. V-BLAST 的接收机设计极为重要, 因其直接决定了系统的误码性能和实现复杂度. 本文将对基于串行干扰消除(SIC: successive interference cancellation)技术的 V-BLAST 检测算法及其性能做一综述.

2 V-BLAST 系统模型

考虑一个具有 M 个发射天线和 $N(N \geq M)$ 个接收天线的 MIMO 系统. 假定其处于一个具有充足散射路径的平衰落无线环境中, 天线之间的距离大于半波长. 此时可以用 $N \times M$ 维矩阵 H 来描述无线信道, 其元素 h_{ij} ($i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M$) 表示从第 j 个发射天线到第 i 个接收天线之间的复信道增益, 它们服从零均值、单位方差的复高斯分布, 且相互独立. 这样, 接收信号可以表示成

$$r = Hs + n = \sum_{j=1}^M h_j s_j + n \quad (1)$$

其中, $s = [s_1, s_2, \dots, s_M]^T$ 是 M 维发射信号向量, 一般假定其各个子数据流(substream)之间互不相关且具有

相等的发射功率; \mathbf{n} 是加性复高斯白噪声向量, 具有零均值和协方差阵 $\sigma_n^2 \mathbf{I}_{N \times N}$.

V-BLAST 检测的目的就是在已知 \mathbf{H} (假定接收端可以对信道做出精确估计) 和 \mathbf{r} 的前提下, 通过设计有效的算法来得到发射信号的估计 $\hat{\mathbf{s}}$. 这实际上是一个典型的干扰抑制问题, 即在恢复期望信号的过程中, 抑制多数据流干扰 (MSI: multistream interference) 和噪声干扰.

3 基于串行干扰消除的 V-BLAST 检测算法

V-BLAST 系统的接收机算法主要包括最大似然 (ML: maximum likelihood) 检测、球形解码、序列蒙特卡罗方法和串行干扰消除.

ML 检测在全向量空间内进行遍历搜索, 以得到使似然函数最大的信号向量并将其作为 $\hat{\mathbf{s}}$. 这是一种最优估计, 但其复杂度关于发射天线数目和信号的字符集大小呈指数增长, 在实际使用中受到了极大的限制. 球形解码的基本思想是将搜索限定在某个超球体范围内 (有别于 ML 的全空间搜索), 寻找特定的高维信号向量, 这里称之为格形点. 显然, 相比起 ML 检测, 球形解码具有比较低的复杂度. 但这样做也自然会带来下述问题: 一是如何确定超球的半径 R . 若 R 选取过大, 算法依然具有足够高的复杂度 (R 趋于无穷大时, 球形解码将退化为 ML 检测); 若 R 取得太小, 则有可能使得最优解未被包含在超球体之内; 二是如何确定什么样的格形点存在于超球内. 关于球形解码已有大量研究成果, 可参见文献 [15~17]. 基于软信息的干扰消除技术利用了统计信号处理中的序列蒙特卡罗方法 [18, 19], 通过采样、更新权重等多次迭代后可以得到各子数据流后验概率的估计值. 由于这里得到的是概率而不是通常硬判决中的符号估计, 所以算法具有更大的灵活性, 可以为软输入软输出 turbo 接收机提供软信息. 但性能提高的前提是算法仍然具有很高的复杂度.

SIC 检测的误码性能虽然不及前述各种算法, 但其运算复杂度也远远低于它们, 因而更具有实用价值. 在 V-BLAST 系统最初被提出时, 贝尔实验室的 Foschini 等人就已经给出了经过巧妙设计的 SIC 检测算法 [13, 14]. 下文将重点关注此方法.

SIC 检测器将对所有 M 个子数据流的检测通过 M 次迭代来实现. 每次独立检测出一个子数据流, 然后将其从接收信号向量中减掉. 如此往复进行, 直至最后一个子数据流被估计出来. 其具体过程可用右面图 1 的流程图来描述.

值得注意的是, SIC 存在误差

传播现象, 即前面检测发生的错误将会造成后面检测出错的概率增大, 从而出现误差的积累. 设计 SIC 检测算法可分为检测器的设计和检测顺序的设计.

3.1 检测器设计

根据不同的设计准则, 常用的线性检测器主要包括迫零 (ZF: zero forcing) 检测器和最小均方误差 (MMSE: minimum mean square error) 检测器.

假定检测顺序为 l_1, l_2, \dots, l_M , 它是 $1, 2, \dots, M$ 的一个重排列. 在第 i 步检测前, 记未被检测出的子数据流对应的信道向量组成的矩阵为 $\mathbf{H}_i = [\mathbf{h}_{l_1}, \mathbf{h}_{l_2}, \dots, \mathbf{h}_{l_M}]$. 则 ZF 检测器 $\mathbf{g}_{ZF,i}^H$ 实际上就是下述矩阵的第一行

$$\mathbf{G}_{ZF,i} = \mathbf{H}_i^\dagger = (\mathbf{H}_i^H \mathbf{H}_i)^{-1} \mathbf{H}_i^H \quad (2)$$

从而 $\hat{\mathbf{s}}_{ZF,i} = \mathbf{g}_{ZF,i}^H \mathbf{r}_i = s_i + \mathbf{g}_{ZF,i}^H \mathbf{n}$ (3)

其中 \mathbf{r}_i 为经过前面 $i-1$ 次干扰消除后的信号向量. 不难看出, ZF 检测器可以完全抑制 MSI, 从而实现了检测后信干比 (SIR: signal to interference ratio) 的最大化. 但当信道矩阵的各列相关性较强时, 经过 $\mathbf{g}_{ZF,i}^H$ 变换后的噪声能量将被放大, 造成检测性能的恶化.

MMSE 检测器是另外一种简单的线性检测器. 相比起 ZF 检测器而言, 它能够将 MSI 和噪声统一考虑, 并在二者之间寻找折衷, 实现后验检测信干噪比 (SINR: signal to interference and noise ratio) 的最大化. MMSE 检测器权向量 $\mathbf{g}_{MMSE,i}^H$ 为下述矩阵的第一行

$$\mathbf{G}_{MMSE,i} = \left(\mathbf{H}_i^H \mathbf{H}_i + \frac{1}{\rho} \mathbf{I}_{M \times M} \right)^{-1} \mathbf{H}_i^H \quad (4)$$

其中 ρ 为接收端信噪比. 与式 (2) 对比不难发现, $\mathbf{G}_{MMSE,i}$ 实际上只增加了一个正则项 $(1/\rho) \mathbf{I}_{M \times M}$. 这就为我们在形式上将二者统一提供了依据. 若定义矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}_i = [\mathbf{H}_i^H \quad \sqrt{(1/\rho)} \mathbf{I}_{M \times M}]^H$, 则 $\mathbf{G}_{MMSE,i}(\mathbf{H}_i)$ 就是由 $\mathbf{G}_{ZF,i}(\tilde{\mathbf{H}}_i)$ 的前 N 列构成的. 同时, 这也表明 ZF 检测器与 MMSE 检测器在实现复杂度上相差不大.

3.2 检测顺序设计

最简单的检测顺序就是从第 1 个子数据流顺次检测到第 M 个, 这也称无排序或自然排序. Foschini 等人给出了一种称作“最优排序”的设计思路 [15, 16], 它是该算法的核心. 这里的“最优”是建立在最大化最小后验检测 SINR 的意义上的. 众所周知, 在不考虑误码传播效应的情况下, SIC 算法的整体误码性能在一定程度上是由性能最差的那一步检测所决定的, 并且误码率作为衡量算法性能的指标又是该步检测的后验 SINR 的减函数. 直观的设计思路就是希望在设计出的排序下, 各步检测中最小的后验检测 SINR 尽可能大. 从这一角度出发, 最优排序的算法在迭代的每一步都选取具有最佳 SINR 的子数据流进行检测. 业已证明, 这样一种局部最优的策略可以直接产生全局最优, 即

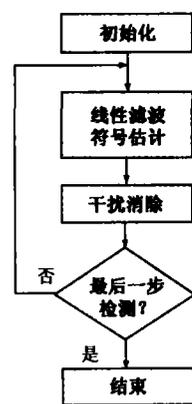


图 1 SIC 算法流程图

$$\min \eta_{i,l_i} \geq \min \eta_{i,l_j}, \quad i=1,2,\dots,M \quad (5)$$

其中, $\{l_1', l_2', \dots, l_M'\} \neq \{l_1, l_2, \dots, l_M\}$ 为不同于最优顺序的另外一种排序, η_{i,l_i} 表示第 i 步时检测第 l_i 个子数据流的 SINR, 满足 $\eta_{i,l_i} \geq \eta_{i,l_j} (\forall j \neq l_i)$.

进一步,我们可以从下述两个方面更好地理解最优排序的核心思想^[20]:

1. 从投影分析角度看: 设 H_i 中包含有 h_j . 记 H_i 除去 h_j 后, 剩余向量构成的矩阵为 $H_{i,j}$. 则由 $H_{i,j}$ 张成的子空间的正交补空间的投影算子可以表示为

$$P_{i,j}^\perp = I_{N \times N} - H_{i,j} (H_{i,j}^H H_{i,j})^{-1} H_{i,j}^H \quad (6)$$

经过简单推导可以得到, $\eta_{i,j} \propto \|P_{i,j}^\perp h_j\|^2$ (这里用到了投影算子的幂等性). 这表明, 后验 SINR 正比于 h_j 到 $H_{i,j}$ 张成的子空间的距离, 而最优排序实际上是基于一种“最大距离准则”, 即迭代的每一步都挑选具有最大距离的信道向量对应的子数据流先进行检测. 若进一步假定各信道向量的能量相同, 则该“最大距离”准则与最小相关准则等价^[21-23].

2. 从功率分配角度看: 对于自然排序的 SIC 算法, 第 i 步的 SINR 是随机变量, 服从 $\chi_{2(N-M+i)}^2$ 分布, 所以分集阶数为 $N-M+i$. 这意味着, 第 1 步检测的分集阶数最低, 随着检测的进行, 分集阶数逐渐增大, 到第 M 步时达到最大的 N . 因此, 在不考虑误码传播的情况下, 各步检测的统计性能从第 1 步到第 M 步是逐渐变好的. 最优排序的算法在接收端根据信道状况重新排列检测顺序, 来合理配置各步检测器权向量的能量, 使其尽可能达到各步后验检测的 SINR 相均衡. 虽然不同于普通的发送端功率分配, 但仍然可以看作是一种接收端的能量调整策略.

3.3 低复杂度的 SIC 检测算法

最优排序的 V-BLSAT 检测算法虽然具有很好的性能, 但其每一步迭代都需要通过矩阵求逆来得到 $G_{ZF,i}$ 和 $G_{MMSE,i}$, 进而确定 l_i . 这会带来很高的计算量 (与发射天线数 M 的 4 次方成正比), 限制了该算法的实用范围. 因此, 后续又有多种改进算法被提出. 它们的共同特点在于并未改变原有的检测顺序和检测器结构, 只是通过巧妙应用矩阵求逆的特殊形式来实现复杂度的下降.

3.3.1 平方根算法^[24]

Hassibi 等人提出一种平方根算法, 其主要特点是利用 Householder 映射或一系列 Givens 旋转来构造酉变换矩阵, 将估计误差协方差矩阵转化为上三角矩阵, 以利于找到最小对角元素对应的标号, 即待检测的子数据流标号, 同时得到权向量. 该方法较之于最初的 V-BLAST 算法, 计算复杂度减小了 $0.7M$ 倍, 并且由于仅使用了正交变换而不存在除法运算, 使得数据稳定性

得到加强.

3.3.2 快速递推算法一^[25]

共有两种快速递推算法. 其一是在文献^[25]中提出的. 该方法利用分块矩阵求逆和矩阵求逆引理来避免直接的矩阵求逆运算, 实现复杂度的下降. 在第 1 步检测时, 矩阵 $H^H H + (1/\rho) I_{M \times M}$ 的逆是通过连续使用 M 次矩阵求逆引理得到的. 在确定了 l_1 和相应的权向量后, 以后各步的检测则根据分块矩阵的结构特点, 使用重排列矩阵对估计误差协方差阵进行变换, 以利于分块求逆并实现矩阵的降阶.

3.3.3 快速递推算法二^[26]

仍然考虑将权矩阵与排序的求取来递推实现, 即迭代的每一步都可以利用前面得到的结果, 从而降低运算量. 整个过程可以分为首轮递推与主递推. 前者利用著名的 Greville 算法得到第 1 步检测需要的权矩阵; 然后算法进入主递推, 通过巧妙利用降阶后信道矩阵与原信道矩阵的关系得到降阶后权矩阵与原权矩阵的关系, 其中利用了广义逆矩阵递推公式. 该方法的运算量较之于快速递推算法一又有进一步降低. 尤其在系统天线数较少的情况下 (更加符合实际情况), 快速递推算法二的优势更加明显.

还有许多改进算法. 如基于平方根算法, 文献^[27]中提出了一种解相关决策反馈检测器, 它将一系列的酉变换用 QR 分解来替代, 从而进一步降低了实现的复杂度; 在文献^[28]中, 作者对平方根算法做了优化, 形成了改进的平方根算法, 复杂度进一步下降了 36%; 一种改进的快速递推算法一通过设计更加有效的初始化矩阵, 来降低第 1 步权矩阵计算的复杂度^[29].

为了对最初的 V-BLAST 算法、改进的平方根算法和两种快速递推算法的计算复杂度有一个直观的描述, 下表给出了它们每次检测出 M 个发射信号所需要的复数加法、乘法的次数和 FLOPS 数. 为了表示方便, 我们假定 $M = N = n$. 值得注意的是, 由于各算法都采用相同的检测器和检测顺序, 因而它们的误码性能完全相同.

表 1 四种 V-BLAST 检测算法复杂度比较

检测算法	复数加/减法次数	复数乘/除法次数	FLOPS
最初的 V-BLSAT 算法	$\frac{43}{12} n^4 + \mathcal{O}(n^3)$	$\frac{43}{12} n^4 + \mathcal{O}(n^3)$	$\frac{86}{3} n^4 + \mathcal{O}(n^3)$
改进的平方根算法	$\frac{25}{6} n^3 + \mathcal{O}(n^2)$	$\frac{25}{6} n^3 + \mathcal{O}(n^2)$	$\frac{100}{3} n^3 + \mathcal{O}(n^2)$
快速递推算法一	$\frac{11}{3} n^3 + \mathcal{O}(n^2)$	$3n^3 + \mathcal{O}(n^2)$	$28n^3 + \mathcal{O}(n^2)$
快速递推算法二	$\frac{19}{6} n^3 + \mathcal{O}(n^2)$	$\frac{19}{6} n^3 + \mathcal{O}(n^2)$	$\frac{76}{3} n^3 + \mathcal{O}(n^2)$

其中, FLOPS (floating-point operations) 表示浮点运算次数, 它是衡量一个算法复杂度的重要指标, 并且不依赖

于具体的硬件实现.1 次复数乘/除法需要 6FLOPS,1 次复数加/减法需要 2FLOPS.

3.3.4 基于其他排序准则的 SIC 算法

注意到以上各种改进算法都是基于最优排序的.目前,已有不少研究工作将注意力转移到设计其他排序准则上:一、设计更加合理的检测顺序,使得算法具有更加好的误码性能,而不去考虑运算量;二、设计次最优的排序准则,使得算法运算量大大下降,并尽量保证误码性能与最优排序算法相差不大.实际中,后者往往被考虑得更多.

一种称作分类 QR 分解的算法在文献[30]中被提出.它在对信道矩阵进行 QR 分解的基础上得到迭代的检测算法,并且在每一步都进行重新排序而不同于最优排序;另一种基于 Cholesky 分解的检测算法^[31]在假定其他子数据流被无误检测的前提下,将各个子数据流的最小可能估计误差方差作为设计新的检测顺序的准则,其复杂度仅为快速递推算法一的 40%,同时误码性能与最优排序的算法比较接近;基于斜投影技术的 SIC 算法在文献[20]中被提出,它从投影分析的角度重新构造了 ZF 与 MMSE 检测器,并设计了一种“逆检测顺序”来方便进行投影算子更新,其复杂度与文献[31]中算法相当.该斜投影算法的最大特点在于设计思路具有明确的物理含义,有利于后续误码性能的分析.

4 误码性能分析

具有最优排序的 V-BLAST 检测,因其高度的非线性和固有的误差传播效应,使得对于算法的性能分析变得异常复杂,甚至根本不可能得到误码率的闭式解.为了简化分析,常常忽略误差传播,单独考虑各步检测时的误码性能和后验检测 SINR 的中断概率,以此来研究最优排序带来的性能增益. Loyka 等人在这方面做了大量工作,得到了有意义的结论^[21-23,32-34].

4.1 $2 \times N$ 系统

对于一个只有 2 个发射天线和 N 个接收天线的系统,性能分析是最为简单的.此时,最优顺序可以简单表示为^[32]

$$l_1 = \arg \max_j \| \mathbf{h}_j \|^2, l_2 = \arg \min_j \| \mathbf{h}_j \|^2 \quad (7)$$

相应地,两步检测的后验 SINR 分别为

$$\eta_1 = (\sin \varphi)^2 \max \{ \| \mathbf{h}_1 \|^2, \| \mathbf{h}_2 \|^2 \} \quad (8)$$

$$\eta_2 = \min \{ \| \mathbf{h}_1 \|^2, \| \mathbf{h}_2 \|^2 \}$$

其中, φ 为信道向量 \mathbf{h}_1 与 \mathbf{h}_2 之间的夹角.因为 $2 \| \mathbf{h}_1 \|^2$ 和 $2 \| \mathbf{h}_2 \|^2$ 均服从 χ_{2N}^2 分布,并且相互独立,所以不难求得 η_1 和 η_2 的分布函数(即中断概率).研究表明:对于 $2 \times N$ 系统,第 1 步检测可以获得 3dB 的 SNR 增益,但同时也会带来第 2 步检测性能的恶化——中断概率

翻倍.由于第 1 步检测的平均误码性能将在很大程度上决定算法的整体性能(尤其在高 SNR 下更是如此),所以最优排序较之于无排序的优势就体现在这里.此外,最优排序虽然形式上表现为选择合并,但分析表明它并没有带来额外的分集增益,而是使算法获得了 SNR 增益.

4.2 $M \times N$ 系统

对于具有任意 M 个发射天线的系统,其精确的误码性能分析至今仍未得到解决.这是由于在迭代的每一步都要重新进行排序,多次下来顺序统计量的分布将变得相当复杂,因而求解异常困难.初步的结论表明,最优排序的算法将为第 1 步检测带来 $10 \log_{10}(M)$ dB 的 SNR 增益^[32].正如前面提到的, SIC 算法的整体性能往往由 M 次迭代中具有最差误码性能的那一步决定.在不考虑误码传播的情况下,第 1 步的平均误码率是最高的.因此,上述分析反映出了最优排序的优越性.事实上,基于“逆检测顺序”的斜投影算法为得到中断概率的解析表达式提供了可能.这是因为,各后验 SINR 都具有明确的物理含义,且迭代过程仅表现为投影算子的更新,使得因每步排序而带来的复杂问题得到大大简化.

5 展望

从上世纪 90 年代末到现在将近 10 年的时间里, V-BLAST 及相应的检测算法一直是 MIMO 领域中的热点,获得了长足的发展.但是仍有许多问题有待进一步研究与探索:

- 算法的误码性能分析:在上文中提到,对于任意 (M, N) 的 V-BLAST 系统,误码率的解析解尚未得到,但此方面已有一些积极的探索.虽然这一问题求解非常困难,但如能得到比较紧的性能界也将具有很高的理论价值,因为它对发射端的功率分配方案设计至关重要.

- 检测顺序设计:目前已有的最优排序是建立在最大化最小后验检测 SINR 的意义上的,但这并不意味着在最小化误码率意义上也是最优的.因为系统的误码率才是我们最终关心的指标.从其他的角度出发,可能得到更加有效的排序方案.

- 功率分配策略:上述 V-BLAST 检测主要从接收端入手进行处理,而假定发射端没有关于信道的任何先验知识.如建立反向链路,将收端估计的信道信息反馈给发射端,指导发端在发射信号时进行功率分配,从而可以进一步提高系统性能.因而,功率分配方案设计是有意义的研究方向.

6 结论

V-BLAST 系统的开拓性研究起源于贝尔实验室的

Foschini 和 Wolniansky 等人发表的论文. 他们的工作极大地推动了学术界对此问题的研究, 使得近几年涌现出了大量的成果, 人们对这一技术的认识不断加深. 作为 MIMO 空间复用的重要技术, V-BLAST 必将在今后获得更加重大的理论突破和更加广阔的应用前景.

参考文献:

- [1] Spencer Q H, Peel C B, Swindlehurst A L, Haardt M. An introduction to the multi-user MIMO downlink[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42(10): 60 – 67.
- [2] Paulraj A J, Gore D A, Nabar R U, Bolcskei H. An overview of MIMO communications-A key to gigabit wireless[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92(2): 198 – 218.
- [3] Goldsmith A, Jafar S A, Jindal Nihar, Vishwanath S. Capacity limits of MIMO channels[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(5): 684 – 702.
- [4] Paulraj A J, Nabar R U, Gore D A. Introduction to space-time wireless communications[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.
- [5] Wittneben A. Base station modulation diversity for digital SIMULCAST[A]. In *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, Gateway to the Future Technology in Motion* [C]. IEEE Press, 1991. 848 – 853.
- [6] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1998, 16(8): 1451 – 1458.
- [7] Tarokh V, Jafarkhani H, Calderbank A R. Space-time block codes from orthogonal design[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1999, 45(5): 1456 – 1467.
- [8] Tarokh V, Seshadri N, Calderbank A R. Space-time codes for high data rate wireless communications: Performance criterion and code construction[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1998, 44(2): 744 – 765.
- [9] Blum R S. Analytical tools for design of space-time convolutional codes[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, 50(10): 1593 – 1599.
- [10] Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas[J]. *Bell Labs Technical Journal*, 1996, 1(2): 41 – 59.
- [11] Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas[J]. *Wireless Personal Communications*, 1998, 6(3): 311 – 335.
- [12] Foschini G J, Golden G D, Valenzuela R A, Wolniansky P W. Simplified processing for high spectral efficiency wireless communication employing multi-element arrays [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(11): 1841 – 1852.
- [13] Golden G D, Foschini G J, Valenzuela R A, Wolniansky P W. Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture[J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(1): 14 – 16.
- [14] Wolniansky P W, Foschini G J, Golden G D, Valenzuela R A. V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel[A]. In *Proceedings of URSI International Symposium on Signals, Systems, and Electronics*[C]. IEEE Press, 1998. 295 – 300.
- [15] Hassibi B, Vikalo H. On the expected complexity of sphere decoding[A]. *Conference Record of the Thirty-Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers* [C]. IEEE Press, 2001. 1051 – 1055.
- [16] Viterbo E, Boutros J. A universal lattice code decoder for fading channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1999, 45(5): 1639 – 1642.
- [17] Damen O, Chkeif A, Belfiore J. Lattice code decoder for space-time codes[J]. *IEEE Communications Letters*, 2000, 4(5): 161 – 163.
- [18] Dong B, Wang X D. A new class of soft MIMO demodulation algorithms[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(11): 2752 – 2763.
- [19] Aggarwal P, Prasad N, Wang X D. An enhanced deterministic sequential Monte Carlo method for near optimal MIMO demodulation with QAM constellations[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(6): 2395 – 2406.
- [20] Ding Z Z, Zhang X D, Gao Q B, Su Y T. An efficient oblique projection algorithm for V-BLAST detection with novel ordering[A]. In *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*[C]. IEEE Press, 2007. 457 – 461.
- [21] Loyka S, Gagnon F. Performance analysis of the V-BLAST algorithm: An analytical approach[A]. In *Proceedings of International Zurich Seminar on Broadband Communications* [C]. IEEE Press, 2002. 5_1 – 5_6.
- [22] Loyka S. V-BLAST outage probability: Analytical analysis [A]. In *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*[C]. IEEE Press, 2002. 24 – 28.
- [23] Loyka S, Gagnon F. Performance analysis of the V-BLAST algorithm: An analytical approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Commun.*, 2004, 3(4): 1326 – 1337.
- [24] Hassibi B. An efficient square-root algorithm for BLAST[A]. In *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* [C]. Istanbul, Turkey: IEEE Press, 2000. 737 – 740.
- [25] Benesty J, Huang Y, Chen J. A fast recursive algorithm for optimum sequential signal detection in a BLAST system[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(7): 1722 – 1730.
- [26] Luo Z D, Liu S Y, Zhao M, Liu Y A. A novel fast recursive

- MMSE-SIC detection algorithm for V-BLAST systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(6): 2022 - 2026.
- [27] Zha W, Blostein S D. Modified decorrelating decision-feedback detection of BLAST space-time system [A]. In Proceedings of IEEE International Conference on Communication [C]. New York: IEEE Press, 2002. 335 - 339.
- [28] Zhu H, Lei Z, Chin F P S. An improved square-root algorithm for BLAST [J]. IEEE Signal Processing Lett., 2004, 11(9): 772 - 775.
- [29] Szczecinski L, Massicotte D. Low complexity adaptation of MIMO MMSE receivers, implementation aspects [A]. In Proceedings of IEEE Global Telecommunication Conference [C]. IEEE Press, 2005, 4: 6.
- [30] Wubben D, Bohnke R, Kuhn V, Kammeyer K. MMSE extension of V-BLAST based on sorted QR decomposition [A]. In Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference [C]. IEEE Press, 2003. 508 - 512.
- [31] Nam J Y, Kim S R, Chung H K. A cholesky based detector for MIMO flat fading channels [A]. In Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference [C]. IEEE Press, 2007. 437 - 441.
- [32] Loyka S, Gagnon F. Analytical framework for outage and BER analysis of the V-BLAST algorithm [A]. In Proceedings of International Zurich Seminar on Broadband Communications [C]. IEEE Press, 2004. 120 - 123.
- [33] Loyka S, Gagnon F. On BER analysis of the BLAST without optimal ordering over Rayleigh fading channel [A]. In Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference [C]. IEEE Press, 2004. 1473 - 1477.
- [34] Loyka S, Gagnon F. V-BLAST without optimal ordering: Analytical performance evaluation for Rayleigh fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(6): 1109 - 1120.

作者简介:



丁子哲 男, 1981 年出生于内蒙古呼和浩特市. 清华大学自动化系博士研究生. 目前在美国哥伦比亚大学电子工程系进行访问学习. 研究方向为 CDMA 系统的多用户检测、多天线系统的干扰抑制和基于序列蒙特卡罗方法的光纤通信接收机算法设计.

E-mail: dingzizhe99@mails.tsinghua.edu.cn



张贾达 男, 1946 年出生于江西省. 现任清华大学自动化系教授、博士生导师, 西安电子科技大学兼职教授、博士生导师. 研究方向为信号处理、智能信号处理及其在雷达、通信、音频信号处理中的应用. 曾以第一获奖人获得国家自然科学奖和部级科技进步奖多项, 以第一发明人获国家发明专利 4 项. 在国际权威杂志 IEEE 汇刊和 Neural Computation 上发表论文近 40 篇, 出版学术

著作 6 部、教材 1 部. E-mail: zxd-dau@tsinghua.edu.cn