

改进的基于 QR 分解的分层空时检测算法

陈亮 李建东 陈东

(西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文提出一种应用于多输入多输出通信系统的基于 QR 分解的检测算法。该算法避免了传统分层空时检测算法中对信道矩阵求逆的过程,减小了运算复杂度。同时克服了排序 QR 分解检测复杂度高的问题。通过串行干扰抵消逐层去除最小错误概率的信号,减小了抵消过程中误差传播的概率,提高了系统的误码性能。仿真表明性能优于传统的分层空时检测算法以及排序、次优排序 QR 分解检测算法。对于未编码 4 发 4 收多天系统,采用 QPSK 调制,在达到 10^{-3} 误码率时,该文所提算法比分层空时检测算法有 2.5 dB 的增益,比次优排序 QR 分解检测算法有 5 dB 的增益。

关键词: 无线通信;多输入多输出;空时分层;QR 分解;串行干扰抵消

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)06-1505-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2008.01186

An Improved QR Based Detection Algorithm for Layered Space-Time Codes

Chen Liang Li Jian-dong Chen Dong

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: An improved QR based detection algorithm is proposed for use in the Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) communication systems. The method does not require the pseudo inverse of the channel matrix. The probability of error propagation is reduced through serial interference canceling; the minimum error probability signal is removed layer by layer. It has less computational complexity than ordered QR based detection and ordered BLAST detection. Simulation shows that it outperforms the classic BLAST and ordered, suboptimal ordered QR based detection algorithm. In the uncoded 4×4 MIMO system with QPSK modulation, there proposed algorithm outperforms ZF-VBLAST by 2.5 dB and outperforms the sorted QR algorithm 5 dB at a BER of 10^{-3} .

Key words: Wireless communication; MIMO; Space time layer; QR decomposition; Serial interference canceling

1 引言

已有的研究表明,在有丰富散射体的环境下多输入多输出天线系统的容量随着发射天线和接收天线数目中最小的天线数线性增长。最早由贝尔实验室提出的垂直分层空时结构^[1]用以达到最大频谱利用率,实现了数据的高速传输。基于串行干扰抵消的检测算法以其较低的复杂度得到广泛研究^[2]。但是大多该类算法在对每层信号进行检测时需要

对已知的信道矩阵求广义逆。矩阵求逆的复杂度很高,因此人们希望能尽量避免算法中出现求逆运算,如使用快速递推算法^[2]。文献[3]给出了一种降低复杂度的快速 BLAST 检测算法,在降低复杂度的同时可以达到传统 BLAST 检测算法的性能。文献[4]分析了一种低复杂度的基于 QR 分解的检测算法,基于 QR 分解的算法避免了矩阵求逆,但是由于误差传播的影响,该算法的性能较差并且很大程度上取决于分层检测的顺序,即 QR 分解的排序问题。为了找到最优的 QR 分解的排列顺序,需要对信道矩阵 H 的列的顺序进行改变并且至少要对 $O(M^2/2)$ 个变序后的信道矩阵进行 QR 分解变换,其中 M 是发射天线数。为了降低排序 QR 分解的复杂度,文献[5]提出了一种高效的低复杂度的次优排序 QR 分解算法,但是复杂度降低的同时恶化了系统性能。

本文提出了一种基于次优排序 QR 分解的串行

2008-09-22 收到,2010-04-22 改回

国家杰出青年科学基金(60725105),国家 973 计划项目(2009CB320404),国家自然科学基金(60572146,60702507),国家 863 计划项目(2007AA01Z288),高等学校博士学科点专项科研基金(20050701007),高等学校创新引智计划(B08038),高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划和教育部科学技术研究重点项目(107103)资助课题

通信作者:陈亮 lchen1@mail.xidian.edu.cn

干扰抵消检测算法,在避免了对矩阵求逆的同时获得了较好的系统性能。通过每次抵消掉前次 QR 分解最上层的信号,减小了误差传播,改善了系统性能。仿真表明该算法优于传统的 BLAST 检测算法和排序 QR 分解算法,因此可以应用到诸多系统作为前端检测器如 MIMO 空时迭代系统中。由于迭代系统每次迭代均需对接收到的信号进行检测从而避免了多次对信道矩阵求逆的运算。

2 系统模型

考虑包含 M 个发射天线, N 个接收天线的 BLAST 系统,并且有 $M \leq N$ 。为了实现高速传输,每根发射天线上的发送数据相互独立,发射信号 \mathbf{x} 可表示为 $M \times 1$ 的矢量 $\mathbf{x} = [x_M, x_{M-1}, \dots, x_1]^T$, 并且有 $E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H] = E_s \mathbf{I}_M$, E_s 为总的发射信号能量;接收信号表示为 $N \times 1$ 的矢量 $\mathbf{y} = [y_N, y_{N-1}, \dots, y_1]^T$ 。系统在接收端接收的信号矢量 \mathbf{y} 可以表示为

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

其中 \mathbf{H} 表示信道。这里假设接收端已知理想信道信息,信道为非相关瑞利平坦衰落信道。因此 \mathbf{H} 为 $N \times M$ 的随机矩阵,矩阵中每个元素为相互独立的零均值,单位方差的复高斯随机变量; \mathbf{n} 表示 $N \times 1$ 噪声矢量,其中每个元素为相互独立的零均值,方差为 σ_n^2 的复高斯随机变量,满足 $E[\mathbf{n}\mathbf{n}^H] = \sigma_n^2 \mathbf{I}_N$ 。

3 改进算法描述

信道矩阵 \mathbf{H} 可以分解为 $\tilde{\mathbf{H}} = \tilde{\mathbf{Q}}\tilde{\mathbf{R}}$, 其中 $\tilde{\mathbf{H}}$ 为根据次优排序 QR 分解算法对列向量重新排序后的信道矩阵。次优排序的准则为采用 Gram-Schmidt 算法进行 QR 分解时根据未正交化矢量到已正交化矢量构成的空间的距离排序,距离最短的矢量先进行正交化^[5]。 $\tilde{\mathbf{Q}}$ 为对信道矩阵分解后具有单位正交列向量的矩阵, $\tilde{\mathbf{R}}$ 为分解后具有正实对角元素的上三角矩阵:

$$\tilde{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} \tilde{r}_{M,M} & \cdots & \cdots & \tilde{r}_{M,2} & \tilde{r}_{M/k,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \tilde{r}_{3,3} & \tilde{r}_{3,2} & \tilde{r}_{3,1} \\ 0 & \cdots & 0 & \tilde{r}_{2,2} & \tilde{r}_{2,1} \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \tilde{r}_{1,1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

对接收信号左乘正交矩阵 $\tilde{\mathbf{Q}}$ 的共轭转置 $\tilde{\mathbf{Q}}^H$, 经变换可得

$$\tilde{\mathbf{z}} = \tilde{\mathbf{Q}}^H \mathbf{y} = \tilde{\mathbf{R}}\tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{Q}}^H \mathbf{n} \quad (3)$$

其中 $\tilde{\cdot}$ 表示新的排序后的矩阵或矢量,并且 $\tilde{\mathbf{z}} = [\tilde{z}_M, \tilde{z}_{M-1}, \dots, \tilde{z}_1]^T$ 。为了表述方便,文中矢量及矩阵中元素的标号按从大到小的顺序排列,检测时先检测标号小的层的信号。对于 $1 < k < M$, 每层的待检

测信号 s_k 可以通过从 \tilde{z}_k 中减去前层已估计的信号 $[\hat{x}_{k-1}, \hat{x}_{k-2}, \dots, \hat{x}_1]$ 获得

$$s_k = \tilde{z}_k - \sum_{p=1}^{k-1} \tilde{r}_{k,p} \hat{x}_p \\ = \tilde{r}_{k,k} \tilde{x}_k + \sum_{p=1}^{k-1} \tilde{r}_{k,p} (\tilde{x}_p - \hat{x}_p) + n_k, \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

其中 \hat{x}_i 表示第 i 层信号的估计值,假设前层信号的估计值准确即 $\hat{x}_i = \tilde{x}_i$, 式(4)可简化为

$$s_k = \tilde{r}_{k,k} \tilde{x}_k + n_k \quad (5)$$

根据式(5)经解调判决即检出发射信号 \tilde{x}_k 。

文献[4]指出,对于采用基于 QR 分解的分层检测,第 k 层获得的分集增益为 k 。因此,分层检测时越高层获得的分集增益越大,层数越低性能越差,层数越高性能越好,最高层具有最低的误码率。基于此我们通过每次抵消具有最低误码率的信号,减小传统 QR 分解算法中由于误差传播带来的低层信号检测误码性能对高层检测误码性能的影响。我们规定 $\mathbf{y}^{(i)}$, $\tilde{\mathbf{H}}^{(i)}$ 和 $\tilde{\mathbf{z}}^{(i)}$ 分别为第 i 步时重构的接收信号,第 i 步排序后的信道矩阵和第 i 步变换后的信号矢量。因此,系统最初接收的信号矢量 \mathbf{y} 为 $\mathbf{y}^{(1)}$ 。第 1 步,我们使用次优排序的 QR 分解算法分解信道矩阵:

$$[\tilde{\mathbf{Q}}^{(1)}, \tilde{\mathbf{R}}^{(1)}] = \mathbf{s}_{\text{qr}}[\mathbf{H}^{(1)}] \quad (6)$$

\mathbf{s}_{qr} 表示次优排序 QR 分解,由此可以得到变换矢量 $\tilde{\mathbf{z}}^{(1)}$ 为

$$\tilde{\mathbf{z}}^{(1)} = \tilde{\mathbf{R}}^{(1)} \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{Q}}^{(1)H} \mathbf{n} \quad (7)$$

其中 $\tilde{\mathbf{R}}^{(1)}$ 为上三角矩阵。根据式(4),可以得到待检信号 $\tilde{s}_M^{(1)}$ 为

$$\tilde{s}_M^{(1)} = \tilde{z}_M - \sum_{p=1}^{M-1} \tilde{r}_{k,p}^{(1)} \hat{x}_p^{(1)} \quad (8)$$

根据 $\tilde{s}_M^{(1)}$ 进行判决得到估计值 $\hat{x}_M^{(1)}$ 。

$$\hat{x}_M^{(1)} = \text{Rec}[\tilde{s}_M^{(1)} / \tilde{r}_{M,M}^{(1)}] \quad (9)$$

其中 $\text{Rec}[\cdot]$ 表示判决运算,根据调制映射确定发送的星座点。 $\tilde{r}_{M,M}^{(1)}$ 表示上三角矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}^{(1)}$ 中第 M 行第 M 列的元素。假设判决的符号正确,我们可以从接收的信号矢量中消除第 1 步得到的估计信号 $\hat{x}_M^{(1)}$ 。

$$\mathbf{y}^{(2)} = \mathbf{y}^{(1)} - \tilde{\mathbf{H}}_M^{(1)} \hat{x}_M^{(1)} \quad (10)$$

其中 $\tilde{\mathbf{H}}_M^{(1)}$ 表示第 1 步排序后信道矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}^{(1)}$ 的第 M 列,包含所有与抵消掉的信号 $\hat{x}_M^{(1)}$ 有关的信道系数。抵消后的接收信号可重新表示为

$$\mathbf{y}^{(2)} = \mathbf{H}^{(2)} \mathbf{x}^{(2)} + \mathbf{n} \quad (11)$$

假定第 i 步排序后的信道矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}^{(i)}$ 的第 n 列对应排序前信道矩阵 $\mathbf{H}^{(i)}$ 的第 $p(n)$ 列,那么矩阵 $\mathbf{H}^{(2)}$ 为通过删除原信道矩阵 $\mathbf{H}^{(1)}$ 的第 $p(M)$ 列得到。同样发射

信号矢量 $\mathbf{x}^{(2)}$ 为 $(M-1) \times 1$ 的矢量:

$$\mathbf{x}^{(2)} = [x_M^{(1)}, x_{M-1}^{(1)}, \dots, x_{p(M)+1}^{(1)}, x_{p(M)-1}^{(1)}, \dots, x_1^{(1)}]^T \quad (12)$$

抵消掉前级检测的信号, 接收信号矢量 $\mathbf{y}^{(2)}$ 可以看作一个新的 MIMO 系统中接收到的信号, 该系统有 $M-1$ 根发射天线, N 根接收天线。我们可以继续使用 QR 分解并如在第 1 步中一样估计出信号 $\hat{\mathbf{x}}_{M-1}^{(2)}$ 。因此, 在后面每步我们都可以分解在上一步中构造的新的信道矩阵。

$$[\tilde{\mathbf{Q}}^{(i)}, \tilde{\mathbf{R}}^{(i)}] = \text{s_qr}[\mathbf{H}^{(i)}] \quad (13)$$

其中 $\mathbf{H}^{(i)}$ 为通过删除前一步中信道矩阵的第 $p(M-i+2)$ 列获得

$$\mathbf{H}^{(i)} = \mathbf{H}_{\text{delete}[p(M-i+2)]}^{(i-1)} \quad (14)$$

每步中消除已检测信号后的等效接收信号矢量可表示为

$$\mathbf{y}^{(i)} = \mathbf{y}^{(i-1)} - \tilde{\mathbf{H}}_{M-i+2}^{(i-1)} \hat{\mathbf{x}}_{M-i+2}^{(i-1)} \quad (15)$$

其中 $i = 2, \dots, M$ 表示当前检测级数, $i-1$ 表示前一级检测级数; $\tilde{\mathbf{H}}_{M-i+2}^{(i-1)}$ 为信道矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}^{(i-1)}$ 的第 $M-i+2$ -th 列 (第 $i-1$ 步矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}^{(i-1)} = [\tilde{\mathbf{h}}_{M-i+2}^{(i-1)}, \dots, \tilde{\mathbf{h}}_2^{(i-1)}, \tilde{\mathbf{h}}_1^{(i-1)}]$), $\mathbf{y}^{(i-1)}$ 为前级等效的接收信号矢量。接着可以根据分解的信道矩阵获得变换后的矢量 $\tilde{\mathbf{z}}^{(i)}$ 为

$$\tilde{\mathbf{z}}^{(i)} = \tilde{\mathbf{Q}}^{(i)\text{H}} \mathbf{y}^{(i)} = \tilde{\mathbf{R}}^{(i)} \tilde{\mathbf{x}}^{(i)} + \tilde{\mathbf{Q}}^{(i)\text{H}} \mathbf{n} \quad (16)$$

得到变换矢量, 第 i 步中的第 k 层信号通过式(4)获得

$$\tilde{\mathbf{s}}_k^{(i)} = \tilde{\mathbf{z}}_k^{(i)} - \sum_{p=1}^{k-1} \tilde{r}_{k,p}^{(i)} \hat{\mathbf{x}}_p^{(i)} \quad (17)$$

其中 $\hat{\mathbf{x}}_p^{(i)}$ $p = 1, \dots, M-i-1$ 由 QR 分解检测算法得到。每步中最高层的估计信号最终可以得到

$$\hat{\mathbf{x}}_{M-i+1}^{(i)} = \text{Rec}[\tilde{\mathbf{s}}_{M-i+1}^{(i)} / \tilde{r}_{M-i+1, M-i+1}^{(i)}] \quad (18)$$

经过 M 步检测后, 最终得到估计的信号矢量。

$$\hat{\mathbf{x}} = [\hat{\mathbf{x}}_M^{(1)}, \hat{\mathbf{x}}_{M-1}^{(2)}, \dots, \hat{\mathbf{x}}_1^{(M)}] \quad (19)$$

其中 $\hat{\mathbf{x}}_k^{(i)}$ 表示第 i 步中检测得到的第 k 层信号。该矢量与原发送信号矢量 \mathbf{x} 仅在元素排列的顺序上不同, 经过重新排序得到最终的估计矢量 $\hat{\mathbf{x}}$ 。

已有研究表明, 串行干扰抵消的 BLAST 检测算法在每步中需要信道矩阵的求逆运算和 $M-i$ 行和列的相关运算, 采用降低复杂度的 SVD 分解对信道矩阵求逆从而完成所有检测的计算复杂度约为 $N^2 M^2 + 2NM^3 + (15/4)M^4$ [6]。本文所提算法在每步使用次优排序后, 对于有 M 个发射天线, N 个接收天线的系统需要 M 步才能完成所有信号的检测。每步均要对 N 行 $(M-i+1)$ 列的信道矩阵进行一次次优排序 QR 分解运算。对于一个 N 行 K 列的矩阵进行次优排序 QR 分解所需的复杂度约为 $(3/2)K^2 N$

+ $(1/2)KN$, 因此完成检测所需总的计算复杂度为 $\sum_{k=1}^M \left(\frac{3}{2} k^2 N + \frac{1}{2} kN \right)$ 。在排序计算时, 矩阵中部分矢量的模值在之前的计算中已获得, 无需再次计算, 因此应减去这部分运算的开销, 约为 $(M^2 N/2) - (MN/2)$ 。最终得到总的计算复杂度约为 $(1/2)NM^3 + (1/2)NM^2 + NM \approx (1/2)NM^3$ 。可以看出该计算复杂度远低于 BLAST 算法复杂度, 在收发天线数较大时复杂度降低尤为明显。

4 仿真及性能分析

我们对所提算法在 MIMO 平坦瑞利衰落信道下的误码性能进行了仿真, 并且与几种已知算法的性能进行了对比。仿真中使用的信道为平坦瑞利衰落信道, 并假设收发端使用理想交织。 M 个发射天线发送的数据相互独立。为了分析简便, 仿真中采用未编码系统以及 QPSK 调制方式, 结论可以扩展到编码系统和高阶调制方式。横坐标中 $E_b = E_s / (-10 \log m \text{ (dB)})$ 为平均比特能量, m 为调制阶数。图 1 所示为采用蒙特卡罗仿真得到的未编码 MIMO 系统, 发射天线数 $M = 4$, 接收天线数 $N = 4$ 情况下的各算法的误码性能。图中比较的算法一共有 5 种, 分别为: 不排序 QR 分解检测算法表示为 Unsorted-QR, 次优排序 QR 分解检测算法表示为 Sort-QR, 基于迫零的 BLAST 检测算法表示为 VBLAST, 最优排序 QR 分解检测算法表示为 Per-QR 和本文所提算法表示为 Improved-QR。其中最优排序 QR 分解检测算法通过搜索所有可能的信道矩阵列排序方式, 从中找出分解后上三角矩阵对角元素排列最优的分解方式。从图中可以看出在误码率约 10^{-3} 性能处, 本文所提的算法与 BLAST 算法相比有约 3 dB 的增益, 与次优排序 QR 分解检测算法比有约 4 dB 的增益。这 3 种算法复杂度最高的是 BLAST 算法, 最低的是次优排序 QR 分解算法, 本文所提算法介于两者之间。需要指出的是, 为了进一步降低所提算法的复杂度, 在每步进行 QR 分解时可采用最简单的不排序 QR 分解算法, 这样减少了每次分解的复杂度。通过仿真, 采用减小复杂度后算法的性能与 BLAST 算法性能一样, 而复杂度极大减少。图中还可以看出最优排序 QR 分解算法的性能与 BLAST 算法的性能基本相同, 由于仿真样本数有限因此两者间性能有波动, 未排序 QR 分解检测性能最差。

图 2 仿真了天线数较大情况下的性能。发射天线数, 接收天线数均为 6。同样采用 QPSK 调制。可以看出在误码率约 10^{-3} 性能处, 本文所提的算法

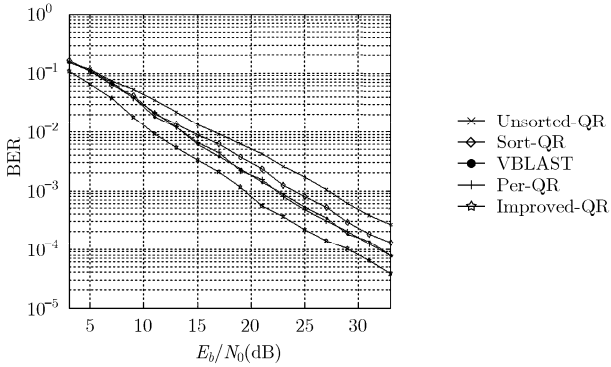


图 1 $M = 4, N = 4$, QPSK 调制性能

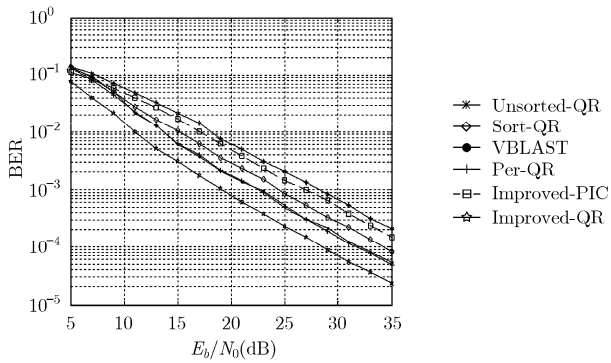


图 2 $M = 6, N = 6$, QPSK 调制性能

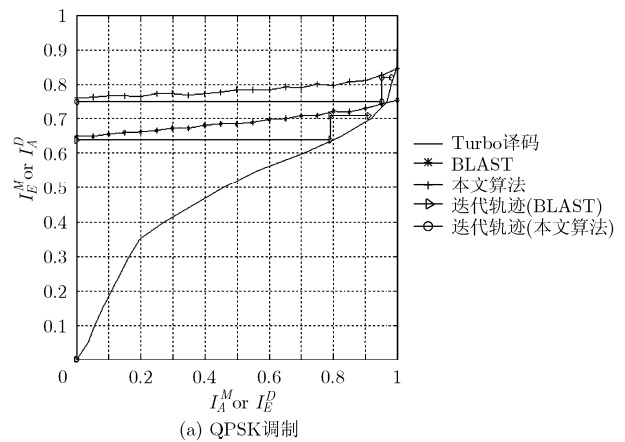
与 BLAST 算法相比有约 4 dB 的增益, 与次优排序 QR 分解检测算法比有约 6 dB 的增益。可以看出收发天线数越大, 增益越大, 复杂度减少越多, 因此, 在大天线数 MIMO 系统中所提算法更具优势。

文献[7]提出了一种改进的多级并行干扰抵消算法。该算法要求矩阵逆, 并且为了改进性能每级并行检测时各天线上的信号必须一次串行的检测出来并更新矩阵。为了比较两者性能, 图 2 中也给出了该算法的性能曲线, 表示为 Improved-PIC, 仿真中采用的是 2 级干扰抵消, 随着级数的增加性能会改善, 但会加大运算量。可以看出在达到误码率 10^{-3} 时, 所提算法与 Improved-PIC 算法相比有约 8 dB 的增益。需要指出的是, 本文主要针对基于迫零的算法进行讨论, 若采用广义 QR 分解替代该算法中的 QR 分解则性能优于基于 MMSE 的 BLAST 算法。

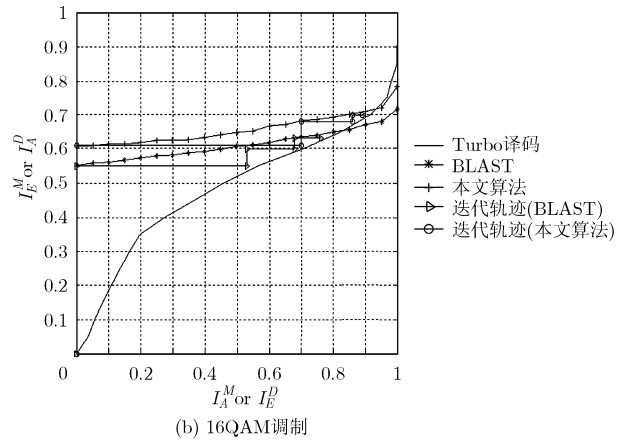
随着迭代技术的出现, 如今的 MIMO 系统中的检测输出通常都与后级的软译码器级联, 通过交换软信息, 经过若干次迭代后降低系统的误码率。目前衡量迭代系统好坏最有效的方法就是采用外信息转移图^[8]。对于检测部分, 在给定先验信息时, 输出的外信息的互信息越大说明通过迭代得到的性能改善越明显。为便于比较, 本文对不同系统采用硬判决抵消迭代接收时的性能进行了比较, 即每层抵消的

为经过判决后的信号。图 3 给出了通过蒙特卡罗仿真得到的采用硬判决抵消软输出时使用 BLAST 算法迭代接收和本文所提算法迭代接收的外信息转移曲线, 所仿系统有 4 根发射天线和 4 根接收天线。

其中实线为后级级联码率为 1/2 的 Turbo 码时接收端软译码输出的外信息转移曲线。图 3(a)给出了调制方式采用 QPSK 调制格雷映射时的外信息转移曲线, 所仿符号信噪比为 $E_s/N_0 = 4$ dB; 图 3(b)给出了采用 16 QAM 调制反格雷映射时的外信息转移曲线, 映射的顺序为 [1 16 2 15 6 11 5 12 7 10 3 14 4 13 8 9], 所仿符号信噪比为 $E_s/N_0 = 10$ dB。其中横坐标为检测器先验信息互信息 I_A^M 或译码器外信息互信息 I_E^D ; 纵坐标表示为检测器外信息互信息 I_E^M 或译码器先验信息互信息 I_A^D 。可以看出, 在相同条件下本文所提算法输出的外信息大于迭代 BLAST 算法输出的外信息。图 3 分别给出了两种系统迭代接收时的迭代轨迹。从给出的迭代轨迹示例可以看出在相同迭代次数下, 本文所提算法得到的性能改善优于迭代 BLAST 系统, 并且最终收敛点优于迭代 BLAST, 说明最终收敛的系统性能优于迭代 BLAST 系统。



(a) QPSK 调制



(b) 16QAM 调制

图 3 $M = 4, N = 4$, 迭代系统性能

5 结束语

本文提出了一种应用于空时分层结构的基于QR分解的检测算法。该算法可广泛应用与MIMO及MIMO迭代接收系统中。该算法通过采用次优排序的QR分解检测算法并且逐次抵消掉具有最小错误概率的信号,不仅避免了对信道矩阵求逆的复杂运算还提高了系统的误码性能。结果表明所提算法性能优于传统BLAST算法以及基于QR分解的串行干扰抵消算法。通过引入迭代译码,保证较低复杂度的同时性能可以得到进一步改善。

参考文献

- [1] Wolniansky 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[C]. IEEE International Symposium on Signals, Systems and Electronics (ISSSE), Pisa, Italy, September 1998: 295-300.
- [2] 丁子哲, 张贤达. 基于串行干扰抵消的 V-BLAST 检测[J]. 电子学报, 2007, 35(6A): 19-24.
Ding Zi-zhe and Zhang Xian-da. V-blast detection based on successive interference cancellation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(6A): 19-24.
- [3] 郭志恒, 李立华, 陶小峰. 快速 V-BLAST 排序检测方法[J]. 北京邮电大学学报, 2007, 30(4): 83-86.
Guo Zhi-heng, Li Li-hua, and Tao Xiao-feng. Fast ordering detection algorithm for V-blast systems[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2007, 30(4): 83-86.
- [4] Choi J. Nulling and cancellation detector for MIMO channels and its application to multistage receiver for coded signals: performance and optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(5): 1207-1216.
- [5] Wübben D, Böhneke R, and Rinas J, *et al.* Efficient algorithm for decoding layered space-time codes[J]. *Electronics Letters*, 2001, 37(22): 1348-1350.
- [6] Hassibi B. An efficient square-root algorithm for blast [C]. IEEE Intl. Conf. Acoustic, Speech, Signal Processing, Turkey, June 5-9, 2000, 2: 737-740.
- [7] Wang W, Jin R, and Geng J. Improved partial parallel multistage detection for V-BLAST system[J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(1): 43-44.
- [8] Zarikoff B W and Cavers J K. EXIT analysis of a soft-input/soft-output iterative multiuser detector[C]. IEEE International Conference on Communications, Singapore, June, 2006, 11: 4965-4970.

陈亮: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为移动通信、信号与信息处理等.

李建东: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 从事宽带无线IP技术、移动通信、软件无线电、Ad hoc 自组织网络等方面的研究.

陈东: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为认知无线电.