

协作 MIMO 中一种新的分布式 VBLAST 自适应 DFE 算法

许晓荣 郑宝玉 崔景伍 解培中
(南京邮电大学信号处理与传输研究院 南京 210003)

摘要: 具有低检测复杂度且可快速收敛的自适应空时均衡算法是实现多用户协作 MIMO 分布式空时编译码的关键。该文研究了分布式垂直型贝尔实验室分层空时编码(D-VBLAST)在多天线接收端的空时判决反馈均衡(DFE), 提出了基于最小二乘准则的 RLS-MIMO-DFE 检测算法。相对于分布式 VBLAST 的极大似然(ML), 迫零-排序串行干扰消除(ZF-OSIC)等检测算法, 该算法可以达到快速收敛, 且具有较低检测复杂度。理论计算和仿真研究表明, 在分布式 VBLAST 2×2 系统中, 尽管 RLS-MIMO-DFE 算法性能稍逊于 ML 检测, 但该算法可以有效折衷检测性能与计算复杂度, 且自适应信道变化, 可满足协作 MIMO 下行链路节点的实时性处理要求。

关键词: 协作 MIMO; 分布式 VBLAST; RLS-MIMO-DFE; ML 检测; 算法复杂度

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)01-0235-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00117

A Novel Distributed VBLAST Adaptive DFE Algorithm in Cooperative MIMO

Xu Xiao-rong Zheng Bao-yu Cui Jing-wu Xie Pei-zhong

(Institute of Signal Processing and Transmission, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210003, China)

Abstract: The significant problem for the implementation of distributed space-time encoding and decoding in multi-user cooperative MIMO is the adaptive space-time equalization algorithm with low detection complexity and fast convergence property. Space-time Decision Feedback Equalization (DFE) at multi-antenna receiver in Distributed Vertical Bell Labs Layered Space-Time (D-VBLAST) system is studied. RLS-MIMO-DFE detection algorithm based on Least Square (LS) criterion is proposed. Compared with other D-VBLAST detection algorithms such as Maximum Likelihood (ML), Zero Forcing Ordered Successive Interference Cancellation (ZF-OSIC), the proposed algorithm has the unique property such as the fast convergence and the lower detection complexity. Theoretical derivation and simulated results show that, in D-VBLAST 2×2 system, although the performance of RLS-MIMO-DFE is a bit inferior to ML detection, the proposed algorithm could compromise the detection performance and computation complexity efficiently, and adapt to channel variation simultaneously. Thus it could satisfy real-time requirements for cooperative nodes in downlink channel.

Key words: Cooperative MIMO; Distributed VBLAST; RLS-MIMO-DFE; ML(Maximum Likelihood) detection; Algorithm complexity

1 引言

协作 MIMO 系统利用单天线终端相互协作, 形成虚拟多天线发射阵列, 结合接收端基站多天线接收, 可以有效利用 MIMO 空间分集增益, 抵抗多径衰落并提高系统性能^[1]。研究表明, 空时编码协作在快衰落信道下可以获得最大分集增益。然而, 协作 MIMO 中的分布式空时编码普遍采用极大似然(ML)

检测算法, 其检测复杂度随协作节点数增加呈指数增长^[2]。利用空间复用的分布式分层空时编码, 可以有效提高数据速率, 且译码算法复杂度随数据速率增加线性升高^[3]。分布式 VBLAST(D-VBLAST)利用多个协作节点天线间的空间复用, 将发射端数据流按协作节点数分为多个子数据流, 各子数据流对应于各协作节点的发射天线进行并行发送, D-VBLAST 的复杂度主要集中于解码(检测)^[4]。借鉴传统 VBLAST 检测算法, 如: ML 算法^[3]、迫零-排序串行干扰消除(ZF-OSIC)算法^[5](ZF 是 MMSE 在高 SNR 下的特殊情形^[6]), 以及基于平坦衰落假设的 VBLAST 接收端空时均衡算法^[7], 文章将分布式 VBLAST 编码与接收端非线性空时 DFE 结合, 在

2009-01-21 收到, 2009-07-13 改回

国家自然科学基金(60972039), 江苏省自然科学基金(BK2007729), 江苏省高校自然科学基金重大基础研究项目(06KJA51001), 南京邮电大学攀登计划(NY207061, NY208036)和江苏省高校研究生科研创新计划(CX09B_147Z)资助课题

通信作者: 许晓荣 d0702@njupt.edu.cn

文献[7]基础上,提出了基于LS的RLS-MIMO-DFE检测算法,并分析了该算法的复杂度。

2 分布式VBLAST及其检测算法

2.1 协作MIMO分布式VBLAST模型

考虑信源节点 S 周围可协作中继节点数为 $(N_T - 1)$,接收端基站天线数为 N_R ,协作MIMO采用时分信道建模。在时隙1, S 将数据包广播给周围可协作节点;在时隙2,协作节点与 S 构成具有 N_T 根虚拟天线的发射端,采用分布式VBLAST实现 N_T 个协作节点的空间复用,具有 N_R 根天线的接收端进行多用户检测,以实现分布式VBLAST解码与协作信号重构。忽略多普勒频移,在准静态Rayleigh衰落信道下,信道变化只发生在两个突发数据包之间,设 $\{s_l(k)\}$ ($l=1,2,\dots,N_T$)为时刻 k 协作MIMO N_T 根发射天线以同一频率发射彼此独立的信息符号,接收端接收信号 $\{r_m(k)\}$ ($m=1,2,\dots,N_R$)以符号间隔采样,频率选择性子信道有限冲击响应向量 $\mathbf{h}_{ji} = [h_{ji}(0), h_{ji}(1), \dots, h_{ji}(L-1)]$, $i=1,2,\dots,N_T$, $j=1,2,\dots,N_R$,其中 $h_{ji}(l)$ $l=0,1,\dots,L-1$ 为独立同分布零均值复高斯过程, L 为 $N_T N_R$ 个频率选择性子信道最大长度(信道阶数)^[7]。分布式VBLAST信道传输模型为

$$\mathbf{r}(k) = \mathbf{H} \cdot \mathbf{S}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (1)$$

其中,接收信号向量 $\mathbf{r}(k) = [r_1(k), r_2(k), \dots, r_{N_R}(k)]^T$,信道矩阵 $\mathbf{H} = \{h_{ji}\}$ ($i=1,2,\dots,N_T; j=1,2,\dots,N_R$),协作发射信号向量 $\mathbf{S}(k) = [s_1(k), s_2(k), \dots, s_{N_T}(k)]^T$,信道加性噪声向量 $\mathbf{v}(k) = [v_1(k), v_2(k), \dots, v_{N_R}(k)]^T$ 。接收信号表示为

$$\mathbf{r}(k) = \sum_{i=1}^{N_T} \mathbf{H}_i \mathbf{s}_i(k) + \mathbf{v}(k) \quad (2)$$

其中 $\mathbf{H}_i = [h_{1i}, h_{2i}, \dots, h_{N_R i}]^T$ ($i=1,2,\dots,N_T$), $\mathbf{s}_i(k) = [s_i(k), s_i(k-1), \dots, s_i(k-L+1)]^T$ 为第 i 个协作节点的 L 维发射信号列向量。

2.2 分布式VBLAST编码及接收端检测算法

采用时分信道建模,假设 S 发出的信源序列 $x(i)$, $i=0,1,2,\dots$,第 n 个协作节点在第 i 时刻发送的信号为 s_n^i ,则传输矩阵 $\mathbf{S} = [s_n^i]$ 如式(3)所示。

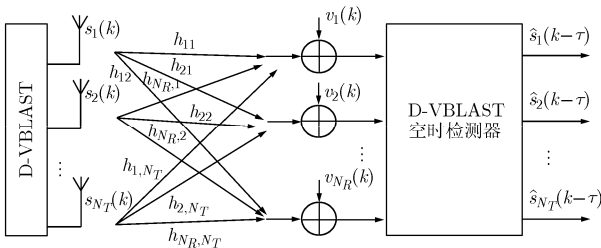


图1 协作MIMO分布式VBLAST信道传输模型

$$\mathbf{S} = (\mathbf{s}(k), \mathbf{s}(k+1), \dots, \mathbf{s}(k+N_T)) = \begin{pmatrix} s_1^1 & s_1^2 & \dots & s_1^{N_T} \\ s_2^1 & s_2^2 & \dots & s_2^{N_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{N_T}^1 & s_{N_T}^2 & \dots & s_{N_T}^{N_T} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(i+N_T) & x(i) & \dots & x(i+N_T-1) \\ x(i+N_T+1) & x(i+1) & \dots & x(i+N_T) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(i+2N_T-1) & x(i+N_T-1) & \dots & x(i+2N_T-2) \end{pmatrix} \quad (3)$$

根据文献[8],本文对信道模型假设如下:(1)接收端 D 已知信道状态信息(CSI)而协作节点未知CSI;(2)协作节点与 D 之间为频率选择性衰落,衰落系数 h_{ji} ($j=1,2,\dots,N_R$ $i=1,2,\dots,N_T$)服从Rayleigh分布, $|h_{ji}|^2$ 服从 $\chi^2(2)$ 分布;(3)协作节点之间信道质量较好,即 $(N_T - 1)$ 个中继总可以正确解调 S 广播信息,协作节点可构成具有 N_T 根发射天线的虚拟阵列;(4)协作节点与多天线接收端同步良好;(5)协作MIMO发送符号采用BPSK/QPSK调制,相邻数据包时间间隔内信道系数保持不变。

对于频率选择性深衰落信道(多个等能量多径,ISI严重),由于低复杂度的线性空时均衡算法均衡效果较差。我们通常采用非线性均衡算法,如:极大似然序列估计(MLSE)和DFE等^[7,9]。尽管ML检测性能通常优于DFE,但其复杂度随 N_T 呈指数增长,为 $O(M^{N_T L})$ 。其中, M 为符号调制阶数, L 为频率选择性信道阶数。对于分布式VBLAST,采用ML检测即寻找使得Frobenius范数最小的矩阵 \mathbf{s}

$$\mathbf{s}(k) = \arg \min \|\mathbf{r}(k) - \mathbf{H}\mathbf{s}(k)\|_F^2 \quad (4)$$

MLSE检测使用遍历搜索,若采用 M 阶调制,频率选择性信道阶数 L ,则 \mathbf{s} 具有 $M^{N_T L}$ 种可能性,因此其复杂度非常高。ZF-OSIC作为传统VBLAST常用检测算法,它是一种非线性迭代译码算法,与ZF-DFE结构相同^[7]。该算法需要进行 N_T 次矩阵求逆和 N_T 次排序,当虚拟发射天线数 N_T 增大时,算法复杂度也随之增大。文献[7]指出,当 $N_T = N_R$ 时,该算法复杂度约为 $O((27/4)N_T^4)$ 。当 N_T 增加时,其检测复杂度比ML要低许多。

3 自适应空时判决反馈均衡算法

3.1 RLS-MIMO-DFE算法

自适应空时DFE采用判决反馈机制,首先检测判决器输出,提取出与判决器相关的噪声,并反馈到判决器输入端,以消除噪声对抽头信号影响^[10]。文献[11]提出了3种VBLAST空时DFE检测算法:

MIMO-DFE, 部分连接 MIMO-DFE 和完全连接 MIMO-DFE, 它们的计算复杂度均正比于 $O([N_R(L_F + 1) + N_T L_B]^3)$ 。其中, L_F 为前馈 FIR 阶数, L_B 为反馈 FIR 阶数, 且 $L_B \leq L_F$ 。基于以上检测算法, 本文提出了基于 LS 准则的分布式 VBLAST 接收端 RLS-MIMO-DFE 算法, 该算法结合空时 DFE 与自适应 LS 算法优势, 具有较低计算复杂度与快速收敛特性, 其接收机框图如图 2 所示。

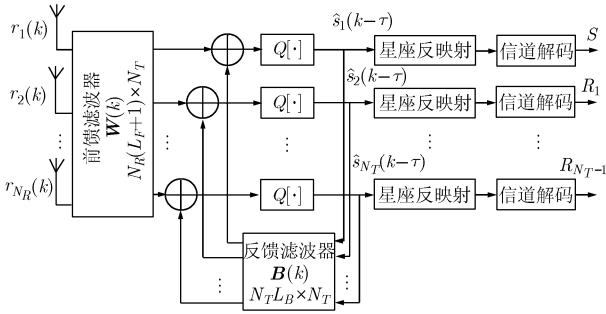


图 2 分布式 VBLAST 接收机 RLS-MIMO-DFE 检测框图

前馈滤波器 $\mathbf{W}(k) = [\mathbf{w}_1(k), \mathbf{w}_2(k), \dots, \mathbf{w}_{N_T}(k)]$ 由 N_T 个前馈空时滤波器组成, 每个空时滤波器由 N_R 个 L_F 阶 FIR 构成, $\mathbf{w}_i(k)$ $i = 1, 2, \dots, N_T$ 为第 i 个前馈空时滤波器的 $N_R(L_F + 1)$ 维列向量。反馈滤波器 $\mathbf{B}(k) = [\mathbf{b}_1(k), \mathbf{b}_2(k), \dots, \mathbf{b}_{N_T}(k)]$ 由 N_T 个反馈空时滤波器组成, 每个空时滤波器由 N_R 个抽头数为 L_B 的反馈横向 FIR 构成, $\mathbf{b}_i(k)$ $i = 1, 2, \dots, N_T$ 为第 i 个反馈空时滤波器的 $N_T L_B$ 维列向量。传统分布式 MIMO-DFE 算法需对 $N_R(L_F + 1) + N_T L_B$ 维矩阵求逆, 其复杂度为 $O([N_R(L_F + 1) + N_T L_B]^3)$, 且不能自适应信道变化。根据文献[7,12], 若采用自适应 MIMO-DFE 可在降低算法复杂度的同时自适应信道变化。所提的 RLS-MIMO-DFE 算法将 $\mathbf{W}(k)$ 输出各支路与 $\mathbf{B}(k)$ 输出各支路相加后进行调制星座点的量化判决, 找出与星座中 Euclidean 距离最近的点判决为发送符号, 即检测出协作 MIMO 中各协作节点的发射层信号 $\hat{s}_i(k - \tau)$, $i = 1, 2, \dots, N_T$ 。RLS-MIMO-DFE 算法具体流程如下:

算法代价函数:

$$J = \sum_{k=0}^i \lambda^{i-k} \left| \hat{s}_i(k - \tau) - \begin{pmatrix} \mathbf{w}_i(k) \\ \mathbf{b}_i(k) \end{pmatrix}^H \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{r}}(k) \\ \hat{\mathbf{s}}(k - \tau - 1) \end{pmatrix} \right|^2, \quad i = 1, 2, \dots, N_T \quad (5)$$

其中, $0 < \lambda < 1$ 为遗忘因子, 通常取 $\lambda = 0.99$ 。 $\mathbf{w}_i(k)$ 为前馈滤波器在 k 时刻权向量, $\mathbf{b}_i(k)$ 为反馈滤波器在 k 时刻权向量, $\tilde{\mathbf{r}}(k) = [\tilde{r}_1(k), \tilde{r}_2(k), \dots, \tilde{r}_{N_R}(k)]^T$ 为 k 时刻 N_R 维接收列向量(前馈滤波器输入向量),

$\hat{\mathbf{s}}(k - \tau - 1) = [\hat{s}_1(k - \tau - 1), \hat{s}_2(k - \tau - 1), \dots, \hat{s}_{N_T}(k - \tau - 1)]^T$ 为 k 时刻经量化后输出 N_T 维列向量, τ 为时延因子。

步骤1 $k = 0$ $\mathbf{w}_i(0) = 0$, $\mathbf{b}_i(0) = 0$, $\mathbf{P}(0) = \delta^{-1} \mathbf{I}$ 。

步骤2 $k = k + 1$, 误差更新、前馈滤波器权向量和反馈滤波器权向量更新公式分别如下:

$$e(k) = \hat{s}_i(k - \tau) - \begin{pmatrix} \mathbf{w}_i(k - 1) \\ \mathbf{b}_i(k - 1) \end{pmatrix}^H \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{r}}(k) \\ \hat{\mathbf{s}}(k - \tau - 1) \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, N_T \quad (6)$$

$$\mathbf{K}(k) = \frac{\mathbf{P}(k - 1) \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{r}}(k) \\ \hat{\mathbf{s}}(k - \tau - 1) \end{pmatrix}}{\lambda + \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{r}}(k) \\ \hat{\mathbf{s}}(k - \tau - 1) \end{pmatrix}^H \mathbf{P}(k - 1) \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{r}}(k) \\ \hat{\mathbf{s}}(k - \tau - 1) \end{pmatrix}} \quad (7)$$

$$\mathbf{P}(k) = \frac{1}{\lambda} \left[\mathbf{P}(k - 1) - \mathbf{K}(k) \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{r}}(k) \\ \hat{\mathbf{s}}(k - \tau - 1) \end{pmatrix}^H \mathbf{P}(k - 1) \right] \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{w}_i(k) \\ \mathbf{b}_i(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{w}_i(k - 1) \\ \mathbf{b}_i(k - 1) \end{pmatrix} + \mathbf{K}(k) e^*(k), \quad i = 1, 2, \dots, N_T \quad (9)$$

步骤3 重复步骤 2, 直到 $k < N$ (N 为 Monte Carlo 仿真次数), 迭代结束。

3.2 RLS-MIMO-DFE 算法复杂度分析

若接收端已知 CSI, RLS-MIMO-DFE 检测算法首先将 $\mathbf{w}_i, \mathbf{b}_i$ ($1 \leq i \leq N_T$) 调整到最佳权向量, 由于 LS 算法的快速收敛性, 空时判决均衡器权向量 $\mathbf{W}(k)$ 和 $\mathbf{B}(k)$ 达到收敛后 DFE 立即进入跟踪状态, 检测出均方误差最小的一层信号后, 该层影响将作为干扰从接收信号中消除, 依次对 N_T 路信号进行均衡量化后, 判决输出 $\hat{\mathbf{s}}(k - \tau)$ 。该算法复杂度与 $\mathbf{W}(k)$, $\mathbf{B}(k)$ 的阶数 L_F, L_B 有关, 但无需矩阵求逆, 且可以自适应信道变化, 其复杂度较 MIMO-DFE 下降了一个数量级, 为 $O([N_R(L_F + 1) + N_T L_B]^2)$ 。分布式 VBLAST 各检测算法复杂度对比如表 1 所示。

4 数值计算与仿真分析

4.1 RLS-MIMO-DFE 算法迭代误差分析

基于 2.2 节信道模型假设, 本文采用 2×2 (协作节点 $N_T = 2$, 接收节点天线数 $N_R = 2$) 分布式 VBLAST 对协作 MIMO 中 RLS-MIMO-DFE 算法性能进行仿真分析。设置仿真参数如下^[7, 13, 14]。

(1) 前馈 FIR 阶数 $L_F = 5$, 时延参数 $\tau = 2$, 遗忘因子 $\lambda = 0.99$, $\mathbf{P}(0)$ 初值中的正数 $\delta = 5$, 反馈 FIR 阶数 $L_B = 1$, 前馈滤波器权向量初值 $\mathbf{w}_i(0) = 0$, 反馈滤波器权向量初值 $\mathbf{b}_i(0) = 0$ ^[7];

(2) LMS-MIMO-DFE 算法步长因子 $\mu =$

0.01^[7];

(3) 发送符号采用 BPSK 调制, Gray 符号映射, 接收端经检测、星座解映射判决后的 SER 等同于 BER;

(4) Monte-Carlo 仿真次数: 3000。

图 3 为分布式 VBLAST 2×2 协作 MIMO 系统自适应 MIMO-DFE 检测算法均方误差收敛曲线。可以看出, 若达到均方误差功率收敛于 0.2, RLS-MIMO-DFE 迭代 100 次, 而 LMS-MIMO-DFE 需迭代约 350 次。因此, RLS-MIMO-DFE 可使前/反馈均衡器的权值迅速收敛到最佳权向量。

4.2 分布式 VBLAST 检测算法性能比较

图 4 表示了频率选择性信道下分布式 VBLAST 2×2 接收端 ML, ZF-OSIC 和 RLS-MIMO-DFE 3 种检测算法性能。在低 SNR 区域, 3 种检测算法性能差异并不明显, 但在高 SNR 区域, ML 明显优于 ZF-OSIC 与 RLS-MIMO-DFE。当 BER 为 10⁻² 时, ML 优于 RLS-MIMO-DFE 约 4 dB, RLS-MIMO-DFE 则明显优于 ZF-OSIC。然而 ML 具有呈指数增长的复杂度, 由于协作 MIMO 下行链路接收节点能量受限, 算法运算量巨大。由表 1 可知, RLS-MIMO-DFE 复杂度较小, 可在性能和运算量开销之间取得较好的折衷。在高 SNR 区域 (SNR > 8 dB), RLS-MIMO-DFE 可以优于 ZF-OSIC 约 (3~4) dB。尽管 RLS-MIMO-DFE 性能稍逊于 ML, 但其低复杂度和快速收敛特性, 可实现协作 MIMO 下行链路节点的自适应实时检测。

文献[14]给出了 Rayleigh 平坦衰落下两协作接收节点 MPSK 调制与 Gray 映射时接收误比特率近似解为

$$P_{\text{bMPSK}} = \frac{1}{2 \log_2 M} \left(1 - (1 + \beta^2)^{-1/2} \right)^2 \left(2 + (1 + \beta^2)^{-1/2} \right) \quad (10)$$

其中 $\beta^{-1} = \sqrt{\gamma_s} \sin(\pi/M)$ 。文献[11]给出了 Rayleigh 平坦衰落 BPSK 调制下 N_R 根天线接收分集时 VBLAST 结构无干扰(单层)BER 限

$$P_{\text{boundBPSK}} = \left(\frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_b}{1 + \bar{\gamma}_b}} \right) \right)^{N_R} \sum_{k=0}^{N_R-1} \left(\frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_b}{1 + \bar{\gamma}_b}} \right) \right)^k \quad (11)$$

其中 $\bar{\gamma}_b$ 为接收平均比特能噪比。

将式(10), 式(11)分别作为分布式 VBLAST 2×2 系统 Rayleigh 衰落 BPSK 调制时 BER 理论值与理论下限, 采用 Monte Carlo 仿真与数值计算结合, 得到 RLS-MIMO-DFE 与 ML 检测的仿真与理论值比较如图 5 所示。由于仿真采用频率选择性信道, 理论值根据 Rayleigh 平坦衰落推导得出, 故理论值均优于仿真值。由于 Monte Carlo 仿真时衰落信道采用循环对称复高斯信道模拟, 仿真随机性导致在某些 SNR 取值点所求 BER 与理论值相差较大(由于采用 BPSK 调制, Gray 符号映射, 在此 SER 等同于 BER), 而理论数值计算得到的曲线具有较好的连续性。ML 算法是最优空时译码算法, 其检测性能在整个 SNR 范围内均最接近于理论值。当 SNR 大于 6 dB 后, 仿真值与理论值差异逐渐增大, 如在 SER = 10⁻², 理论值要优于 ML 约 2 dB, 优于 RLS-MIMO-DFE 约 6 dB。理论值与理论下限的差异约 3 dB 左右, 说明分布式 VBLAST 仅利用了空间复用增益, 使接收端分集增益有所下降。

表 1 分布式 VBLAST 检测算法复杂度比较

算法	ML	ZF-OSIC	MIMO-DFE	RLS-MIMO-DFE
计算复杂度	$O(M^{N_r L})$	$O((27/4)N_r^4)$	$O([N_r(L_f + 1) + N_r L_b]^3)$	$O([N_r(L_f + 1) + N_r L_b]^2)$

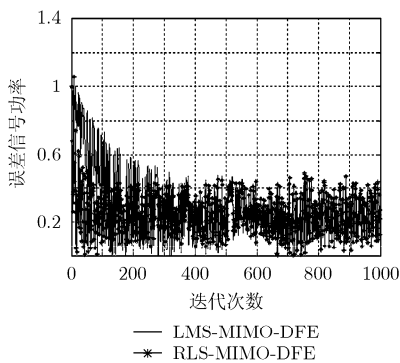


图 3 分布式 VBLAST 2×2 自适应 MIMO-DFE 检测算法均方误差收敛曲线

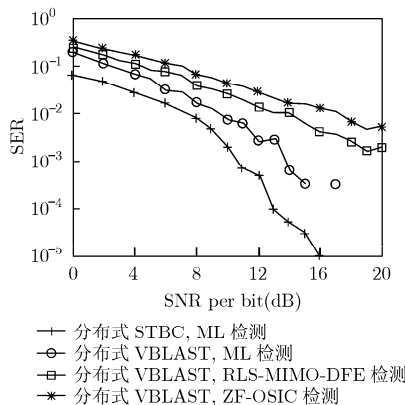


图 4 分布式 VBLAST 2×2 系统各检测算法性能比较

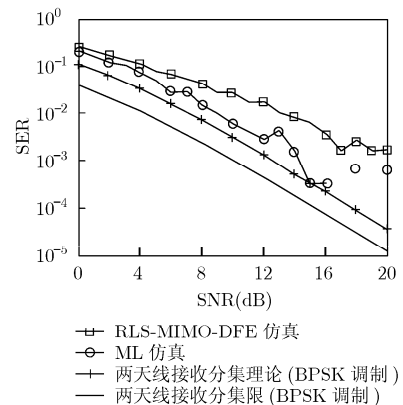


图 5 分布式 VBLAST 2×2 系统检测算法仿真与理论比较

5 结束语

针对协作 MIMO 中分布式空时编码采用 ML 检测复杂度较高的情况, 本文提出了采用空间复用分布式 VBLAST 下行链路的 RLS-MIMO-DFE 检测算法。仿真实验表明, 尽管算法检测性能稍逊于 ML, 但其具有较低的检测复杂度和快速收敛特性, 可满足协作 MIMO 下行链路节点自适应实时检测要求, 且可以防止检测误差传播。协作 MIMO 分布式 VBLAST 空间复用可以有效提高节点吞吐量, 但与分布式 STBC 相比, 分布式 VBLAST 吞吐量增加的同时也降低了空间分集增益。当数据传输速率很高时, 协作 MIMO 节点与接收端之间的信道将出现频率选择性, 而本文所提检测算法则可以较好地应用于频率选择性信道下的协作 MIMO 系统。

参考文献

- [1] Cui S, Goldsmith A J, and Bahai A. Energy efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(6): 1089-1098.
- [2] Unger T and Klein A. Cooperative MIMO relaying with distributed space-time block codes. The 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2006). Helsinki, Finland, September 2006: 1-5.
- [3] Jafarkhani H 著, 任品毅译. 空时编码的理论与实践. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 48-78, 194-205.
- [4] Foschini G J Jr, Chizhik D, Gans M J, and Papadias C, et al. Analysis and performance of some basic space-time architectures. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(3): 303-320.
- [5] Golden G D, Foschini G J Jr, Valenzuela R A, and Wolniansky P W. Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture. *IEEE Electronics Letters*, 1999, 35(1): 14-15.
- [6] 李颖, 李佳, 王新梅. 一种改进的分层空时码检测算法. *通信学报*, 2003, 24(3): 113-118.
Li Y, Li J, and Wang X M. An improved detection algorithm of layered space-time codes. *Journal on Communications*, 2003, 24(3): 113-118.
- [7] 姜煜. MIMO 信道下 V-BLAST 接收机关键技术研究. [博士论文], 哈尔滨工程大学, 2006: 34-38, 68-79, 87-93.
- Jiang Y. Research on the key technology of V-BLAST receiver over MIMO channels. [Ph.D. dissertation], Harbin Engineering University, 2006: 34-38, 68-79, 87-93.
- [8] 李兆训. 频率选择性衰落信道下基于协作分集的车际通信. *信息工程大学学报*, 2007, 8(4): 439-442.
Li Z X. Inter-vehicle communications based on collaborative diversity in frequency-selective fading channels. *Journal of Information Engineering University*, 2007, 8(4): 439-442.
- [9] 许晓荣, 郑宝玉, 崔景伍, 邹玉龙. FMT 系统信道均衡技术的研究. *通信学报*, 2008, 29(3A): 5-12.
Xu X R, Zheng B Y, Cui J W, and Zou Y L. Research in the technologies of channel equalization in FMT system. *Journal on Communications*, 2008, 29(3A): 5-12.
- [10] Lozano A and Papadias C. Layered space-time receivers for frequency-selective wireless channels. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, 50(1): 65-73.
- [11] Vucetic B, Yuan J H 著. 王晓海等译. 空时编码技术. 北京: 机械工业出版社, 2004: 26-43, 164-173.
- [12] 史昆, 张旭东. 基于自适应滤波算法的 FIR MIMO 系统均衡. *清华大学学报*, 2004, 44(10): 1414-1417.
Shi K and Zhang X D. Equalization of FIR MIMO systems using an adaptive filter algorithm. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2004, 44(10): 1414-1417.
- [13] Younis W M and Sayed A H. Adaptive channel estimation for MIMO space-time coded communications. The 2004 IEEE Sensor Array and Multi-channel Signal Processing Workshop. Barcelona (SAM), Spain, July 2004: 412-416.
- [14] 邹玉龙, 郑宝玉, 赵贤敬. 一种新的两用户协作分集方案及其性能研究. *电子与信息学报*, 2008, 30(7): 1557-1561.
Zou Y L, Zheng B Y, and Zhao X J. A novel two-user cooperative diversity scheme and performance analysis. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(7): 1557-1561.

许晓荣: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为多用户协作通信中的空时编码与资源分配、认知无线电频谱感知等。
郑宝玉: 男, 1945 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为多用户协作通信、认知无线电技术等。
崔景伍: 女, 1955 年生, 高级工程师, 研究方向为多用户协作通信技术等。
解培中: 女, 1968 年生, 副教授, 研究方向为多用户协作通信技术等。