

## 时变多径 MIMO 信道中一种带自适应信道追踪的序列检测方法

景小荣<sup>①</sup> 周正中<sup>①</sup> 徐征<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>(华东交通大学电气与电子工程学院 南昌 330013)

**摘要:** 该文针对时变多径 MIMO 信道, 各 MISO 子系统首先分别采用混合 MLSE(H-MLSE)处理, 然后结合  $\Gamma$ -幸存状态选择, 提出了一种复杂度可控的、带自适应信道追踪的序列检测方法。与传统的 MLSE 算法相比, 该方法具有 3 个显著特征: 通过参数选择, 可实现对算法复杂度的可控调节; 通过嵌入的判决导向/LMS(DD/LMS)算法, 对各幸存状态转移对应的幸存路径上的信道参数可实现接近零时延追踪; 可部分采用并行处理技术来实现。对具有两条多径的 2X4 MIMO 时变信道通过数值仿真表明: 当  $\Gamma \geq 2$  时, 该方法可获得满意的检测性能。

**关键词:** MIMO 系统;  $\Gamma$ -幸存状态选择; 时变多径信道

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)08-1930-05

## A Sequence Detection Method with Adaptive Channel Tracking in Time-varying Multipath MIMO Channels

Jing Xiao-rong<sup>①</sup> Zhou Zheng-zhong<sup>①</sup> Xu Zheng<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(School of Communication and Information Engineering, UEST of China, Chengdu 610054, China)

<sup>②</sup>(School of Electric and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Adopting the hybrid MLSE (H-MLSE) on each MISO subsystem firstly, and then combining the  $\Gamma$ -selection of survival states, a complexity-controllable sequence detection method with adaptive channel tracking is proposed for Multi-Input Multi-Output (MIMO) time-varying multipath channels. In contrast to the conventional MLSE, the proposed method has three features: (1) the adjustable computational complexity, which can be achieved by adjusting the parameter; (2) the on-line channel tracking with near zero-delay, which is embedded in the scheme and accomplished for each selected survival state transition along the corresponding path by decision-directed/LMS algorithm (DD/LMS); (3) It can be partly implemented by parallel processing technology. The simulation results show the proposed method can achieve the satisfactory detection performance for 2X4 time-varying MIMO channel with two multipaths when  $\Gamma \geq 2$ .

**Key words:** MIMO system;  $\Gamma$ -selection of survival states; Time-varying multipath channel

### 1 引言

随着移动多媒体业务的不断增长, 未来移动通信在频谱效率方面提出了更高的要求, 而 MIMO 技术能够在带宽保持不变的情况下, 成倍地提高通信系统的频谱利用率<sup>[1]</sup>, 因此有望成为未来移动通信中最主要的技术方案之一。在移动通信环境中, 由于信道的时变性及多径效应, 要实现信号的可靠接收, 必须采用有效的接收机实现方案, 以实现时变信道的即时追踪, 同时又能克服符号间干扰(ISI)。文献[2]提出利用 Kalman 滤波来追踪时变信道, 并采用 MMSE 干扰抑制来消除 ISI 的影响, 但由于 Kalman 滤波器本身实现的复杂性, 使该方法并不适宜在实际系统中采用。从理论讲, 对于非时变多径信道环境, 利用维特比算法实现的传统的 MLSE 算法是最佳的, 但在时变环境, 该算法的判决时延导

致对时变信道的跟踪存在较大的偏差, 从而影响到系统的检测性能。在单输入单输出(SISO)时变多径信道环境, Raheli 等人提出了一种灵活的  $N$  幸存路径 MLSE 算法 (NSP-MLSE)<sup>[3]</sup> ( $1 \leq N \leq Q$ ,  $Q$  为网格状态数); 随后文献[4]以临时判决 MLSE(TD-MLSE)和全幸存路径 MLSE (PSP-MLSE)算法为基础, 提出了一种自适应 H-MLSE 算法。文献[5]根据全幸存路径处理原则, 针对时变多径 MIMO 信道环境, 提出了一种可基于盲或半盲实现的均衡算法, 由于该算法涉及到所有幸存路径, 因此算法复杂度十分可观。纵观以上不同类型的 MLSE 算法, MLSE 算法的复杂度主要由算法所涉及的状态数所决定, 而在多天线环境, 状态数随天线数目与信道记忆长度之积成指数增长。

本文针对多天线通信系统各 MISO 子系统, 分别采用 H-MLSE 算法, 然后沿与各幸存状态相关联的幸存路径, 利用分集合并原则, 保留  $\Gamma$  个最佳幸

存状态(简称 $\Gamma$ -幸存状态选择),以此为基础,提出了一种复杂度可控的序列检测与信道追踪方法,记作 $\Gamma$ -H-MLSE方法。文中H-MLSE算法所涉及的两类基本算法可通过对原始的NSP-MLSE算法略做修正得到:仅保留原始NSP-MLSE算法<sup>[3]</sup>中的 $N$ 个最佳幸存路径及对应的 $N$ 个信道估计子,记作 $N$ -SP-MLSE。在两种极端情况下, $N$ -SP-MLSE与原始的NSP-MLSE一样,本文为了突出参数 $N$ 的灵活性,由TD-MLSE与 $N$ -SP-MLSE( $2 \leq N \leq Q$ )构成文中所采用的H-MLSE算法,文献[4]可看做本文H-MLSE算法的一种特例。

## 2 系统与信道模型

考虑具有 $t$ 根发射天线和 $r$ 根接收天线的MIMO无线通信系统,以 $t \times r$ 标记。接收信号以符号率采样,信道采用抽头延迟线模型,假设具有 $L+1$ 个符号间隔的抽头。

发送符号以类似TDMA帧的结构组织,用矩阵 $\mathbf{D} = [\mathbf{A}_H \ \mathbf{X}_I \ \mathbf{A}_T]$ 表示,其中 $\mathbf{A}_H$ 和 $\mathbf{A}_T$ 为已知的帧头符号矢量子块和帧尾符号矢量子块, $\mathbf{X}_I$ 表示信息符号矢量子块。令 $\mathbf{x}(k)$ 表示 $k$ 时刻从 $t$ 个发射天线发送的符号矢量,实质上 $\mathbf{x}(k)$ 为 $\mathbf{D}$ 中一列: $\mathbf{x}(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_t(k)]^T$ ,其中 $x_i(k) \in \Psi$ , $\Psi$ 代表调制符合集合。便于表述,用 $\mathbf{h}_j^{(p)}(k)$ 表示 $k$ 时刻与第 $j$ 个接收天线相关联的第 $p$ 个信道矢量抽头: $\mathbf{h}_j^{(p)}(k) = [h_{1,j}^{(p)}(k) \ h_{2,j}^{(p)}(k) \ \dots \ h_{t,j}^{(p)}(k)]$ ,其中 $p=0,1,\dots,L$ 。

同时定义MISO信道矢量 $\mathbf{h}_j^{0L}(k)$ 和符号矢量 $\mathbf{x}^{0L}(k)$ : $\mathbf{h}_j^{0L}(k) = [\mathbf{h}_j^{(0)}(k) | \mathbf{h}_j^{(1)}(k) | \dots | \mathbf{h}_j^{(L)}(k)]$ , $\mathbf{x}^{0L}(k) = [\mathbf{x}^T(k) | \mathbf{x}^T(k-1) | \dots | \mathbf{x}^T(k-L)]^T$ ,则 $k$ 时刻第 $j$ 个MISO子系统的接收信号可表示为

$$y_j(k) = \sum_{p=0}^L \mathbf{h}_j^{(p)}(k) \mathbf{x}(k-p) + n_j(k) \quad (1)$$

$$= \mathbf{h}_j^{0L}(k) \mathbf{x}^{0L}(k) + n_j(k) \quad (2)$$

其中 $j=1,2,\dots,r$ , $n_j(k)$ 为第 $j$ 个MISO子系统的附加高斯噪声,均值为0且方差为 $\delta_0^2$ 。

信道采用典型的Jake模型,即 $\mathbf{h}_j^{(p)}(k)$ 中各分量

$h_{i,j}^{(p)}(k)$ 为零均值,宽平稳复高斯随机过程,相关函数由多普勒率 $f_D T$ 确定: $E\{\mathbf{h}_j^{(p)}(k) \mathbf{h}_j^{(p)\dagger}(k')\} = J_0(2\pi f_D T |k-k'|) \cdot \delta(p-p') \cdot \delta(j-j') \mathbf{I}_t$ , $J_0(\cdot)$ 是第一类零阶Bessel函数。

## 3 结合 $\Gamma$ -幸存状态选择,利用H-MLSE实现序列估计及信道追踪

图1给出 $\Gamma$ -H-MLSE方法的原理图。该方法利用唯一的幸存状态 $S^{s-1}(1) = \mathbf{x}^{0L-1}(0)$ 及与之相关联的信道估计矢量 $\hat{\mathbf{h}}_j^{0L}(\mathbf{x}^{0L}(0))$ ( $j=1,2,\dots,r$ )初始化, $\mathbf{x}^{0L}(0)$ 由 $\mathbf{A}_H$ 或 $\mathbf{A}_T$ 或二者共同构造。 $k$ 时刻,利用当前时刻的 $\Gamma$ -幸存状态选择( $S^{s-n}(k)$ , $1 \leq n \leq \Gamma$ ),各MISO子系统依据各自的信道环境,自适应选择TD-MLSE算法或 $N$ -SP-MLSE( $2 \leq N \leq Q$ )算法,在可能状态转移(P-ST)空间及可能信道矢量(P-CV)空间分别存储可能状态转移及与之相关联(关联I)的信道矢量,接着对于P-ST空间中终止于同一状态的所有状态转移,依路径度量最小原则,仅保留幸存状态转移(SV-ST)在SV-ST空间,同时利用DD/LMS算法,更新与之相关联(关联II)的信道矢量,保存在E-CV空间。最后从SV-ST空间,沿各幸存路径依据分集合并原则,最多选择 $\Gamma$ 个最佳幸存状态予以保留。

### 3.1 带自适应信道追踪的序列检测步骤

假设在 $k$ 时刻已经保存了 $\Gamma$ 个幸存状态选择及与之相关联的幸存分支路径 $\hat{X}(S^{s-i}(k))$ 和路径度量 $\zeta(S^{s-i}(k)) = \sum_k \mu_k$ ,其中 $\mu_k$ 为沿着幸存路径 $\hat{X}(S^{s-i}(k))$ 的分支度量, $i=1,2,\dots,\Gamma$ 。

(1) $k$ 时刻,分别对 $\Gamma$ 个幸存状态 $S^{s-i}(k)$ ,估计与各MISO子系统相关联的瞬时接收SNR<sup>[4]</sup>

$$\hat{\gamma}_{j,k,i} = \hat{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-i}(k)) \hat{\mathbf{h}}_j^{0L\dagger}(S^{s-i}(k)) / \hat{n}_{j,k,i} \quad (3)$$

其中 $\hat{n}_{j,k,i} = (1-\beta)\hat{n}_{j,k-1} + \beta(|y_j(k-1) - \hat{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-i}(k)) \hat{\mathbf{x}}^{0L}(k-1)|^2)$ , $\hat{n}_{j,k-1}$ 由终止于幸存状态 $S^{s-i}(k)$ 的幸存路径所决定, $0 < \beta < 1$ , $j=1,2,\dots,r$ 。

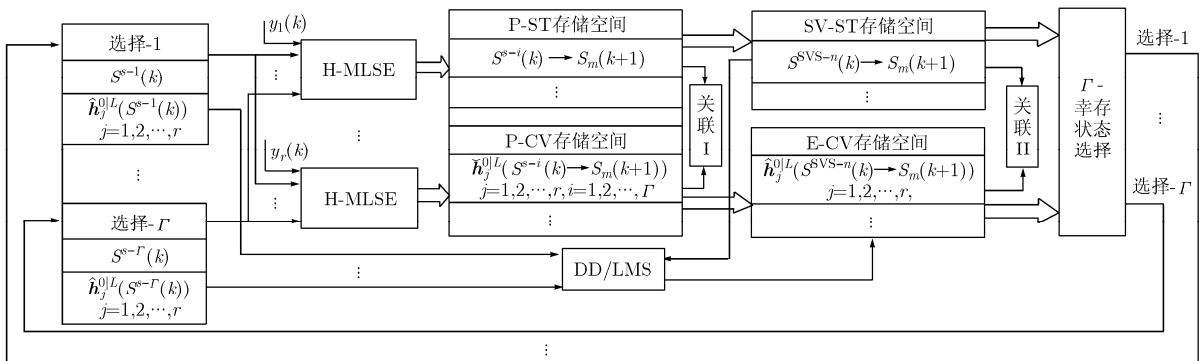


图1  $\Gamma$ -H-MLSE方法原理框图

(2)开辟存储空间 P-ST 及 P-CV, 分别用于保存可能状态转移及与之相关联的信道矢量。对各 MISO 子系统, 根据信道环境, 自适应选择 TD-MLSE 及  $N$ -SP-MLSE ( $2 \leq N \leq Q$ ) 算法。

$$\tilde{\omega}_{j,k,i} = \zeta(S^{s-i}(k)) + |y_j(k) - \hat{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-i}(k))\mathbf{x}^{s-i}(k)|^2 \quad (4)$$

其中  $\mathbf{x}^{s-i}(k) = [\mathbf{v}_{j,i}^T | S^{s-i}(k)]^T$ 。

当  $\hat{\gamma}_{j,k,i} \geq \lambda$  时, 依据 TD-MLSE 算法, 由  $\tilde{\mathbf{v}}_{j,i} = \arg \min_{\alpha_{j,i} \in \Psi^t} \tilde{\omega}_{j,k,i}$ , 在 P-ST 中保存可能状态转移

$S^{s-i}(k) \rightarrow S_m^1(k+1)$ , 相应地在 P-CV 中保存对应的信道矢量  $\tilde{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-i}(k) \rightarrow S_m^1(k+1))$ :

$$\tilde{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-i}(k) \rightarrow S_m^1(k+1)) = \hat{\mathbf{h}}_j(S^{s-i}(k)) + \eta e_j(S^{s-i}(k) \rightarrow S_m(k+1))\tilde{\mathbf{x}}^{0L}(k)^H \quad (5)$$

其中  $\tilde{\mathbf{x}}^{0L}(k) = [\tilde{\mathbf{v}}_{j,i}^T | S^{s-i}(k)]^T$ ,  $S_m^1(k+1) = [\tilde{\mathbf{v}}_{j,i}^T | S^{s-i}(k) \{1:t(L-1)\}^T]^T$ ,  $\eta$  为 LMS 算法的步长因子,

$$e_j(S^{s-i}(k) \rightarrow S_m^1(k+1)) = y_j(k) - \hat{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-i}(k))\tilde{\mathbf{x}}^{0L}(k)^T。$$

当  $\hat{\gamma}_{j,k,i} < \lambda$ , 利用  $N$ -SP-MLSE ( $2 \leq N \leq Q$ ) 算法, 类似于  $\hat{\gamma}_{j,k,i} \geq \lambda$ , 选择一最优状态转移  $S^{s-i}(k) \rightarrow S_m^1(k+1)$  及  $N-1$  个次优状态转移  $S^{s-i}(k) \rightarrow S_m^q(k+1)$  ( $q=2,3,\dots,N$ ) 存储在 P-ST 空间, 同时在 P-CV 中存储对应的  $N$  个信道矢量  $\tilde{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-i}(k) \rightarrow S_m^1(k+1)), \dots, \tilde{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-i}(k) \rightarrow S_m^N(k+1))$ , 其中  $S_m^q(k+1) = [\tilde{\mathbf{v}}_{j,q,i}^T | S^{s-i}(k) \{1:t(L-1)\}^T]^T$ ,  $\tilde{\mathbf{v}}_{j,q,i}$  的确定类似于  $\hat{\gamma}_{j,k,i} \geq \lambda$  的情形。

(3)确定幸存状态转移, 更新与之相关联的信道矢量, 并分别保存在 SV-ST 和 E-CV 空间。

对于 P-ST 中终止于状态  $S_m(k+1)$  的所有可能状态转移, 根据式(6)确定幸存状态转移, 并将其保存在 SV-ST 空间。

$$\begin{aligned} & S^{\text{SVS}-n}(k) \rightarrow S_m(k+1) \\ &= \arg \min_{S^{s-n}(k) \rightarrow S_m(k+1) \in \text{P-ST}} \left\{ \zeta(S^{s-n}(k)) \right. \\ & \left. + \sum_{j=1}^r |y_j(k) - \tilde{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-n}(k) \rightarrow S_m(k+1))\tilde{\mathbf{x}}^{0L}(k)|^2 \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

其中  $\tilde{\mathbf{x}}^{0L}(k) = [\mathbf{v}(S^{s-n}(k) \rightarrow S_m(k+1)) | S^{s-n}(k)]^T$ ,  $\mathbf{v}(S^{s-n}(k) \rightarrow S_m(k+1))$  由状态转移  $S^{s-n}(k) \rightarrow S_m(k+1)$  唯一确定, 相应地,  $\tilde{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-n}(k) \rightarrow S_m(k+1))$  由式(7)确定:

$$\begin{aligned} & \tilde{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-n}(k) \rightarrow S_m(k+1)) = \\ & \begin{cases} \tilde{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-n}(k) \rightarrow S_m(k+1)), \tilde{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-n}(k) \rightarrow S_m(k+1)) \\ \quad \in \text{P-CV} \\ \tilde{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-n}(k) \rightarrow S_m^1(k+1)), \tilde{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-n}(k) \rightarrow S_m(k+1)) \\ \quad \notin \text{P-CV} \end{cases} \quad (7) \end{aligned}$$

式(7)表明: 如果  $\tilde{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-n}(k) \rightarrow S_m(k+1)) \notin \text{P-CV}$ , 我们用与最佳状态转移  $S^{s-n}(k) \rightarrow S_m^1(k+1)$  相关联的临时信道矢量  $\tilde{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-n}(k) \rightarrow S_m^1(k+1))$  代替。对于每个幸存状态转移  $S^{\text{SVS}-n}(k) \rightarrow S_m(k+1)$ , 依据 DD/LMS 算法重新更新与之相关联的信道矢量  $\hat{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{\text{SVS}-n}(k) \rightarrow S_m(k+1))$ , 并保存在 E-CV 中。

(4)沿与各幸存状态转移相关联的分支路径, 依据分集合并, 选择保留  $\Gamma$  个最佳幸存状态转移及与之相关联的信道矢量、路径度量。

与常规的分集合并不同, 由于该分集合并分别作用于各幸存路径, 因此包含了与当前幸存状态转移相关联的前一时刻的路径度量  $\zeta(S^{\text{SVS}-n}(k))$

$$\begin{aligned} & \zeta(S^{\text{SVS}-n}(k)) + \\ & \sum_{j=1}^r |y_j(k) - \hat{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{\text{SVS}-n}(k) \rightarrow S_m(k+1))\tilde{\mathbf{x}}^{0L}(k)|^2 \quad (8) \end{aligned}$$

其中  $\tilde{\mathbf{x}}^{0L}(k) = [\mathbf{v}(S^{\text{SVS}-n}(k) \rightarrow S_m(k+1)) | S^{\text{SVS}-n}(k)]^T$ 。简单起见, 用标有  $s-1, \dots, s-\Gamma$  的终止状态  $S^{s-1}(k+1), \dots, S^{s-\Gamma}(k+1)$  来表示这  $\Gamma$  个幸存状态转移及对应的信道矢量:  $\hat{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-1}(k+1)), \dots, \hat{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{s-\Gamma}(k+1))$ , 并保存与之相关的  $\Gamma$  个幸存路径  $\hat{\mathbf{X}}(S^{s-1}(k+1)), \dots, \hat{\mathbf{X}}(S^{s-\Gamma}(k+1))$  及路径度量  $\zeta(S^{s-i}(k+1)) = \zeta(S^{\text{SVS}-n}(k)) + \sum_{j=1}^r |y_j(k) - \hat{\mathbf{h}}_j^{0L}(S^{\text{SVS}-n}(k) \rightarrow S^{s-i}(k+1))\tilde{\mathbf{x}}^{0L}(k)|^2$ , 最后用这  $\Gamma$  个幸存状态及相关联的信道矢量更新当前的  $\Gamma$ -幸存状态选择。

(5)类似与传统的 MLSE 算法, 当接收数据矢量长度  $d \geq 5L$ , 进行判决。

## 4 性能评估

本节中, 对  $\Gamma$ -H-MLSE 方法进行性能评估, 并与 MIMO TD-MLSE<sup>[6]</sup>, 传统的 MIMO MLSE 及 MIMO PSP-MLSE 作了比较; 同时对影响算法复杂度的关键因素作了定性分析, 并验证了 DD/LMS 算法对信道的追踪情况。

### 4.1 性能仿真结果

在载频 1.9 GHz, 终端速度 200 km/h, 传输率 48.6 kb/s 所对应的经典 Jake 信道模型下, 给出了一系列仿真。考虑一 2X4 MIMO 系统, 采用 BPSK 调制, 单个数据帧中包括 20 个信息符号矢量, 帧头与帧尾矢量各为 5,  $L=1$ 。另外设置参数  $\beta=0.30$ , 门限  $\lambda=24$  (dB)。

在图 2, 针对  $N=2,3,4$  三种情况, 分别给出比特错误率(BER)随信噪比 SNR 变化的性能图。用点画线给出 MIMO TD-MLSE, 传统的 MIMO MLSE 和 MIMO PSP-MLSE 曲线做为参照。为公平起见, 在所提出的方法及对比算法中, 如果带信道追踪, 均采用步长因子  $\eta=0.15$  的 DD/LMS 算法。文献[6]

所提出 MIMO TD-MLSE, 在时变环境中, 如果没有信道追踪, 性能将急剧恶化。我们发现: 对于  $N = 2, 3, 4$  且  $\Gamma = 1$ , 带信道追踪的 MIMO TD-MLSE 性能优于  $\Gamma$ -H-MLSE 方法。当  $\Gamma = 2$ ,  $\Gamma$ -H-MLSE 方法的性能已经接近传统的 MIMO MLSE 性能, 主要是因为  $\Gamma$ -H-MLSE 中, 信道参数估计基本无延迟, 而传统 MLSE 信道估计延迟不可避免。当  $\Gamma = 4$  且  $N = 4$ ,  $\Gamma$ -H-MLSE 方法接近 MIMO PSP-MLSE 的性能。

4.2 门限  $\lambda$  的确定

由于信道实现的随机性, 本文采用数值仿真来确定门限  $\lambda$ , 图 3 给出 SNR=6, 14(dB) 时,  $\Gamma$ -H-MLSE 方法的 BER 性能曲线随门限  $\lambda$  变化情况, 考虑  $N = 2, 3, 4$  这 3 种情况。从图 3 可以看出, 当门限  $\lambda > 24$  时, BER 随  $\lambda$  的增加已不再明显下降, 因此选择  $\lambda = 24$ 。

4.3  $\Gamma$ -H-MLSE 方法中 DD/LMS 算法对信道的跟踪性能

利用归一化信道估计均方误差(N-CE-MSE)来考察  $\Gamma$ -H-MLSE 方法中 DD/LMS 算法对时变多径信道的跟踪性能, 我们只选择 MIMO 多径信道中其

中一条多径作为考察对象, 结果如图 4 所示, 同样地针对  $N = 2, 3, 4$  三种情况。从图 4 可以看出, 随参数  $\Gamma$  和  $N$  增加, N-CE-MSE 有逐渐减小的趋势。

4.4 影响  $\Gamma$ -H-MLSE 方法复杂度的关键因素

传统的 MIMO MLSE, 每次必须处理  $2^{tP}$  个状态, 而  $\Gamma$ -H-MLSE 方法, 只须处理  $\Gamma (2^{tP} \geq \Gamma \geq 1)$  个最佳幸存状态, 减少的状态数意味着复杂度降低, 但采用 DD/LMS 对信道追踪, 使计算量有极少量增加, 但这种增加比起 MIMO PSP-MLSE 算法的复杂度来说, 要小很多。另外由于  $\Gamma$ -H-MLSE 方法中两种算法选择的随机性, 使精确地定量分析该方法的复杂度的过程变得十分繁琐, 同时也由于空间有限, 我们将在后续工作中深入展开。

通过参数  $\Gamma$  和  $N$  来调控复杂度。随着  $\Gamma$  和  $N$  的增加, 在性能提升的同时, 复杂度将增加, 因此可根据实际的需要, 来选择合适的参数  $\Gamma$  和  $N$ , 从而在性能和复杂度之间取得折中。

对  $r$  个 MISO 子系统中的  $\Gamma$  个幸存状态转移, 可利用  $\Gamma \cdot r$  个并行处理过程来计算步骤(1)和步骤(2), 从而减轻了整个系统计算负荷。

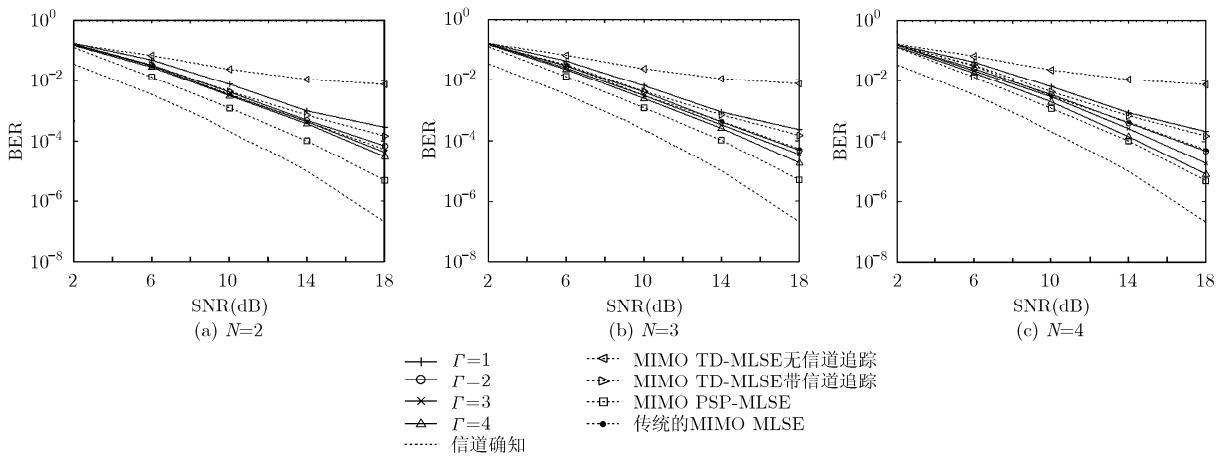


图2 性能比较曲线图

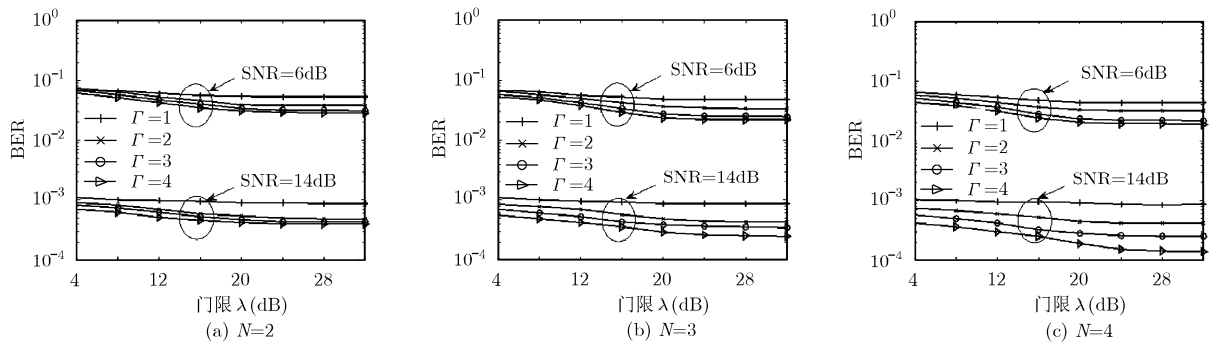


图3 性能随门限  $\lambda$  的变化

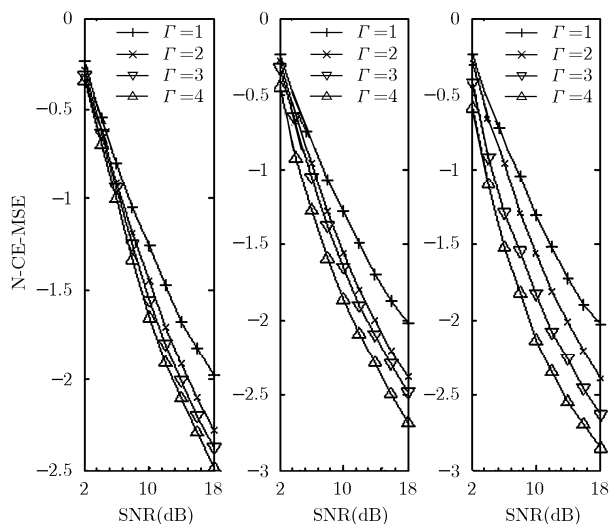


图4  $\Gamma$ -H-MLSE 方法中 DD/LMS 算法对时变信道的追踪性能

## 5 结论

本文针对 MIMO 时变多径信道, 提出了一种带自适应信道追踪的序列估计方法 ( $\Gamma$ -H-MLSE), 该方法具有可调整复杂度, 近零延时信道估计及可部分并行处理等一系列优点; 同时该方法可通过参数  $\Gamma$  和  $N$  的选择, 实现复杂度与性能之间的折中, 因此该方法对于如何将 MLSE 算法的思想推广到实际的多天线通信系统中具有一定的参考价值。

### 参考文献

[1] Ezio B, Robert C, and Anthony C. *et al.* MIMO Wireless Communications. London: Cambridge University Press, 2007:

24-30.

- [2] He J Q, Gu G X, and Wu Z S. MMSE interference suppression in MIMO frequency selective and time-varying fading channels. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(8): 3638-3651.
- [3] Raheli R, Marino G, and Castoldi P. Per-survivor processing and tentative decisions: what is in between? *IEEE Transactions on Communication*, 1996, 44(2): 127-129.
- [4] Jung S J, Seung C H, and Yong H L. Adaptive MLSE receiver: hybrid of persurvivor processing and tentative decision MLSE. *Electronics Letters*, 2000, 36(7): 678-680.
- [5] Manuel A V and Joaquin M. A per-survivor processing algorithm for maximum likelihood equalization of MIMO channel with unknown order. 2008 International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA 2008), Darmstadt, Feb. 2008: 387-391.
- [6] Mohammad N P, Predrag B R, and Jinho C. Low complexity sequence detection for MIMO ISI channel with decision feedback MLSE. 2004 IEEE Eighth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, Sydney, Australia, Sept. 2004: 643-647.

景小荣: 男, 1974年生, 博士生, 研究领域为多天线系统的信号检测和信道估计.

周正中: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为通信与测量信号处理.

徐征: 女, 1978年生, 讲师, 研究领域为信号处理及测控.