

## 基于用户分簇的正交导频交替最小二乘接收机算法研究

刘芹 韩曦 闫江 虞欣 师嘉晨  
北方工业大学信息学院, 北京 100144

**[摘要]** 用户分簇通信是一种提高系统容纳用户数, 提升频谱利用率及提高数据信息传输速率的有效方法。在通信过程中接收信号往往会引入空域, 时域, 频域等多方面的信息, 因此可以使用多维矩阵模型来进行信号参数获取。笔者提出在用户分簇协作通信的系统中使用多维矩阵模型进行信道参数和符号的联合估计。仿真现象表明, 该接收机的性能优于 TST 接收机的性能, 且接近 ZF 接收机。

**[关键词]** 分簇通信; 联合估计; 多维矩阵

DOI: 10.33142/sca.v5i1.5578

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

### Research on the Orthogonal Pilot Alternating Least Square Receiver Algorithm Based on User Clustering

LIU Qin, HAN Xi, YAN Jiang, YU Xin, SHI Jiachen

School of Information, North University of Technology, Beijing, 100144, China

**Abstract:** User cluster communication is an effective method to improve the number of users, the frequency spectrum utilization, and the data transmission rate. In the process of communication, the received signal often introduces the spatial domain, time domain, frequency domain, and other information, so the multi-dimensional matrix model can be used to obtain the signal parameters. In this paper, a multi-dimensional matrix model is proposed for the joint estimation of channel parameters and symbols in a user cluster cooperative communication system. Simulation results show that the performance of this receiver is better than that of the TST receiver and close to the ZF receiver.

**Keywords:** cluster communication; joint estimation; multidimensional matrix

#### 引言

最近, 协作通信系统由于可以通过空间分集来减轻无线网络中的衰落性能而引起了广泛关注, 并且它与多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 系统有着密切的联系。MIMO 通信系统目前已被广泛应用于实现分集增益、扩展覆盖范围和降低误码率 (Bit Error Rate, BER) 的场景<sup>[1]</sup>。然而, 在一些不可控的情况下, 由于硬件限制, 无线终端可能无法配备多根天线。例如, 用户终端可能太小而无法实现天线阵列。在这种情况下, 可以使多用户环境中的单天线移动设备共享其天线并生成虚拟多天线发射机, 从而实现发射分集。协作通信系统就是利用无线信道的广播特性, 分配多个中继节点以帮助信号源将其信息转发到目的地, 从而形成虚拟天线阵列。在 [2] 中, Laneman 描述了各种协作通信技术, 例如解码转发和放大转发 (Amplify and Forward, AF)。

在协作通信系统中, 必须获得准确的信道状态信息 (Channel State Information, CSI) 才能获得该系统带来的好处<sup>[3]</sup>。因此, 有效的 CSI 估计在协作通信系统的实现中起着关键作用。目前, 获得准确的 CSI 算法主要

分为使用导频序列估计, 半盲估计和全盲估计三类算法。完全采用训练序列来获得信道参数会导致频谱效率变差<sup>[4]</sup>。因此, 此类算法往往不被用来进行信道参数估计。半盲估计算法可以通过使用少量的训练符号提高信道参数估计的可靠性, 并且这种算法可以有效避免全盲估计算法中遇到的收敛问题。现在已经有很多学者对半盲估计算法进行了探索和研究, 有学者设计了一种用于 MIMO 信道的半盲估计算法<sup>[5]</sup>, 将信道矩阵分解为白化矩阵和酉矩阵的乘积来进行估计, 但该算法的性能依赖于白化矩阵的估计精度。

在本文中, 我们考虑的是两跳协作通信系统。在通信过程中, 为了提高系统容纳用户数, 提升频谱利用率及提高数据信息传输速率, 我们对信息发送用户进行分簇处理, 然后经过预编码处理将信息发送出去, 在中继端我们使用操作简单、开销小和复杂度低的 AF 协议。在本文中, 我们提出了一种基于用户分簇的正交导频交替最小二乘接收机算法, 并与两阶段训练序列 (Two-Stage Training, TST) 和迫零 (Zero Forcing, ZF) 接收机算法进行了比较, 验证了该接收机算法的有效性。

## 1 系统模型

文中采用由信源节点、中继节点和目的节点构成的两跳协作通信系统。在信源节点，将  $M$  个用户划分为一个簇，然后在信号发送之前进行预编码处理；在中继节点，使用 AF 协议对接收信号进行放大然后转发给目的节点。其中， $L$  和  $K$  分别是信源节点发送的信号长度和用户簇数； $N_R$ 、 $N_D$  分别代表了中继节点和目的节点配备的天线数。 $N_{UE}$  代表每个用户的天线数，则每个簇的天线数为  $N_C = MN_{UE}$ ，信源节点的天线数为  $N_S = KN_C$ 。假设每个簇的发送信号矩阵为  $\mathbf{u}_k \in \mathbb{C}^{N_C \times L}$ ，则信源节点的信息矩阵可以被写为  $\mathbf{S} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_K]^T \in \mathbb{C}^{N_S \times L}$ 。中继节点与信源节点和目的节点之间的信道分别用  $\mathbf{H}_{SR}$ 、 $\mathbf{H}_{RD}$  表示。

在本文的协作通信系统中，中继节点接收到的信号矩阵为：

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{H}_{SR} \text{diag}_k(\mathbf{E}) \mathbf{S} \quad (1)$$

其中， $k=1, 2, \dots, K$ 。 $\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{N_S \times L}$ 、 $\mathbf{E} \in \mathbb{C}^{N_S \times K}$  表示信源节点的符号矩阵和预编码矩阵。经过中继节点的放大转发，在第  $t$  个时间段内，目的节点的接收信号可写为：

$$\mathbf{X}_{t,k} = \mathbf{H}_{RD} \text{diag}_t(\mathbf{F}) \mathbf{A} \mathbf{X}_k \quad (2)$$

其中， $t=1, 2, \dots, T$ 。 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{N_R \times N_R}$  代表中继节点的放大矩阵， $\mathbf{F} \in \mathbb{C}^{N_R \times T}$  代表中继节点的编码矩阵。

## 2 多维矩阵信号模型

根据第 1 小节所描述的系统模型可知，在中继处接收到的信号可构成张量  $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_R \times L}$ 。将公式 (1) 带入公式 (2)，可以得出：

$$\mathbf{X}_{t,k} = \mathbf{H}_{RD} \text{diag}_t(\mathbf{F}) \mathbf{A} \mathbf{H}_{SR} \text{diag}_k(\mathbf{E}) \mathbf{S} \quad (3)$$

则公式 (3) 可以看作是四维矩阵  $\mathbf{V} \in \mathbb{C}^{N_D \times N_S \times N_R \times L}$  的模展开式。

在本文中，设计  $\mathbf{S}$  为正交导频序列，即  $\mathbf{S} \mathbf{S}^T = \mathbf{I}$ 。则式 (3) 可以写为：

$$\mathbf{Y}_{t,k} = \mathbf{H}_{RD} \text{diag}_t(\mathbf{F}) \mathbf{A} \mathbf{H}_{SR} \text{diag}_k(\mathbf{E}) \quad (4)$$

将目的节点的接收信号按照簇  $k$  排列，则在第  $t$  个时间段内的接收信号可以表示为：

$$\mathbf{Y}_t = \mathbf{H}_{RD} \text{diag}_t(\mathbf{F}) \mathbf{A} \mathbf{H}_{SR} \begin{bmatrix} \text{diag}_1(\mathbf{E}) \\ \text{diag}_2(\mathbf{E}) \\ \vdots \\ \text{diag}_K(\mathbf{E}) \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

假设  $\mathbf{H}_{SR}$  的表达式如下：

$$\mathbf{H}_{SR} = \mathbf{A} \mathbf{H}_{SR} \begin{bmatrix} \text{diag}_1(\mathbf{E}) \\ \text{diag}_2(\mathbf{E}) \\ \vdots \\ \text{diag}_K(\mathbf{E}) \end{bmatrix}^T \in \mathbb{C}^{N_R \times KN_S} \quad (6)$$

由目的节点的接收信号可以得到一个三维矩阵

$\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{N_D \times N_R \times KN_S}$ ，它的  $(i, j, k)$  的元素可以表示为：

$$\mathbf{Y}(i, j, k) = \sum_{r=1}^{N_R} \mathbf{H}_{RD}(i, r) \mathbf{F}(j, n) \mathbf{H}_{SR}(r, j) \quad (7)$$

其中， $\mathbf{H}_{RD}$ 、 $\mathbf{F}$  和  $\mathbf{H}_{SR}$  为 PARAFAC 模型的三个加载矩阵。

## 3 正交导频交替最小二乘接收机

在本文中，已知编码矩阵  $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{F}$  和中继放大矩阵  $\mathbf{A}$ ，假设  $\mathbf{W}$  和  $\mathbf{Z}$  的表达式如下：

$$\mathbf{W}^{(p-1)} = \mathbf{F} \tilde{\mathbf{H}}_{RD}^{(p-1)} \quad (8)$$

$$\mathbf{Z}^{(p)} = \left( \tilde{\mathbf{H}}_{SR}^{(p)} \right)^T \mathbf{F} \quad (9)$$

则信道  $\mathbf{H}_{SR}$ 、 $\mathbf{H}_{RD}$  的闭式表达式为：

$$\tilde{\mathbf{H}}_{SR}^{(p)} = \left[ \mathbf{W}^{(p-1)} \right]^\dagger \mathbf{Y}_{(1)} \quad (10)$$

$$\tilde{\mathbf{H}}_{RD}^{(p)} = \left\{ \left[ \left( \mathbf{Z}^{(p)} \right)^H \mathbf{Z}^{(p)} \right]^{-1} \left[ \left( \mathbf{Z}^{(p)} \right)^H \mathbf{Y}_{(2)} \right] \right\}^T \quad (11)$$

则正交导频交替最小二乘接收机算法的估计步骤如下：

- ① 令  $p=1$ ，随机初始化  $\tilde{\mathbf{H}}_{RD}^{(0)}$ ；
- ② 使用公式 (10) 获得  $\mathbf{H}_{SR}$  的更新值；
- ③ 使用公式 (11) 获得  $\mathbf{H}_{RD}$  的更新值；
- ④  $p=p+1$
- ⑤ 重复步骤②③④，直到该算法达到收敛条件；
- ⑥ 由公式 (6) 得到信道  $\mathbf{H}_{SR}$  的估计值。

## 4 仿真结果与分析

在本节中，为了验证本文所提算法的有效性，使用 MATLAB 软件进行仿真。图 1 显示了在相同条件下，TST 算法与正交导频交替最小二乘算法的 NMSE 性能曲线，图中，TST 接收机获得的  $\mathbf{H}_{SR}$  性能较好， $\mathbf{H}_{RD}$  性能较差，是因为 TST 算法利用了导频序列， $\mathbf{H}_{RD}$  的估计值依赖于  $\mathbf{H}_{SR}$  的估计值，造成了误差累计，而所提正交导频交替最小二乘算法是联合估计信道矩阵，故误差累计问题是不存在的。由图 2 的仿真结果可知，本文所提的正交导频交替最小二乘接收机算法估计得到的  $\tilde{\mathbf{S}}$ 、 $\mathbf{H}_{SR}$  和  $\mathbf{H}_{RD}$  的性能优于 TST 算法，并且接近 ZF 算法。

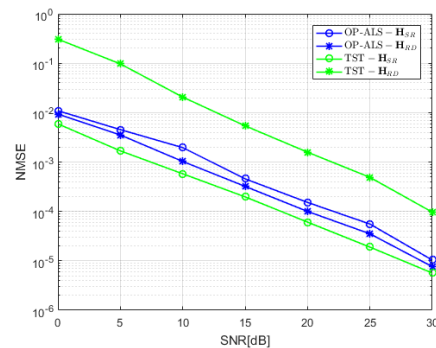


图 1 NMSE 与信噪比 SNR 关系图

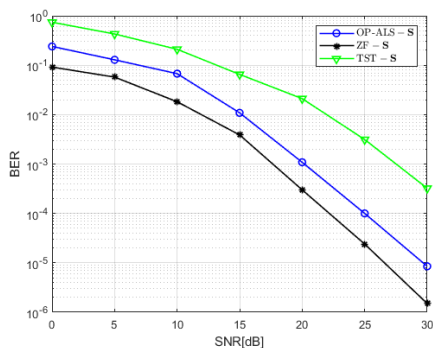


图2 BER与信噪比SNR关系图

## 5 结语

在协作通信系统中,提出了一种基于用户分簇的正交导频交替最小二乘接收机算法,由目的节点接收到的信号构造多维矩阵模型,实现了信道矩阵的有效估计。在仿真中,对所提接收机算法与TST和ZF接收机算法进行了比较,验证了本文所提算法的有效性。

基金项目:本课题获得泛网无线通信教育部重点实验室(BUPT)(批准编号KFKT-2020104),北京市自然科学基金项目(L182039,L192034),北京市教育委员会科技计划一般项目(KM201910009011),北方工业大学科研启动基金资助项目的资助。

### [参考文献]

[1]X. Han, X. Zhao, A. L. F. de Almeida, W. d. C. Freitas and W. Bai, Enhanced Tensor-Based Joint

Channel and Symbol Estimation in Dual-Hop MIMO Relaying Systems[J]. IEEE Communications Letters,2021,25(5):1655-1659.

[2]J. N. Laneman, D. N. C. Tse and G. W. Wornell, Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2004,50(12):3062-3080.

[3]X. Han, X. Zhao, A. L. F. de Almeida, W. d. C. Freitas and W. Bai, Enhanced Tensor-Based Joint Channel and Symbol Estimation in Dual-Hop MIMO Relaying Systems[J]. IEEE Communications Letters,2021,25(5):1655-1659.

[4]K. Mawatwal, D. Sen and R. Roy, A Semi-Blind Channel Estimation Algorithm for Massive MIMO Systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters,2017,6(1):70-73.

[5]A. Jagannatham and B. D. Rao, A semi-blind technique for MIMO channel matrix estimation[J]. IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications - SPAWC,2003(1):304-308.

作者简介:刘芹(1996.11-),所属院校:北方工业大学,所学专业:信息与通信工程,研究方向:无线通信技术。