

高速移动场景下基于贪婪算法的改进模代数预编码

廖勇¹ 杨馨怡¹ 夏茂茵² 王博² 李守智² 沈轩帆¹

(重庆大学通信与测控中心 重庆 400044)¹ (重庆大学微电子与通信工程学院 重庆 400044)²

摘要 针对高速移动场景下信道时频域选择性衰落特性给多入多出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)系统的预编码带来的技术挑战,文中提出了一种基于贪婪算法的用户调度方案,该方案以信道容量最大化为目标对用户进行调度并排序;进而为用户调度提出一种基于贪婪算法的改进模代数预编码(Tomlinson-Harashima Precoding, THP)算法,根据用户调度结果,对信道矩阵进行选择重构,将重构后的信道矩阵应用到 THP 算法中,以对传统 THP 进行优化,从而提高预编码精度。仿真结果表明,相比传统预编码,所提预编码具有更优的误码率(Bit Error Ratio, BER)性能和信道容量,并且其鲁棒性能更好,验证了所提算法能有效地适应高速移动场景。

关键词 高速场景, MIMO, 模代数预编码, 用户调度, 贪婪算法

中图分类号 TN929.5 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.08.020

Improved Tomlinson-Harashima Precoding Based on Greedy Algorithm in High-speed Mobile Scenarios

LIAO Yong¹ YANG Xin-yi¹ XIA Mao-han² WANG Bo² LI Shou-zhi² SHEN Xuan-fan¹

(Center of Communication and TT&C, Chongqing University, Chongqing 400044, China)¹

(School of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)²

Abstract Aiming at the technical challenges brought by the fast time-selective and frequency-selective channel characteristics of high-speed mobile to Multiple Input Multiple Output (MIMO) system precoding, this paper proposed a user scheduling scheme based on greedy algorithm, which schedules and ranks users with the goal of maximizing channel capacity. Further, this paper proposed an improved Tomlinson-Harashima precoding (THP) algorithm based on greedy algorithm for user scheduling. The channel matrix is reconstructed according to the user scheduling result, and the reconstructed channel matrix is applied to the THP algorithm to optimize the traditional THP algorithm, improving the precoding precision. The simulation results show that the proposed precoding has better Bit Error Ratio (BER) performance and channel capacity than traditional precodings, and its robust performance is also better, which verifies that the proposed algorithm can adapt to high-speed mobile scenarios effectively.

Keywords High-speed scenarios, MIMO, Tomlinson-Harashima precoding, User scheduling, Greedy algorithm

1 引言

我国的高铁建设目前正以迅猛的势头向前发展,这给高速移动通信系统带来了新的挑战^[1]。为了提高下一代铁路无线通信系统的可靠性和容量,3GPP 组织提出了铁路长期演进(Long Term Evolution Railway, LTE-R)系统,目前正在形成标准^[2]。然而,当 LTE-R 应用于高速铁路时,尚面临一系列的问题,典型的有:快时变信道建模、频繁的越区切换、多普勒频移、下行预编码等^[3]。鉴于此,本文针对基于多人多出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)系统的下行链路,研究高速移动场景下的预编码技术。

预编码是指在发送端能够获得信道状态信息(Channel State Information, CSI)的前提下,对待发送信号进行预处理的技术。在 MIMO 系统中,预编码可以有效地消除用户间的干扰^[4],并且极大程度地降低接收端处理信号的复杂度^[5-6]。预编码分为线性预编码和非线性预编码。与线性预编码相比,非线性预编码能够获得更高的信道容量,但是其复杂度也更高。由于基站(Base Station, BS)往往不受计算能力、功率等因素的限制,因此非线性预编码也是目前研究与应用的焦点。其中模代数预编码(Tomlinson-Harashima Precoding, THP)是一种典型的非线性预编码算法,在复杂度与预编码性能之间有良好的折中^[7]。为了实现系统性能的优化并提升

收到日期:2018-07-09 返修日期:2018-09-24 本文受国家自然科学基金(61501066),重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjA40003),中央高校基本科研业务费(106112017CDJXY500001),国家大学生创新训练项目(201710611124)资助。

廖勇(1982-),男,博士,副研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为高速移动通信、下一代通信技术, E-mail: liaoy@cqu.edu.cn (通信作者);杨馨怡(1996-),女,硕士生,主要研究方向为高速移动通信中的预编码技术;夏茂茵(1996-),男,主要研究方向为高速移动通信中的信道估计;王博(1996-),男,主要研究方向为高速移动通信中的信道估计;李守智(1998-),男,主要研究方向为高速移动通信中的信道估计;沈轩帆(1994-),男,硕士生,主要研究方向为高速移动通信中的信道估计。

信道容量,设计针对不同应用场景的非线性预编码对于提高无线通信质量有着重要的意义。

在高速移动的场景下,时频域选择性信道衰落、过期CSI、反馈延时以及CSI的反馈精度等都会对预编码的性能产生影响。为提高预编码的性能,Yang等提出了一种LTE协议下的双差分空-频MIMO预编码^[8],该预编码方法可以提供更高的分集增益和更低的误码率(Bit Error Ratio, BER),但是并没有提升容量。文献^[9]基于正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM),提出了一种新型预编码技术和检测方法,该方法通过在每隔一定数目的子载波间插入一些虚假的符号来消除子载波间的干扰,但是其没有分析算法对信道容量的影响。Inoue等提出了一种基于Kerdock码的预编码算法,该算法复杂度低,但整体通信性能较差^[10]。由此可见,虽然已有一些用于高速移动通信的预编码,但其在BER、信道容量以及鲁棒性等综合设计方面缺少系统的考虑,因此,高速移动环境下的预编码设计仍具有重要的理论以及应用研究价值。

基于上述分析,本文提出一种高速移动下基于贪婪算法的改进THP算法。该算法对传统THP算法进行改进,将基于贪婪算法的多用户调度及排序算法与THP相结合,从而有效消除多用户间的干扰,提高预编码的准确度,并提升信道容量。本文的主要贡献为:

- 1) 针对高速移动环境下信道时频域选择性衰落特性给系统带来的性能损耗,本文提出了一种基于贪婪算法的用户调度方案,该方案以最大化信道容量为准则对用户进行了调度和排序。
- 2) 基于贪婪算法的用户调度方案,提出了一种改进的THP算法。首先,在高速移动环境下,采用贪婪的方式选择

信道容量最大的用户进行优先调度。然后,根据用户调度结果,对信道矩阵进行选择重构,将重构后的信道矩阵应用到THP算法中。仿真结果表明,与传统THP算法相比,本文所提算法不仅在BER性能及信道容量方面均有较大提升,而且鲁棒性能良好。

2 系统模型

假定在一个MIMO系统中的单小区多用户下行链路中,BS部署了 N_T 根天线。BS和 N 个用户同时传输数据,每个用户配备1根天线,即 $N_R=1$; N 个用户数据用 N 维向量 $\mathbf{a}=[a_1, a_2, \dots, a_N]^T$ (符号T表示转置操作)表示,用户数据均取自 M -QAM星座(M 表示调制进制数),功率为 $\sigma_a^2=2(M-1)/3$,即 a_n 的实部和虚部来自于集合 $A=\{\pm 1, \pm 3, \dots, \pm\sqrt{M}-1\}$ 。

发送端多用户THP系统下行链路模型如图1所示。它由一个反馈矩阵 \mathbf{B} 、一个前馈矩阵 \mathbf{F} 和 N 个非线性取模操作组成,信号在发送端经过预编码处理后进入高速移动信道,最终到达接收端。为了满足系统的物理可实现性,在基于最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)的多用户THP算法中,将反馈矩阵 \mathbf{B} 设置为严格下三角矩阵,允许数据以递归的方式进行预编码,取模操作对其输入的实部和虚部均独立,取模操作的具体规则如下:

$$\text{mod}_{\sqrt{M}}(x) = x - 2\sqrt{M} \cdot \left\lfloor \frac{x - \sqrt{M}}{2\sqrt{M}} \right\rfloor \quad (1)$$

其中,符号 $\lfloor c \rfloor$ 表示向下取整,即最小的整数大于或等于 c 。在实际中,取模操作 $\text{mod}_{\sqrt{M}}(x)$ 将 x 的实数部分周期映射到间隔 $(-\sqrt{M}, \sqrt{M}]$ 内。

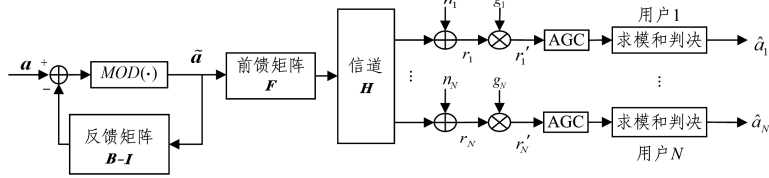


图1 发送端多用户THP系统下行链路模型

Fig.1 Multi-user THP system downlink model at transmitter

由式(1)可见,预编码的符号 \tilde{a}_n 可以迭代计算,如式(2)所示:

$$\tilde{a}_n = a_n - \sum_{\ell=1}^{n-1} [\mathbf{B} - \mathbf{I}]_{n,\ell} \tilde{a}_\ell + d_n, n=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中, $[\cdot]_{n,\ell}$ 表示封闭矩阵的第 n 行 ℓ 列元素; $d_n=2\sqrt{M}p_n$; p_n 是实部和虚部都是合适的整数的复数,可以降低 \tilde{a}_n 的值,使其实部和虚部均能映射到间隔 $(-\sqrt{M}, \sqrt{M}]$ 内。式(2)表示图1中的取模运算符等价于在输入数据符号上添加向量 \mathbf{d} ,其中 $\mathbf{d}=[d_1, d_2, \dots, d_N]^T$ 。我们定义等效发送数据向量 $\mathbf{v}=\mathbf{a}+\mathbf{d}$,则式(2)以矩阵形式重写为:

$$\tilde{\mathbf{a}} = \mathbf{v} - (\mathbf{B} - \mathbf{I})\tilde{\mathbf{a}} \Rightarrow \tilde{\mathbf{a}} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{v} \quad (3)$$

预编码符号 \tilde{a}_n 传递到前馈矩阵 \mathbf{F} 。最终 N_T 维数据向量 $\mathbf{x}=\mathbf{F}\tilde{\mathbf{a}}$ 通过BS的天线阵发送出去并在信道上传输。信道用 $N \times N_T$ 维的矩阵 \mathbf{H} 来表示。其中, $[\mathbf{H}]_{n,i}$ 表示第 i 根发送天

线到第 n 根接收天线的信道增益。第 n 个移动终端的信号可以写为:

$$r_n = h_n \mathbf{F} \tilde{\mathbf{a}} + n_n \quad (4)$$

其中, h_n 表示 \mathbf{H} 的第 n 行; n_n 表示加性高斯白噪声,是一个均值为0、方差为 σ_n^2 的随机变量。将接收到的所有用户信号叠加到一个向量 $\mathbf{r}=[r_1, r_2, \dots, r_N]^T$ 中,则式(4)重写为:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{F}\tilde{\mathbf{a}} + \mathbf{n} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{n}=[n_1, n_2, \dots, n_N]^T$ 是一个均值为0、方差为 $\sigma_n^2 \mathbf{I}$ 的高斯向量。由于在发送端做了取模操作及反馈操作,相当于添加了向量 \mathbf{d} ,为了消除 d_n 的影响,在接收端,每个抽样信号 r_n 被传递到自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC)单元,然后做与发送端相同的取模操作,最终对输出信号进行判决,加权后的接收向量 \mathbf{r}' 可以写为:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{G}(\mathbf{H}\mathbf{F}\tilde{\mathbf{a}} + \mathbf{n}) = \mathbf{G}\mathbf{H}\mathbf{F}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{v} + \mathbf{G}\mathbf{n} \quad (6)$$

3 改进的模代数预编码

高速移动场景下,信道具有时频域选择性衰落特性,严重影响系统性能^[11],而 BS 通过采用多用户调度算法,选取信道条件较好的用户优先进行通信,可以降低 BER,提升信道容量^[12]。因此本文在对用户数据做 THP 预编码操作前加入了一种基于贪婪算法的用户调度方案,从而提升预编码的性能。

3.1 基于贪婪算法的用户调度方案

贪婪算法(Greedy algorithm)是一种可以更快、更简单地求解最优解问题的算法^[13]。与遍历算法相比,贪婪算法的复杂度更低,同时寻找最优解的时间更短^[14]。本文引入贪婪算法旨在提高信道容量,因此在设计贪婪算法时,我们以最大化信道容量为目标。根据信息论可知,对于含有加性高斯白噪声的信道,其信道容量定义为发送信号与接收信号间的平均互信息量的最大值^[15],如式(7)所示:

$$C = \max_{\text{Tr}(\mathbf{R}_{xx})=N_K} \log_2 \det(\mathbf{I}_M + \frac{P}{N_T N_0} \mathbf{H} \mathbf{R}_{xx} \mathbf{H}^H) \text{ bps/Hz} \quad (7)$$

其中, P 表示发送总功率, N_0 表示噪声功率。我们假设每根发送天线等分发送功率,并且每个发送向量元素都相互独立,即 $\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{I}_{N_K}$,则式(7)可以写为:

$$C = \log_2 \det(\mathbf{I}_{N_K} + \frac{P}{N_T N_0} \mathbf{H} \mathbf{H}^H) \text{ bps/Hz} \quad (8)$$

本文使用贪婪算法对用户进行调度及排序,从而最大化信道容量,同时降低系统 BER。本文设计的贪婪算法的主要思想是:首先从所有用户 N 中选出一个具有最大容量的用户,然后选择下一个用户,每一次新选择的用户和之前选择好的用户一起组合得到的信道容量最大,当选择的用户数达到设定的上限时,停止选择,算法结束。该算法的具体过程如算法 1 所示。

算法 1 基于贪婪算法的用户调度方案

输入:发送天线数 N_T ,信噪比 $\frac{P}{N_0}$,备选用户数 N ,备选用户的信道矩阵 \mathbf{H} ,目标用户数 K

输出:已选用户的信道矩阵 \mathbf{H}_K

步骤 1 初始化,设定备选用户集合 $\Gamma = \{1, 2, \dots, N\}$,已选用户集合 $\Omega = \emptyset$,信道矩阵 $\mathbf{H} = []$,即空矩阵;

步骤 2 计算备选用户中每个用户的信道容量,选出具有最大信道容量的用户:

$$a_{k_1} = \arg \max_{k_1 \in \Gamma} \log_2 \det(\mathbf{I} + \frac{E_x}{N_T N_0} \mathbf{H}_{k_1} \mathbf{H}_{k_1}^H) \text{ bps/Hz};$$

步骤 3 更新集合, $\Gamma = \Gamma - \{a_{k_1}\}$, $\Omega = \Omega + \{a_{k_1}\}$,更新信道矩阵 $\mathbf{H}_K = [\mathbf{H}_{k_1}]$;

步骤 4 将更新后的 Γ 集合中的用户逐一与已选用户组成新的联合信道矩阵,并计算联合信道的容量,选出联合信道容量最大的用户;

步骤 5 重复步骤 3,直到选出设定的目标用户数;

步骤 6 算法结束,输出选择出的用户的信道矩阵 \mathbf{H}_K 。

本文使用的贪婪算法通过连续计算每个用户和已选定用户组成的联合信道是否具有最大信道容量,来决定是否将其选出。与遍历算法相比,本文算法的搜索次数大大减少,而结果也等于或接近最优解。在使用贪婪算法调度用户时,生成联合信道矩阵,这相当于对用户进行同步排序,在一定程度上可以提高系统性能。

3.2 基于贪婪算法多用户调度的模代数预编码

由上述算法过程可以看出,本文中基于贪婪算法的用户调度方案以最大化信道容量为目标,选择出最优用户并对其排序,排序后的待发送数据表示为 $\mathbf{a}' = [a_1', a_2', \dots, a_K']^T$ 。基于上述贪婪算法进行多用户调度后得到的改进 THP 算法的系统模型如图 2 所示。

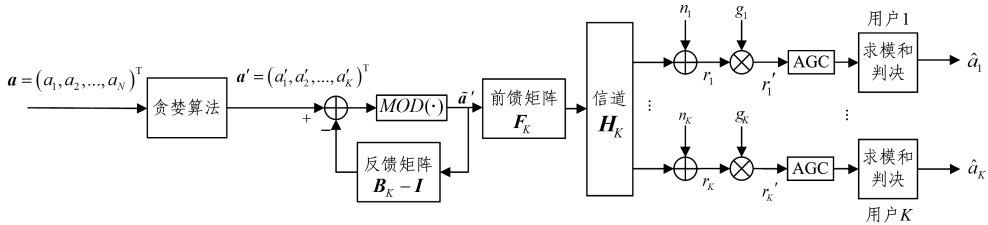


图 2 改进 THP 系统下行链路模型

Fig. 2 Improved THP system downlink model

经过贪婪算法进行用户调度并排序后重构的信道矩阵 \mathbf{H}_K 会产生相应的前馈矩阵 \mathbf{F}_K 、反馈矩阵 \mathbf{B}_K 和加权矩阵 \mathbf{G}_K 。根据式(6)可得接收向量 \mathbf{r}_K' :

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_K' &= \mathbf{G}_K (\mathbf{H}_K \mathbf{F}_K \tilde{\mathbf{a}}' + \mathbf{n}_K) \\ &= \mathbf{G}_K \mathbf{H}_K \mathbf{F}_K \mathbf{B}_K^{-1} \mathbf{v}_K + \mathbf{G}_K \mathbf{n}_K \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $\mathbf{r}_K' = [r_1', r_2', \dots, r_K']^T$, $\mathbf{n}_K = [n_1, n_2, \dots, n_K]^T$, $\mathbf{v}_K = \mathbf{B}_K \tilde{\mathbf{a}}'$ 为等效的发送数据向量。从图 2 可以看出,接收端数据向量 \mathbf{r}_K' 与发送端数据向量 \mathbf{v}_K 的误差 \mathbf{e} 为:

$$\begin{aligned} \mathbf{e} &= \mathbf{r}_K' - \mathbf{v}_K \\ &= \mathbf{G}_K [(\mathbf{H}_K \mathbf{F}_K \tilde{\mathbf{a}}' + \mathbf{n}_K)] - \mathbf{B}_K \tilde{\mathbf{a}}' \\ &= (\mathbf{G}_K \mathbf{H}_K \mathbf{F}_K - \mathbf{B}_K) \tilde{\mathbf{a}}' + \mathbf{G}_K \mathbf{n}_K \end{aligned} \quad (10)$$

根据 MMSE 的思想,构建目标函数和约束条件:

$$\begin{cases} \arg \min_{\mathbf{B}_K, \mathbf{G}_K, \mathbf{F}_K} E[\|(\mathbf{G}_K \mathbf{H}_K \mathbf{F}_K - \mathbf{B}_K) \tilde{\mathbf{a}}' + \mathbf{G}_K \mathbf{n}_K\|^2] \\ \text{s. t. } \|\tilde{\mathbf{a}}'\|^2 \leq P \end{cases} \quad (11)$$

因为直接求解式(11)比较困难,所以利用正交原理将式(11)转化为:

$$\begin{aligned} E[\mathbf{e} \mathbf{e}^H] &= E[(\mathbf{r}_K' - \mathbf{v}_K) \mathbf{r}_K'^H] \\ &= E[\mathbf{G}_K \mathbf{r}_K \mathbf{r}_K^H - \mathbf{B}_K \tilde{\mathbf{a}}' \mathbf{r}_K'^H] = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

再将式(10)代入式(12),得到:

$$\mathbf{G}_K (\mathbf{H}_K \mathbf{F}_K \mathbf{R}_a^2 \tilde{\mathbf{F}}_K^H \mathbf{H}_K^H + \sigma_{n_K}^2 \mathbf{I}) = \mathbf{B}_K \mathbf{R}_a^2 \tilde{\mathbf{F}}_K^H \mathbf{H}_K^H \quad (13)$$

其中, $\mathbf{R}_a^2 = E[\tilde{\mathbf{a}}' \tilde{\mathbf{a}}'^H] = \sigma_a^2 \mathbf{I}$, $\sigma_{n_K}^2 \mathbf{I} = E[\mathbf{n}_K \mathbf{n}_K^H]$ 。令 $\xi = \frac{\sigma_{n_K}^2}{\sigma_a^2}$,则式(12)可写作:

$$\mathbf{G}_K (\mathbf{H}_K \mathbf{F}_K \mathbf{F}_K^H \mathbf{H}_K^H + \xi \mathbf{I}) = \mathbf{B}_K \mathbf{F}_K^H \mathbf{H}_K^H \quad (14)$$

由于实际通信时,多用户下行信道的用户间无协同传输的情况,因此设置加权矩阵 \mathbf{G}_K 为对角矩阵。为了不改变发送数据的发送功率,同时为了得到上述问题的闭合形式的解,假设前馈矩阵 \mathbf{F}_K 为酉矩阵,满足 $\mathbf{F}_K \mathbf{F}_K^H = \mathbf{I}$,因此式(14)可化简为:

$$\mathbf{G}_K (\mathbf{H}_K \mathbf{H}_K^H + \xi \mathbf{I}) = \mathbf{B}_K \mathbf{F}_K^H \mathbf{H}_K^H \quad (15)$$

并得到:

$$\mathbf{F}_K^H = \mathbf{B}_K^{-1} \mathbf{G}_K (\mathbf{H}_K \mathbf{H}_K^H + \xi \mathbf{I}) \mathbf{H}_K^{-H} \quad (16)$$

再根据 $\mathbf{F}_K \mathbf{F}_K^H = \mathbf{I}$,得到:

$$\mathbf{F}_K^H \mathbf{F}_K = \mathbf{B}_K^{-1} \mathbf{G}_K (\mathbf{H}_K \mathbf{H}_K^H + \xi \mathbf{I}) \mathbf{H}_K^{-H} \mathbf{H}_K^H \mathbf{B}_K^{-1} (\mathbf{H}_K \mathbf{H}_K^H + \xi \mathbf{I}^H) \mathbf{G}_K^H \mathbf{B}_K^H = \mathbf{I} \quad (17)$$

为了方便处理,我们将式(17)重写为:

$$\mathbf{G}_K^{-1} \mathbf{B}_K \mathbf{B}_K^H \mathbf{G}_K^H = (\mathbf{H}_K \mathbf{H}_K^H + \xi \mathbf{I}) \mathbf{H}_K^{-H} \mathbf{H}_K^H \mathbf{H}_K^{-1} (\mathbf{H}_K \mathbf{H}_K^H + \xi \mathbf{I}^H) \quad (18)$$

令 $\mathbf{L}_K = \mathbf{G}_K^{-1} \mathbf{B}_K$,式(18)可表示为:

$$\mathbf{L}_K \mathbf{L}_K^H = (\mathbf{H}_K \mathbf{H}_K^H + \xi \mathbf{I}) \mathbf{H}_K^{-H} \mathbf{H}_K^H \mathbf{H}_K^{-1} (\mathbf{H}_K \mathbf{H}_K^H + \xi \mathbf{I}^H) \quad (19)$$

对 $(\mathbf{H}_K \mathbf{H}_K^H + \xi \mathbf{I}) \mathbf{H}_K^{-H}$ 做 LQ 分解,可得到下三角矩阵 \mathbf{L}_K ,即:

$$(\mathbf{H}_K \mathbf{H}_K^H + \xi \mathbf{I}) \mathbf{H}_K^{-H} = \mathbf{L}_K \mathbf{Q}_K \quad (20)$$

取出 \mathbf{L}_K 的主对角元素,将其倒数作为加权矩阵 \mathbf{G}_K 的对角线元素,即:

$$\mathbf{G}_K = \begin{bmatrix} l_{11}^{-1} & & & \\ & l_{22}^{-1} & & \\ & & \ddots & \\ & & & l_{KK}^{-1} \end{bmatrix} \quad (21)$$

反馈矩阵 \mathbf{B}_K 可以表示为:

$$\mathbf{B}_K = \mathbf{G}_K \mathbf{L}_K \quad (22)$$

根据式(16)可以得到前馈矩阵 \mathbf{F}_K :

$$\mathbf{F}_K = \mathbf{Q}_K^H \quad (23)$$

至此,可以求解出所有预编码矩阵。

4 仿真与分析

为验证所提算法的性能,本文使用 MATLAB 仿真软件在高速移动环境下对所提算法进行仿真验证。仿真采用 4×1 的多用户 MIMO 模型,即发送天线数为 4,接收天线数为 1,高速信道模型为 WINNER II D2a 信道模型^[16],调制方式为正交相移键控 (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK),总用户数为 10,目标用户数为 4。为了更好地比较所提算法的性能,本文设置了两类典型移动速度,一类是 50 km/h 的中低速,另一类是 300 km/h 的高速。通过比较在这两类速度下的 BER、信道容量及鲁棒性,对所提算法进行验证。具体的仿真参数如表 1 所列。

表 1 主要仿真参数

Table 1 Main simulation parameters

参数	值
载波频率/GHz	2.6
移动速度/(km/h)	50,300
BS 发送天线数 N_T	4
用户侧接收天线数 N_R	1
总用户数 N	10
选择目标用户数 K	4
带宽/MHz	5
调制方式	QPSK

本文主要比较了基于迫零 (Zero Forcing, ZF) 准则的线性预编码^[17]、基于 MMSE 准则的线性预编码^[18]、文献[7]提出的传统 THP 算法,以及本文提出的基于贪婪算法用户调度的改进 THP 算法在不同速度环境下的 BER、信道容量和鲁棒性。

4.1 误码率

图 3 给出了移动速度为 50km/h 时,线性预编码、传统 THP 算法以及本文算法的 BER 曲线图。图 4 给出移动速度为 300km/h 时,上述算法的 BER 曲线图。图 3 和图 4 中,带圆形符号的曲线为线性预编码 BER 曲线,带星形符号的曲线为传统 THP 算法的 BER 曲线,带三角形符号的曲线为本文所提算法的 BER 曲线。当移动速度为 50km/h 时,本文所提算法的 BER 数量级在 10^{-4} 和 10^{-5} 之间,传统 THP 算法的 BER 数量级在 10^{-3} 和 10^{-4} 之间;而当移动速度为 300km/h 时,本文所提算法的 BER 数量级接近 10^{-4} ,THP 算法的 BER 数量级约为 10^{-3} 。在两个速度下,线性预编码最多只能达到 10^{-2} 。从图中可以明显看出,不管是在高速环境还是中低速环境中,本文所提算法明显优于传统 THP 算法和线性预编码。这是由于传统 THP 采用了取模、反馈等非线性操作,有效提高了预编码精度,从而降低了 BER,而本文所提算法在此基础上加入了用户调度算法,对信道条件好的用户进行调度并排序,优先进行数据传输,在一定程度上提高了预编码精度,降低了 BER。此外,在图 3 和图 4 中,实线表示基于 ZF 准则的预编码,点划线表示基于 MMSE 准则的预编码,可以看出,基于 MMSE 的算法优于基于 ZF 的算法,这是因为 ZF 算法在处理信号的过程中不考虑噪声,而 MMSE 在处理信号时平衡了噪声的影响,这与理论分析结果一致。

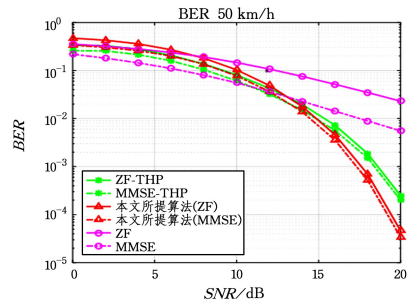


图 3 终端速度为 50 km/h 时几种预编码算法的 BER 曲线

Fig. 3 BER for precoding algorithms when terminal speed is 50 km/h

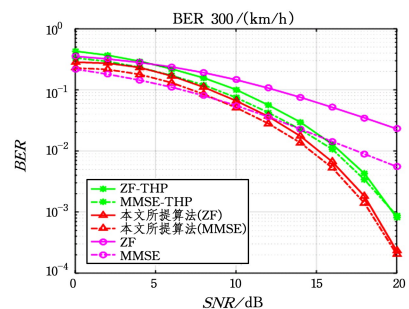


图 4 终端速度为 300 km/h 时几种预编码算法的 BER 曲线

Fig. 4 BER for precoding algorithms when terminal speed is 300 km/h

4.2 信道容量

图 5 给出了移动速度为 50 km/h 时,线性预编码、传统 THP 算法以及本文算法的信道容量曲线图。图 6 给出了移动速度为 300 km/h 时,上述算法的信道容量曲线图。从图中可以清晰地看到,不管是在高速场景下还是中低速场景下,本文所提算法的信道容量明显优于其他两种算法,而线性预编码算法的信道容量最差。当信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 为 20 dB,移动速度为 50 km/h 时,本文所提算法的信道容量相比传统 THP 提升了约 10 bps/Hz,相比线性预编码提升了约 15 bps/Hz;当 SNR 为 20 dB,移动速度为 300 km/h 时,本文所提算法的信道容量相比传统 THP 提升了约 9 bps/Hz,相比线性预编码提升了约 14 bps/Hz。非线性预编码可以提升信道容量,得到的结果与理论分析结果一致。从式(8)可以看出,在 SNR 确定的情况下,信道容量只与信道矩阵有关,本文在传统 THP 算法中加入贪婪算法进行用户调度,该贪婪算法以最大化信道容量为准则,因此其信道容量最优。移动速度为 50 km/h 时的信道容量要优于 300 km/h 时的信道容量,这是由于随着移动速度的增加,信道质量变差,信道容量变低。这与理论分析结果一致。

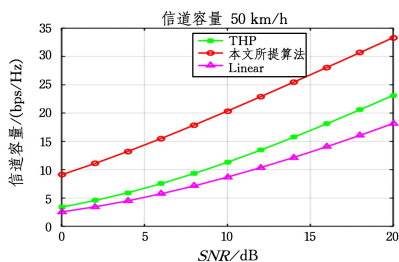


图 5 终端速度为 50 km/h 时几种预编码算法的信道容量

Fig. 5 Capacity for precoding algorithms when terminal speed is 50 km/h

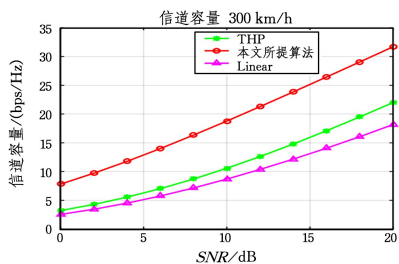


图 6 终端速度为 300 km/h 时几种预编码算法的信道容量

Fig. 6 Capacity for precoding algorithms when terminal speed is 300 km/h

4.3 鲁棒性

图 7 给出了在 50 km/h 和 300 km/h 的移动速度下本文所提算法的 BER 曲线。图 8 给出了在这两种移动速度下本文所提算法的信道容量曲线。可以看出,与移动速度为 50 km/h 时的 BER 性能及信道容量相比,移动速度为 300 km/h 时 BER 性能和信道容量均有所下降,这是由于随着物体移动速度的增加,多普勒频移也相应增加,信道条件变差。但是其性能并没有下降很多,仿真结果显示不管是在高速场景还是中低速场景下,本文所提算法都有较好的 BER 性能和信道容量,证明了本文所提算法的鲁棒性能良好。

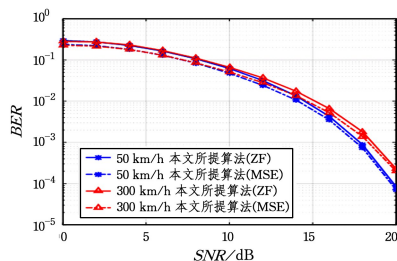


图 7 不同速度下本文所提算法的 BER 曲线

Fig. 7 BER of proposed algorithm in different velocities

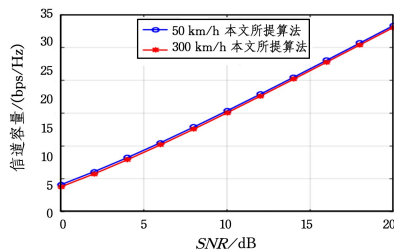


图 8 不同速度下本文所提算法的信道容量

Fig. 8 Capacity of proposed algorithm in different velocities

结束语 本文对面向高速移动场景下 MIMO 系统的预编码算法进行了研究,针对高速移动场景下信道时频域选择性衰落特性给系统性能造成的损失,首先提出了一种基于贪婪算法的用户调度方案。该方案以最大化信道容量为目标,对用户进行调度并排序,选择用户进行优先传输数据。进一步,本文提出了一种基于贪婪算法用户调度的改进 THP 算法,根据用户调度结果,对信道矩阵进行选择重构,将重构后的信道矩阵应用到 THP 算法中,从而提升预编码精度。仿真结果表明:在高速移动通信环境下,与传统 THP 预编码算法相比,本文所提算法的 BER 性能和信道容量均有较大提升;同时通过对比本文算法在两类典型移动速度下的 BER 性能和信道容量,验证了本文算法具有良好的鲁棒性、有效性以及合理性。

参考文献

- [1] LU Y, XIONG K, FAN P, et al. Optimal multi-cell coordinated beamforming for downlink high-speed railway communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(10): 9603-9608.
- [2] LIAO Y, LI Y F, SHEN X F. Adaptive beamforming of massive MIMO based on DoA in high mobility scenarios [J]. Journal on Communications, 2017, 38(6): 58-67. (in Chinese)
廖勇,李瑜峰,沈轩帆.基于 DoA 的高速场景下大规模 MIMO 自适应波束成形 [J]. 通信学报, 2017, 38(6): 58-67.
- [3] HE R, AI B, WANG G, et al. High-speed railway communications: from GSM-R to LTE-R [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(3): 49-58.
- [4] GAO T, SUN B. A high-speed railway mobile communication system based on LTE [C] // International Conference on Electronics and Information Engineering. IEEE, 2010: V1-414-V1-417.
- [5] MOHAMED E M, KINOSHITA D, MITSUNAGA K, et al. MI-

- MO based wireless backhaul[C]//International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops. IEEE,2010;202-209.
- [6] CHANDRASEKARAN M,SUBRAMANIAN S.Performance of precoding techniques in LTE[C]//International Conference on Recent Trends in Information Technology. IEEE, 2012; 367-371.
- [7] UBAIDULLA P,CHOCKALINGAM A. Robust Tomlinson-Harashima precoders for multiuser MISO downlink with imperfect CSI[J]. *Wireless Personal Communications*, 2010, 54(1): 53-68.
- [8] YANG M, YAO D, AI B, et al. A double differential space-frequency MIMO precoding scheme of LTE in high-speed railway environment[C]//International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. IEEE, 2013; 33-37.
- [9] ZHANG R, AI B, YANG L, et al. A precoding and detection scheme for OFDM based wireless communication system in high-speed environment[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2015, 60(4): 558-566.
- [10] INOUE T, JR R W H. Kerdock codes for limited feedback precoded MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(9): 3711-3716.
- [11] WANG C X, GHAZAL A, AI B, et al. Channel measurements and models for high-speed train communication systems: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 18(2): 974-987.
- [12] YANG Y. Research on downlink MU-MIMO precoding and user scheduling technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
杨阳. 下行 MU-MIMO 预编码及用户调度技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [13] PATHANIA A, VENKATRAMANI V, SHAFIQUE M, et al. Optimal greedy algorithm for many-core scheduling[J]. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2017, 36(6): 1054-1058.
- [14] SARVABHATLA M, KONDA S, VORUGUNTI C S, et al. A dynamic and energy efficient greedy scheduling algorithm for cloud data centers[C]//International Conference on Cloud Computing in Emerging Markets. IEEE, 2017; 47-52.
- [15] MEINILÄ J, KYÖSTI P, JÄMSÄ T, et al. WINNER II channel models[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008; 39-92.
- [16] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. *Bell Labs Technical Journal*, 1948, 27(4): 379-423.
- [17] BEN CHEIKH D, KELIF J M, COUPECHOUX M, et al. Multi-cellular zero forcing precoding performance in rayleigh and shadow fading [C] // Vehicular Technology Conference. IEEE, 2011; 1-5.
- [18] PATCHARAMANEepakorn P, ARMOUR S, DOUFEXI A. On the equivalence between SLNR and MMSE precoding schemes with single-antenna receivers[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(7): 1034-1037.