

RZF 预编码与 MMSE-SIC 检测联合的大规模 MIMO 系统预编码设计算法^①

谢 斌^② 刘述睿 谢舒闽

(江西理工大学信息工程学院 赣州 341000)

摘 要 研究了大规模多输入多输出(MIMO)系统的预编码设计算法。针对大规模 MIMO 系统通常利用增加用户天线数来提高系统频谱效率的方法会导致用户间干扰增大,从而对系统性能产生负面影响的问题,提出了一种将正则化迫零(RZF)预编码与最小均方误差-串行干扰消除(MMSE-SIC)检测相结合的改进算法。该算法通过在基站端采用 RZF 预编码对信号进行预处理以平衡用户间干扰和噪声干扰的影响,继而在接收端运用检测性能优异的 MMSE-SIC 算法来进一步减轻信号中的干扰,从而达到提升系统容量的目的。实验结果表明,这种将 RZF 预编码与 MMSE-SIC 检测相结合的改进算法,在用户间干扰较大时具有较好的适用性,且在完全已知和未完全已知信道状态信息情况下的频谱效率均优于传统 RZF 算法。

关键词 大规模多输入多输出(MIMO), 预编码, 信号检测, 频谱效率, 信道状态信息

0 引 言

无线通信技术的发展对数据传输速率提出了更高的要求,如何有效提升移动通信系统的传输性能成为人们研究的重点。2010 年,贝尔实验室的 Marzetta 提出了一种大规模多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)技术^[1],该技术通过在基站端集成大规模天线阵列实现了在同一频带上服务多个单天线或多天线用户。与传统 MIMO 系统相比,大规模 MIMO 系统通过增加基站端的天线数目以更高层次地挖掘无线空间维度资源^[2],从而有效地提升了系统的性能。大规模 MIMO 技术还具有传输速率高、容量大等显著优势。另外,考虑到频谱资源日益紧张,移动通信系统的频谱效率(即单位频带内的信号传输速率)成为了衡量系统性能的重要标准,而大规模 MIMO 技术能大幅提高系统的频谱

效率,从而提高频谱资源的利用率。因此,大规模 MIMO 技术成为了下一代 5G 通信的核心技术之一^[3]。

目前大规模 MIMO 技术的研究热点主要集中在预编码算法、导频污染、信道估计及信号检测等方面。在大规模 MIMO 系统中用户通常配置单根天线,因此系统所能达到的性能增益较为有限^[4]。部分学者通过增加用户的天线数来达到提高系统容量的目的。但在基站与用户进行数据通信时,不同用户发送的信号在同一频段内进行传输,用户信号都将受到来自其他用户的同信道干扰(co-channel interference, CCI),并且信号经建筑物的反射、折射将会形成多个信号分量,由于多个分量都有一定的时延,多个时延分量叠加将形成了干扰,因此,考虑到上述用户间干扰产生的原因,在用户配置多根天线数时,系统中用户间干扰将变大,从而使基站接收的导频信号和有用信号的误码率增大,导致基站在估

① 国家自然科学基金(61363076)和江西省自然科学基金(20142BAB207020)资助项目。

② 男,1977 年生,硕士,副教授;研究方向:大规模 MIMO 技术,信号处理;联系人, E-mail: xiebin-66@163.com (收稿日期:2017-01-09)

计信道状态信息时存在估计误差较大的问题,进而加重了导频污染对系统性能产生负面影响^[5]。

为有效提升系统的容量,一些研究者通过导频优化策略来提高预编码算法的有效性,并以此减轻用户间干扰及导频污染对系统容量产生的影响^[6]。文献[7]针对用户间干扰给出了一种基于单小区的迫零(zero-forcing, ZF)预编码算法,通过求信道矩阵的伪逆使预编码矩阵的矢量方向与非目标用户的信道矩阵正交,以此来消除用户间的干扰。由于迫零(ZF)预编码算法没有考虑噪声放大的问题,所以在信道矩阵病态时,接收信噪比将急剧恶化,从而严重影响系统性能。文献[8]提出了一种改进的 ZF 预编码算法,即正则化迫零(regularized zero-forcing, RZF)预编码算法,通过增加正则化项的方法来平衡用户间干扰和噪声干扰的影响,再根据资源分配策略使系统达到近似最优的性能增益。然而在基站端天线数量和接收端的天线数量相差不大的情况下,该线性预编码算法的性能下降较为明显。针对文献[8]中的问题,文献[9]给出了一种向量扰动的非线性预编码方案,该算法在信号发射之前加上一个最优的扰动矢量使信号的发射功率最小化,因此在基站端天线数量和接收端天线数量相差不大时,该算法能降低系统的总发射功率,所以在一定程度上提升了系统的容量。但是该算法中涉及扰动矢量最优化问题,计算复杂度相对较高。文献[10,11]利用正交导频把系统中的小区进行分类,并对不同类别的小区分配不同导频,再通过导频功率控制的方法来提高预编码算法的有效性,从而减轻了用户间干扰和导频污染的影响。针对传统方法往往只单方面考虑基于基站端的预编码算法或基于接收端的信号检测算法,文献[12]提出了一种双向中继系统中的格约简-Tomlinson Harashima 预编码(lattice reduction-Tomlinson Harashima precoding, LR-THP)与格约简迫零(lattice reduction zero-forcing, LR-ZF)检测联合设计算法。首先利用 LR-THP 算法对发射端信号进行预处理,然后通过中继节点对信号进行放大后转发,最后在接收端利用 LR-ZF 检测算法来进一步减轻干扰。该联合设计算法与传统预编码算法相比,有较好的误比特率性能。但在用户配置多根天

线的系统中,基于接收端的 LR-ZF 检测算法在用户间干扰较大情况下的检测性能较差。

针对上述问题,本文在传统正则化迫零(RZF)预编码算法的基础上,提出了一种 RZF 预编码与最小均方误差-串行干扰消除(minimum mean squared error-successive interference cancellation, MMSE-SIC)检测相结合的改进算法。在用户配置多根天线而导致用户间干扰增大的情况下,本文算法首先通过 RZF 预编码算法来有效平衡用户间干扰和噪声干扰的影响,然后结合检测性能优异的非线性 MMSE-SIC 算法来进一步减弱用户间干扰。仿真结果表明,本文算法在用户间干扰较大的情况下具体较好的实用性,在完全已知信道状态信息(channel state information, CSI)和未完全已知 CSI 两种情况下的系统频谱效率均优于传统的 RZF 预编码算法。

1 大规模 MIMO 单小区系统模型

大规模 MIMO 单小区通信系统模型如图 1 所示。假设基站端集成了 M 根发射天线,与 K 个配置 N 根天线的用户进行数据通信,系统采用时分双工的工作模式,即上行链路和下行链路的信道传播系数相同^[13],基站利用接收到的导频信号估计上行链路的信道状态信息,而下行链路根据信道互易性获取信道估计。

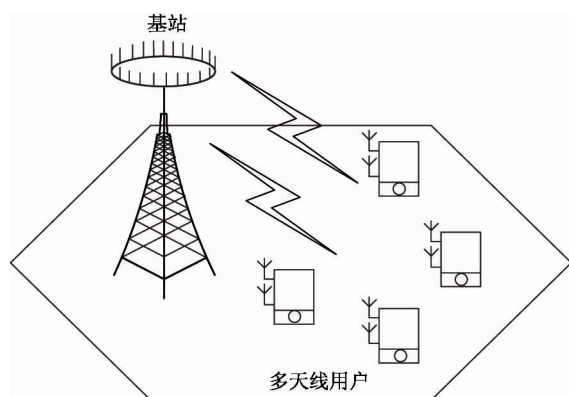


图 1 大规模 MIMO 单小区移动通信系统

在目标小区中,基站端接收的导频信号为

$$Y = \sum_{k=1}^K C_k B_k + n \quad (1)$$

式中, $\mathbf{C}_k \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 为第 K 个用户的信道响应,服从独立高斯分布。 $\mathbf{B}_k \in \mathbb{C}^{N \times E}$ 第 K 个用户的导频信号矩阵,其中 $E = NK$ 表示基站估计导频序列所需的矩阵维度。 $n \sim CN(0, \sigma^2 \mathbf{I}_{EM})$ 为加性高斯白噪声。另外,考虑到目标小区中的用户配置了多根天线,使得用户天线之间距离较短,从而导致信号在有限的信道空间范围内散射不足。因此,文中运用经典的克罗内克模型描述信道空间相关性^[14],则第 K 个用户的信道响应 $\mathbf{C}_k$ 可写为

$$\mathbf{C}_k = \mathbf{A}_{r,k}^{1/2} \mathbf{C}_{w,k} \mathbf{A}_{t,k}^{1/2} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{C}_{w,k} \in \mathbb{C}^{M \times N}$, $\mathbf{A}_{t,k} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 表示第 K 个用户的信道空间相关性矩阵, $\mathbf{A}_{r,k} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 表示基站到第 K 个用户的信道空间相关性矩阵,并且 $\mathbf{A}_{r,k}$ 包含了信道的大尺度衰落系数,其值为 $\frac{1}{M} \text{tr}(\mathbf{A}_{r,k})$,同时第 K 个用户的信道空间相关性矩阵可分解为

$$\mathbf{A}_{t,k} = \mathbf{U}_k \mathbf{\Lambda}_k \mathbf{U}_k^H \quad (3)$$

式中, $\mathbf{U}_k \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 为酉矩阵, $\mathbf{\Lambda}_k = [\lambda_{k1}, \dots, \lambda_{kN}]$ 为信道空间相关性矩阵的特征值向量。由式(1)、式(2)、式(3)可知,基站接收的导频信号可写为

$$\mathbf{Y} = \sum_{k=1}^K \mathbf{C}_k \mathbf{B}_k + \mathbf{n} = \sum_{k=1}^K \mathbf{G}_k \mathbf{D}_k^{1/2} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{n} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{G}_k$ 为信道传输矩阵, $\mathbf{G}_k = \mathbf{A}_{r,k}^{1/2} \mathbf{C}_{w,k} \mathbf{U}_{t,k}$, $\mathbf{D}_k$ 为用户的发射功率, $\mathbf{D}_k^{1/2} = \mathbf{\Lambda}_k \mathbf{J}_k$, $\mathbf{F}_k^T$ 满足 $\mathbf{F}_k^H \mathbf{F}_k = \mathbf{E} \mathbf{I}_N$ 。假设基站已知信道的功率控制参数 $\mathbf{D}_k$,则根据基于最小均方误差 (MMSE) 准则的信道估计理论^[15],得到第 K 个用户的信道估计为

$$\hat{\mathbf{g}}_k = (\mathbf{D}_k^{1/2} \otimes \mathbf{A}_{r,k}) ((\mathbf{D}_k \otimes \mathbf{A}_{r,k}) + \frac{\sigma^2}{E} \mathbf{I}_{MN})^{-1} \mathbf{a}_k \quad (5)$$

式中, $\hat{\mathbf{g}}_k = \text{vec}(\mathbf{G}_k)$, $\text{vec}(\cdot)$ 为向量化操作符, $\mathbf{a}_k = \frac{1}{E} \mathbf{Y}_k \mathbf{F}_k = (\mathbf{G}_k \mathbf{D}_k^{1/2} + \frac{1}{E} \mathbf{N} \mathbf{F}_k)$, $\otimes$ 表示克罗内克积。

2 RZF 预编码与 MMSE-SIC 检测联合设计算法

大规模 MIMO 系统通常考虑系统的用户为单天线用户。为进一步提高系统的容量,可以通过增加用户的天线数量来增加数据流,再利用多路复用技

术来提升系统容量。然而,大规模 MIMO 系统在增大用户端天线数量的同时也使系统中的用户间干扰增大,导致对信号的检测难度增大。常用的线性预编码算法在基站端天线数与接收端天线数比值较小的情况下对减轻用户间干扰的性能不够理想,从而影响了系统的性能。为提升系统的抗干扰能力,部分算法在基站端利用导频优化来改进线性预编码效率^[16],或采用性能更好但复杂度较高的非线性预编码方法。另一方面,部分算法在接收端采用检测性能更好的检测算法来提高系统性能。然而,上述方案都仅仅单方面考虑在基站端或在接收端进行改进,具有一定局限性。并且在用户间干扰较大的情况下其适用性较差,系统所能达到的频谱效率不高。

基于上述考虑,本文提出了一种预编码算法与信号检测相结合的算法,同时在基站端和接收端改进系统性能,以提高用户间干扰较大情况下的系统频谱效率。该方案的设计流程如图 2 所示。

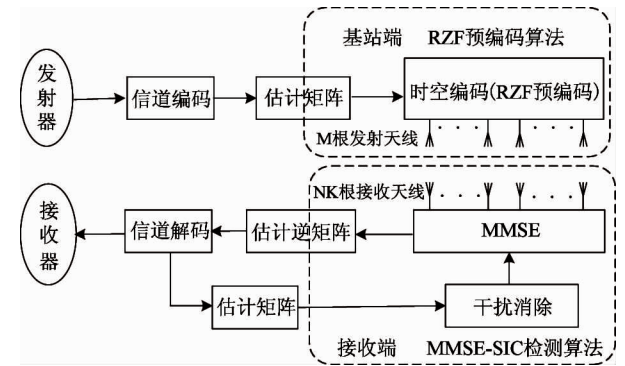


图 2 RZF 预编码与 MMSE-SIC 检测算法联合设计示意图

在图 2 中,系统分别考虑在基站端和接收端运用性能较好的预编码算法和检测算法来减轻用户间干扰对系统性能产生的影响。该方案的设计过程主要分为两个部分,即基于基站端的 RZF 预编码算法和基于接收端的 MMSE-SIC 信号检测算法。联合设计方案的具体过程为:首先,在系统接收端对导频信号进行信道估计来获知上行链路的信道状态信息 (CSI),再将 CSI 反馈至基站端。并且,在时分双工系统中,下行链路的信道估计可以通过上下行信道具有互易性获知,同时,考虑到 RZF 预编码算法能有效平衡噪声干扰及用户间干扰的影响,因此,在基站端通过 RZF 预编码算法对信号进行预处理,以此

减轻用户间干扰的影响。继而将 RZF 预编码矩阵与 CSI 相结合生成适合在下行链路信道中传输的信号。信号经下行链路传输至用户接收端后,用户采用多根天线接收信号,为进一步减轻信号中干扰,在接收端采用逐层干扰消除的 MMSE-SIC 检测算法对信号中的用户间干扰作进一步处理。最后,得到预编码与信号检测联合处理后的信号。

如图 2 所示,文中方法在基站端采用 RZF 预编码算法。RZF 预编码算法同时具有 ZF 预编码算法和 MR 预编码算法的优点^[17],即能有效减轻用户间干扰,并且运算复杂度较低。RZF 预编码算法通过在信道矩阵求逆之前增加正则化项来平衡噪声干扰与用户间干扰的影响,其预编码矩阵定义为

$$\mathbf{W}_k^{RZF} = \mathbf{G}_k (\mathbf{G}_k^H \mathbf{G}_k + \xi \mathbf{I}_M)^{-1} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{W}_k^{RZF} \in \mathbb{C}^{M \times N}$, $\mathbf{G}_k = \mathbf{A}_{r,k}^{1/2} \mathbf{C}_{w,k} \mathbf{U}_{t,k}$ 为信道向量, ξ 为正则化参数,它的取值由基站发射功率 P 和信道噪声方差 σ^2 决定。另外,基站端接收的 K 个用户信号为

$$\mathbf{y} = \sum_{k=1}^K \mathbf{C}_k \bar{\mathbf{B}}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{n} = \sum_{k=1}^K \mathbf{G}_k \mathbf{A}_k^{1/2} P_k^{1/2} \mathbf{x}_k + \mathbf{n} \quad (7)$$

式中, $\bar{\mathbf{B}}_k$ 为上行链路的预编码矩阵, $\bar{\mathbf{B}}_k = \mathbf{U}_k P_k^{1/2}$, $\mathbf{x}_k$ 为用户传输信号, $\mathbf{x}_k \sim CN(0, \mathbf{I}_N)$ 。此时,基站端接收的用户信号与 RZF 预编码矩阵结合,生成适合在下行信道中传输的发射信号 $\mathbf{x}_k \mathbf{W}_k^{RZF}$ 。

另外,本文方法在接收端采用 MMSE-SIC 检测算法。MMSE-SIC 检测算法在用户间干扰较大的情况下具有比传统线性检测算法更好的检测性能,并且硬件较简单,易于实现^[18]。在系统的接收端,接收信号可表示为

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{G}_k^H \sum_{k=1}^K \mathbf{W}_k^{RZF} \psi_k^{1/2} \mathbf{x}_k + \mathbf{n}_k \quad (8)$$

式中, ψ_k 为用户的总发射功率, $\psi_k = \text{diag}\{\omega_{k,1}, \dots, \omega_{k,N}\}$ 。在接收端,基于 MMSE 准则的串行干扰消除算法的原理是逐层消除当前最大用户干扰,首先根据 MMSE 准则检测出信号与干扰加噪声比 (signal interference noise ratio, SINR) 最高的用户信号,再消除检测出的信号对所有未检测信号的影响,并依此逐级检测,直到检测出全部信号。其具体步骤如下:

(1) 令 $\hat{\mathbf{W}}$ 为信号检测算法的权值矩阵,其中基于 MMSE 准则的权值矩阵 $\hat{\mathbf{W}}$ 定义为

$$\hat{\mathbf{W}} = \mathbf{G}_k (\mathbf{G}_k^H \mathbf{G}_k + \sigma^2 \mathbf{I}_M)^{-1} \quad (9)$$

(2) 选择 SINR_i 最大的信号矩阵 $\hat{\mathbf{W}}_i$ 作为初始检测信号,并赋值给 n_i ,其中 SINR_i 和 n_i 为

$$\text{SINR}_i = \frac{|\hat{\mathbf{W}}_i \mathbf{G}_i|^2}{\sum_{j=1, j \neq i}^K |\hat{\mathbf{W}}_i \mathbf{W}_j|^2 + \|\hat{\mathbf{W}}_i\|^2 \varepsilon^{-1}} \quad (10)$$

$$n_i = \text{argmin} \|\hat{\mathbf{W}}_i\| \quad (11)$$

式(10)、(11)中, ε 为发射信号的信噪比, $\|\cdot\|$ 表示范数。

(3) 检测第 n_i 个用户中的有用信号,再根据星座图对检测信号进行硬判决:

$$x_{n_i} = Q(r_{n_i}) = Q((\hat{\mathbf{W}}_i)_{n_i} y_i) \quad (12)$$

(4) 消除第 n_i 个用户信号对未检测出信号的干扰:

$$y_{i+1} = y_i - x_{n_i} (\mathbf{G}_i)_{n_i} \quad (13)$$

(5) 重复步骤(2)至步骤(4),直到检测出所有信号,得到检测后的信号 $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_K]$ 。

由于 MMSE-SIC 检测算法前一级的信号检测效果会直接影响下一级需要检测的信号,因此应尽量提高每一级信号检测的精度以提高系统性能。

3 联合设计算法的系统频谱效率分析

3.1 上行链路频谱效率分析

在大规模 MIMO 系统中,假设系统完全已知信道状态信息 (CSI),由于上行链路中的预编码向量与用户空间相关性矩阵的特征向量一致^[19],因此,根据系统中的信道空间相关性,联合设计算法的上行链路频谱效率可以表示为

$$SE_{ul} = \sum_{k=1}^K \mathbb{E} \{ \log_2 |\mathbf{I}_N + \mathbf{S}_k \mathbf{G}_K^H \mathbf{\Omega}_k \mathbf{G}_K| \} \quad (14)$$

式中, $\mathbf{S}_k = \mathbf{A}_k P_k$, $P_k = \text{diag}\{p_{k1}, \dots, p_{kn}\}$, P_k 为用户发射功率,并且满足 $\text{tr}(P_k) \leq P_k$, $\mathbf{\Omega}_k$ 为上行信道的协方差矩阵,可表示为

$$\mathbf{\Omega}_k = \left(\sum_{l \neq k} \mathbf{G}_l \mathbf{S}_l \mathbf{G}_l^H + \sigma^2 \mathbf{I}_M \right)^{-1} \quad (15)$$

式中, $\mathbf{G}_l$ 为第 l 个用户的信道矩阵, $\mathbf{I}_M$ 为单位矩阵。

3.2 下行链路频谱效率分析

在大规模 MIMO 系统的下行链路中,系统为了

进一步减轻信号中的干扰,在接收端采用基于 MMSE 准则的串行干扰消除算法对信号进行进一步处理,则联合处理后 K 个用户的信号可表示为

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{U}_k^H \mathbf{Y}_k = \mathbf{A}_k^{1/2} \mathbf{G}_k^H \sum_{l=1}^K \mathbf{W}_l^{RZF} \boldsymbol{\psi}_l^{1/2} x_l + \mathbf{U}_k^H \mathbf{n}_k \quad (16)$$

式中, $\mathbf{W}^{RZF}$ 为 RZF 预编码矩阵,则联合设计系统的下行链路频谱效率为

$$SE_{dl} = \sum_{k=1}^K \mathbb{E} \{ \log_2 | \mathbf{I}_N + \bar{\mathbf{G}}_k^H \mathbf{T}_k \bar{\mathbf{G}}_k | \} \quad (17)$$

式中, $\bar{\mathbf{G}}_k$ 为下行有效信道矩阵, $\bar{\mathbf{G}}_k = \mathbf{A}_k^{1/2} \mathbb{E} \{ \mathbf{G}_k^H \mathbf{W}_k^{RZF} \} \boldsymbol{\psi}_k^{1/2}$, $\mathbf{T}_k$ 为下行信道的协方差矩阵,表示为

$$\mathbf{T}_k = (\mathbf{A}_k^{1/2} \mathbb{E} \{ \mathbf{G}_k^H \sum_{l \neq k} (\mathbf{W}_l^{RZF} \boldsymbol{\psi}_l (\mathbf{W}_l^{RZF})^H) \mathbf{G}_k \} \mathbf{A}_k^{1/2} + \sigma^2 \mathbf{I}_N)^{-1} \quad (18)$$

3.3 理想 CSI 与非理想 CSI 时的系统频谱效率分析

在大规模 MIMO 系统时分双工的模式下,预编码以及收发联合设计都需要系统的信道状态信息 (CSI),而 CSI 通过在接收端对导频信号进行信道估计获得,为了能在基站端进行信号处理,CSI 通过反馈到达基站端,并与预编码矩阵结合生成适合在信道中传输的信号。因此,大规模 MIMO 系统的性能依赖于 CSI 的质量。部分研究者为了对预编码算法进行改进分析,假设基站端完全已知信道状态信息,以此提高预编码的精确性,从而达到减小信号的误码率的目的。但在实际情况下,由于信道估计误差及反馈时延等因素,基站端的获知的 CSI 通常存在误差,即未完全已知 CSI。系统在未完全已知 CSI 时,系统预编码矩阵的精确性也随之降低,导致信号差错率增大,从而降低了系统的容量。因此,本文在系统完全已知 CSI 和未完全已知 CSI 两种情况下分析本文改进方案的系统性能。

由式(14)、式(17)得知理想 CSI 情况下的系统总的频谱效率为

$$SE = SE_{ul} + SE_{dl} \quad (19)$$

由于下行链路根据信道互易性获知信道状态信息,但在信道估计过程中往往会存在反馈误差和估计误差^[20],信道状态信息被定义为

$$\begin{aligned} \mathbf{G}'_k &= \gamma^{1/2} (\sqrt{1-a^2} \mathbf{\Gamma}_k + a \mathbf{\Phi}_k) \\ &= \sqrt{1-a^2} \mathbf{G}_k + a \mathbf{n}_k \end{aligned} \quad (20)$$

式中, $\mathbf{G}_k$ 表示理想状态下的信道状态信息, $\gamma \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 为信道协方差矩阵, $\mathbf{\Gamma}_k \sim CN(0_M, \mathbf{I}_M)$, $\mathbf{\Phi}_k \sim CN(0_M, \mathbf{I}_M)$, $\mathbf{n}_k \sim CN(0_M, \gamma)$ 表示独立的信道估计误差。参数 a 的取值范围为 0 到 1。当 a 等于 0 时,表示符合理想情况下的 CSI;当 a 等于 1 时,表示仅仅符合统计学上的信道状态信息。另外,参数 a 的取值主要取决于单位时间内系统用于信道估计的功率^[21]。由此得知,理想 CSI 与非理想 CSI 的系统频谱效率有如下关系式:

$$SE \geq \bar{SE} \quad (21)$$

式中, $\bar{SE}$ 表示非理想 CSI 情况下的系统频谱效率, $\bar{SE}$ 的值与系统获知 CSI 的准确度有关。

4 实验仿真及结果分析

为了说明所提改进算法在大规模 MIMO 系统中的性能,本文在 Matlab2016 平台上进行了大量的仿真实验。将文中算法与 RZF、ZF、MR 等预编码算法进行比较,以此来证明文中算法对减轻用户间干扰的有效性。

图 3 所示为系统完全已知 CSI 时文中算法与 MR、ZF、RZF 算法的频谱效率比较结果。仿真实验基本设置如下:用户配置单根天线,小区用户数为 8

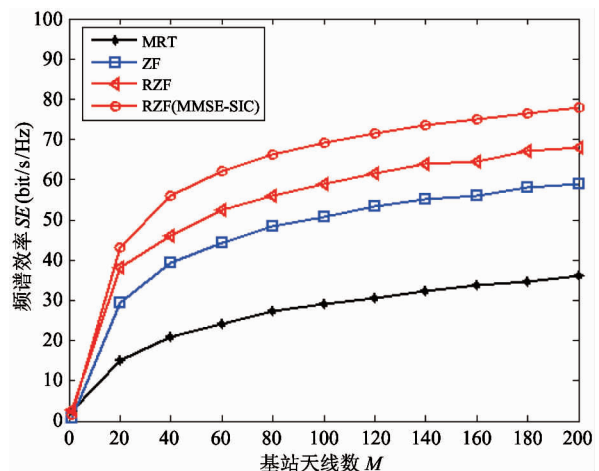


图 3 频谱效率随基站天线数变化的曲线图

个,发射端到接收端之间由传播环境造成的损耗为 3.7dB,接收信噪比为 0dB,基站端天线数 M 的变化范围为 1 到 200。由图 3 可知,在用户配备单天线的情况下,本文算法与 RZF 等传统预编码算法的频谱效率都随着天线数的增大而增大,并且本文算法的频谱效率明显优于其它三种算法。当基站天线数为 200 时,本文算法的频谱效率比传统 RZF 算法提升了约 1.2dB,比 ZF 算法提升了约 2.5dB。图 3 所示的仿真结果表明,本文算法能有效减轻用户间干扰,且可实现更高的系统频谱效率。

图 4 所示为系统完全已知 CSI 时本文算法与传统 RZF 算法在不同用户天线数和基站天线数变化条件下的频谱效率比较结果。仿真实验基本设置为:小区用户数为 8 个,用户配置天线数 N 的变化范围为 1 至 3,接收信噪比为 0dB,基站天线数的变化范围为 1 至 200。由图 4 可知,本文算法的频谱效率随着用户天线数 N 的增大而增大,并且提升的幅度较大,这主要是由于用户采用多根天线增加系统的数据流,再通过多路复用技术来提升系统性能。另外,在 $N=2$ 时,本文联合设计算法的频谱效率比 RZF 算法提升了约 1.6dB,在 $N=3$ 时,本文算法的系统性能比 RZF 算法提升了约 2dB。由此可知,随着用户天线数 N 的增大,本文算法消除用户间干扰的效果较 RZF 算法更为明显。图 4 所示仿真结果表明,本文所提 RZF 预编码与 MMSE-SIC 相结合的改进算法在用户间干扰较大的情况下具有较好的适用性。

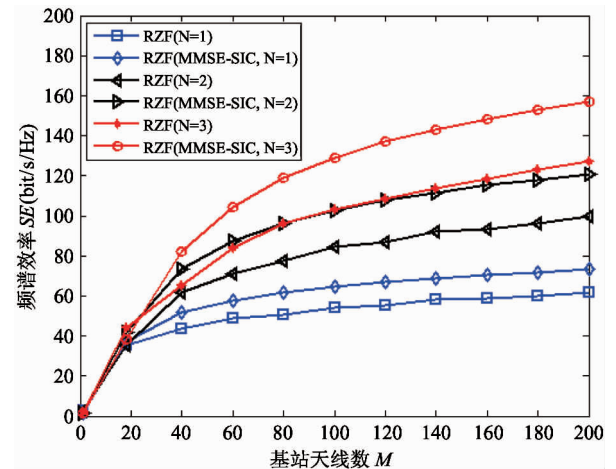


图 4 频谱效率与用户天线数及基站天线数的关系曲线图

图 5 所示为系统完全已知 CSI 时文中算法与 RZF 算法在不同信噪比和小区用户数变化条件下的频谱效率比较结果。仿真实验基本设置为:基站天线数为 50 根,接收信噪比分别考虑 -5dB、0dB、和 5dB 三种情况,用户天线数为 2 根,小区用户数的变化范围为 1 至 50。由图 5 可知,文中所提算法在三种接收信噪比情况下的频谱效率均优于传统 RZF 算法,并且随着信噪比的增大,文中所提算法的性能提升幅度更大。另外,在小区用户规模不大的情况下,文中算法的频谱效率显著优于 RZF 预编码算法。随着用户数的进一步增大,虽然频谱效率曲线逐步降低,但是文中算法的效果还是优于 RZF 预编码算法。图 5 所示仿真结果表明,在小区用户数不大且用户配置多根天线时,文中所提算法的性能优于 RZF 预编码算法。

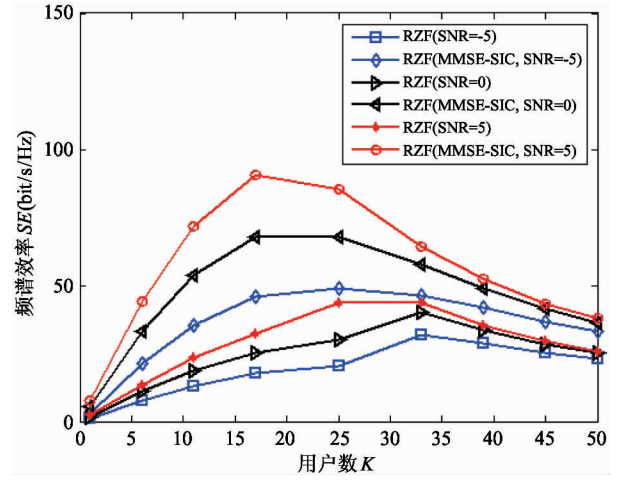


图 5 频谱效率与信噪比及小区用户数的关系曲线图

图 6 所示为 CSI 完全已知和部分已知两种情况下本文所提算法与 RZF 算法的频谱效率随基站天线数变化的比较结果。仿真环境基本设置为:基站端天线数的变化范围为 1 至 200,信道参数值 $\alpha=0.5$,小区用户数 8 个,用户天线数为 2 根,接收信噪比为 0dB。由图 6 可知,本文所提算法的频谱效率在 CSI 完全已知和未完全已知两种情况下都随着天数的增大而增大。在系统未完全已知 CSI 时,本文所提算法的频谱效率比 RZF 预编码算法提高了约 2.3dB。在系统完全已知 CSI 时,本文所提算法比 RZF 预编码算法的性能提升了约 1.6dB。图 6 所示

仿真结果表明,本文所提算法在 CSI 完全已知和未完全已知两种情况下的频谱效率均优于 RZF 算法,并且考虑到实际情况,本文算法在未完全已知 CSI 的实际情况下适用性更好。

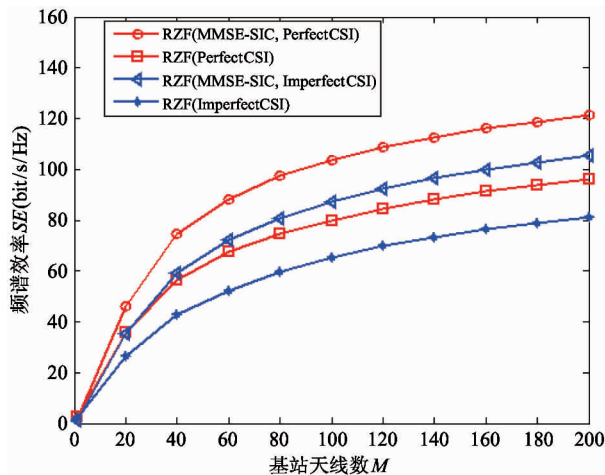


图 6 CSI 完全已知和部分已知情况下系统频谱效率与基站天线数的关系图

5 结 论

大规模 MIMO 系统预编码算法和检测算法的选择对系统性能起着关键性的作用,为解决用户配置多根天线而导致用户间干扰较大的问题,本文提出了一种正则化迫零(RZF)预编码与最小均方误差-串行干扰消除(MMSE-SIC)检测相结合的改进算法,该算法通过联合设计的方法对用户间干扰进行分步消除。首先,在基站端采用 RZF 预编码算法对信号进行预处理以平衡用户间干扰和噪声干扰的影响。然后,在接收端运用检测性能优异的 MMSE-SIC 算法来进一步消除干扰。与传统 RZF 预编码算法相比,该联合设计方案能更大程度上的减弱用户间干扰,另外,本文算法同时分析了信道状态信息(CSI)的估计质量对系统频谱效率产生的影响。通过对本文所提算法与传统线性预编码算法在不同实验仿真环境下的比较结果表明,本文所提联合设计算法在完全已知 CSI 和未完全已知 CSI 两种情况下的频谱效率均优于传统 RZF 预编码算法,说明该算法在用户间干扰较大的情况下具有较好的适用性。

在大规模 MIMO 系统中基站端集成的天线数量

较多,这将导致系统的能量功耗较大。如何在不影响系统性能的情况下,通过功率控制的方法来提高系统的能量效率,将是下一步的研究重点。

参考文献

- [1] Marzetta T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(11): 3590-3600
- [2] Xin Y, Wang D, Zhu H, et al. Area spectral efficiency and area energy efficiency of massive MIMO cellular systems of massive MIMO cellular systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(5): 3243-3254
- [3] Zhang Q, Lu Z, Jin S, et al. Power scaling of massive MIMO systems with arbitrary-rank channel means and imperfect CSI. In: *Proceedings of the 2013 IEEE Global Communications Conference, Atlanta, USA, 2013*. 4157-4162
- [4] Song N, Sung Y, Love D J. Pilot beam pattern design for channel estimation in massive MIMO systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2013, 8(5): 787-801
- [5] Zhang J, Wiesel A, Haardt M. Low rank approximation based hybrid precoding schemes for multi-carrier single-user massive MIMO systems. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Shanghai China, 2016*. 3281-3285
- [6] Zhang B, Bai Z Q, Li J H, et al. Artificial fish swarm algorithm based pilot allocation in massive MIMO system. In: *Proceedings of the 16th International Symposium, on Communications and Information Technologies (ISCIT), Qingdao, China, 2016*. 82-86
- [7] Hong Y, Marzetta T L. Performance of conjugate and zero-forcing beamforming in large-scale antenna systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(2): 172-179
- [8] Wang Z J, Wen C. Regularized zero-forcing for multiantenna broadcast channels with user selection. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2012, 1(2): 129-132
- [9] Ma Y, Yamani A, Yi N, et al. Low-complexity MU-MIMO nonlinear precoding using degree-2 sparse vector perturbation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(3): 497-509
- [10] 方昕,张建锋,曹海燕等. 大规模 MIMO 系统中动态导频分配. *电子与信息学报*, 2016, 38(8): 1901-1907

- [11] 王海荣,俞菲,黄永明等. 大规模 MIMO 多小区 TDD 系统中预编码策略和导频调度. 信号处理, 2013, 29(8):915-924
- [12] 王林,芮国胜,张海波. 双向中继系统用户联合预编码与检测算法研究. 电子与信息学报, 2015, 37(7): 1550-1555
- [13] Rasmus B, Bengtsson M. Distributed CSI acquisition and coordinated precoding for TDD multicell MIMO systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(5): 2890-2906
- [14] Kermaol J P, Schumacher L, Pedersen K I, et al. A stochastic MIMO radio channel model with experimental validation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(6):1211-1226
- [15] Babak H, Hochwald B M. How much training is needed in multiple-antenna wireless links? *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(4): 951-963
- [16] 彭吉生,田霖,周一青. 有限符号约束下的 MIMO 信道线性预编码设计. 高技术通讯, 2013, 23(11): 1117-1123
- [17] Krishnan R, Khanzadi M R, Krishnan N, et al. Linear massive MIMO precoders in the presence of phase noise—a large-scale analysis. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 65(5):3057-3071
- [18] Tseng F S, Hsu C Y. A transceiver design for limited feedback AF MIMO relay system with MMSE-SIC receiver. In: Proceedings of the on 2016 International Conference Networking and Network Applications, Hakodate City, Japan, 2016. 126-130
- [19] Antonios P, Mohammed S K, Larsson E G. Uplink performance of time-reversal MRC in massive MIMO systems subject to phase noise. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(2): 711-723
- [20] Liu A, Lau V K N. Impact of CSI knowledge on the codebook-based hybrid beamforming in massive MIMO. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(24): 6545-6556
- [21] Yang R Z, Zong L, Si P B, et al. Selective transmission and channel estimation in massive MIMO systems. *High Technology Letters*, 2016, 22(1): 99-106

An algorithm for precoding design for massive MIMO systems based on combining RZF precoding with MMSE-SIC detection

Xie Bin, Liu Shurui, Xie Shumin

(Information Engineering Institute, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000)

Abstract

The precoding design of massive multiple input multiple output (MIMO) systems was studied. Considering that massive MIMO systems use the increasement of the number of user antennas to improve the spectrum efficiency, but this brings more inter-user interference so causing the negative influence on the system performance, an improved precoding design algorithm using the combination of regularized zero-forcing (RZF) and minimum mean squared error-successive interference cancellation (MMSE-SIC) detection was proposed. The algorithm performs the signal pre-processing to balance the effect between inter-user interference and noise interference by using the RZF precoding algorithm in the base station, and then uses the MMSE-SIC detection algorithm to further reduce the signal interference, thus the system capacity is increased. The experimental results show that under the condition of the serious inter-user interference, the algorithm using the combination of RZF precoding and MMSE-SIC detection has the good applicability and its spectrum efficiency is better than the traditional RZF algorithm in the condition that the channel state information is completely known or completely unknown.

Key words: massive multiple input multiple output (MIMO), precoding, signal detection, spectrum efficiency, channel state information