

6-6-2020

Hybrid RZF Precoding Algorithm for Massive MIMO System

Bin Xie

School of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

Shumin Xie

School of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

Shurui Liu

School of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Hybrid RZF Precoding Algorithm for Massive MIMO System

Abstract

Abstract: In view of the high system complexity and high cost of the multi-user Massive MIMO system based on the traditional full digital precoding, *a hybrid analog and digital RZF precoding is proposed. Based on the consideration of the channel noise, the inter-user interference and the system structure, the analog precoding matrix is sectionally designed with the combination of MRT precoding and RZF precoding, and for the digital part, a low dimension RZF precoding is used on the basis of the optimized channel matrix. After the optimization design, both the number of RF chain and the dimension of the digital baseband processing are reduced.* According to the simulation results, based on the reduction of system complexity and implementation cost, the spectrum efficiency of the proposed hybrid RZF precoding algorithm is very close to that of the traditional full digital RZF precoding.

Keywords

massive MIMO, hybrid precoding, RZF precoding, RF chain, spectrum efficiency

Recommended Citation

Xie Bin, Xie Shumin, Liu Shurui. Hybrid RZF Precoding Algorithm for Massive MIMO System[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(12): 3114-3122.

大规模 MIMO 系统中的混合 RZF 预编码算法研究

谢斌, 谢舒闽, 刘述睿

(江西理工大学信息工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 针对多用户大规模 MIMO 系统采用传统全数字预编码时系统复杂度和实现成本较高的问题, 提出了一种模拟和数字相结合的混合 RZF 预编码。在充分考虑信道噪声、用户间干扰和系统结构的基础上, 结合 MRT 和 RZF 预编码对模拟部分的预编码矩阵进行分段设计, 数字部分则根据生成的优化信道矩阵, 采用低维 RZF 预编码进行处理。通过这种优化设计, 大幅度减少了系统所需射频链路的数量, 并且降低了数字基带处理部分的维度。仿真结果表明, 在有效地降低了系统复杂度和实现成本的基础上, 文中所提混合 RZF 预编码的频谱效率非常接近传统全数字 RZF 预编码。

关键词: 大规模 MIMO; 混合预编码; RZF 预编码; 射频链路; 频谱效率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 12-3114-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201712024

Hybrid RZF Precoding Algorithm for Massive MIMO System

Xie Bin, Xie Shumin, Liu Shurui

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

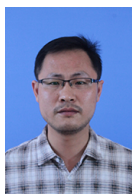
Abstract: In view of the high system complexity and high cost of the multi-user Massive MIMO system based on the traditional full digital precoding, a hybrid analog and digital RZF precoding is proposed. Based on the consideration of the channel noise, the inter-user interference and the system structure, the analog precoding matrix is sectionally designed with the combination of MRT precoding and RZF precoding, and for the digital part, a low dimension RZF precoding is used on the basis of the optimized channel matrix. After the optimization design, both the number of RF chain and the dimension of the digital baseband processing are reduced. According to the simulation results, based on the reduction of system complexity and implementation cost, the spectrum efficiency of the proposed hybrid RZF precoding algorithm is very close to that of the traditional full digital RZF precoding.

Keywords: massive MIMO; hybrid precoding; RZF precoding; RF chain; spectrum efficiency

引言

随着移动通信设备连接数量的不断增加, 现有的通信系统将很难满足移动通信数据量爆炸式的

增长需求, 因此, 人们对下一代通信系统提出了更高的要求^[1]。与传统的多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术相比, 大规模 MIMO 技术^[2]通过在基站部署大量的天线(几十根至几百根), 能够大幅度提高系统的频谱效率和能量效率, 不仅能满足用户不断增长的数据通信业务需求, 同时也符合当前绿色通信^[3]的发展理念, 因而被视为第五代移动通信系统(5G)的关键技术之一^[4-7]。然而, 大规模 MIMO 技术仍然面临着诸多挑战, 其



收稿日期: 2016-09-14 修回日期: 2017-03-09;
基金项目: 国家自然科学基金(61363076), 江西省自然科学基金(20142BAB207020);
作者简介: 谢斌(1977-), 男, 江西于都, 硕士, 副教授, 研究方向为大规模 MIMO 技术等; 谢舒闽(1988-), 男, 江西瑞金, 硕士生, 研究方向为大规模 MIMO 技术。

<http://www.china-simulation.com>

• 3114 •

中系统复杂度较大、实现成本较高等问题显得尤为突出^[8]。

在大规模 MIMO 系统传输过程中, 需要使用射频(Radio Frequency, RF)链路(包括数模转换器、混频器和功率放大器等)将经过预处理的基带信号上变频调制后通过天线进行发射。文献[9-10]在系统中采用传统的全数字预编码方式, 这类方案虽然具有较好的性能, 但是它要求每根天线对应一个 RF 链路, 随着天线数量大幅度增大, 势必会导致系统复杂度和实现成本增加, 为大规模 MIMO 技术的应用带来阻碍。为了解决系统中 RF 链路数量过大而导致成本较高的问题, 文献[11-12]提出了利用模拟电路实现的模拟预编码方案。与数字预编码不同, 模拟预编码的基本思想是利用低成本的移相器来控制每一根天线发射信号的相位。因此, 相对于数字预编码, 模拟预编码的复杂度和实现成本通常更低。这种模拟预编码方案也被 IEEE 802.15.3c 等通信标准所采纳^[13]。但是, 由于受到硬件条件的限制, 很难做到对信号相位的精准控制, 因此模拟预编码的性能通常要比数字预编码差。

近年来有些学者综合了数字预编码和模拟预编码的优点, 提出了模拟和数字相结合的混合预编码方案。为了减少多天线系统中 RF 链路的数量, 文献[14]在综合考虑 RF 链路和基带处理部分的基础上, 提出了一种基于软天线选择的算法, 在独立衰落的 MIMO 信道中, 该算法要优于传统的天线选择算法, 并且在分集传输的情况下, 能达到传统全数字预编码算法的性能。文献[15]在充分考虑了模拟预编码器受电路条件限制以及基站端只能获得部分信道信息的基础上, 提出了一种迭代的混合预编码算法, 在单用户的毫米波信道中, 该算法能够达到接近传统全数字预编码算法的性能。然而, 文献[14-15]所提混合预编码方案只考虑了单用户的 MIMO 系统, 没有考虑多用户多数据流的情况。对于多用户 MIMO 系统, 文献[16]提出了一种模拟预编码与基带数字预编码相结合的方案, 该方案不仅能减少系统中 RF 链路的数量, 还能降低对模数

转换器精度的要求, 在对模拟预编码进行量化的基础上, 该算法能够使接收信号的均方误差最小化。文献[17]提出了一种两级结构的混合预编码算法, 该算法能够控制大规模 MIMO 系统中的簇间干扰并且减小系统中的信道反馈开销。然而, 由于没有考虑对混合预编码中模拟部分和数字部分的改进, 文献[16-17]所提算法的系统性能还有待提高。

针对上述问题, 文中提出了一种模拟和数字相结合的混合 RZF 预编码算法。其中模拟部分通过移相器和混合器网络控制信号的相位, 并根据信道中噪声和用户间干扰的影响分段提取不同的全数字预编码矩阵中各元素的相位信息作为模拟预编码矩阵。数字基带部分则根据信道特性与模拟预编码矩阵生成的优化信道矩阵, 采用低维的 RZF 预编码处理。通过这种设计, 大量地减少了系统中 RF 链路的数量, 并且降低了数字基带处理部分的维度, 从而有效地降低了系统的复杂度和实现成本。仿真结果表明, 文中所提混合 RZF 预编码算法的频谱效率非常接近全数字的 ZF 和 RZF 预编码算法, 并且在大信噪比时要优于 MRT 预编码算法。

1 多用户大规模 MIMO 系统模型

在单小区的多用户大规模 MIMO 系统中, 装配了 N 根天线的基站同时服务于 K 个单天线的用户, 其系统模型如图 1 所示。

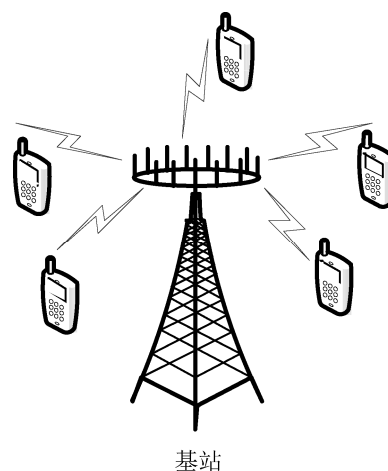


图 1 多用户大规模 MIMO 系统模型
Fig. 1 Multi-user massive MIMO system model

在大规模 MIMO 系统传输过程中, 发送到 K 个用户的数据流经过预编码器处理后, 基站的发射信号 $\mathbf{x}$ 可以表示为:

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^K \mathbf{w}_i s_i = \mathbf{W} \mathbf{s} \quad (1)$$

式(1)中: $\mathbf{s}=[s_1, s_2, \dots, s_K]^T$ 表示发射符号矢量;

$\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{N \times K}$ 表示预编码矩阵, 且满足约束条件:

$$\text{tr}(\mathbf{W} \mathbf{W}^H) = P \quad (2)$$

式(2)中: $(\bullet)^H$ 表示共轭转置; P 表示基站的发射总功率。

假设系统信道模型采用瑞利衰落信道, 则基站到第 k 个用户的信道估计可以表示为:

$$\hat{\mathbf{h}}_k = \sqrt{\Phi}(\sqrt{1-\tau^2} \mathbf{z}_k + \tau \mathbf{v}_k) = \sqrt{1-\tau^2} \mathbf{h}_k + \tau \mathbf{d}_k \quad (3)$$

式(3)中: $\mathbf{h}_k = \sqrt{\Phi} \mathbf{z}_k$ 表示基站到第 k 个用户的下行真实信道, 其中 $\Phi \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 表示信道协方差矩阵,

$\mathbf{z}_k \sim CN(\mathbf{0}_{N \times 1}, \mathbf{I}_N)$, $\mathbf{I}$ 表示单位矩阵。

$\mathbf{d}_k = \sqrt{\Phi} \mathbf{v}_k \sim CN(\mathbf{0}_{N \times 1}, \Phi)$ 表示独立的信道估计误差, 其中 $\mathbf{v}_k \sim CN(\mathbf{0}_{N \times 1}, \mathbf{I}_N)$ 。参数 $\tau \in [0, 1]$ 为瞬时衰减系数, 用来表示瞬时信道状态信息的质量因子。当 $\tau=0$ 时, 对应理想的瞬时信道状态信息, 当 $\tau=1$ 时, 对应的信道只有信道的统计信息。为了简化分析, 假设基站到所有用户的信道质量因子 τ 都相同。因此, 用户端的接收信号可以表示为 K 维向量, 即

$$\mathbf{Y} = \hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{W} \mathbf{P} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (4)$$

式(4)中: $\hat{\mathbf{H}} = [\hat{\mathbf{h}}_1 \dots \hat{\mathbf{h}}_K] \in \mathbb{C}^{N \times K}$ 表示基站到所有用户的信道估计矩阵; $\mathbf{P} = \text{diag}(p_1, p_2, \dots, p_K)$ 表示功率分配矩阵, 其对角线元素 p_k 表示基站到第 k 个用户的发射功率; $\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_K]^T$ 表示系统信道中的噪声, 其中 $n_k \sim CN(0, \sigma^2)$ 表示均值为零方差为 σ^2 的加性高斯噪声。

相应地, 第 k 个用户的接收信号可以表示为:

$$y_k = \hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{w}_k p_k s_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{w}_i p_i s_i + n_k \quad (5)$$

式(5)中: $\mathbf{w}_k$ 表示预编码矩阵 $\mathbf{W}$ 的第 k 列向量。于是第 k 个用户接收信号的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)可以表示为:

$$\text{SINR}_k = \frac{p_k |\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K p_i |\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{w}_i|^2 + \sigma^2} \quad (6)$$

由式(6)可得系统频谱效率为:

$$R_{SE} = \sum_{k=1}^K \log_2^{(1+\text{SINR}_k)} \quad (7)$$

2 预编码基本原理

在多用户大规模 MIMO 系统中, 随着天线数和用户数的增大, 系统中的干扰将会迅速增加。为了抑制这些干扰, 使移动端经过简单的处理就能够获得用户所需要的数据, 通常需要在基站端对发射信号进行预编码处理^[18]。预编码技术能有效地减小系统干扰所带来的影响, 其核心思想是: 基站根据所估计出的信道状态信息生成预编码矩阵, 并对将要发送的信号进行预处理, 从而有效地抑制系统中存在的干扰。

根据对发射信号处理方式的不同, 预编码一般分为非线性预编码和线性预编码。非线性预编码主要包括矢量扰动(Vector Perturbation, VP)、汤姆林森-哈拉希玛预编码(Tomlinson-Harashima Precoding, THP)和脏纸编码(Dirty Paper Coding, DPC)。脏纸编码在发送信号前, 发送端根据已经掌握的信道信息对发送信号进行处理, 从而预先消除系统中干扰的影响, 使得系统达到最优容量域, 因此脏纸编码被认为是最优的预编码方案^[19]。但是脏纸编码算法复杂度太高, 难以在实际中应用, 只能作为理论上界。在大规模 MIMO 系统中, 当天线数量远远大于用户数量时, 线性预编码能够达到接近非线性预编码的性能, 而且相对于非线性预编码, 线性预编码具有较低的复杂度, 因此, 在大规模 MIMO 系统中, 通常采用线性预编码技术。

常见的线性预编码主要有最大比传输(Maximum Ratio Transmission, MRT)预编码、迫零(Zero Forcing, ZF)预编码和正则化迫零(Regularized Zero Forcing, RZF)预编码等, 它们三者与用户信道间的关系如图 2 所示。其中 $\mathbf{h}_k$ 表示

目标用户 k 的信道向量, $\mathcal{S}$ 表示非目标用户信道构成的子空间, $\mathbf{w}_{Mk}$ 、 $\mathbf{w}_{Zk}$ 和 $\mathbf{w}_{Rk}$ 分别表示 MRT、ZF 和 RZF 预编码矩阵的第 k 列向量。

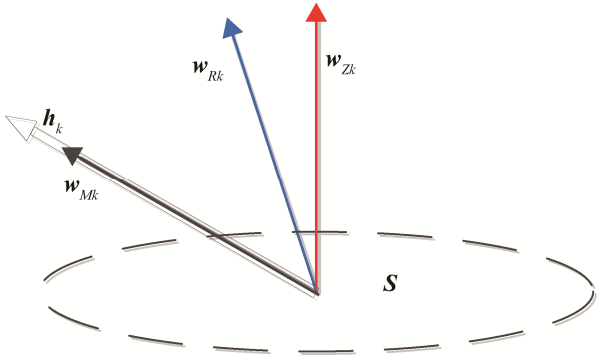


图 2 MRT、ZF、RZF 预编码与用户信道间关系示意图
Fig. 2 Illustration of the relationships among MRT, ZF, RZF precodings and user channel

(1) MRT 预编码

MRT 预编码是以接收信号信噪比最大化为目的的预编码方案。为了减小信道衰落对用户信号的影响, MRT 预编码矩阵的第 k 列 $\mathbf{w}_{Mk}$ 的矢量方向与目标用户信道相同, 以保证第 k 个用户的接收信号信噪比最大化。MRT 预编码矩阵可以表示为:

$$\mathbf{W}_{MRT} = \hat{\mathbf{H}} \quad (8)$$

MRT 预编码矩阵直接从信道信息中获得, 避免了对矩阵的求逆运算, 其计算复杂度低且容易实现, 因此是最简单的预编码方案。但是 MRT 预编码无法消除系统中其它用户对目标用户的干扰, 当用户间干扰较大时, 系统性能将受到很大的影响。

(2) ZF 预编码

ZF 预编码是以消除用户间干扰为目的的预编码方案, 其预编码矩阵通过求信道矩阵的伪逆来获得。ZF 预编码矩阵可以表示为:

$$\mathbf{W}_{ZF} = \hat{\mathbf{H}}(\hat{\mathbf{H}}^H \hat{\mathbf{H}})^{-1} \quad (9)$$

ZF 预编码矩阵的第 k 列 $\mathbf{w}_{Zk}$ 的矢量方向与非目标用户信道正交, 能够有效地消除其它用户对目标用户的干扰。ZF 预编码的原理较为简单, 但是这种预编码方案没有充分考虑噪声的影响, 其系统性能还有待改进。

(3) RZF 预编码

RZF 预编码综合了 MRT 和 ZF 预编码的优点, 这种预编码方案并没有完全消除用户间的干扰, 而是通过增加正则化项来平衡噪声干扰与用户间干扰之间的关系, 以获得近似最优的性能^[20]。RZF 预编码矩阵可以表示为:

$$\mathbf{W}_{RZF} = \hat{\mathbf{H}}(\hat{\mathbf{H}}^H \hat{\mathbf{H}} + \xi \mathbf{I}_K)^{-1} \quad (10)$$

式(10)中: ξ 表示正则化系数, 当 $\xi \rightarrow 0$ 时, RZF 退化为 ZF 预编码; 当 $\xi \rightarrow \infty$ 时, RZF 退化为 MRT 预编码。文献[21]给出了 ξ 的最优取值, 它依赖于信道质量因子 τ 、噪声方差 σ^2 和基站发射功率 P 。

在大规模 MIMO 系统中, 尽管采用传统的全数字线性预编码能够获得较高的频谱效率, 但是这类方案要求为每根天线配备相应的 RF 链路, 随着天线数量的增大, 系统所需的 RF 链路数量也随之增加, 使得系统复杂度和实现成本迅速上升。

3 基于 RZF 的混合预编码方案

针对多用户大规模 MIMO 系统中采用传统的全数字预编码方案时系统复杂度和实现成本较高的问题, 文中采用一种模拟和数字相结合的混合 RZF 预编码方案, 其系统模型如图 3 所示。

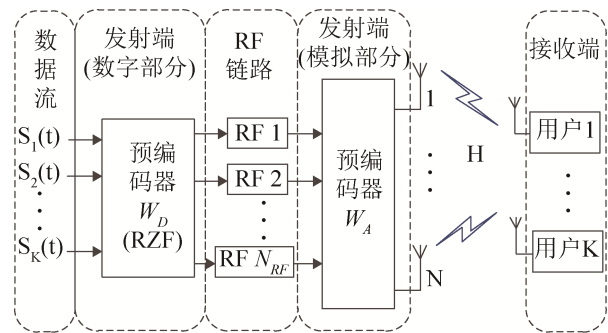


图 3 混合 RZF 预编码的系统模型
Fig. 3 System model of hybrid RZF precoding

在混合 RZF 预编码系统中, 将预编码器分成模拟部分和数字部分, 假定基站天线数量为 N , 同时服务于 K 个单天线的用户, 系统含有 N_{RF} 个 RF 链路, 满足 $K \leq N_{RF} \leq N$ 。系统在下行链路传输时, 发送到 K 个用户的数据流经过数字预编码器处理后变成 N_{RF} 个并行的数据流, 然后经过模拟预

编码器处理后映射到 N 根天线上进行发射, 此时, 用户端的接收信号可以表示为:

$$Y = \hat{H}^H W_{Hy} P_s + n = \hat{H}^H W_A W_D P_s + n = H_{op} W_D P_s + n \quad (11)$$

式(11)中, $W_{Hy} = W_A W_D$ 表示混合预编码矩阵, 其中 $W_A \in \mathbb{C}^{N \times N_{RF}}$ 和 $W_D \in \mathbb{C}^{N_{RF} \times K}$ 分别表示模拟预编码矩阵和数字预编码矩阵, $H_{op} = \hat{H}^H W_A \in \mathbb{C}^{K \times N_{RF}}$ 表示数字部分的优化信道矩阵。相应地, 第 k 个用户接收信号的信干噪比可以表示为:

$$SINR_k = \frac{p_k \left| \hat{h}_k^H W_A w_{D,k} \right|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K p_i \left| \hat{h}_k^H W_A w_{D,i} \right|^2 + \sigma^2} = \frac{p_k \left| h_{op,k} w_{D,k} \right|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K p_i \left| h_{op,k} w_{D,i} \right|^2 + \sigma^2} \quad (12)$$

式(12)中, $w_{D,k}$ 和 $h_{op,k}$ 分别表示数字预编码矩阵 W_D 和优化信道矩阵 H_{op} 的第 k 列向量。将式(12)代入式(7)中即可得到混合 RZF 预编码系统的频谱效率。

通过这种设计, 一方面可以使得系统所需 RF 链路数量从传统全数字预编码系统中与天线数量相同的 N 个减少到混合 RZF 预编码系统中远小于天线数量的 N_{RF} 个, 另一方面还降低了系统数字基带处理部分的维度, 从而减小了系统的运算量。因此, 采用文中所提混合 RZF 预编码方案能够大大降低系统复杂度和实现成本。

4 基于 RZF 的混合预编码算法描述

4.1 分段设计模拟预编码部分

为了获得大规模 MIMO 系统中多天线所带来的天线阵列增益, 文中通过提取全数字预编码矩阵中各元素的相位信息作为模拟预编码矩阵 W_A , 即

$$W_A(i, j) = \frac{W(i, j)}{\sqrt{N} |W(i, j)|} \quad (13)$$

由 RZF 和 MRT 预编码的基本原理可知, 当系统采用 RZF 预编码时, 由于目标用户 k 的预编码向量 w_{Rk} 与目标用户信道 h_k 的方向不同, 导致 w_{Rk}

在目标用户方向上的增益小于 1, 从而使用户功率产生一定的损失。而采用 MRT 预编码时, 由于 w_{Mk} 的矢量方向与目标用户信道 h_k 相同, 因而能够避免用户功率的损失。当信噪比较小时, 系统中的干扰主要来源于信道噪声, 此时采用 MRT 预编码可以保证目标用户接收信号的信噪比最大化。当信噪比较大时, 系统中除了信道噪声的干扰外, 来自其它用户信号的干扰也随之增强, 此时采用 RZF 预编码能够平衡这些干扰之间的关系, 从而提升系统性能。

基于以上分析, 文中考虑对混合 RZF 预编码的模拟部分进行分段设计。在小信噪比时, 提取全数字 MRT 预编码矩阵中各元素的相位信息作为模拟预编码矩阵 W_A , 在大信噪比时, 提取全数字 RZF 预编码矩阵中各元素的相位信息作为模拟预编码矩阵 W_A , 即

$$\begin{cases} W_A(i, j) = \frac{W_{MRT}(i, j)}{\sqrt{N} |W_{MRT}(i, j)|}, & \text{小信噪比时} \\ W_A(i, j) = \frac{W_{RZF}(i, j)}{\sqrt{N} |W_{RZF}(i, j)|}, & \text{大信噪比时} \end{cases} \quad (14)$$

另外, 在式(14)中, 模拟预编码矩阵中每个元素的相位是连续的, 但是在实际应用中, 模拟部分的移相器由于受实际条件的制约, 模拟预编码矩阵中每个元素的相位通常需要量化。对 W_A 中各元素的模拟相位进行 M 比特量化, 则量化后的相位可以表示为 $\varphi_Q = 2\pi\hat{m}/2^M$, 其中 $\hat{m} = \arg \min_{m \in \{0, \dots, 2^M - 1\}} \left| \varphi - \frac{2\pi m}{2^M} \right|$, φ 表示量化前的相位信息。

4.2 设计数字预编码部分

在文中所提混合 RZF 预编码方案中, 经过模拟部分处理后, 预编码器的性能主要取决于优化信道矩阵的相关性, 这就意味着需要使模拟预编码矩阵 W_A 与信道 $\hat{H}$ 作用后得到的优化信道矩阵 H_{op} 趋于正交。在多用户大规模 MIMO 系统中, 对于固定的用户数 K , 当天线数量 N 趋于无穷时, 无线信道渐近正交^[22], 此时有:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{W}_{MRT} = \hat{\mathbf{H}}^H \hat{\mathbf{H}} \rightarrow \mathbf{A}_{MRT} \\ \hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{W}_{RZF} = \hat{\mathbf{H}}^H \hat{\mathbf{H}} (\hat{\mathbf{H}}^H \hat{\mathbf{H}} + \xi \mathbf{I}_K)^{-1} \rightarrow \mathbf{A}_{RZF} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{A}_{MRT}$ 和 $\mathbf{A}_{RZF}$ 表示对角矩阵。

在混合 RZF 预编码系统中, 满足 $K \leq N_{RF} \leq N$ 。首先考虑 $N_{RF} = K$ 的情况, 当模拟预编码矩阵从全数字 MRT 预编码中提取时, 数字部分的优化信道矩阵可以表示为:

$$\mathbf{H}_{op} = \hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{W}_A = \hat{\mathbf{H}}^H (\hat{\mathbf{H}} / A) \quad (16)$$

式中: $A(i, j) = \sqrt{N} |W_{MRT}(i, j)|$ 。与式(15)中的 $\mathbf{A}_{MRT}$ 相比较, 式(16)中 $\mathbf{H}_{op}$ 只有幅度上的变化, 因此有 $\mathbf{H}_{op} \rightarrow \alpha \mathbf{A}_{MRT}$, 其中 α 表示常系数。

当模拟预编码矩阵从全数字 RZF 预编码中提取时, 数字部分的优化信道矩阵可以表示为:

$$\mathbf{H}_{op} = \hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{W}_A = \mathbf{H}^H (\hat{\mathbf{H}} (\hat{\mathbf{H}}^H \hat{\mathbf{H}} + \xi \mathbf{I}_K)^{-1} / \mathbf{B}) \quad (17)$$

式中: $B(i, j) = \sqrt{N} |W_{RZF}(i, j)|$ 。与式(15)中的 $\mathbf{A}_{RZF}$ 相比较, 式(17)中 $\mathbf{H}_{op}$ 也只有幅度上的变化, 因此有 $\mathbf{H}_{op} \rightarrow \beta \mathbf{A}_{RZF}$, 其中 β 表示常系数。

对于 $N_{RF} > K$ 的情况, 此时 $\mathbf{H}_{op}$ 具有更高的维度, 因此, 也有 $\mathbf{H}_{op} \rightarrow \mathbf{A}$ 。

综上所述, 在混合 RZF 预编码系统中, 当天线数量不断增大时, 优化信道矩阵 $\mathbf{H}_{op}$ 趋于正交。

由于 RZF 预编码能够通过正则化系数平衡噪声干扰与用户间干扰之间的关系, 具有近似最优的性能, 因此, 文中在混合预编码的数字部分采用 RZF 预编码。相应地, 数字部分的预编码矩阵 $\mathbf{W}_D$ 可以表示为:

$$\mathbf{W}_D = \mathbf{H}_{op} (\mathbf{H}_{op}^H \mathbf{H}_{op} + \xi \mathbf{I}_K)^{-1} \quad (18)$$

相对于式(10)中的 $\hat{\mathbf{H}}$, 式(18)中 $\mathbf{H}_{op}$ 的维度较小, 因此其运算复杂度相对较低。

5 仿真结果及分析

为了验证文中所提混合 RZF 预编码算法的有效性, 分别在不同信噪比、不同用户数和不同天线数的条件下比较了全数字 RZF 预编码(RZF)、全数字 ZF 预编码(ZF)、全数字 MRT 预编码(MRT)、混合 RZF 预编码(Hybrid-RZF)和对混合 RZF 预编码

进行 3 比特量化的预编码(Hybrid-RZF-Q-3bit)算法在信道质量因子 $\tau=0.1$ 的瑞利衰落信道中的频谱效率。

5.1 信噪比变化时不同预编码的性能比较

图 4 给出了用户数 K 和 RF 链路数 N_{RF} 为 32 个, 天线数量分别为 64, 128, 256 根时, 在瑞利衰落信道中不同预编码对应的频谱效率随信噪比的变化曲线。

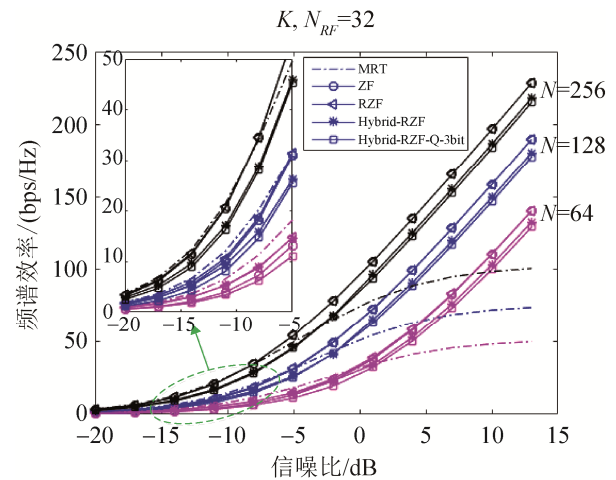


图 4 频谱效率随信噪比变化曲线
($K, N_{RF} = 32$ $N = 64, 128, 256$)

Fig. 4 Spectral efficiency with varying SNR
($K, N_{RF} = 32$ $N = 64, 128, 256$)

由图 4 可知, 在整个信噪比范围内, 文中所提混合 RZF 预编码算法的频谱效率都非常接近传统的全数字 ZF 和 RZF 预编码算法。当用户数和 RF 链路数量一定时, 在相同信噪比下, 随着天线数量的增加或减少, 各种预编码对应的频谱效率也随之增大或降低。当用户数、RF 链路数量和天线数量一定时, 在小信噪比条件下, MRT 预编码算法的频谱效率要优于 ZF、RZF 和混合 RZF 预编码算法, 随着信噪比的增大, MRT 预编码算法的频谱效率虽然有提升, 但提升速度明显变慢, 而 ZF、RZF 和混合 RZF 预编码算法的频谱效率则显著提升, 并且在大信噪比条件下要优于 MRT 预编码算法。这是因为当信噪比较小时, 干扰主要来自于信道噪声, 而 MRT 预编码可以保证目标用户接收信号的信噪比最大化, 所以在小信噪比时 MRT 预编码算

法的频谱效率要优于其它预编码。然而随着信噪比的增大, 来自其它用户信号的干扰也随之增强, ZF、RZF 和混合 RZF 预编码能够有效地消除用户间干扰的影响, 因此当信噪比较大时, ZF、RZF 和混合 RZF 预编码算法的频谱效率要优于 MRT 预编码算法。

图 5 给出了基站天线数量 N 为 128 根, 用户数 K 和 RF 链路数 N_{RF} 分别为 16, 32, 64 个时, 在瑞利衰落信道中不同预编码所对应的频谱效率随信噪比的变化曲线。

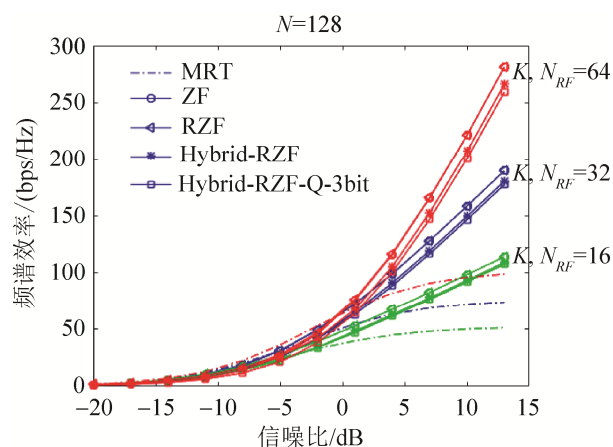


图 5 频谱效率随信噪比变化曲线
($N=128$ $K, N_{RF}=16, 32, 64$)

Fig. 5 Spectral efficiency with varying SNR
($N=128$ $K, N_{RF}=16, 32, 64$)

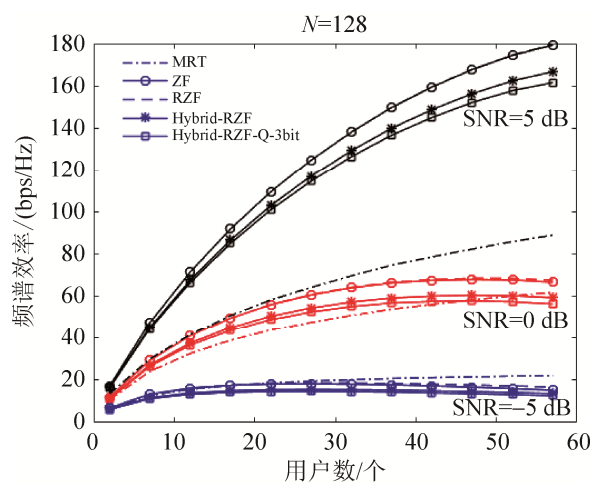
由图 5 可知, 当基站天线数量一定时, 在相同信噪比下, 随着用户数和 RF 链路数量的增加或减少, 各种预编码所对应的系统频谱效率也随之增大或降低。在大信噪比条件下, 文中所提混合 RZF 预编码算法的频谱效率要优于 MRT 预编码算法, 并且非常接近 ZF 和 RZF 预编码算法。

此外, 图 4 和图 5 的仿真结果表明, 对文中所提混合 RZF 预编码的模拟部分进行 3 比特量化预编码算法的频谱效率与量化前的频谱效率非常接近。

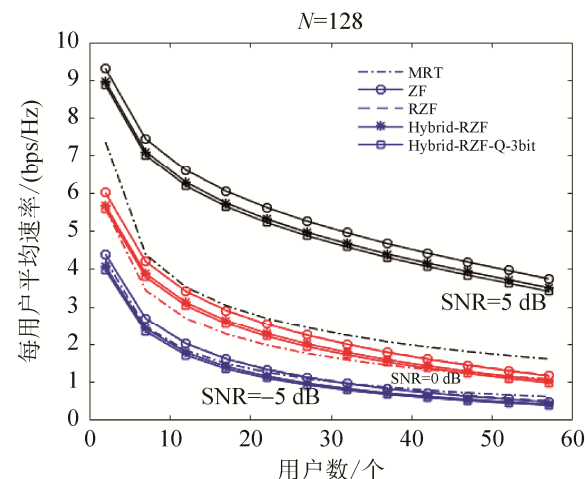
5.2 用户数变化时不同预编码的性能比较

图 6 给出了基站天线数量 N 为 128 根, 信噪比分别为 -5 dB, 0 dB, 5 dB 时, 不同预编码对应

的频谱效率和每个用户平均速率随用户数的变化曲线。



(a) 系统频谱效率随用户数的变化曲线



(b) 每个用户平均速率随用户数的变化曲线

图 6 频谱效率和每个用户平均速率随用户数的变化曲线
Fig. 6 Spectral efficiency and average rate per user with varying numbers of users

由图 6(a)可知, 当信噪比为 -5 dB 时, MRT 预编码算法的频谱效率要优于混合 RZF 预编码算法, 并且随着用户数的增大, MRT 预编码算法的性能要优于 ZF 和 RZF 预编码算法; 当信噪比为 0 dB 时, 混合 RZF 预编码算法的频谱效率要优于 MRT 预编码算法, 但是, 随着用户数的增大, MRT 预编码算法的频谱效率要逐渐优于混合 RZF 预编码算法; 当信噪比为 5 dB 时, 混合 RZF 预编码算法的频谱效率要优于 MRT 预编码算法, 并且接近传统全数字

ZF 和 RZF 预编码算法的性能。同时, 仿真结果还表明, 随着用户数的增大, 系统频谱效率逐渐增加, 但是, 当用户数增大到一定数量时, 系统的频谱效率不再增加, 这是由于用户数增加时, 用户间的干扰增大造成的。由图 6(b)也可以看出, 当用户数逐渐增大时, 每个用户的平均速率逐渐降低, 这是因为用户数增加时, 系统中用户之间的干扰也逐渐增大, 从而导致每个用户的平均速率逐渐降低。

5.3 天线数变化时不同预编码的性能比较

图 7 给出了用户数 K 和 RF 链路数量 N_{RF} 为 32 个, 信噪比分别为 -5 dB, 0 dB, 5 dB 时, 不同预编码对应的频谱效率随基站天线数量的变化曲线。

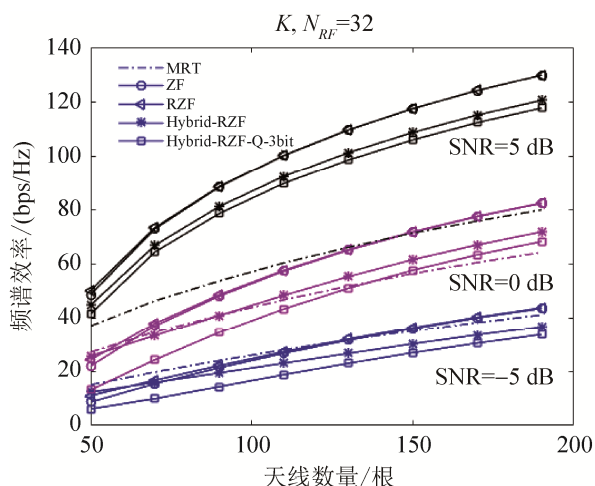


图 7 系统频谱效率随基站天线数量的变化曲线

Fig. 7 Spectral efficiency with varying numbers of the BS antennas

由图 7 可知, 当用户数和信噪比一定时, 随着天线数量不断增大, 系统的频谱效率逐渐提高, 且当天线数量较大时, ZF 预编码算法的频谱效率与 RZF 预编码算法相同。同时, 仿真结果还表明, 当信噪比为 -5 dB 时, MRT 预编码算法的频谱效率要优于文中所提混合 RZF 预编码算法; 当信噪比为 0 dB 时, 随着天线数量的增大, 混合 RZF 预编码算法的频谱效率要逐渐优于 MRT 预编码算法; 当信噪比为 5 dB 时, 混合 RZF 预编码算法的频谱效率要优于 MRT 预编码算法, 并且接近全数字 ZF 和 RZF 预编码算法的性能。

6 结论

多用户大规模 MIMO 系统采用传统的全数字预编码方案时需要使用大量的 RF 链路, 导致系统复杂度和实现成本较高, 针对这一问题, 文中提出了一种模拟和数字相结合的混合 RZF 预编码算法, 该算法将预编码器分为模拟和数字两部分, 并结合 MRT 和 RZF 预编码对其进行设计。与传统的全数字预编码方案相比较, 混合 RZF 预编码方案只需要使用少量的 RF 链路, 并且能有效地降低数字基带处理部分的维度, 从而大大降低了系统复杂度和实现成本。通过对全数字 MRT、全数字 ZF、全数字 RZF 和混合 RZF 预编码算法在不同信噪比、不同用户数和不同天线数下的实验仿真结果表明, 文中所提混合 RZF 预编码算法的频谱效率非常接近全数字 ZF 和 RZF 预编码算法, 并且在大信噪比时要优于 MRT 预编码算法。由于毫米波的波长较短, 适合应用大规模天线阵列, 将文中所提混合 RZF 预编码算法应用到毫米波大规模 MIMO 系统中将是下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] Yang S, Hanzo L. Fifty years of MIMO detection: the road to large-scale MIMOs[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials (S1553-877X), 2015, 17(4): 1941-1988.
- [2] Marzetta T L, Nj B L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications (S1536-1276), 2010, 9(11): 3590-3600.
- [3] Xu X, He G, Zhang S, et al. On functionality separation for green mobile networks: concept study over LTE[J]. IEEE Communications Magazine (S0163-6804), 2013, 51(5): 82-90.
- [4] Andrews J G, Choi W, Hanly S V, et al. What will 5G be[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (S0733-8716), 2014, 32(6): 1065-1082.
- [5] Lu L, Li G Y, Swindlehurst A L, et al. An overview of massive MIMO: benefits and challenges[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing (S1932-4553), 2014, 8(5): 742-758.
- [6] Jungnickel V, Manolakis K, Zirwas W, et al. The role of

- small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G[J]. IEEE Communications Magazine (S0163-6804), 2014, 52(5): 44-51.
- [7] Larsson E G, Edfors O, Tufvesson F, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems[J]. IEEE Communications Magazine (S0163-6804), 2014, 52(2): 186-195.
- [8] Rusek F, Persson D, Lau B K, et al. Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays[J]. IEEE Signal Processing Magazine (S1053-5888), 2013, 30(1): 40-60.
- [9] Bjornson E, Larsson E G, Debbah M, et al. Massive MIMO for maximal spectral efficiency: how many users and pilots should be allocated[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications (S1536-1276), 2014, 15(2): 1293-1308.
- [10] Sanguinetti L, Moustakas A L, Bjornson E, et al. Large system analysis of the energy consumption distribution in multi-user MIMO systems with mobility[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications (S1536-1276), 2015, 14(3): 1730-1745.
- [11] Chen L, Yang Y, Chen X, et al. Multi-stage beamforming codebook for 60GHz WPAN[C]// International 1st Conference on Communications & Networking in China. IEEE Computer Society, 2011: 361-365.
- [12] Hur S, Kim T, Love D J, et al. Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks[J]. IEEE Transactions on Communications (S0090-6778), 2013, 61(10): 4391-4403.
- [13] Baykas T, Sum C S, Lan Z, et al. IEEE 802.15.3c: the first IEEE wireless standard for data rates over 1 Gb/s[J]. IEEE Communications Magazine (S0163-6804), 2011, 49(7): 114-121.
- [14] Zhang X, Molisch A F, Kung S, et al. Variable-phase-shift-based RF-baseband codesign for MIMO antenna selection[J]. IEEE Transactions on Signal Processing (S1053-587X), 2005, 53(11): 4091-4103.
- [15] Alkhateeb A, El Ayach O, Leus G, et al. Hybrid precoding for millimeter wave cellular systems with partial channel knowledge[C]// Information Theory and Applications Workshop. 2013:1-5.
- [16] Venkateswaran V, Der Veen A J. Analog beamforming in MIMO communications with phase shift networks and online channel estimation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing (S1053-587X), 2010, 58(8): 4131-4143.
- [17] Adhikary A, Nam J, Ahn J, et al. Joint spatial division and multiplexing—the large-scale array regime[J]. IEEE Transactions on Information Theory (S0018-9448), 2013, 59(10): 6441-6463.
- [18] 金鑫, 田霖, 关娜, 等. 基于正则信道求逆预编码的 MIMO 功率分配方案研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(2): 382-388.
- Jin Xin, Tian Lin, Guan Na, et al. Research on QoS-aware power allocation scheme in multi-user MIMO systems based on regularized channel inversion precoding[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(2): 382-388.
- [19] Weingarten H, Steinberg Y, Shamai S, et al. The capacity region of the gaussian multiple-input multiple-output broadcast channel[J]. IEEE Transactions on Information Theory (S0018-9448), 2006, 52(9): 3936-3964.
- [20] Wang Z, Chen W. Regularized zero-forcing for multiantenna broadcast channels with user selection[J]. IEEE Wireless Communication Letters (S2162-2337), 2012, 1(2): 129-132.
- [21] Mueller A, Kammoun A, Bjornson E, et al. Linear precoding based on polynomial expansion: reducing complexity in massive MIMO[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking (S1687-1499), 2016, 2016(1):1-22.
- [22] Bjornson E, Larsson E G, Marzetta T L, et al. Massive MIMO: ten myths and one critical question[J]. IEEE Communications Magazine (S0163-6804), 2016, 54(2): 114-123.