

CoMP 系统中的天线选择与预编码联合算法

常有宝,葛文萍,韩前方

(新疆大学 信息科学与工程学院,乌鲁木齐 830046)

摘 要: 针对大规模多输入多输出系统天线数量过多使得预编码算法计算量增加的问题,提出一种基于协作的天线选择与预编码联合算法。该算法通过降低小区间和用户间干扰,避免传统预编码算法对信道矩阵求逆运算时因天线数量增加使得复杂度提高。理论分析和仿真结果表明,与迫零预编码算法、最小均方误差预编码算法和基于信漏噪比最大化的预编码算法相比,天线选择和预编码联合算法不仅能更好地提高系统的信道容量,而且能够降低预编码算法复杂度。

关键词: 多输入多输出;协作多点传输;天线选择算法;预编码算法;信道容量;算法复杂度

中文引用格式: 常有宝,葛文萍,韩前方. CoMP 系统中的天线选择与预编码联合算法[J]. 计算机工程,2017,43(11):45-49.

英文引用格式: CHANG Youbao, GE Wenping, HAN Qianfang. Antenna Selection and Precoding Joint Algorithm in CoMP System[J]. Computer Engineering, 2017, 43(11):45-49.

Antenna Selection and Precoding Joint Algorithm in CoMP System

CHANG Youbao, GE Wenping, HAN Qianfang

(College of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

[Abstract] Aiming at the problem that too many antennas of large-scale Multiple Input Multiple Output (MIMO) system increases the amount of calculation of precoding algorithm, this paper adopts the method combining antenna selection algorithm with traditional precoding algorithm in Coordinated Multiple Points (CoMP) transmission system, through reducing the interference between zones and interference between users, it can avoid the higher complexity brought by traditional precoding algorithm to channel matrix inversion with the increase of antenna numbers. Theoretical analysis and simulation results show that compared with Zero Forcing (ZF) precoding algorithm, Minimum Mean Square Error (MMSE) precoding algorithm and precoding algorithm based on maximization of signal to leakage plus noise ratio, antenna selection and joint precoding algorithm can better improve the channel capacity of the system and reduce the complexity of precoding algorithm.

[Key words] Multiple Input Multiple Output (MIMO); Coordinated Multiple Points (CoMP) transmission; antenna selection algorithm; precoding algorithm; channel capacity; algorithm complexity

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.11.008

0 概述

大规模多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 技术是传统 MIMO 技术的一种演进,它的核心思想是通过在基站侧配置数十根甚至数百根的天线组成天线阵列,形成多个并行的数据传输通道,进而实现在相同的时频资源内同时为多个用户提供服务,最终带来整个系统的频谱效率的提升^[1]。大规模 MIMO 技术在涵盖小规模 MIMO 技术的所有优点的同时还呈现出了节约能源、硬件实现方便、降低同小区内用户间的干扰、大幅提高系

统容量等很多独特的属性^[2]。当天线数量足够大时,最简单的线性预编码和线性检测技术就可获得最优信号处理技术所得到的性能,并且噪声和同小区内的干扰都可忽略不计^[3]。然而,大规模 MIMO 系统在带来显著优点的同时也伴随着一个主要缺点,即求解预编码矩阵时复杂度会显著提高且增加射频链路的数量和信道获取中的导频开销。在实际应用中,受限于物理层的限制和系统实现的复杂度等因素,不能配置任意多数量的天线。协作多点 (Coordinated Multiple Points, CoMP) 传输技术能够抑制小区干扰,其实质是一种分布式天线技术,通过

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2012211A013)。

作者简介: 常有宝(1991—),男,硕士研究生,主研方向为 LTE-A 技术;葛文萍(通信作者),教授;韩前方,硕士研究生。

收稿日期: 2016-09-26 **修回日期:** 2016-12-02 **E-mail:** wenpingge@sohu.com

系统中的多天线协作传输,能够改善小区干扰。它利用分布式多天线信道独立的优点,得到了更高的空间分集增益和空间复用增益,提高小区边缘用户吞吐量^[4]。针对 CoMP 中的天线选择技术成为近年来研究的热点,对用户节点进行合适的选择,既能避免天线过多带来预编码技术复杂度增加的问题,又能够给系统带来更大的分集增益^[5]。文献[6-7]对基于天线选择的低秩信道 MIMO 系统容量进行了研究,理论分析表明,当系统处于低散射环境时,采用选择天线发射的方法可以增加信道容量,而选择天线接收不会增加信道容量,本文联合算法只对发送端进行天线选择。文献[8-11]成功推导出当发送或接收天线数目趋近于无穷时 MIMO 系统的渐近容量,为大规模 MIMO 技术的发展奠定了理论基础。文献[2,12]对大规模 MIMO 中的线性预编码技术、信道估计等进行了综述。经典的大规模线性预编码技术主要包括迫零预编码和最小均方误差预编码,其性能可以接近脏纸编码(Dirty Paper Coding, DPC)算法^[13]。但这些线性预编码算法存在较为庞大的求逆运算^[14-16]。文献[14]利用纽曼系数扩展简化求解大规模 MIMO 下行迫零预编码。文献[15]利用矩阵多项式扩展近似最小均方误差预编码矩阵求逆。这类大规模 MIMO 预编码求逆的近似解法是目前研究的重点方向之一。此外,文献[16]提出了一种基于 SLNR 预编码的天线与用户联合选择算法,该算法对用户端进行单天线选择,获得了良好的多用户分集增益,但未对发送端天线进行选择,难以避免预编码较为庞大的求逆运算。本文基于传统的线性预编码算法在大规模 MIMO 系统中复杂度增加的问题,提出了一种 CoMP 系统中的天线选择和预编码联合算法。

1 系统模型

CoMP 中的天线选择传输系统如图 1 所示,假设该系统中有 N 个基站 BS 和 M 个用户 UE 构成,每个用户的天线数为 N_R 。在该网络中,天线 i 向用户 j 发送的信号为 x_{ij} ,因此,用户 j 的接收信号为:

$$y_{ij} = \sqrt{p_{ij}} h_{ij} w_{ij} x_{ij} + n_{ij} \quad (1)$$

其中, y_{ij} 为基站第 i 根天线到用户 j 的接收信号, p_{ij} 为天线到用户的发射功率, h_{ij} 为天线到用户的信道增益,其为瑞利平坦衰落信道, w_{ij} 为预编码矩阵的第 i 行 j 列元素, n_{ij} 为加在用户端的复高斯白噪声,其服从均值为 0、方差为 N_0 的复高斯分布。

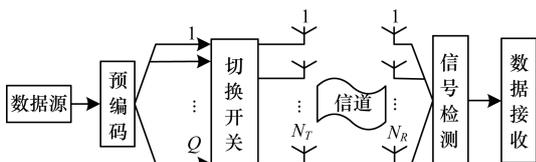


图 1 基于天线选择的 MIMO 预编码模型

天线 i 向用户 j 发送信号,其瞬时信噪比可以表示如下^[5]:

$$\gamma_{ij} = p_{ij} |h_{ij} w_{ij}|^2 / N_0 \quad (2)$$

当基站有 N 根天线与用户 j 通信时,用户 j 的瞬时信噪比为:

$$\gamma_{ij} = \sum_{i=1}^N p_{ij} |h_{ij} w_{ij}|^2 / N_0 \quad (3)$$

假设系统采用等功率分配方案,则上述瞬时信噪比可以改写为:

$$\gamma_{ij} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{P}{M} |h_{ij} w_{ij}|^2 / N_0 \right) \quad (4)$$

其中, P 为基站发射天线总功率。假设天线到用户采用最大比合并(Maximum Ratio Combining, MRC),则用户 j 的信道容量为^[5]:

$$C = \text{lb} \left(1 + \sum_{i=1}^N \gamma_{ij} \right) \quad (5)$$

在高信噪比下 MIMO 系统信道容量(非单一用户)可以近似为^[6]:

$$C_s \approx k \text{lb} (SNR/N) + \sum_{i=1}^k \text{lb} \sigma_i^2 \quad (6)$$

其中, k 是信道矩阵的秩; σ_i 为信道矩阵的第 i 个特征值; SNR 是每根接收天线端的输出信噪比。若把发射天线从 N 减小到 k ,则第一项将增加,第二项将减小,因此,天线选择可提高系统容量。即有 $(N-k)$ 根天线对信道容量没有贡献且浪费功率资源。

本文中相关符号说明: $|A|$ 、 $\|A\|_2$ 代表取模及二范数; A^T 、 A^H 分别表示矩阵的转置和共轭转置; $\text{Tr}(A)$ 表示矩阵的迹。

2 天线选择技术

天线选择技术是 CoMP 系统中的关键技术之一,天线数量对系统性能产生直接影响。传统天线选择技术主要分为最优天线选择技术和次优天线选择技术,其中次优选择包括递增/递减天线选择技术、基于范数天线选择技术、基于相关度天线选择技术以及随机选择技术等。除随机选择技术外,都是基于信道状态信息(Channel State Information, CSI)对天线进行选择以使得信道容量最大化。针对传统天线选择技术复杂度过高的问题,本文采用信道容量增量的天线选择技术对大规模 MIMO 系统进行预编码,既能增加系统容量,又能降低传统预编码在大规模 MIMO 系统中带来的复杂度。

针对小区内部任意用户 d ,天线 i 到用户 d 的瞬时信噪比为:

$$\gamma_{id} = \sum_{i=1}^N p_{id} |h_{id} w_{id}|^2 / N_0 \quad (7)$$

已知基站有 N 根天线,其到用户 d 的 N 个信道

增益按从大到小排列,选取信道增益最大的天线节点,可以表示为:

$$\mathbf{A} = \operatorname{argmax} h_{id} \quad (8)$$

在此基础上,通过以下步骤对天线进行选择:

步骤 1 初始化信道容量 C_0 为:

$$C_0 = \operatorname{lb}(1 + \gamma_{md}) \quad (9)$$

其中, γ_{md} 为 h_{id} 中最大信道增益 h_{md} 对应的信噪比,将最佳天线节点 A 的索引号加入到集合 B 中,将剩余的 $N-1$ 根天线索引号放入到集合 D 中。

步骤 2 根据式(7),从集合 D 中选择最优天线 A 的索引号。

步骤 3 将步骤 2 选择出来的天线加入到系统之中。此时系统容量更新为: $C_m = \operatorname{lb}(1 + \gamma_{md} + \gamma_{id})$ 设定增量容量 ΔC , 如果 $C_m - C_0 \geq \Delta C$, 则将新计算的 A 的索引号加入到集合 B 中。然后从 D 中删除,直到所有节点选择完毕。其具体实现如下:

假设信道状态完全已知且用 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 表示, 其为一个复数矩阵; 设 $\mathbf{L} \in \mathbb{B}^{N \times M}$, 其为一个 $\mathbf{0}$ 和 $\mathbf{1}$ 组成的矩阵是根据信道容量增量天线选择算法所得到的天线索引集合。设有 $Q < N$ 个天线节点被选出, $\{P_1, P_2, \dots, P_Q\}$ 为选择的天线下标, 假设天线下标为 $\{1, 3, 5\}$, 则 $\mathbf{L} = (\mathbf{1}, \mathbf{0}, \mathbf{1}, \mathbf{0}, \mathbf{1})^T$, 其中 $\mathbf{1}, \mathbf{0}$ 分别为 $1 \times M$ 的全 $\mathbf{1}$ 和全 $\mathbf{0}$ 行向量。若选择天线后的信道矩阵为 $\tilde{\mathbf{H}}$, 则 $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{L}\mathbf{H}$ 。

上述 ΔC 选择要适中, 选择过大, 会使节点选择过少, 不能得到合理的信道增益; 选择过小, 也不能满足要求。由式(6)分析可知, 本文天线选择算法不仅能剔除没有贡献的信道, 而且对那些贡献小于消耗的信道也一并剔除。

3 基于天线选择的预编码联合算法

为了说明联合算法的可行性, 本文采用传统的 ZF 和 MMSE 预编码和改进的基于信漏噪比最大化^[17]的预编码。假设有 Q 个天线节点被选出, 未被选择的天线位置用 0 代替。 $\tilde{\mathbf{H}}$ 为进行天线选择后的信道矩阵, $\tilde{\mathbf{H}} = (\tilde{H}_1, \tilde{H}_2, \dots, \tilde{H}_j, \dots, \tilde{H}_M)^T$ 其中, $\tilde{H}_j = (h_{p_{1j}}, h_{p_{2j}}, \dots, h_{p_{Qj}}), j \in \{1, 2, \dots, M\}$, 即 \tilde{H}_j 中的 Q 列表示基站到用户 j 的有效信道。 \mathbf{W} 可以表示为 $\mathbf{W} = (\tilde{\mathbf{W}}_1, \tilde{\mathbf{W}}_2, \dots, \tilde{\mathbf{W}}_j, \dots, \tilde{\mathbf{W}}_M)$, 其中, $\tilde{\mathbf{W}}_j = (W_{p_{1j}}, W_{p_{2j}}, \dots, W_{p_{Qj}})^T, j \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。下文给出了 3 种预编码方案。

1) 迫零预编码

$$\mathbf{W} = \tilde{\mathbf{H}}^H (\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H)^{-1} \quad (10)$$

2) 最小均方预编码

$$\mathbf{W} = \tilde{\mathbf{H}}^H (\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H + \frac{M}{P} \mathbf{I}_M)^{-1} \quad (11)$$

3) 基于信漏噪比最大化的预编码

天线 i 到用户 j 的瞬时信漏噪比可以表示为:

$$SLNR_{ij} = \sum_{i=1}^N \frac{(\frac{P}{M}) |h_{ij} w_{ij}|^2}{(\frac{P}{M-1}) \sum_{k=1, k \neq j}^M |h_{ik} w_{ij}|^2 + N_0} \quad (12)$$

经天线选择后上述表达式可以简化为:

$$SLNR = \frac{(\frac{P}{M}) \mathbf{W}\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H \mathbf{W}^H}{(\frac{P}{M-1}) \mathbf{W}\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H \mathbf{W}^H + N_0 \mathbf{I}_M} \quad (13)$$

其中, $\tilde{\mathbf{H}} = (\tilde{H}_1, \tilde{H}_2, \dots, \tilde{H}_{j-1}, \tilde{H}_{j+1}, \dots, \tilde{H}_M)^T$ 表示经天线选择后其他用户到用户 j 的信道矩阵; \mathbf{W} 可以表示为 $\mathbf{W} = (\tilde{\mathbf{W}}_1, \tilde{\mathbf{W}}_2, \dots, \tilde{\mathbf{W}}_j, \dots, \tilde{\mathbf{W}}_M)$, $\tilde{\mathbf{W}}_j = (W_{p_{1j}}, W_{p_{2j}}, \dots, W_{p_{Qj}})^T, j \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。

根据信漏噪比最大化原则, 设置 \mathbf{W} 的最优化问题可以表示如下:

$$\mathbf{W} = \operatorname{arg} \max_{\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{Q \times K}} SLNR$$

$$\text{s. t. } \|\mathbf{W}\|_2^2 = 1 \quad (14)$$

由式(14)、式(15)可知:

$$\mathbf{W} = \operatorname{argmax} \frac{\operatorname{Tr}(\mathbf{W}^H \mathbf{A} \mathbf{W})}{\operatorname{Tr}(\mathbf{W}^H \mathbf{B} \mathbf{W})} \quad (15)$$

$$\text{s. t. } \|\tilde{\mathbf{W}}_j\|_2^2 = 1, j \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (16)$$

其中, $\mathbf{A} = \frac{P}{M} \tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H, \mathbf{B} = \frac{P}{(M-1)} \tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H + \mathbf{I}_M N_0, \mathbf{A}, \mathbf{B}$ 都是 $Q \times Q$ 的 Hermite 矩阵, 且 \mathbf{B} 是正定矩阵, 由 (\mathbf{A}, \mathbf{B}) 组成矩阵束, 因此式(14)是一个广义 Rayleigh 商问题, 设矩阵束 (\mathbf{A}, \mathbf{B}) 的广义特征值及其广义特征向量为 $\lambda_j, \mathbf{P}_j, j \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。由 Courant-Fisher 定理可知, 第 j 个用户的预编码矩阵 $\tilde{\mathbf{W}}_j$ 由广义值对应的特征向量组成, 其可以表示为: $\tilde{\mathbf{W}}_j = [\frac{P_j}{\|\mathbf{P}_j\|_2}]$, $j \in \{1, 2, \dots, M\}$, 因此:

$$\mathbf{W} = [\frac{P_1}{\|\mathbf{P}_1\|_2}, \frac{P_2}{\|\mathbf{P}_2\|_2}, \dots, \frac{P_M}{\|\mathbf{P}_M\|_2}] \quad (17)$$

4 算法复杂度分析

由上述分析可知, 如果不考虑信道矩阵的稀疏性, 那么迫零预编码方案需要 $2MN^2$ 次乘法运算、 $N^2(2M-1) - MN$ 次加法运算和 N^3 求逆运算。而最小均方误差算法比迫零算法多 $M+1$ 次乘法 and 1 次加法, 求逆运算为 N^3 。对于信漏噪比最大化预编码

方案若只考虑 A, B 和其广义矩阵 (A, B) 的广义特征向量的求解, 则 A 的求解需要 MN^2 次乘法, B 的求解需要 $(M-1)N^2$ 次乘法, 广义特征向量的求解的复杂度为 N^2 , 而联合算法求解复杂度是将 N 用选择天线数量 Q 来替代。这对于 N^3 求逆运算可以随天线选择算法而大幅度降低。

5 仿真分析

为了对天线选择与预编码联合算法的性能进行验证, 信道实现 100 次循环, 假设功率采用平均分配方案。发射天线数和用户数量均为 100, 用户端噪声功率均相等, 且数值为 1。仿真中主要考虑误码率和信道容量 2 个指标, 误码率显示了系统的可靠性, 而信道容量体现了系统的有效性。本文首先对信道容量增量 ΔC 的选取进行了时间复杂度和误码率性能的仿真验证, 得到最佳天线数量。其次对比了联合算法与独立算法在误码率和信道容量上的性能表现。由表 1、图 2、图 3 可知, 当 $\Delta C = 0.01$ 时, 联合算法的性能与独立算法接近, 而独立算法在天线数量为 100 时, 运行时间接近 8 s, 运行时间比联合算法要长。因此, 本文选择 $\Delta C = 0.01$, 对联合算法与独立算法的性能进行了比较。

表 1 运行时间与选择天线数量的关系

信道容量增量 /(bit · s ⁻¹)	选择天线数	运行时间/s
0.050	28	6.09
0.040	36	6.14
0.028	47	6.24
0.020	60	6.34
0.015	70	6.52
0.010	80	6.52
0.006	92	6.62
0.002	99	6.73

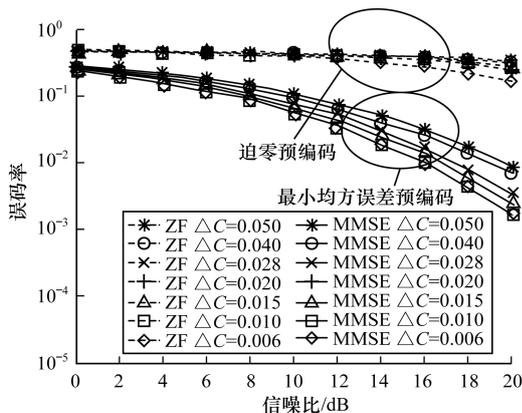


图 2 不同 ΔC 下天线选择和 ZF, MMSE 联合预编码算法的误码率性能

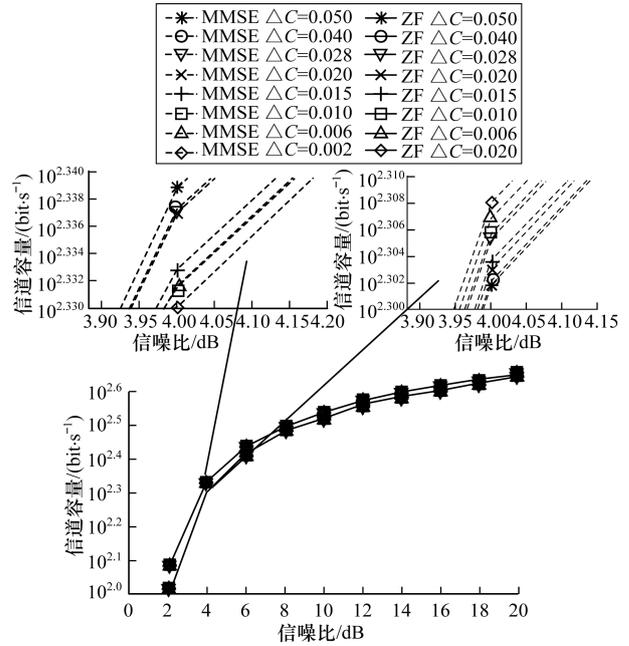


图 3 不同 ΔC 下天线选择和 ZF, MMSE 联合预编码算法的信道容量性能

图 2 对不同 ΔC 下天线选择和 ZF, MMSE 联合预编码算法的误码率性能进行了比较。图 2 显示在信噪比较小, 天线选择数量对联合算法的误码率性能影响较小, 而在大规模 MIMO 系统中由于天线数量增加, 分配给每根天线的功率较少, 这会使发送端信噪比较小。此时, 就可以减小选择天线的数量。既不影响算法的整体性能, 又能减小时间复杂度。

图 3 显示了不同 ΔC 下天线选择和 ZF, MMSE 联合预编码算法的信道容量性能。图 3 显示在天线选择数量增加时, 信道容量略有增加。在信噪比为 4 dB 时, 天线数量每增加 10 根, 信道容量大约增加了 1 bit/s。

图 4 针对联合算法与独立算法的误码率性能进行了比较, 图 4 显示在 $\Delta C = 0.01$ 时, 联合算法的误码率性能损失会随着信噪比的增加而增加。在信噪比较小时, 误码率性能几乎没有损失。而在大规模 MIMO 系统中, 每根天线分配的功率较小, 接收端信噪比也会较小。这正是联合算法在大规模 MIMO 系统中所体现的优势。

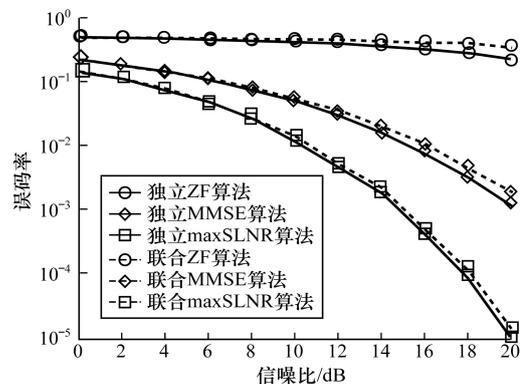


图 4 联合算法与独立算法的误码率性能 ($\Delta C = 0.01$)

图 5 显示了独立算法与联合算法的信道容量性能。由图 5 可知,联合算法的信道容量比独立算法的信道容量略有升高。这与式(6)的分析相吻合,而由理论已知知识可知,误码率和信道容量分别代表可靠性和有效性。联合算法牺牲了少量的可靠性,而使得有效性得到了增加。在低信噪比下,联合算法的误码率性能几乎没有损失,而信道容量的增加量也与其在高信噪比下的增加量近似,进一步说明了联合算法在低信噪比下,能够获得比独立算法更高的性能。这是因为在天线数量较少的情况下,共道干扰随之减小,此时信道利用不充分,导致误码率性能略有降低,但随着选择天线数量的增加,共道干扰快速加重,联合算法抑制共道干扰的作用变大,性能优势也随之凸显。

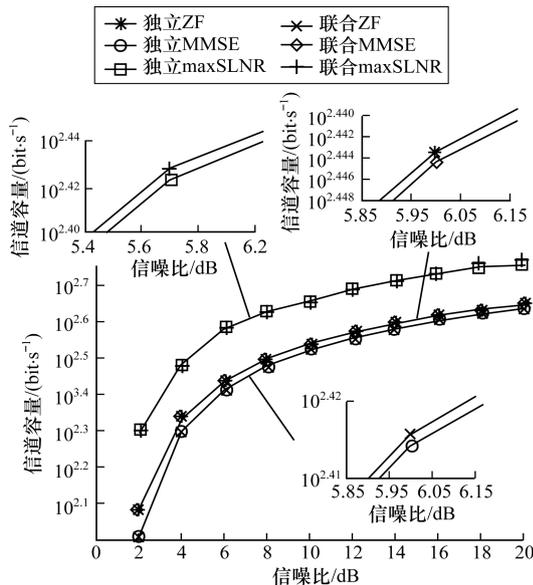


图 5 独立算法与联合算法的信道容量性能 ($\Delta C = 0.01$)

6 结束语

针对大规模 MIMO 系统中预编码算法复杂度高的问题,本文提出一种天线选择和预编码联合算法。通过降低小区间干扰和用户间干扰,避免传统预编码算法对信道矩阵求逆运算随天线数量增加带来的复杂度增加。实验结果表明,联合算法在天线选择合适的情况下,能够降低预编码独立算法的复杂度,且在低信噪比下获得性能的增益,因此,联合算法更适合应用于大规模 MIMO 系统。

参考文献

- [1] ZHANG J, WEN C K, JIN S, et al. On Capacity of Large-scale MIMO Multiple Access Channels with Distributed Sets of Correlated Antennas [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 31(2):133-148.
- [2] LARSSON E, EDFORS O, TUFVESSON F, et al. Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2):186-195.
- [3] 尤肖虎,潘志文,高西奇,等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学:信息科学, 2014, 44(5):551-563.
- [4] SAWAHASHI M, KISHIYAMA Y, MORIMOTO A, et al. Transmission/Reception Techniques for LTE-advanced [J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 17(3):26-34.
- [5] 戴翠琴,钟 声. CoMP 系统中的天线选择和功率分配联合算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2013, 25(1):90-95.
- [6] 黎海涛,张 靖,陆建华. 天线选择对 MIMO 信道容量的影响[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(7):1000-1005.
- [7] 苏彦兵,谈振辉. 基于天线选择的低秩信道 MIMO 系统容量研究[J]. 电子学报, 2004, 32(3):395-398.
- [8] LOZANO A, TULINO A M. Capacity of Multiple-transmit Multiple-receive Antenna Architectures [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 48(12):3117-3128.
- [9] TULINO A M, SERGIO V. Random Matrix Theory and Wireless Communications [J]. Communications & Information Theory, 2014, 1(1):171-182.
- [10] MOUSTAKAS A L, SIMON S H, SENGUPTA A M. MIMO Capacity Through Correlated Channels in the Presence of Correlated Interferers and Noise: A Large N Analysis [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(10):2545-2561.
- [11] LIANG C, PAN G, BAI Z D. Asymptotic Performance of MMSE Receivers for Large Systems Using Random Matrix Theory [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(11):4173-4190.
- [12] 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, 2014, 8(5):742-758.
- [13] JOSE J, ASHIKHMIN A, MARZETTA T L, et al. Pilot Contamination and Precoding in Multi-cell TDD Systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 10(8):2640-2651.
- [14] PRABHU H, RODRIGUES J, EDFORS O, et al. Approximate Matrix Inverse Computations for Very-large MIMO and Applications to Linear Precoding Systems [C] // Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013:2710-2715.
- [15] ZAREI S, GERSTACKER W, MULLER R R, et al. Low-complexity Linear Precoding for Downlink Large-scale MIMO Systems [C] // Proceedings of IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013:1119-1124.
- [16] 陈 磊,王大鸣,王 盛,等. 一种基于 SLNR 预编码的天线与用户联合选择算法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(10):3887-3890.
- [17] 刘祖军,王杰令,孙德春,等. 多小区多用户 TDD MIMO 下行链路干扰抑制预编码算法[J]. 通信学报, 2013(4):187-193.