

基于反向 Petri 网的大规模 MIMO 分布式天线选择算法

（重庆邮电大学 通信与信息工程学院，重庆 400065）

摘要：分布式大规模多输入多输出（MIMO）通信系统的分布式天线选择技术相对于集中式方法减少了计算复杂度，并且在保留多样性和空间复用性的同时提供了高容错性。本文调研了一种新颖的分布式天线选择算法，并展示了它相对于现有的集中式和分布式解决方案的优势。该算法表现出在信息不完全的情况下仍能良好运行，并且每个节点执行的简单计算操作数量较少，收敛速度快。本文调研了基于反向 Petri 网提出的算法，这是 Petri 网的一种变体，受可逆计算启发，能够在遵守守恒定律的同时进行正向和反向执行。

关键词：MIMO；分布式天线选择；反向 Petri；可逆计算
中图分类号：TN929 **文献标志码：**A

Large-scale MIMO Distributed Antenna Selection Algorithm Based on Reverse Petri Net

（School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, P. R. China;）

Abstract: This article explores distributed antenna selection technology for massive MIMO communication systems. Compared to centralized methods, this distributed approach reduces computational complexity and provides high fault tolerance while maintaining diversity and spatial multiplexity. A novel distributed antenna selection algorithm is proposed and its advantages over existing centralized and distributed solutions are demonstrated. The algorithm performs well even when the channel state information is incomplete, and each node executes a small number of simple computational operations, leading to rapid convergence to a steady state. The proposed algorithm is based on reverse Petri nets, a variant of Petri nets inspired by reversible computation, which allows for both forward and backward execution while adhering to conservation laws. Overall, this study highlights the potential of reversing Petri nets in distributed antenna selection for massive MIMO systems.

Keywords: MIMO; distributed antenna selection; reverse Petri nets; reversible computation

收稿日期：xxxx-xx-xx 修订日期：xxxx-xx-xx 通讯作者：连宇昊 lianyuhao@ieee.org

基金项目：重庆邮电大学通信建模仿真课程项目

Foundation Item:

Communication Modeling and Simulation Course Project of Chongqing University of Posts and Telecommunications

0 引言

在分布式大规模 MIMO (多输入多输出) 天线阵列中的天线选择问题是一个重要的优化问题, 该系统由大量行为相似的简单组件组成。可以在减少无线电频率 (RF) 链路数量和一次供电的天线数量的同时保持大天线阵列的优点, 包括抑制干扰、空间复用和多样性[1], 因为使用所有可用天线并不是最优的; 一些天线未能对服务做出贡献[2]。对于大天线阵列的最优发射天线选择需要大量的计算[3], 因此实时使用采用次优方法。一种流行的方法是贪婪算法[4], 该迭代过程将对容量贡献最大的天线添加到已选择的天线集合中。该方法对于接收天线选择具有保证的性能界限, 但对于发射情况则没有。从另一个角度来看, 随机天线选择被认为是一种计算成本低廉的替代方案, 在某些情况下具有令人满意的结果[5]。

本文调研的天线选择算法是使用 Petri 网的分布式范例来改进分布式决策。Petri 网是一种强大的数学和图形表示法, 用于设计、分析和控制各种系统。例如, 它们已应用于无线网络的 ISO-OSI 模型的更高层[5]。在这里, 使用了一种 Petri 网的变体, 反向 Petri 网 (RPN) [6], 这是一种能够逆转其进化的形式, 因此可以保存信息。在这封信中, 我们利用了它的符号守恒。其中使用 RPN 的原因是:

(1) Petri 网将复杂系统的处理形式化的能力: 大量简单实体异步操作, (2) 它的可逆性, 本质上允许回溯、周期性行为、故障恢复和系统中的信息守恒。

在本调研中, 本文调研了一种快速、环境感知、异步、分布式天线选择算法, 使分布式阵列的 RPN 方案中的总容量最大化。执行少量简单的计算任务, 因此该算法在集中式和分布式天线选择算法中都比现有技术更简单、更快。

1 发射天线优化模型

我们考虑了一个具有 N_T 天线的分布式大规模 MIMO 基站的下行 (发射) 天线选择场景, 其任务是选择尺寸为 N_{TS} 的天线子集。小区中有 N_R 单天线用户, 我们的目标是使总容量最大化:

$$C = \max_{\mathbf{P}, \mathbf{H}_c} \log_2 \det \left(\mathbf{I} + \frac{\rho N_R}{N_{TS}} \mathbf{H}_c \mathbf{P} \mathbf{H}_c^H \right) \quad (1)$$

其中 ρ 为信噪比 (SNR), \mathbf{I} 为 $N_{TS} \times N_{TS}$ 的单位矩阵, \mathbf{P} 为对角 $N_R \times N_R$ 功率分布矩阵。 \mathbf{H}_c 是 $N_T \times N_R$ 信道矩阵 \mathbf{h} 中所选天线子集的 $N_{TS} \times N_R$ 信道子矩阵, \mathbf{h} 是[9]中采用的方法, 我们在这里将天线选择定义为

由所选天线数量组成的大规模 MIMO 系统的最大容量和问题, 并计算出最优 (脏纸编码) 预编码。根据[10]的示例, 我们按所选天线的数量缩放功率, 使用阵列增益来降低每根天线的发射功率, 而不是增加接收信噪比。

接收器选择问题与 (1) 不同, 因为它不以发射天线的数量为特征。因此, 可以使用具有保证 (次优) 性能边界的贪婪算法来解决接收器选择问题, 发射机天线的选择不是模块化的[11]; 在已经选择的天线集上增加一个新的天线实际上会减少信道容量, 如果贡献低于平均值。在这种情况下, 贪婪算法没有性能保证。

(1) 中的优化问题有两个变量, 即所选天线的子集和它们上的最优功率分配。根据[6]、[9]的做法, 我们从 \mathbf{P} 的所有对角线元素都等于 $1/N_R$ (它们的和为单位, 使总功率等于 $\frac{\rho N_R}{N_{TS}}$) 的假设开始, 在天线选择后通过注水算法进行迫零均衡对 \mathbf{P} 进行优化。[9]中提出这是一种实用措施; 因此, 本文中的结果是在线性波束形成之后提出的, 并且考虑了相干数据传输。我们使用 IImprop 信道模型[12], 该模型除其他特征外, 还考虑了空间相关、路径损失和阴影衰落[13]。在这种情况下, 假设信道状态信息 (CSI) 是完美的, 矩阵 \mathbf{H} 是已知的, 但我们证明了算法在 \mathbf{H} 的不确定性和误差下是鲁棒的。

2 RPN 算法

我们调研了一个通用的 RPN 模型, 其行为模拟了所提出的天线选择算法的运行。

RPN 的结构如图所示, 可以理解和解释分布式算法的复杂结构, 它还提供了可以应用验证技术的形式化语义。RPN 框架独立于阵列结构 (或更一般的网络拓扑), 因为它不依赖于天线的数量或天线相互连接的方式。这表明了它作为无线通信资源分配框架的通用性。

我们调研的算法如图 1 所示, 其中有关于[14]中形式模型的更多信息。天线用 *places* (circles A-G) 表示, 其中一些位置的 *token* 令牌 (bright circle) 表示各自的天线当前处于打开状态。这些地方被分成重叠的集合, 我们称之为 *neighbourhoods* 邻域 (图 1(a) 中的 N_1 和 N_2), 这样每两个相邻的地方都属于

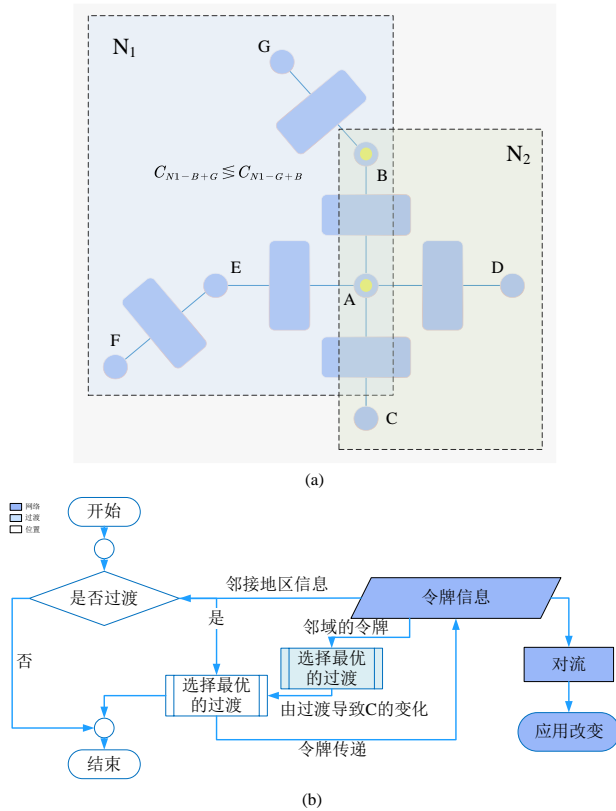


图1 (a)用于天线选择的示例性Petri网, (b)流程图

(至少一个)公共邻域。*Transitions* 过渡, 被描述为地点之间的条形, 允许令牌移动, 它们的操作如下:

1)如果在它连接的两个位置(例如图1中的B和G)中的一个位置有一个令牌, 则转换是可能的。否则(例如, A和B, 或E和F)是不可能的。

2)如果在两个地方(对于B和G, 即邻居 N_1)共享的邻居中具有令牌的所有天线计算的总容量(1)小于同一邻居计算的总容量, 但令牌移动到空位置(对于B-G过渡, $C_{AB} < C_{AG}$), 则会发生使能转换。否则, 它不会发生。

3)如果一个地方有几个可能的过渡(例如, A-E, A-D, A-C), 以最大的总容量差被赋予优先级(优先级在过渡条件函数中实现)。

4)转换执行没有指定顺序, 直到达到稳定状态才进行转换。

这种异步方案(如图1(b)中的流程图所示)需要很少(在我们的试验中, 对于64 Tx/16 Rx的情况, 最多需要5次)通过网络收敛到稳定状态, 从随机选择 n 个天线(随机位置的 n 个令牌)开始。它保留令

牌的数量, 并且每个位置最多保留一个令牌, 因此结果状态将捕获 n 个选定天线的集合。

快速收敛表明, 如果我们从均匀随机初始条件出发, 对于少数用户, 靠近特定用户的天线对应的位置可能并不总是收到令牌。因此, 如果目标是服务相对较少的用户 ($\leq \sqrt{N_T}$), 并行运行多个

RPN(在我们的实验中, 5个RPN就足够), 并从中选择最佳结果。对于大量用户 ($\geq \sqrt{N_T}$), 我们的结果表明一个RPN就足够了。一旦RPN收敛, 天线的状态就会改变, 带令牌的天线在相干间隔内开启。在信道状态信息的下一次更新时, 算法恢复其操作。

3 仿真分析

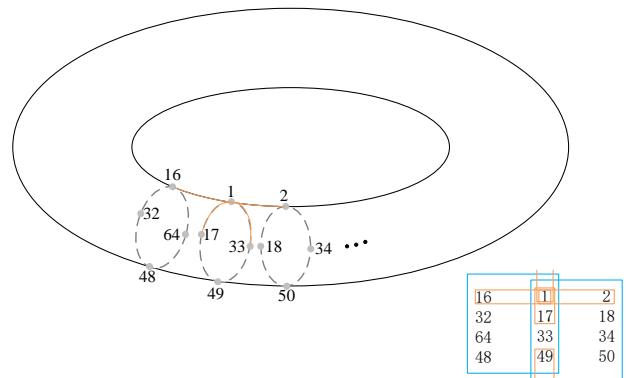


图2 天线在RPN拓扑中的位置图

在与[6]中的NN算法相同的条件下, 使用光线追踪MA TLAB工具IImprop[12]在包含75个散射体和一个大障碍物的区域内使用64个分布式发射器对该算法进行测试。用户数量从4到16不等; 用户、天线和散射簇分布均匀, 发射机和接收机采用信噪比 $\rho = -5$ dB, 载波频率为2.6 GHz, 带宽为20 MHz, 全向天线。在所有计算中, 矩阵 H 被归一化为所有天线、用户和子载波的单位平均能量[9]。图2显示了天线在RPN拓扑中的映射: 它们被排列成一个 4×16 的阵列, 然后折叠成一个环面, 这样阵列的边缘就连续地连接到相反的边缘。在这种布置中, 天线1是天线2、16、17和49的直接邻居。我们在Neumann上的直接V(上, 下, 左, 右)邻居之间建立链接(允许它们之间交换令牌), 并设置两个重叠的8天线邻居: 在天线1的示例中, 向天线

16 和 17 的过渡由邻域{16,32,48,64,1,17,33,49}控制, 而向天线 2 和 49 的过渡由{1,17,33,49,2,18,34,50}控制, 其他天线的模式相同(左上下, 左邻域, 右上, 右邻域)。

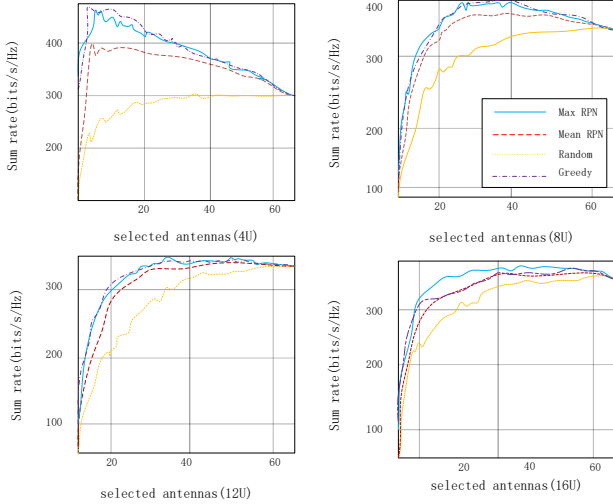


图 3 RPN 算法实现 4-16 个用户与随机、集中贪婪选择对比图

4、8、12 和 16 个用户的实验结果如图 3 所示, 对比了贪婪选择和随机选择与我们的 RPN 方法的两种变体:一种是随机初始条件下并发运行的五个 RPN 的平均值,另一种是这五个 RPN 中最好的 RPN 的性能。他们证明了所提出的算法与通过中心化贪婪选择获得的和率的性能相当。此外,它表明,对于大量用户,我们调研的算法优于由贪婪算法表示的集中式天线选择,而对于少量用户,集中式算法的性能略好。这是因为分布式基站的某些区域可能会受到小型用户池中的集中式算法的正确青睐,但在我们的分布式算法中只包含几个令牌;在大型用户池中,分布式基站的所有区域都对业务有贡献。在实践中,这意味着单个 RPN 足以满足具有相对较大预期用户数量的网络。多用户的情况是我们试图解决的问题,在大规模 MIMO 中使用多天线服务多用户的想法。战略性天线选择的必要性在所有观察到的情况下,随机选择的结果都明显表现不佳。

4 结 论

本文调研了一种新的分布式天线选择算法,改进了现有分布式方案的不足,并降低了计算复杂度。我们的 RPN 应用是一个先驱,我们的目标是将 RPN 方法扩展到无线通信中的其他资源管理问题,利用 RPN 的守恒特性和反向运行网络或其部分的能力,从故障中恢复并处理固有的可逆通信现象(例如,接收/发送对偶性)。RPN 解决方案能够以最小的计算负担进行异步操作和快速收敛,即使在高移动性场景中也可以实时应用该算法。在未来的工作中,我们将研究将天线阵列的物理拓扑转换为 Petri 网拓扑的方法,并为 5G 带来的新用例提出解决方案。

致谢

在完成《基于反向 Petri 网的大规模 MIMO 分布式天线选择算法》大作业的过程中,我要向许多人表达我的谢意和感激之情。

首先,我要衷心感谢我的老师朱江教授。感谢您在整个研究过程中给予我的指导和鼓励。您的专业知识、丰富的经验以及耐心细致的指导,对我大作业的顺利完成起到了关键的作用。再次向您表达我最诚挚的谢意。

我还要感谢学校提供的优质教育资源和良好的学术环境。特别感谢通信建模仿真课程的教师团队,他们深入浅出地讲解了通信建模仿真的基本原理和技术。这门课程不仅使我对通信领域的理论知识有了更深刻的理解,还培养了我独立解决问题和进行科学研究的能力。

最后,我要感谢我的家人和朋友们。感谢他们在我整个本科生阶段给予的无私支持和理解。你们的鼓励 and 爱意激励着我不断前行。

再次向所有为我论文完成做出贡献的人表示最诚挚的感谢!

参考文献

- ## 参考文献
- [1] A. Ozgur, O. Lévêque, and D. Tse, “大型分布式 MIMO 系统和无线自组织网络的空间自由度”, IEEE J. Sel.Areas Commun., vol. 31, no. 2, pp. 202 – 214, Feb. 2013.
- [2] J. Hoydis, S. T. Brink, and M. Debbah, “Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: How many antennas do we need?” IEEE J. Sel.Areas Commun., vol. 31, no. 2, pp. 160 – 171, Feb. 2013.
- [3] Y. Gao, H. Vinck, and T. Kaiser, “Massive MIMO antenna selection: Switching architectures, capacity bounds, and optimal antenna selection algorithms,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 66, no. 5, pp. 1346 – 1360, Mar. 2018.
- [4] M. Gharavi-Alkhansari and A. B. Gershman, “Fast antenna subset selection in MIMO systems,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 52, no. 2, pp. 339 – 347, Feb. 2004.
- [5] B. M. Lee, J. Choi, J. Bang, and B.-C. Kang, “An energy efficient antenna selection for large scale green MIMO systems,” in Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst. (ISCAS), Beijing, China, 2013, pp. 950 – 953.
- [6] H. Siljak, I. Macaluso, and N. Marchetti, “Distributing complexity: A new approach to antenna selection for distributed massive MIMO,” IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 7, no. 6, pp. 902 – 905, Dec. 2018
- [7] Yuhao Lian, Yuhua Wang. Double Walsh-Hadamard Transform for Improved Efficiency in OFDM-IM [C]. 2023 the 12th International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS), Singapore, 2023, pp. 950 – 953.
- [8] Yuhao Lian, Mingjun Ying, Shuyu Wang, Yuhua Wang. An Efficient Fast Walsh-Hadamard Transform Based OFDM-IM Scheme with Lower PAPR [C]. Wireless Telecommunications Symposium (WTS), USA, 2023, pp. 1021-1024.
- [9] X. Gao, O. Edfors, F. Tufvesson, and E. G. Larsson, “Massive MIMO in real propagation environments: Do all antennas contribute equally?” IEEE Trans. Commun., vol. 63, no. 11, pp. 3917 – 3928, Nov. 2015.
- [10] X. Gao, O. Edfors, J. Liu, and F. Tufvesson, “Antenna selection in measured massive MIMO channels using convex optimization,” in Proc. IEEE GLOBECOM Workshops, Atlanta, GA, USA, 2013, pp. 129 – 134.
- [11] G. D. Galdo, M. Haardt, and C. Schneider, “Geometry-based channel modelling of MIMO channels in comparison with channel sounder measurements,” Adv. Radio Sci., vol. 2, pp. 117 – 126, May 2005.
- [12] R. Vaze and H. Ganapathy, “Sub-modularity and antenna selection in MIMO systems,” IEEE Commun. Lett., vol. 16, no. 9, pp. 1446 – 1449, Sep. 2012
- [13] G. Del Galdo, “Geometry-based channel modeling for multi-user MIMO systems and applications,” Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng. Inf.Technol., Ilmenau Univ. Technol., Ilmenau, Germany, Jul. 2008.
- [14] A. Philippou, K. Psara, and H. Siljak, “Controlling reversibility in reversing Petri nets with application to wireless communications,” in Proc. 11th Int. Conf. Reversible Comput., 2019, pp. 1 – 8.