



综述

非正交多址系统资源分配研究综述

王正强, 成藁, 樊自甫, 万晓榆
(重庆邮电大学, 重庆 400065)

摘要: 非正交多址 (NOMA) 是 5G 无线网络的一个重要候选技术, 可以满足下一代移动通信系统低时延、低功耗、高可靠、高吞吐量、广覆盖等需求。NOMA 通过在发送端采用叠加编码和接收端采用串行干扰消除来实现在同一资源块复用多个用户数据, 从而相对于传统的正交多址接入方式提高了频谱效率。概述了 NOMA 系统资源分配的研究现状, 其中包括单载波 NOMA 的资源分配、多载波 NOMA 的资源分配、协作 NOMA 中继的资源分配、硬件损伤条件下协作 NOMA 的资源分配。最后, 总结了当前研究中存在的主要问题, 讨论了 NOMA 资源分配技术的研究挑战和未来研究方向。

关键词: 非正交多址; 资源分配; 单载波; 多载波; 中继; 硬件损伤

中图分类号: TN925

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018236

A survey of resource allocation in non-orthogonal multiple access systems

WANG Zhengqiang, CHENG Qu, FAN Zifu, WAN Xiaoyu
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: Non-orthogonal multiple access (NOMA) is an important candidate technology of the fifth generation (5G) wireless network, which can meet the low latency, low power consumption, high reliability, high throughput, wide coverage requirements of the next generation mobile communication systems. NOMA utilizes superposition coding at the transmitter and successive interference cancellation at the receiver to allow several users' data multiplexing in the same resource block. It improves the spectrum efficiency compared with the traditional orthogonal multiple access. The research status of resource allocation of NOMA systems was summarized including single-carrier NOMA resource allocation, multi-carrier NOMA resource allocation, cooperative NOMA relay resource allocation, and cooperative NOMA resource allocation under hardware impairment conditions. Finally, the main problems in the current study were summarized and the research challenges and some future research directions of NOMA resource allocation technology were discussed.

Key words: non-orthogonal multiple access, resource allocation, single-carrier, multi-carrier, relay, hardware impairment

收稿日期: 2018-02-03; 修回日期: 2018-07-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61701064); 重庆市教委科学技术项目 (No.KJ1600424)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61701064), Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (No.KJ1600424)

1 引言

随着移动互联网、社交网络和物联网的飞速发展,移动智能终端日益普及,爆炸式增长的移动数据业务对无线通信系统的要求越来越高;同时,爆发式增长的数据流量给有限的频谱资源也带来了巨大的挑战^[1-2]。因此,能够支持更多用户连接、更高频谱效率和能量效率的新型多址接入技术成为 5G 产业界和学术界一个迫切需要解决的难题和研究热点^[3]。在最新的 5G 新型多址技术研究中,基于功率域复用的非正交多址接入(non-orthogonal multiple access, NOMA)技术是 5G 网络的一个重要的候选技术,日益受到产业界的重视,不仅可满足 5G 在频谱效率和连接数等方面的需求,还可以满足低时延、高可靠性、大规模连接、提高公平性和高吞吐量的异构需求^[4-6]。与传统的正交多址接入(orthogonal multiple access, OMA)方案不同, NOMA 可以利用功率域、时域、频域、码域来实现多路访问,在发送机端采用非正交发送,主动引入干扰信息,在接收端通过串行干扰消除(successive interference cancellation, SIC)技术按照一定的顺序进行多用户检测、正确解调以及干扰消除,以便获得自己的信息^[7]。近年来,在工业界和学术界已经研究了许多 NOMA 技术,例如交织分多址接入(interleave division multiple access, IDMA)、比特分割多路复用(bit division multiplexing, BDM)、稀疏码多址接入(sparse code multiple access, SCMA)、多用户共享访问接入(multi-user sharing access, MUSA)和模式分割多址(pattern division multiple access, PDMA)^[8]。NOMA 技术相对于传统的 OMA 技术具有如下优点:更高的频谱效率、更高的小区边缘吞吐量、更低的传输等待时间、增强的用户公平性和更多的用户连接数^[2]等。基于 NOMA 技术的以上优点,尤其是满足未来宽带无线通信技术的高频谱效率和大连接需求,已成为

当前研究的一项关键技术和热点。用户功率域的非正交性使得资源分配算法在 NOMA 系统中变得尤为重要,只有通过有效的资源分配算法才能保证 NOMA 系统接收端的用户数据被有效解码,实现更大的用户连接数、更高的频谱效率和能量效率。考虑 NOMA 系统采用的载波数目和是否采用协作通信技术,当前研究中的 NOMA 系统分配问题主要可以分为基于单载波 NOMA^[9-22]、基于多载波 NOMA^[23-41]、基于协作 NOMA^[42-54]和硬件损伤条件下协作 NOMA^[55-57]资源分配 4 个方面。

2 NOMA 资源分配

2.1 单载波 NOMA 资源分配

当 NOMA 原理被应用于单个正交资源块即单载波时,实现多址接入的频谱有效方式是利用功率域,大部分工作是在图 1 的系统模型下进行研究的。参考文献[9]考虑只有两个用户的下行 NOMA 系统,在基站总功率和用户最小速率需求的约束条件下,研究了系统的和速率最大化问题。基于优化问题的 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件,得出带有闭式解的最优功率分配方案。参考文献[10]在固定功率分配下,研究单载波 NOMA 系统的用户配对对于系统性能的影响,证明了当配对用户的信道增益差异越大时,采用固定功率分配的 NOMA 系统的和速率比 OMA 方式的和速率越高。参考文献[11]考虑 MIMO-NOMA 分层传输系统中的最佳功率分配,在复用两个用户情况下提出一种分层传输的 MIMO-NOMA 总速率最大化算法。参考文献[12]研究 MIMO-NOMA 系统的遍历容量最大化问题。首先得出最优的信道输入协方差矩阵,然后提出最优功率分配方案和低复杂度的次优功率分配方案。因为无法获得功率分配的闭式表达式,因此在总传输功率限制和最小速率约束条件下,采用二分搜索法来获得用户 2 的功率分配,最大化系统的遍历容量。而后,为了降低复杂度,由于优化问题的解位于可行区域的边界上,还提



出了近似最优功率分配算法。结果表明,提出的 NOMA 方案明显优于传统正交多址方案。参考文献[13]基于用户分簇研究了 MIMO-NOMA 系统的公平性,研究了动态用户分配和功率优化问题。由于将用户分配到不同簇是一个 NP 问题,因此,本文提出了次优算法。与穷举搜索方法相比,所提算法在吞吐量和复杂性之间实现了很好的折中。参考文献[14]基于比例公平调度准则,研究了两个用户下行 NOMA 系统,提出了最大系统和速率与最大最小用户速率的两种功率分配算法。参考文献[15]研究基于 NOMA 的无线能量传输网络中的资源分配问题,给出了联合优化基站发射功率、能量采集和信息传输时间的算法以最大化系统速率。仿真结果表明与固定发射功率的 NOMA 方案相比,所提方案可以实现更高的速率与系统公平性。参考文献[16]在总发射功率和用户最小速率约束下,研究衰落 MIMO-NOMA 系统的能效优化问题,提出了近似最优功率分配方案,并获得了次优闭式解。仿真结果表明所提 NOMA 方案在频谱效率和能量效率方面优于传统的 OMA 方案。参考文献[17]在多用户下行系统中从能效角度研究了基于认知无线电技术启发的 NOMA 系统。在每个主用户受服务质量约束的条件下,最大化系统的能效。仿真结果表明 NOMA 比传统的 OMA 能效更高。参考文献[18]基于单输入单输出(single input single output, SISO) NOMA 下行系统,在用户最小速率需求约束下,提出一种内外两层迭代算法来最大化系统能效。其中内层算法在固定系统能效的情况下对用户进行功率分配,外层算法采用二分法搜索能效。仿真结果表明 NOMA 系统获得的能效优于传统 OMA 方案。参考文献[19]推导了理想信道下单载波 NOMA 系统中基于比例公平调度的最优功率分配的闭式解,并联合功率分配和用户集选择设计了一种低复杂度算法。结果表明,所提出方案所获得的吞吐量接近上限,且相比传统 OMA、分式发射功率分配(fractional

transmit power allocation, FTPA)等方案性能最优。参考文献[20]采用 Stackelberg 博弈研究了 NOMA 系统基于定价的功率分配问题来最大化基站的收益,通过引入辅助变量将基站优化问题转化为 3 个优化子问题,进一步利用凸优化和交替优化来分配用户功率,仿真结果表明所提算法比等功率分配算法提高了基站收益。参考文献[21]针对 NOMA 系统提出了一种新的基于定价的功率分配算法。首先,针对两个用户的情况给出闭式解,分析表明基站的最优策略为向两个用户或仅向信道较好的用户分配功率;然后,针对用户数目多余两个的情况,提出了基于两用户轮询配对的迭代算法。仿真结果表明所提算法在基站的收益和用户的和速率方面更优^[20]。考虑用户之间的速率公平比例约束条件,参考文献[22]采用 Stackelberg 博弈研究了 NOMA 系统基于定价机制下基站收益最大化问题。首先通过用户功率和速率之间的对应关系,将基站的功率分配问题转化为速率优化问题;进一步利用速率优化问题的单调性,提出了在速率公平比例约束条件下 NOMA 系统基于定价的最优功率分配算法。

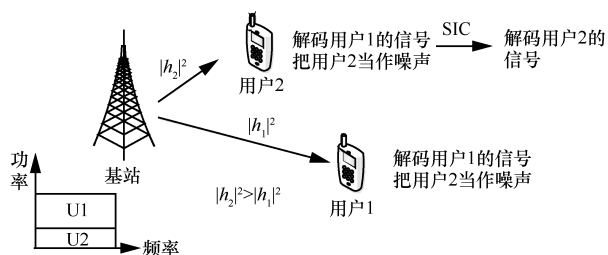


图1 两用户下行链路单载波 NOMA 方案示例

2.2 多载波 NOMA 的资源分配

由于资源分配的灵活性和多用户分集增益,多载波技术^[23]已在过去的宽带无线通信中被大量采用。在传统的多载波系统中,给定的频谱资源被分成多个子载波,而每个子载波至多分配给一个用户使用,有效避免多用户干扰。然而这样的分配方式却不能达到容量区域的上界,特别是当系统保证用户公平性时,会将部分子载波专门分

配给信道质量较差的用户使用,从而会造成频谱资源的浪费^[24-25]。因此,联合多载波技术和 NOMA 技术的多载波 NOMA 接入方式可以进一步提高频谱利用效率,这已经成了未来宽带无线通信接入技术的一个演进方向。对于多载波的资源分配,参考文献[26]在图 2 的系统模型下,通过联合子载波分配和功率分配优化多载波 NOMA 系统的加权和速率。因为优化问题是 NP 问题,所以将子信道分配问题转化为多对多的用户与子信道双向匹配问题,提出用户—子信道交互匹配算法 (user-subchannel swap-matching algorithm, USMA-1) 与 USMA-2 两种算法,将功率分配问题转化为几何规划问题,最后采用联合子信道和功率分配算法 (joint subchannel and power allocation algorithm, JSPA)。仿真结果表明所提算法在用户和速率和公平性方面都优于传统的 OFDMA (orthogonal frequency division multiple access) 方案。参考文献[27]研究两个用户多载波 NOMA 系统,在用户传输速率和最大发送功率限制条件下,最小化子载波数,仿真结果表明,所提出的资源分配策略提高了频谱效率和小区边缘用户吞吐量。参考文献[28]研究了在每个子载波最多复用两个用户的情况下,多载波 NOMA 系统的加权系统吞吐量最大化问题。基于单调优化和凸逼近的方法,分别提出最优方案和低复杂度的次优算法。仿真结果表明所提次优算法性能相对于传统的多载波正交多址系统提高了系统的吞吐量。参考文献[29]研究了多载波 NOMA 系统最大化和速率的资源分配问题,由于是非凸优化问题,因此,提出采用匹配理论和注水功率分配的次优算法进行求解,仿真结果表明所提算法获得的系统速率优于基于 OFDMA 的分配方式。参考文献[30-31]考虑下行 NOMA 系统,联合优化信道和功率分配以最大化系统加权和速率问题。由于该优化问题是 NP 问题,因此提出基于拉格朗日对偶和动态规划的次优算法。仿真结果表明所提算法优于 OFDMA 和

带有分数功率分配的 NOMA 方案^[32]。参考文献[33]考虑多载波 NOMA 系统,提出一种两次迭代的注水算法,并证明了该算法在每个子载波复用不超过两个用户的情况下具有收敛性,仿真结果表明所提算法性能接近现有的次优算法^[30],但具有更低的时间复杂度。参考文献[34]在满足用户最小速率需求的情况下,研究了多载波 NOMA 系统总功率最小化问题,并提出了低复杂度的联合子载波和功率分配算法。仿真结果表明所提算法相比传统 OFDM 的频分复用和静态的非正交资源分配算法降低了系统的能量消耗。参考文献[35]考虑在用户最小速率约束条件下,研究多载波 NOMA 系统和速率的最大化问题。由于该问题是非凸的,因此,本文提出次优算法将原问题分解为子载波分配和功率分配问题。先在假设等功率分配的情况下进行子载波分配,然后在给定的子载波分配的情况下进行功率分配。参考文献[36]在发送端具有信道状态统计信息 (channel state information at the transmitter, CSIT) 的前提下,提出一种次优的功率分配和用户调度算法来得到多载波 NOMA 系统的最小发射总功率。仿真结果表明,所提算法相比传统 OMA 方式降低了系统的总功率。参考文献[37]考虑基站全双工多载波 NOMA 系统的资源分配问题,优化系统的加权和速率,提出利用连续凸逼近的次优算法来平衡算法复杂度和最优性。结果表明所提算法接近最优性能,并且在系统平均吞吐量、平均接入用户数、系统公平性上优于 3 种基准的对比算法 (基于全双工的多载波正交接入、半双工的多载波 NOMA 和半双工的多载波 OMA)。参考文献[38-39]在每个子载波复用最多两个用户的限制条件下,研究多载波 NOMA 系统基于能效的子信道分配和功率分配算法,提出了一种次优的信道分配和功率分配算法以最大化 NOMA 系统用户的能效的总和。相比传统的 OFDM 方案,所提 NOMA 方案能实现更好的和速率与能量效率。参考文献[40]研究了由多载波—非



正交多址支持的虚拟无线网络 (virtualized wireless network, VWN) 的上行链路资源分配问题, 将优化问题分解为独立的功率和子载波分配问题, 并提出一种基于连续凸近似和互补几何规划的迭代算法。结果表明, 与 OMA 相比, 所提出的多载波 NOMA 算法可以显著提高频谱和功率效率。参考文献[41]通过共同考虑信道分配和功率控制, 为基于 NOMA 的上行链路网络制定了一个和速率最大化问题, 将原始问题转化为图论中的最大加权独立集问题, 提出一种有效的低复杂度资源分配算法。结果显示该算法在数据速率和支持用户数方面相对其他方案的性能更优。

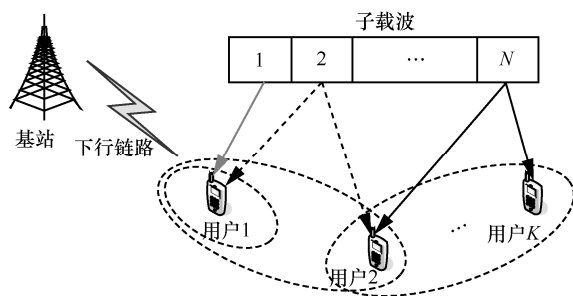


图2 多用户下行链路多载波 NOMA 方案示例

2.3 协作 NOMA

协作通信可以使用多个中继来帮助源节点与目的节点通信, 以提高无线网络的容量和可靠性, 也是防止无线信道多径衰落和提高系统吞吐量性能的最有效方法之一, 还具有降低发射功率和减少能量消耗的特点^[42]。又由于受到 NOMA 优势的吸引, 近年来部分研究人员将 NOMA 的技术和中继技术相结合, 开展了协作 NOMA 中继系统的性能分析^[43-49]与资源分配^[50-54]研究。

2.3.1 性能分析

参考文献[43]在协调直接和中继传输 (coordinated direct and relay transmission, CDRT) 中引入 NOMA, 导出了中断概率和遍历和容量的分析表达式, 仿真结果表明与非协调直接和中继传输中的 NOMA 系统相比, 所提方案具有显著的

性能增益。参考文献[44]研究了在不理想信道状态信息的 Nakagami- m 衰落信道下, 协作 NOMA 下行放大转发中继网络的中断概率, 仿真结果表明相比传统 OMA 系统, 性能可以显著提升。参考文献[45]研究了 NOMA 多天线中继网络中用户的中断行为, 仿真结果表明当中继位置靠近移动用户时, OMA 可实现更好的中断性能, 但 NOMA 可提供更好的频谱效率和用户公平性。参考文献[46]在 AF 中继的帮助下研究了协作动态 NOMA 网络的中断性能, 导出了中断概率精确闭合表达式的近似结果, 仿真结果表明协作 NOMA 比协作 OMA 有更高的分集增益和编码增益, 中断性能也有所提高。参考文献[47]分析并比较了 NOMA 协作和 NOMA 时分多址两种方案的中断性能, 结果表明 NOMA 协作方案的中断性能比 NOMA 时分多址方案更好。参考文献[48]研究了具有多个中继的协作下行链路非正交多址网络的中继选择方案。提出了两个最优中继选择方案, 称为两阶段加权最大最小值 (weighted-max-min, WMM) 和最大加权谐波均值 (maxweighted-harmonic-mean, MWHM) 方案。分析两种方案的中断概率, 并确定它们的分集增益。结果表明, 所提出的最优两阶段 WMM 和 MWHM 方案优于现有的次优中继选择 (relay selection, RS) 方案。参考文献[49]研究了中继选择对协作 NOMA 性能的影响, 其中继以全双工 (full-duplex, FD) 或半双工 (half-duplex, HD) 模式工作, 并采用随机几何对网络的中继位置进行建模, 推导出 FD / HD NOMA 两种 RS 方案的中断概率解析表达式。结果表明, 基于 FD 的 RS 方案在低信噪比 (SNR) 区域中具有比基于 HD 的 RS 方案更好的中断性能; 基于 FD/HD 的 NOMA 中继选择方案 (single-stage RS, SRS) / 两阶段中继选择方案 (two-stage RS, TRS) 的中断行为优于随机中继选择方案 (random RS, RRS) 和基于 OMA 的中继选择方案。

2.3.2 资源分配

参考文献[50]分析了协作 NOMA 中继系统的平均速率的渐进表达式,提出 NOMA 的次优功率分配方案,仿真结果表明此系统能提高频谱效率。参考文献[51]研究 NOMA 协作中继系统 (cooperative relaying system using non-orthogonal multiple access, CRS-NOMA) 的新型检测方案,目的节点通过采用最大比合并与串行干扰消除直连信号和转发信号进行联合解码,研究了系统的遍历和速率和中断性能,通过求解遍历和速率对于功率分配因子的导数,可得到最优功率分配因子即所提功率分配方案。所提方案比参考文献[50]方案在遍历和速率和中断性能方面都有明显的改善。参考文献[52]研究协作非正交多址中继 (collaborative noma assisted relaying, CNAR) 系统,分析 CNAR 系统和简化的 CNAR 系统中断行为,分别考虑源—中继和中继—目的节点链路的中断行为来分析两个系统的中断概率,提出通过最小化中断概率来保证数据速率的最优功率分配方案。结果证明了所提出的 CNAR 在可能的传输策略中实现了最佳性能,并且简化的 CNAR 获得了类似的性能并且降低了中继复杂性。参考文献[53]在图 3 的系统模型下,研究了具有单向 OFDM 放大转发中继的 NOMA 系统的资源分配问题,通过优化子信道分配和功率分配来最大化平均和速率。将问题转化为多对多双向匹配问题,提出两个近似最优的源—目的节点间的子信道匹配算法,即静态匹配算法和动态匹配算法都在有限次数的迭代之后收敛到成对的稳定匹配,再采用注水功率分配算法进行功率分配。结果表明所提算法具有较低复杂度,能服务更多用户且平均和速率也高于传统 OFDMA 系统。参考文献[54]提出一种基于 NOMA 的新型协作传输方案来重新设计无线回程双层异构网络架构。设计 NOMA 解码顺序以及在宏基站 (macro base station, MBS) 和小小区接入点 (small cells access point, SCAP) 处的下行

链路发射波束成形和功率分配,最大化可达速率和满意的用户数。提出了一种基于连续凸近似和主要最小化方法的迭代低复杂度算法来求次优解。结果表明,所提方案更加先进和有效,且总可达速率方面优于常规设计。

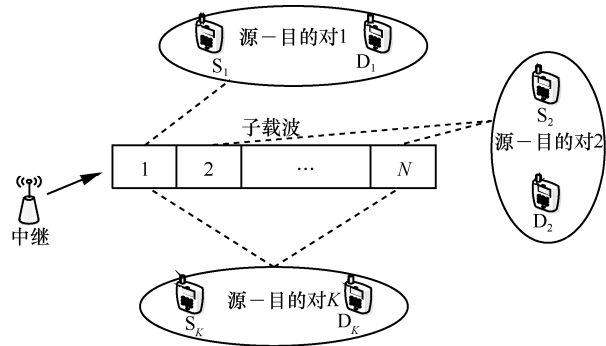


图3 多用户协作 NOMA 中继方案示例

2.4 硬件损伤条件下协作 NOMA 的资源分配

在当前已有研究中,大多研究和文献都是在理想的硬件条件假设下进行的分析和优化。然而,在实际的协作 NOMA 系统中,硬件并不都是完美的,硬件遭受来自各个方面的影响和损害,源节点、中继节点以及用户节点存在不同程度的硬件损伤,这些硬件损伤包括:把通信设备自身产生并难以消除的系列有损害通信质量的诸多因素,包括 I/Q 不平衡、非线性功放产生的等效噪声以及射频电路噪声等。一般来说,通过在发射机处使用某些校准技术或/和在接收机处的补偿算法,通常可以减轻由上述单一类型的硬件损伤导致的性能退化。然而,这些方法不能完全消除硬件损伤,因此总是存在一定量的由于残留硬件损伤 (residual hardware impairment, RHI) 而导致的未被计入的失真,这些损失被添加到发送/接收信号中,导致系统性能的下降。参考文献[55]研究了量化残余硬件损伤 (RHI) 对基于非正交多址 (NOMA) 的中继网络的影响,推导出中断概率的精确和渐近表达式,在 Nakagami-m 衰落信道上给出封闭形式。研究结果表明,在低 SNR 或低目标速率下, RHI 引起的中断性能损失较小,但在高



SNR 或目标速率下损失显著。此外,还提出了系统遍历和速率(ergodic sum rate, ESR)的渐近表达式,并与正交多址(OMA)传输的传统硬件损坏中继系统的 ESR 作对比,结果表明,在没有 RHI 的情况下, NOMA 或 OMA 系统中的 ESR 随着 SNR 的增加而单调增加,而在两个系统的硬件受损情形中引入了不可避免的 ESR 上限。参考文献[56]量化联合发射机/接收机同相正交相位不平衡(in-phase/quadrature-phase imbalance, IQI)所带来的硬件损伤对多径衰落条件下基于 NOMA 的多载波系统性能的影响,并推导了所考虑的多载波 NOMA 建立的渐近分集阶数。结果证明同相正交相位不平衡 IQI 的影响在 NOMA 用户中差异很大,并取决于底层的系统参数。参考文献[57]研究了非正交多址(NOMA)双跳(dual-hop, DH)放大转发中继网络的性能,其中考虑 Nakagami- m 衰落信道。综合考虑源节点、中继节点和目的节点处的收发器硬件损伤,导出了中断概率和近似遍历和速率的闭式表达式。另外,为了进一步揭示硬件损伤参数对网络性能的影响,对高信噪比(SNR)情况下的中断概率和遍历和速率进行了渐近分析。

2.5 对比与分析

对以上关于 NOMA 资源分配算法相关工作进行总结见表 1。

3 研究挑战和未来研究方向

尽管目前国内外对于 NOMA 系统的资源分配问题的研究已经取得了一定的研究成果。上述提到的资源分配方法也在一定程度上满足了 NOMA 系统某一方面的优化目标,但是现有研究针对 NOMA 系统的资源分析手段和优化方法仍然具有一定的局限性。由以上归纳分析发现,大部分研究都是理想信道状态信息下,进行算法设计和优化,但无线信道状态信息通常会受到信道估计误差、量化误差等实际因素的影响,因此需要进一步考虑非理想信道状态信息下,对于单载波 NOMA、多载波 NOMA、协作 NOMA 的资源分配问题进行建模和分析,又由于该问题一般为非凸甚至 NP 难问题。因此,如何设计出低复杂度的在线资源分配算法,接近最优性能的次优算法也极其重要和具有挑战。

基于 Stackelberg 博弈方法采用定价机制研究 NOMA 系统的资源分配问题^[20-22]仍然处于起

表 1 NOMA 资源分配相关研究工作总结

	研究目标	参考文献	解决方法
单载波 NOMA	和速率	[9-15,19]	凸优化、KKT 条件、穷举搜索算法、两层迭代算法、二分搜索法、变量替换、交替优化、博弈论
	公平性	[13-15]	
	能量效率	[16-18]	
	基站收益	[20-22]	
多载波 NOMA	和速率	[26-31,35,37,41]	几何规划、迭代算法、连续凸逼近、单调优化、凸优化、匹配理论、注水功率分配算法、对偶分解、拉格朗日对偶法、动态规划
	公平性	[33,37]	
	功率	[34,36,40]	
	能量效率	[38-39]	
协作 NOMA 中继	和速率	[43,50-54]	凸优化、匹配算法、分式规划、单调优化
	中断性能	[43-49,52]	
	公平性	[45]	
硬件损伤下协作 NOMA	和速率	[55,57]	
	公平性	[55]	
	中断性能	[55-57]	

步阶段,在未来研究中可以进一步考虑用户的服务质量需求,联合容许控制和功率分配设计 NOMA 系统基于定价的资源算法来最大化基站的收益。

现有研究针对 NOMA 系统在硬件损伤下的性能分析也刚处于研究起步阶段,相关研究成果主要有参考文献[55-57],这些研究主要分析硬件损伤下的 NOMA 系统的中断概率和渐进和速率等性能指标,但并没有从资源分配角度对系统资源进行优化。因此,可以对硬件损伤条件下协作 NOMA 系统的基于频效的资源分配研究,充分考虑发射源端、中继节点、用户接收端的硬件损伤程度,信道的状态信息、发射功率等因素的影响,利用连续凸逼近、拉格朗日对偶分解等优化理论来设计;也可以对硬件损伤条件下协作 NOMA 系统的基于能效的资源分配研究,综合利用分式规划理论、单调优化方法等建立基于硬件损伤条件下的协作 NOMA 系统基于能效的低复杂度资源分配算法;还可以对硬件损伤条件下协作 NOMA 基于经济效益的资源分配研究,采用 Stackelberg 博弈建模分析协作 NOMA 系统中继节点在价格激励机制下的最优定价和功率分配策略,最大化中继节点和用户的收益。

综上所述,对于单载波 NOMA^[9-22]、多载波 NOMA^[26-41]已有的研究成果大多集中在和速率、公平性、功率、能效等方面;对于协作 NOMA^[43-54]已有的研究成果大多集中在中断概率、和速率和公平性等方面;对于硬件损伤条件下协作 NOMA^[55-57]的已有研究成果也大多集中在和速率、公平性、中断性能等方面。因此,针对这几个方面,研究和设计基于其他性能指标的有效资源分配算法也是极其重要的,可以采用的合理相关数学工具有:分式规划、连续凸逼近、博弈论、压缩不动点、对偶分解、顽健优化、随机过程、动态规划等方法。并通

过计算机仿真和实验去验证评价算法性能。进而设计出低复杂度、顽健的优化算法,实现系统的绿色节能。

4 结束语

本文先简述了 NOMA 的原理与优势,然后基于单载波 NOMA、多载波 NOMA、协作 NOMA 中继、硬件损伤条件下协作 NOMA 的资源分配进行介绍,最后总结了当前现状,并提出研究挑战和未来发展方向。但是现有研究对 NOMA 资源分配研究考虑的模型大部分过于理想,大都假设系统具有理想信道状态信息,用户的接收端可以完全消除信道条件较好用户的干扰。然而,考虑到实际通信系统信道估计误差、信道反馈误差、量化误差等因素的影响和用户解码硬件的限制,有必要在信道估计误差和不完全干扰消除情况下,对 NOMA 系统的资源分配问题进行建模和分析,进一步研究和探索具有顽健性的资源分配算法。

参考文献:

- [1] LI Q C, NIU H N, PAPATHANASSIOU A T, et al. 5G network capacity: key elements and technologies[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2014, 9(1): 71-78.
- [2] DAI L L, WANG B C, YUAN Y F, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 74-81.
- [3] TAO Y Z, LIU L, LIU S, et al. A survey: several technologies of non-orthogonal transmission for 5G[J]. China Communications, 2015, 12(10): 1-15.
- [4] 毕奇,梁林,杨姗,等. 面向 5G 的非正交多址接入技术[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 20-27.
BI Q, LIANG L, YANG S, et al. Non-orthogonal multiple access technology for 5G systems[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 20-27.
- [5] DING Z G, LIU Y W, CHOI J, et al. Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2): 185-191.
- [6] WEI Z Q, YUAN J H, NG D W K, et al. A survey of downlink



- non-orthogonal multiple access 5G wireless communication networks[J]. ZTE Communication, 2016, 14(4): 17-25.
- [7] DING Z G, PENG M G, POOR H V. Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(8): 1462-1465.
- [8] CHEN S, REN B, GAO Q, et al. Pattern division multiple access—a novel non-orthogonal multiple access for fifth-generation radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(4): 3185-3196.
- [9] WANG C L, CHEN J Y, CHEN Y J. Power allocation for a downlink non-orthogonal multiple access system[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(5): 532-535.
- [10] DING Z G, FAN P Z, POOR H V. Impact of user pairing on 5G non-orthogonal multiple-access downlink transmissions[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(8): 6010-6023.
- [11] CHOI J. On the power allocation for MIMO-NOMA systems with layered transmissions[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(5): 3226-3237.
- [12] SUN Q, HAN S, I C L, et al. On the ergodic capacity of MIMO NOMA systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(4): 405-408.
- [13] LIU Y, ELKASHLAN M, DING Z G, et al. Fairness of user clustering in MIMO non-orthogonal multiple access systems[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(7): 1465-1468.
- [14] CHOI J. Power allocation for max-sum rate and max-min rate proportional fairness in NOMA[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(10): 2055-2058.
- [15] CHINGOSKA H, HADZI-VELKOV Z, NIKOLOSKA I, et al. Resource allocation in wireless powered communication networks with non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(6): 684-687.
- [16] SUN Q, HAN S, I C L, et al. Energy efficiency optimization for fading MIMO non-orthogonal multiple access systems[C]// IEEE International Conference on Communications (ICC), June 8-12, 2015, London, UK. Piscataway: IEEE Press, 2015: 2668-2673.
- [17] ZHANG Y, YANG Q, ZHENG T X, et al. Energy efficiency optimization in cognitive radio inspired non-orthogonal multiple access[C]//IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Sept 4-7, 2016, Valencia, Spain. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [18] ZHANG Y, WANG H M, ZHENG T X, et al. Energy-efficient transmission design in non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(3): 2852-2857.
- [19] LIU F, PETROVA M. Proportional fair scheduling for downlink single-carrier NOMA systems[C]// 2017 IEEE Global Communications Conference(GLOBECOM 2017), Dec 4-8, 2017, Singapore. Piscataway: IEEE Press, 2017.
- [20] LI C, ZHANG Q, LI Q, et al. Price-based power allocation for non-orthogonal multiple access systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(6): 664-667.
- [21] WANG Z Q, WEN C C, FAN Z F, et al. A novel price-based power allocation algorithm in non-orthogonal multiple access networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017(99): 1.
- [22] FAN Z F, WEN C C, WANG Z Q, et al. Price-based power allocation with rate proportional fairness constraint in downlink non-orthogonal multiple access systems[J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2017, 100(11): 2543-2546.
- [23] AFOLABI R O, DADLANI, KIM K. Multicast scheduling and resource allocation algorithms for OFDMA-based systems: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(1): 240-254.
- [24] NG D W K, LO E S, SCHÖBER R. Dynamic resource allocation in MIMO-OFDMA systems with full-duplex and hybrid relaying[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(5): 1291-1304.
- [25] VENTURINO L, ZAPPONE A, RISI C, et al. Energy-efficient scheduling and power allocation in downlink OFDMA networks with base station coordination[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14 (1): 1-14.
- [26] DI B Y, SONG L Y, LI Y H. Sub-channel assignment, power allocation, and user scheduling for non-orthogonal multiple access networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(11): 7686-7698.
- [27] HOJEIJ M R, FARAH J, NOUR C, et al. Resource allocation in downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access[C]// IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), May 11-14, 2015, Glasgow, UK. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [28] SUN Y, NG D W K, DING Z, et al. Optimal joint power and subcarrier allocation for MC-NOMA systems[C]// IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Dec 4-8, 2016, Washington DC, USA. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [29] DI BY, BAYAT S, SONG L Y, et al. Radio resource allocation for downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) networks using matching theory[C]//IEEE Global Communications Conference, Dec 6-10, 2015, San Diego, California, USA. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [30] LEI L, YUAN D, HO C K, et al. Joint optimization of power and channel allocation with non-orthogonal multiple access for

- 5G cellular system[C]//IEEE Global Communications Conference, Dec 6-10, 2015, San Diego, California, USA. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [31] LEI L, YUAN D, HO C K, et al. Power and channel allocation for non-orthogonal multiple access in 5G systems: tractability and computation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(12): 8580-8594.
- [32] SAITO Y, BENJEBBOUR A, KISHIYAMA Y, et al. System-level performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) [C]//IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Sept 8-11, 2013, London, UK. Piscataway: IEEE Press, 2013: 611-615.
- [33] FU Y, SALALÜN L, SUNG C W, et al. Double iterative waterfilling for sum rate maximization in multicarrier NOMA systems[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC), May 21-25, 2017, Paris, France. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [34] LI X, LI C, JIN Y. Dynamic resource allocation for transmit power minimization in OFDM-based NOMA systems[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(12): 2558-2561.
- [35] CAI W, CHEN C, BAI L, et al. Subcarrier and power allocation scheme for downlink OFDM-NOMA systems[J]. IET Signal Processing, 2017, 11(1): 51-58.
- [36] WEI Z, NG D W K, YUAN J. Power-efficient resource allocation for MC-NOMA with statistical channel state information[C]//IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Dec 4-8, 2016, Washington DC, USA. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-7.
- [37] SUN Y, NG D W K, DING Z, et al. Optimal joint power and subcarrier allocation for full-duplex multicarrier non-orthogonal multiple access systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(3): 1077-1091.
- [38] FANG F, ZHANG H, CHENG J, et al. Energy-efficient resource allocation for downlink non-orthogonal multiple access network[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(9): 3722-3732.
- [39] FANG F, ZHANG H, CHENG J, et al. Energy efficiency of resource scheduling for non-orthogonal multiple access (NOMA) wireless network[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC), May 22-27, 2016, Kuala Lumpur, Malaysia. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [40] TWEED D, PARSAEFARD S, DERAKHSHANI M, et al. Dynamic resource allocation for MC-NOMA VWNs with imperfect SIC[C]// IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, Oct 8-13, 2017, Montreal, Canada. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [41] ZHAI D, DU J. Spectrum efficient resource management for multi-carrier based NOMA networks: a graph-based method[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 7(3): 388-391.
- [42] KIM S H, CHAITANYA T V K, LE N T, et al. Rate maximization based power allocation and relay selection with IRI consideration for two-path AF relaying[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(11): 6012-6027.
- [43] KIM J B, LEE I H. Non-orthogonal multiple access in coordinated direct and relay transmission[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(11): 2037-2040.
- [44] MEN J, GE J, ZHANG C. Performance analysis for downlink relaying aided non-orthogonal multiple access networks with imperfect CSI over Nakagami- m fading[J]. IEEE Access, 2017(5): 998-1004.
- [45] MEN J, GE J. Non-orthogonal multiple access for multiple antenna relaying networks[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(10): 1686-1689.
- [46] LIANG X, WU Y, NG D W K, et al. Outage performance for cooperative NOMA transmission with an AF relay[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(11): 2428-2431.
- [47] SUN H, WANG Q, HU R Q, et al. Outage probability study in a NOMA relay system[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC), March 19-22, 2017, San Francisco, USA. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [48] XU P, YANG Z, DING Z, et al. Optimal relay selection schemes for cooperative NOMA[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(8): 7851-7855.
- [49] YUE X, LIU Y, KANG S, et al. Spatially random relay selection for full/half-duplex cooperative NOMA networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018(99): 1.
- [50] KIM J B, LEE I H. Capacity analysis of cooperative relaying systems using non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(11): 1949-1952.
- [51] XU M, JI F, WEN M, et al. Novel receiver design for the cooperative relaying system with non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(8): 1679-1682.
- [52] LIU X, WANG X, LIU Y. Power allocation and performance analysis of the collaborative NOMA assisted relaying systems in 5G[J]. China Communications, 2017, 14(1): 50-60.
- [53] ZHANG S, DI B, SONG L, et al. Sub-channel and power allocation for non-orthogonal multiple access relay networks with amplify-and-forward protocol[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(4): 2249-2261.
- [54] NGUYEN T M, AJIB W, ASSI C. A novel cooperative non-orthogonal multiple access (NOMA) in wireless backhaul



two-tier HetNets[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(7): 4873-4887.

- [55] DING F, WANG H, ZHANG S, et al. Impact of residual hardware impairments on non-orthogonal multiple access based amplify-and-forward relaying networks[J]. IEEE Access, 2018(99): 1.
- [56] SELIM B, MUHAIDAT S, SOFOTASIOS P C, et al. Performance analysis of non-orthogonal multiple access under I/Q imbalance[J]. IEEE Access, 2018(6): 18453-18468.
- [57] DENG C, ZHAO X, ZHANG D, et al. Performance analysis of NOMA-based relaying networks with transceiver hardware impairments[J]. Ksii Transactions on Internet & Information Systems, 2017(12): 134.

[作者简介]



王正强（1983-），男，博士，重庆邮电大学通信与信息工程学院副教授，主要研究方向为 5G 移动通信理论与关键技术、绿色通信、无线资源管理与优化。



成蓁（1993-），女，重庆邮电大学通信与信息工程学院硕士生，主要研究方向为 NOMA 通信系统能效优化。



樊自甫（1977-），男，重庆邮电大学经济管理学院教授，主要研究方向为电信组织与运管管理、下一代网络技术。



万晓榆（1963-），男，博士，重庆邮电大学经济管理学院教授，主要研究方向为下一代网络技术、通信运营管理。