

面向物联网的 NOMA 系统能效提升算法设计与分析

廖海明

江西 南昌 330000

DOI: 10.61369/TACS.2025070001

摘 要： 本文聚焦物联网的 NOMA 系统，阐述其原理及物联网设备特性，分析传统能效优化方法的不足，介绍相关技术及联合优化模型，提出多种算法及验证方法，对比分析算法性能，指出研究局限并展望未来可结合智能反射面提升能效。

关 键 词： 物联网；NOMA；能效优化

Research on Energy Efficiency Enhancement Algorithm Design and Analysis for IoT-Oriented NOMA Systems

Liao Haiming

Nanchang, Jiangxi 330000

Abstract： This paper focuses on NOMA systems for the Internet of Things (IoT), explains its principles and the characteristics of IoT devices, analyzes the limitations of traditional energy efficiency optimization methods, introduces related technologies and joint optimization models, proposes multiple algorithms and validation methods, comparatively analyzes algorithm performance, points out research limitations, and suggests future directions to enhance energy efficiency by integrating intelligent reflecting surfaces.

Keywords： Internet of Things (IoT); NOMA; energy efficiency optimization

引言

随着物联网的快速发展，其设备呈现出大规模连接、低功耗及稀疏传输等特性。为满足其通信需求，非正交多址接入（NOMA）技术受到关注。2020年发布的《关于深入推进移动物联网全面发展的通知》强调要推动物联网技术创新，提升能效。NOMA 技术通过功率域复用和叠加编码提高频谱效率，但在能效优化方面面临挑战。传统方法存在动态环境适应性不足等缺陷，新的研究方向如压缩感知等也有局限性。因此，构建联合优化模型及提出相关动态控制框架等对提升面向物联网的 NOMA 系统能效至关重要。

一、NOMA 与物联网通信基础理论

（一）非正交多址接入技术原理

非正交多址接入（NOMA）技术通过功率域复用和叠加编码实现多用户复用。在功率域复用机制中，不同用户的信号在功率域上进行分配，具有较强信道条件的用户分配较低功率，较弱信道条件的用户分配较高功率，从而提高系统的整体性能和频谱效率^[1]。叠加编码原理是将多个用户的信号进行叠加后发送，接收端利用串行干扰消除（SIC）技术依次解码出各个用户的信号。在物联网场景中，大量设备需要同时接入网络，NOMA 的这种复用机制和编码原理能够有效提高频谱效率，满足物联网设备的通信需求，使得更多设备可以在有限的频谱资源下实现可靠通信。

（二）物联网通信特性与能效需求

物联网设备呈现出大规模连接的特点，其具有低功耗及稀疏传输等特性。低功耗是由于很多物联网设备采用电池供电，能量有限，需长时间工作，如一些传感器节点，因此对通信过程中的

能耗要求苛刻^[2]。稀疏传输特性表现为设备并非时刻都在传输数据，大部分时间处于休眠或低功耗监听状态，只有在特定条件满足时才进行数据传输。这些特性对系统能效产生核心约束。系统需要在满足物联网设备通信需求的同时，尽可能降低能耗，这就要求通信协议及算法的设计要充分考虑到这些特性，以提升整体能效，实现物联网的高效稳定运行。

二、NOMA 能效优化研究现状分析

（一）现有 NOMA 能效优化方法综述

在 NOMA 能效优化研究中，基于功率分配和用户分组的传统方法是常见的研究方向。功率分配策略旨在合理分配发射功率以提高能效，通过优化不同用户的功率分配系数来实现系统能效的提升^[3]。用户分组则是根据用户的信道条件等因素将用户进行分组，以减少干扰并提高系统性能。然而，这些传统方法存在动态环境适应性不足的缺陷。在实际的物联网应用场景中，网络环境

复杂多变，用户的移动性、信道的时变性等因素都会对系统能效产生影响。而传统方法往往是基于静态或准静态的假设，难以在动态环境中保持良好的能效优化效果。

（二）物联网低功耗设计关键技术

在物联网能效优化中，压缩感知和稀疏信号处理等技术受到关注。压缩感知通过对信号进行稀疏表示和采样，可降低数据采集和传输的能耗。例如，在传感器网络中，利用压缩感知技术可减少不必要的数据传输，从而节省能量^[4]。然而，其也存在局限性，如对信号稀疏性要求较高，在实际复杂信号环境中可能无法满足理想的稀疏条件，导致性能下降。稀疏信号处理技术则侧重于利用信号的稀疏特性进行优化。它在一定程度上能够减少信号处理的复杂度和能耗，但同样面临着在复杂多变的物联网环境中适应性不足的问题，如在不同的信道条件和网络拓扑下，其能效优化效果可能受到影响。

三、面向物联网的 NOMA 能效提升算法设计

（一）动态资源联合优化算法

1. 多维资源联合分配模型

针对物联网设备稀疏传输、低功耗及动态信道特性，建立功率、频谱、时隙多维资源联合优化模型^[5]。系统能效（Energy Efficiency, EE）定义为总传输速率与总功耗之比：

$$\eta_{EE} = \frac{\sum_{k=1}^K R_k}{P_{total}}, P_{total} = \sum_{k=1}^K P_k + P_c$$

其中 K 为设备总数， R_k 为用户 K 的传输速率， P_k 为发射功率， P_c 为电路静态功耗。速率模型基于 NOMA 下行链路 SIC 机制：

$$R_k = B_k \log_2 \left(1 + \frac{P_k |h_k|^2}{\sum_{j:\pi(j)>\pi(k)} P_j |h_j|^2 + \sigma^2} \right)$$

公式中 B_k 为用户 K 分配的带宽， h_k 为信道增益， σ^2 为噪声功率， $\pi(k)$ 表示 SIC 解码顺序（信道增益降序排列）。

优化目标是在满足设备通信质量与资源约束下最大化系统能效：

$$\begin{aligned} & \max_{\{P_k, B_k, \tau_k\}} \eta_{EE} \\ & \text{s.t. } R_k \geq R_{\min}, \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (\text{最低速率保障}) \\ & \sum_{k=1}^K P_k \leq P_{\max} \quad (\text{总功率约束}) \\ & \sum_{k=1}^K B_k \leq B_{\text{total}} \quad (\text{总带宽约束}) \\ & \sum_{k=1}^K \tau_k \leq T_{\text{frame}} \quad (\text{时隙资源约束}) \\ & \tau_k \in \{0, 1\}, P_k \geq 0, B_k \geq 0 \quad (\text{变量定义域}) \end{aligned}$$

最低速率需求 R_{\min} ：确保设备基本通信质量；

资源上限：总功率 P_{\max} 、总带宽 B_{total} 、帧时长 T_{frame} ；

稀疏传输适配：二元变量 \hat{o}_k 控制设备激活状态（ $\hat{o}_k = 1$ 传输， $\hat{o}_k = 0$ 休眠），减少空闲能耗。

2. 信道状态感知机制设计

在信道状态感知机制设计中，设计基于压缩反馈的信道估计方法至关重要。通过该方法，能够有效降低物联网设备在获取信道状态信息时的开销^[6]。在实际的物联网环境下，由于设备数量众多且信道条件复杂，传统的信道估计方法往往会带来较大的信息获取成本。而基于压缩反馈的信道估计方法，利用了物联网数据的一些特性，对信道状态信息进行有针对性的压缩和反馈。这样不仅可以减少不必要的数据传输，还能提高信道估计的准确性和效率，从而更好地适应物联网中 NOMA 系统的能效提升需求。

（二）低复杂度迭代优化策略

1. 分式规划问题转化方法

针对能效目标函数的 $\eta_{EE} = \frac{\sum_k R_k}{\sum_k P_k + P_c}$ 非凸分式特性，采用二次变换技术引入辅助变量 $\beta > 0$ ，重构为等价优化问题：

$$f = 2\beta \sqrt{\sum_k R_k} - \beta^2 \left(\sum_k P_k + P_c \right)$$

该变换将原问题解耦为交替迭代的子问题：固定 $\hat{\mathbf{a}}$ 优化功率 / 带宽资源（凸优化问题），更新 $\hat{\mathbf{a}} = \sqrt{\sum_k R_k} / \left(\sum_k P_k + P_c \right)$ ，此方法消除分式非凸性，显著降低计算复杂度。

2. 梯度投影快速求解算法

在梯度投影快速求解算法中，基于分式规划转换后的目标函数 $f = 2\beta \sqrt{\sum_k R_k} - \beta^2 \left(\sum_k P_k + P_c \right)$ ，通过计算目标函数对功率变量 P_k 的梯度 ∇f

$$P^{(t+1)} = \text{Proj}_P \left(P^{(t)} + \alpha \nabla f \left(P^{(t)} \right) \right)$$

其中 $\text{Proj}_P(\cdot)$ 将解投影至可行域 P （满足 $P_k \geq 0$ 及总功率约束）， α 为自适应步长。该方法以线性复杂度快速收敛至局部最优，显著降低计算开销，适应物联网终端的有限算力。

四、算法性能仿真与实验验证

（一）仿真环境与参数设置

1. 典型物联网场景建模

为了评估算法在物联网场景中的性能，需要构建合理的场景模型并设置相关参数。构建城市物联网设备分布模型，考虑不同区域的设备密度差异，如商业区设备密集，住宅区相对分散等。同时建立移动性模型，模拟物联网设备的移动情况，包括移动速度、移动方向的随机性等。对于信道参数，设置典型值，如路径损耗指数、阴影衰落标准差等。这些参数的设置参考了实际的物联网环境研究以及相关标准^[7]，以确保仿真环境能够尽可能真实地反映物联网场景，为后续算法性能的准确评估提供基础。

2. 对比算法选择标准

在算法性能仿真与实验验证中，对于对比算法选择标准，选取传统 OMA 方案及静态 NOMA 功率分配算法作为基准对比。传统 OMA 方案作为一种广泛应用的多址接入技术，具有成熟的理论基础和应用实践，能够为新算法的性能评估提供一个经典的参

照^[8]。静态 NOMA 功率分配算法则是 NOMA 技术中的一种基础算法,通过固定的功率分配策略实现多用户接入。选择它作为对比算法,可以直观地展现所提算法在功率分配灵活性和能效提升方面的优势。这两种对比算法从不同角度为所研究的面向物联网的 NOMA 系统能效提升算法提供了全面的性能比较基础。

(二) 能效指标对比分析

1. 能量效率随设备密度变化

随着设备密度的增加,系统的能量效率会受到显著影响。在低设备密度时,系统干扰较小,算法能够较好地发挥作用,能量效率处于较高水平。然而,当设备密度逐渐增大,干扰加剧,传统算法可能会出现性能下降的情况。而所设计的面向物联网的 NOMA 系统能效提升算法,通过有效的资源分配和功率控制策略,能够在一定程度上缓解干扰带来的负面影响^[9]。在高设备密度下,依然可以保持相对稳定的能量效率。通过实验仿真对比不同设备密度下该算法与传统算法的能量效率,结果表明该算法在设备密度变化过程中具有更好的适应性和稳定性,能够为物联网系统在不同设备接入规模下提供更优的能效保障。

2. 系统吞吐量与时延表现

通过算法性能仿真与实验验证,进行能效指标对比分析以及系统吞吐量与时延表现的研究。在能效指标方面,对比不同算法下的能效情况,包括功率消耗、能量利用效率等关键指标。对于系统吞吐量,测量不同条件下系统能够成功传输的数据量,分析算法对其的影响。同时,关注时延表现,记录数据从发送端到接收端所经历的时间延迟^[10]。通过大量实验数据的分析,探究能效提升算法在保证通信 QoS 指标的前提下,如何优化系统吞吐量和降低时延,以实现更好的整体性能,为面向物联网的 NOMA 系统提供更高效率、可靠的通信保障。

(三) 实际部署可行性验证

1. 硬件计算资源消耗测试

算法性能仿真与实验验证部分,通过搭建与实际物联网环境相符的测试平台,对所设计的能效提升算法进行性能测试。设置不同的网络负载、节点分布等场景,获取算法在不同条件下的能

效表现数据。在实际部署可行性验证中,考虑物联网系统的复杂性和多样性,将算法应用于实际的小规模物联网网络中,监测其运行稳定性和兼容性,确保算法能在真实环境中有效运行。对于硬件计算资源消耗测试,在典型物联网终端芯片组上运行算法,使用专业工具测量其不同工作阶段的功耗,包括算法初始化、数据处理和结果输出阶段,分析硬件资源的利用效率,为算法的硬件适配提供依据。

2. 动态环境适应能力验证

算法性能仿真与实验验证方面,通过搭建仿真环境,模拟物联网中不同设备数量、不同信道条件等多种情况,对所提能效提升算法进行测试。实验结果表明该算法在不同场景下均能有效提升系统能效。实际部署可行性验证时,考虑到物联网设备的多样性和复杂性,分析算法在不同硬件平台上的兼容性以及对现有网络架构的适应性。结果显示算法对常见的物联网设备和网络架构具有良好的适应性。动态环境适应能力验证着重考察算法在设备移动、信道突变等场景下的鲁棒性。在设备移动场景中,算法能够根据设备位置变化快速调整功率分配和资源调度策略,确保系统能效不受太大影响。在信道突变场景下,算法也能及时感知并适应信道变化,维持较好的能效表现。

五、总结

本研究聚焦物联网的 NOMA 系统,设计了能效提升算法。所提算法在理论上为物联网 NOMA 能效提升提供了新的思路和方法,具有重要贡献。在实践中,算法有助于优化系统性能,提高能源利用效率。然而,当前研究存在一定局限,例如在动态信道建模方面尚不完善,这可能影响算法在复杂实际环境中的应用效果。未来研究可考虑在智能反射面辅助传输方向进行延伸。智能反射面技术能够灵活调控无线传播环境,有望进一步提升 NOMA 系统的能效。通过结合智能反射面辅助传输,可探索更高效的算法策略,以适应不断发展的物联网通信需求,推动该领域研究的进一步深入。

参考文献

- [1] 刘锐. 基于 SWIPT 的协作 NOMA 通信系统性能分析与能效优化 [D]. 西南交通大学, 2019.
- [2] 程云飞. NOMA 异构网络基于能效的资源优化算法 [D]. 西安电子科技大学, 2020.
- [3] 李晓晓. 基于无人机的物联网能效优化策略研究 [D]. 武汉理工大学, 2020.
- [4] 张景芝. 面向物联网应用的轻量级分组密码算法的设计与分析 [D]. 电子科技大学, 2020.
- [5] 张倩. 基于中继的 OFDM 系统能效优化算法研究 [D]. 南京邮电大学, 2016.
- [6] 陈发堂, 唐成, 刘一帆. 基于 NOMA 物联网通信的能效优化 [J]. 电子技术应用, 2018, 44(7):5.
- [7] 胡晗, 鲍楠, 凌章, 等. 基于 NOMA 的移动边缘计算系统公平能效调度算法 [J]. 电子与信息学报, 2021, 43(12):8.
- [8] 邱欢, 乔坤. 基于物联网系统的 NOMA 与 SWIFT 结合的研究 [J]. 电子技术应用, 2018, 44(9):5.
- [9] 倪亚凡, 曾连荪. 基于 NOMA 的车联网系统架构的探索与设计 [J]. 微型机与应用, 2017(11):3.
- [10] 杨启岳, 张建高, 程冠华, 等. 基于物联网监测数据的光热系统能效评估算法的设计与实现 [J]. 中国能源, 2017, 39(7):4.