



# 计算机科学

COMPUTER SCIENCE

## 面向集能型中继窄带物联网的非正交多址接入和多维网络资源优化

沈家芳, 钱丽萍, 杨超

引用本文

沈家芳, 钱丽萍, 杨超. 面向集能型中继窄带物联网的非正交多址接入和多维网络资源优化[J]. 计算机科学, 2022, 49(5): 279-286.

SHEN Jia-fang, QIAN Li-ping, YANG Chao. Non-orthogonal Multiple Access and Multi-dimension Resource Optimization in EH Relay NB-IoT Networks[J]. Computer Science, 2022, 49(5): 279-286.

---

## 相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于多天线 NOMA 的通信系统高能效功率分配方法](#)

Energy Efficient Power Allocation for MIMO-NOMA Communication Systems

计算机科学, 2021, 48(6A): 398-403. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.200900175>

[一种面向 5G 网络的移动边缘计算卸载策略](#)

5G Network-oriented Mobile Edge Computation Offloading Strategy

计算机科学, 2020, 47(11A): 286-290. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.200200028>

[窄带物联网下的安全门锁密钥可靠更新方案](#)

Reliable Security Lock Key Updating Scheme over Narrow Band Internet of Things

计算机科学, 2019, 46(4): 137-143. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2019.04.022>

[一种带有能量自补给节点的异构传感器网络分簇路由算法](#)

Clustering Routing Algorithm for Heterogeneous Wireless Sensor Networks with Self-supplying Nodes

计算机科学, 2017, 44(1): 134-139. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2017.01.026>

[吞吐量最大化的二维无线能量传输算法](#)

Bi-dimensional Wireless Energy Transfer Algorithm for Maximum Network Throughput

计算机科学, 2015, 42(11): 164-169. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2015.11.034>

# 面向集能型中继窄带物联网的非正交多址接入和多维网络资源优化

沈家芳 钱丽萍 杨超

浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023

(jfshen\_zjut@163.com)

**摘要** 随着窄带物联网技术的蓬勃发展,窄带物联网设备越来越多,但是严重的同频干扰和信号衰减,导致边缘窄带物联网设备的服务质量难以得到保证。针对此问题,提出了集能型中继非正交多址接入窄带物联网。基于该网络模型,建立了以窄带物联网设备数据速率比例公平性为优化目标的传输功率、数据调度以及时隙调度多维资源分配模型,以在优化网络性能的同时,保证每个窄带物联网设备的数据速率需求。通过发掘该模型的凸优化特性,基于 KKT 条件提出了多维资源优化分配算法。仿真结果验证了所提算法的有效性,其数据速率比例公平性提升了 11.9%,频谱效率提升了 55.4%,网络能效提升了 44.1%。

**关键词:** 窄带物联网;能量采集;非正交多址接入;多维资源分配

**中图分类号** TN929

## Non-orthogonal Multiple Access and Multi-dimension Resource Optimization in EH Relay NB-IoT Networks

SHEN Jia-fang, QIAN Li-ping and YANG Chao

College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

**Abstract** With the rapid development of the narrow band Internet of things (NB-IoT) technology, more and more NB-IoT devices are deployed. However, due to the severe co-channel interference and signal attenuation, it is difficult to guarantee the quality of service of NB-IoT devices at the edge. In order to solve this problem, an energy harvesting (EH) relay-aided non-orthogonal multiple access (NOMA) NB-IoT networking model is proposed in this paper. Based on the proposed model, we aim at maximizing the NB-IoT device data rate based proportional fairness through jointly optimizing transmission power, data scheduling and time slot scheduling, to optimize the network performance while ensuring the data rate requirements of each NB-IoT device. By exploring the convexity of this optimization problem, an optimal multi-dimensional resource allocation algorithm based on the KKT conditions is proposed. Simulation results verify the effectiveness of the proposed algorithm, and show the proposed algorithm can efficiently improve the data rate based proportional fairness with 11.9%, the spectral efficiency with 55.4% and the energy efficiency with 44.1%.

**Keywords** NB-IoT, Energy harvesting, Non-orthogonal multiple access, Multi-dimension resource allocation

### 1 引言

近年来,随着物联网技术的蓬勃发展,各类物联网应用(如智能电表、智能制造、智能家居、自动驾驶、健康监测、智慧农业等)不断涌现,万物互联的时代已经来临<sup>[1-5]</sup>。为满足物联网中海量机器类通信的性能需求,给物联网用户提供良好的服务体验,移动网络的生态结构、资源管理亟需进一步完善<sup>[4-8]</sup>。窄带物联网(Narrow Band Internet of Things, NB-IoT)是 3GPP 标准下的蜂窝物联网技术,被视为应对物联网

需求的关键技术<sup>[6,8-10]</sup>。NB-IoT 通过极小的带宽在蜂窝网络的带内、保护带、独立载波中进行部署,不仅具有很强的灵活性及适用性,而且具有低功耗、广覆盖、多连接、低成本的优点。但 NB-IoT 的广泛部署和应用需要架设大量的蜂窝基站以满足其网络接入,这势必会导致大量的能源消耗和温室气体排放<sup>[11-12]</sup>。

为了有效提升 NB-IoT 设备的数据速率公平性且兼顾网络频谱效率及能效,本文将非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)<sup>[13]</sup>、能量采集(Energy Harvesting,

到稿日期:2021-04-22 返修日期:2021-10-15

基金项目:国家自然科学基金(62071431,62122069);国家重点研发计划政府间科技合作专项(2019YFE0111600)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(62071431,62122069) and Intergovernmental International in Science and Technology Innovation Program(2019YFE0111600).

通信作者:钱丽萍(lpqian@zjut.edu.cn)

EH)<sup>[12,14-17]</sup>和中继技术<sup>[18]</sup>应用到 NB-IoT 网络中,从而实现绿色通信。NOMA 通过连续干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)机制使同一频带接入多个用户,并在用户存在相互干扰的情况下始终取得这一频带的最佳信道容量。与传统的正交接入方式相比,NOMA 在相同的频谱资源下增加了系统的容量,在相同的目标速率下降低了用户的发送功率,节约了用户能耗。NOMA 的良好性能适用于用户之间信道增益存在差异的网络,而针对一个通过 NB-IoT 远距离连接的设备密集分布的工业物联网场景,设备之间的信道增益区分度相对较低,会影响 NOMA 性能优势的发挥。EH 中继技术可以在减少能源消耗的情况下有效提升远距离 NB-IoT 设备的网络接入。EH 中继利用采集环境中的能量对中继进行供电,可以有效应对能源短缺与环境污染问题。同时,与电网有线供电相比,EH 中继通过无线方式采集能量,进一步提高了中继部署的灵活性;与电池供电相比,其免除了更换电池或充电的过程,降低了维护的难度和成本。

近年来,NOMA、EH 和中继技术的研究备受关注。文献[19]考虑了一个带有直接链路的下行 NOMA 中继场景,所有节点以半双工模式工作,在固定资源分配的情况下,Liu 等研究了不同中继策略的中断概率和平均吞吐量。文献[18]设计了一个中继辅助的下行 NOMA 框架,其利用两个时隙完成一次从基站到用户的传输,通过功率分配优化了频谱效率。文献[20]针对一个终端用户集能的下行 NOMA 异构网络,考虑到信道参数的不确定性,提出了一种基于稳健性的能效最大化资源分配算法。该算法分别利用拉格朗日对偶原理和单调性原理求解不同的单个变量,其中基于对偶原理的变量通过外层更新乘子、内层更新变量的方法进行迭代,并在此基础上对多个变量进行联合迭代直至收敛。文献[21]基于不完美的 SIC 和非线性的 EH 模型,分别以最大化加权和速率以及最小化功耗为目标,提出了结合坐标梯度下降和 CVX 的优化算法以及直接运用现成的 CVX 的优化算法。文献[22]把 NOMA 应用到 NB-IoT 网络中,仿真结果表明,与非正交多址 NB-IoT 网络相比,NOMA NB-IoT 网络的吞吐量及用户接入数量有了很大的提升。文献[23]在一个包含两个用户的 EH 中继 NOMA 下行链路中,通过优化功率分割因子最大化系统吞吐量。以上文献采用各自的资源分配方案,主要考虑了中断概率、吞吐量、能效、功耗等方面的网络性能,没有综合考虑用户之间的公平性和其他性能。针对不同的网络结构,资源分配算法仍有十分重要的研究意义。

通过应用 EH 和中继技术,NOMA 的性能优势得以保证。另一方面,由于 NB-IoT 设备之间保留了信道增益差异性,因此如何在优化网络性能的同时保证各个 NB-IoT 设备的服务质量成为十分重要的问题。在资源分配给定的情况下,NOMA 通过连续干扰消除机制,在解码时不断从叠加信号中消除已解码出的中心 NB-IoT 设备(信道增益最大的 NB-IoT 设备)信号的干扰,减少了边缘 NB-IoT 设备(信道增益最小的 NB-IoT 设备)受到的干扰,提高了边缘 NB-IoT 设备的性能,促进了 NB-IoT 设备之间的公平性,改善了网络

性能。在资源分配管理时,如果只考虑网络的性能,而忽略单个 NB-IoT 设备的性能,那么中心 NB-IoT 设备将会获得最好的资源,而边缘 NB-IoT 设备将会得到最差的服务<sup>[24]</sup>。因此,考虑从最大化 NB-IoT 设备数据速率比例公平性的角度出发进行资源分配,以在满足 NB-IoT 设备之间公平性的同时,实现系统性能的最优化。

本文的主要贡献如下:

(1)针对上行的 EH 中继 NOMA NB-IoT 网络模型,以 NB-IoT 设备数据速率比例公平性为优化目标,考虑 NB-IoT 设备最小数据速率需求,兼顾 NB-IoT 设备能量、EH 中继能量及数据缓存约束,建立了联合功率分配、数据调度(比特调度)和时隙调度的多维资源分配问题模型。该问题模型是一个非凸的优化问题,难以直接得到解析解。

(2)针对该优化问题的非凸优化特性,通过变量替换和对数化发掘该优化问题的凸优化特性,基于拉格朗日函数和 KKT 条件,提出了梯度下降和次梯度下降相结合的多维资源优化分配算法。

(3)通过仿真实验,验证了所提算法的有效性。与传统的正交多址接入 NB-IoT 网络相比,所提的基于多维资源优化分配的 EH 中继 NOMA NB-IoT 网络可以有效保证边缘 NB-IoT 设备的服务质量,提升网络的性能;而且随着网络中接入的 NB-IoT 设备数量和 EH 中继上采集能量的增加,网络性能也得到进一步提升。

## 2 系统模型及问题建模

### 2.1 系统模型

本文考虑了一个由  $N$  个 NB-IoT 设备、一个 EH 中继和一个汇聚节点组成的 EH 中继 NB-IoT 网络(此网络模型可以应用于工业物联网场景中的智能制造工厂,EH 中继由工厂部署,汇聚节点由运营商部署),如图 1 所示。NB-IoT 设备集表示为  $N = \{1, 2, \dots, n, \dots, N\}$ ,其中  $n$  表示 NB-IoT 设备的标识,该网络的拓扑结构包括室内通信和室外通信两部分。NB-IoT 设备由电池供电,每个 NB-IoT 设备可使用  $E_n$  J 的能量。NB-IoT 设备利用 NOMA 发送数据至 EH 中继节点,EH 中继节点再将接收到的数据转发给汇聚节点。NOMA 通过叠加编码和 SIC 在同一频谱资源上接入多个 NB-IoT 设备,实现信道复用。在上行链路中,接收端接收到来自不同路径的 NB-IoT 设备的信号,对不同路径的 NB-IoT 设备的信道增益进行降序排序,以此作为 SIC 解码顺序。设  $h_{d_n}$  为 NB-IoT 设备  $d_n$  至 EH 中继节点的信道增益,满足  $h_{d_1} > h_{d_2} > \dots > h_{d_n} > \dots > h_{d_N}$ ,EH 中继节点的 SIC 解码顺序为  $S = d_1 \rightarrow d_2 \rightarrow \dots \rightarrow d_n \rightarrow \dots \rightarrow d_N$ 。定义  $p_{d_n}$  为 NB-IoT 设备  $d_n$  的发送功率。令  $R_{d_n}$  为 NB-IoT 设备节点  $d_n$  到 EH 中继节点的数据传输速率,应用 NOMA,  $R_{d_n}$  的表达式为:

$$R_{d_n} = W_s \log \left( 1 + \frac{h_{d_n} p_{d_n}}{\sum_{j=n+1}^N h_{d_j} p_{d_j} + N_r} \right), \forall n \in \mathcal{N} \quad (1)$$

其中,  $W_s$  表示所有 NB-IoT 设备共享的带宽,  $N_r$  表示 EH

中继节点处的高斯白噪声功率。

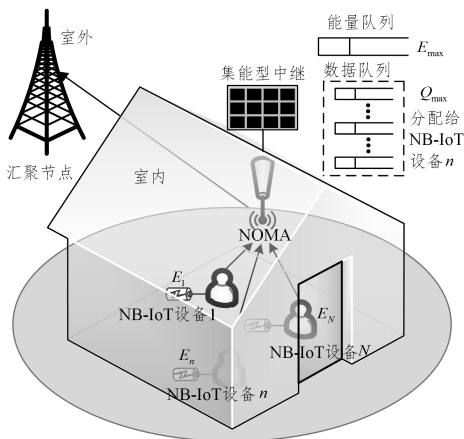


图1 EH中继NB-IoT网络模型

Fig.1 System model of EH relay NB-IoT network

EH中继节点有两种类型的存储队列:用来存储来自NB-IoT设备的数据的数据队列和用来存储EH中继的采集能量的能量队列。数据队列和能量队列的容量分别是 $Q_{\max}$  bits和 $E_{\max}$  J。EH中继采用基于解码转发的两跳半双工中继传输协议,将一个长为 $T$ 个时间单位的时隙,分成两个子时隙来接收和转发数据。令时隙分配因子为 $\tau$ ,在第一个子时隙 $\tau T$ 内,所有NB-IoT设备的数据信号叠加在一起通过NOMA发送至EH中继节点,EH中继节点采用SIC依次解码出各个NB-IoT设备的数据信号,并存储在相应的数据队列中;在第二个子时隙 $(1-\tau)T$ 内,EH中继从每个NB-IoT设备 $d_n$ 对应的数据队列中选择 $\alpha_{d_n}$ 比例的数据封装在一起,并以 $p_r$ 发射功率将其转发至汇聚节点。假设EH中继在接收到NB-IoT设备 $d_n$ 发送来的数据之前,数据队列中原有的数据量为 $Q_{d_n}$  bits,令 $B_{d_n}$ 为NB-IoT设备 $d_n$ 通过EH中继转发给汇聚节点的数据量, $B_{d_n}$ 的表达式为:

$$B_{d_n} = \alpha_{d_n} (Q_{d_n} + \tau TR_{d_n}), \forall n \in \mathcal{N} \quad (2)$$

定义 $h_r$ 为EH中继节点到汇聚节点的信道增益,令 $R_r$ 为EH中继节点的数据传输速率, $R_r$ 表达式为:

$$R_r = W_r \log \left( 1 + \frac{h_r p_r}{N_s} \right) \quad (3)$$

其中, $W_r$ 表示EH中继节点占用的带宽, $N_s$ 表示汇聚节点处的高斯白噪声功率。

## 2.2 问题建模

NOMA适用于NB-IoT设备之间信道增益存在差异的网络,信道增益的差异导致了各NB-IoT设备数据速率的差异。为了应对这一问题,保证边缘NB-IoT设备的服务质量,本文考虑在满足各个NB-IoT设备最小数据速率需求的情况下,最大化NB-IoT设备数据速率的比例公平性以实现最佳的网络性能。在提出优化问题之前,鉴于数据队列和能量队列的容量有限,先给出发送功率和数据速率的限制条件。每个NB-IoT设备均由各自的电池供电,并以发送功率 $p_{d_n}$ 发送其数据符号,发送功率须满足:

$$\tau T(p_{d_n} + P_N) \leq E_{d_n}, \forall n \in \mathcal{N} \quad (4)$$

其中, $P_N$ 表示NB-IoT设备 $d_n$ 上的电路损耗, $E_{d_n}$ 表示

NB-IoT设备 $d_n$ 的电池中存储的能量。考虑到数据队列的容量限制,NB-IoT设备 $d_n$ 的数据速率须满足:

$$Q_{d_n} + \tau TR_{d_n} \leq Q_{\max}, \forall n \in \mathcal{N} \quad (5)$$

假设EH中继节点的能量队列中存储了 $E_r$ 单位采集到的能量。EH中继节点的发送功率 $p_r$ 须满足:

$$(1-\tau)T(p_r + P_R) \leq E_r \quad (6)$$

其中, $P_R$ 表示EH中继节点上的电路损耗。基于解码转发的中继策略,EH中继节点的数据速率须满足因果性的限制条件:

$$(1-\tau)TR_r = \sum_{n=1}^N B_{d_n} \quad (7)$$

此外,NB-IoT设备 $d_n$ 的数据速率须满足最小的数据速率需求 $R_{\min}$ :

$$\frac{B_{d_n}}{T} \geq R_{\min}, \forall n \in \mathcal{N} \quad (8)$$

结合上述限制条件,数据速率比例公平性最大化问题可建模为:

$$\begin{aligned} \text{P1: } & \max_{p_{d_n}, \alpha_{d_n}, s_{d_n}, p_r, \tau} \sum_{n=1}^N \log \left( \frac{B_{d_n}}{T} \right) \\ \text{s. t. } & \text{constraints (4) - (8)} \\ & 0 \leq \tau \leq 1, 0 \leq \alpha_{d_n} \leq 1, \forall n \in \mathcal{N} \\ & p_{d_n} \geq 0, \forall n \in \mathcal{N}, p_r \geq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

## 2.3 问题凸化

由于共信道干扰的存在,优化问题式(9)具有非凸性,但是通过一系列的变换和代换可以将其转化为等价的凸优化问题。

引入新的变量 $x_{d_n}$ ,其表达式为:

$$x_{d_n} = \frac{h_{d_n} p_{d_n}}{\sum_{j=n+1}^N h_{d_j} p_{d_j} + N_r}, \forall n \in \mathcal{N} \quad (10)$$

给定 $x_{d_n}$ ,可以计算得到 $p_{d_n}$ 的值:

$$p_{d_n} = \frac{x_{d_n} N_r}{h_{d_n}} \prod_{j=n+1}^N (x_{d_j} + 1), \forall n \in \mathcal{N} \quad (11)$$

此时限制条件式(4)可以改写为:

$$\frac{\tau x_{d_n} N_r}{h_{d_n}} \prod_{j=n+1}^N (x_{d_j} + 1) \leq \frac{E_{d_n}}{T} - \tau P_N, \forall n \in \mathcal{N} \quad (12)$$

引入新的变量 $s_{d_n}$ 和 $\bar{\tau}$ ,令 $s_{d_n} = Q_{d_n} + \tau TR_{d_n}$ , $\bar{\tau} = 1 - \tau$ ,此时限制条件式(5)和式(8)可以分别转化为如下的等价形式:

$$Q_{d_n} \leq s_{d_n} \leq Q_{\max}, \forall n \in \mathcal{N} \quad (13)$$

$$\alpha_{d_n}^{-1} s_{d_n}^{-1} \leq \frac{1}{TR_{\min}}, \forall n \in \mathcal{N} \quad (14)$$

在 $\bar{\tau}$ 固定的情况下,EH中继节点发送的数据量( $\bar{\tau} TR_r$ )随着EH中继节点发送功率的增加而增加。根据 $B_{d_n}$ 与 $R_r$ 之间的因果关系, $p_r$ 对 $R_r$ 的决定作用以及 $p_r$ 受到 $E_r$ 的能量限制,将 $s_{d_n}$ 代入 $B_{d_n}$ 的表达式式(2)中,结合 $R_r$ 的表达式式(3),不失最优性,限制条件式(6)和式(7)可以被转化为如下的等价形式:

$$\sum_{n=1}^N \alpha_{d_n} s_{d_n} \leq \bar{\tau} T W_r \log \left( 1 - \frac{h_r P_R}{N_s} + \frac{h_r E_r}{\tau T N_s} \right) \quad (15)$$

限制条件式(6)在 $p_r = \frac{E_r}{\tau T} - P_R$ 时起作用。类似地,限制

条件  $s_{d_n} = Q_{d_n} + \tau TR_{d_n}$  可以被等价变换为:

$$s_{d_n} \leq Q_{d_n} + \tau TW_s \log(1 + x_{d_n}), \forall n \in \mathcal{N} \quad (16)$$

至此,通过变量代换把优化问题式(9)等价变换为如下形式:

$$\begin{aligned} \text{P2: } \min_{x, \alpha, s, \tau, \bar{\tau}} & \prod_{n=1}^N \alpha_{d_n}^{-1} s_{d_n}^{-1} \\ \text{s. t. constraints} & (12) - (16) \\ & 0 \leq \tau + \bar{\tau} \leq 1 \\ & 0 \leq \alpha_{d_n} \leq 1, \forall n \in \mathcal{N}, x_{d_n} \geq 0, \forall n \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (17)$$

其中,  $\mathbf{x}, \boldsymbol{\alpha}$  和  $\mathbf{s}$  分别是  $x_{d_n}'s, \alpha_{d_n}'s$  和  $s_{d_n}'s$  的向量。由优化问题式(17)的最优解  $x_{d_n}^* 's, \alpha_{d_n}^* 's, s_{d_n}^* 's, \tau^*$  和  $\bar{\tau}^*$ , 可以进一步得到最优解  $p_{d_n}^*$  和  $p_r^*$ :

$$p_{d_n}^* = \frac{x_{d_n}^* N_r}{h_{d_n}} \prod_{j=n+1}^N (x_{d_j}^* + 1), \forall n \in \mathcal{N} \quad (18)$$

$$p_r^* = \frac{N_s}{h_r} \left( \exp \left( \frac{\sum_{n=1}^N \alpha_{d_n}^* s_{d_n}^*}{\bar{\tau}^* TW_r} \right) - 1 \right) \quad (19)$$

此时限制条件式(15)和式(16)起作用。根据式(17)一式(19),问题式(9)的最优解可以通过求解问题式(17)得到。对于优化问题式(17),有如下的定理1成立。

**定理1** 通过一对一的对数域变换,可以将优化问题式(17)变换为凸优化问题。

证明:通过对数域变换,问题式(17)的目标函数可以写为  $\sum_{n=1}^N -(\tilde{\alpha}_{d_n} + \tilde{s}_{d_n})$ , 其中  $\tilde{\alpha}_{d_n}$  和  $\tilde{s}_{d_n}$  分别表示  $\log \alpha_{d_n}$  和  $\log s_{d_n}$ 。显然  $\sum_{n=1}^N -(\tilde{\alpha}_{d_n} + \tilde{s}_{d_n})$  是凸的,得证对数域中的目标函数是凸的。下文证明在对数域中,约束条件都可以转化为凸的。令  $\tilde{\tau} = \log \tau$  和  $\tilde{x}_{d_n} = \log x_{d_n}$ , 在对数域中约束条件式(12)可以写为:

$$\begin{aligned} \tilde{\tau} + \tilde{x}_{d_n} + \sum_{j=n+1}^N \log(\exp(\tilde{x}_{d_j}) + 1) & \leq \\ \log \left( \frac{E_{d_n}}{T} - \exp(\tilde{\tau}) P_N \right) + \log \frac{h_{d_n}}{N_r}, & \forall n \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (20)$$

由于原始的约束条件式(12)是一个单项式上界不等式约束,它的对数形式(即约束条件式(20))是凸的。对数形式的约束条件式(13)和式(14)也是凸的。通过对数域变换,约束条件式(15)和式(16)可以分别改写为:

$$\begin{aligned} \log \left( \sum_{n=1}^N \exp(\tilde{\alpha}_{d_n} + \tilde{s}_{d_n}) \right) & \leq \tilde{\tau} + \log(TW_r) + \\ \log \log \left( 1 - \frac{h_r P_R}{N_s} + \frac{\exp(-\tilde{\tau}) h_r E_r}{TN_s} \right) & \end{aligned} \quad (21)$$

$$\tilde{s}_{d_n} \leq \log(Q_{d_n} + \exp(\tilde{\tau}) TW_s \log(1 + \exp(\tilde{x}_{d_n}))) \quad (22)$$

因为  $1 - \frac{h_r P_R}{N_s} \leq 1$ , 式(21)右边函数的 Hessian 矩阵是负定阵,所以函数是凹的。同时,不等式左边  $\log \left( \sum_{n=1}^N \exp(\tilde{\alpha}_{d_n} + \tilde{s}_{d_n}) \right)$  是凸的,所以这个不等式约束式(21)是凸的。优化问题式(17)剩下的3个约束条件的对数形式显然是凸的。通过对数形式的变量代换,及目标函数和约束条件一对一的对数域变换,优化问题式(17)转换为凸优化问题。定理1成立,证毕。

### 3 算法设计

通过变量替换和对数化,原本的非凸优化问题转为了凸优化问题,这为基于 KKT 条件的算法设计提供了可能。此外,KKT 条件可以保证全局最优,为后续设计的低复杂度算法性能评估提供了基准。接下来继续求解凸优化问题的最优解。基于优化问题的凸性,可以利用 KKT 条件<sup>[25]</sup> 计算得到问题的最优解。具体地,问题的拉格朗日函数为:

$$\begin{aligned} L(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\boldsymbol{\alpha}}, \tilde{\mathbf{s}}, \tilde{\tau}, \tilde{\bar{\tau}}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\phi}) & = \\ = \sum_{n=1}^N -(\tilde{\alpha}_{d_n} + \tilde{s}_{d_n}) + \sigma(\exp(\tilde{\tau}) + \exp(\tilde{\bar{\tau}}) - 1) + & \\ \sum_{n=1}^N \lambda_{d_n} (\tilde{\tau} + \tilde{x}_{d_n} + \sum_{j=n+1}^N \log(\exp(\tilde{x}_{d_j}) + 1)) - \log \left( \frac{E_{d_n}}{T} - \right. & \\ \exp(\tilde{\tau}) P_N) - \log \frac{h_{d_n}}{N_r} + \sum_{n=1}^N \mu_{d_n} (\tilde{s}_{d_n} - \log(Q_{d_n} + & \\ \exp(\tilde{\tau}) TW_s \log(1 + \exp(\tilde{x}_{d_n})))) + & \\ \sum_{n=1}^N \nu_{d_n} (\log(TR_{\min}) - \tilde{\alpha}_{d_n} - \tilde{s}_{d_n} + \boldsymbol{\xi}(\log \left( \sum_{n=1}^N \exp(\tilde{\alpha}_{d_n} + & \\ \tilde{s}_{d_n}) \right) - \tilde{\tau} - \log(TW_r) - \log \log \left( 1 + \frac{h_r E_r \exp(-\tilde{\tau})}{N_s T} - \right. & \\ \left. \frac{h_r P_R}{N_s} + \sum_{n=1}^N \phi_{d_n} (\tilde{s}_{d_n} - \log(Q_{\max})) \right)) & \end{aligned} \quad (23)$$

其中,  $\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\nu}$  和  $\boldsymbol{\phi}$  分别表示的  $\lambda_{d_n}'s, \mu_{d_n}'s, \nu_{d_n}'s$  和  $\phi_{d_n}'s$  的向量。 $\lambda_{d_n} \geq 0, \mu_{d_n} \geq 0, \nu_{d_n} \geq 0, \boldsymbol{\xi} \geq 0, \boldsymbol{\sigma} \geq 0$  和  $\phi_{d_n} \geq 0$  分别是约束条件式(20)、式(22)、 $\tilde{\alpha}_{d_n} + \tilde{s}_{d_n} \geq \log(TR_{\min})$ 、式(21)、 $\exp(\tilde{\tau}) + \exp(\tilde{\bar{\tau}}) \leq 1$  和  $\tilde{s}_{d_n} \leq \log(Q_{\max})$  对应的拉格朗日乘子。边界不等式约束  $\tilde{s}_{d_n} \geq \log(Q_{d_n})$  和  $\tilde{\alpha}_{d_n} \leq 0$  可以在 KKT 条件下得到限制。

在得到拉格朗日函数式(23)之后,分析当前问题中变量多目标多维度的优化特性。若要通过直接的一对一的稳定性等条件分析来分别计算各个变量及拉格朗日乘子的最优解,则需要相对独立地考虑各个变量及拉格朗日乘子的特性,再根据各个变量和拉格朗日乘子的特性采用不同的子算法进行求解,然后联合这些子算法,得到问题的最优解,此算法有一定的复杂性。此外,与各个变量及拉格朗日乘子特性高度相关的算法具有一定的局限性,从实践和应用上来说,当所求解的优化问题稍有变化时,原本的算法很可能失效,不利于后续维护。得益于凸优化问题的转化和 KKT 条件全局最优性的保证,本文设计了一个低复杂度的算法。通过最小化拉格朗日函数式(23)和最大化拉格朗日对偶函数  $g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\phi})$  得到资源分配问题的最优解,即

$$\begin{aligned} g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\phi}) & = \min_{\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\boldsymbol{\alpha}}, \tilde{\mathbf{s}}, \tilde{\tau}, \tilde{\bar{\tau}}} L(\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\boldsymbol{\alpha}}, \tilde{\mathbf{s}}, \tilde{\tau}, \tilde{\bar{\tau}}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\phi}) \\ \text{s. t. } & \tilde{s}_{d_n} \geq \log(Q_{d_n}), \forall n \in \mathcal{N} \\ & \tilde{\alpha}_{d_n} \leq 0, \forall n \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \max_{\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\phi}} & g(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\phi}) \\ \text{s. t. } & \forall \lambda_{d_n}, \forall \mu_{d_n}, \forall \nu_{d_n}, \boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\sigma}, \forall \phi_{d_n} \geq 0 \end{aligned} \quad (25)$$

本文提出利用联合梯度下降法和次梯度下降法的最优的资源分配算法来求解式(24)和式(25)。

首先,对拉格朗日函数  $L(\cdot)$  分别关于  $\tilde{x}_{d_n}, \tilde{\alpha}_{d_n}, \tilde{s}_{d_n}, \tilde{\tau}$  和  $\tilde{\tau}$  进行求导,得到:

$$\frac{\partial L(\cdot)}{\partial \tilde{x}_{d_n}} = \lambda_{d_n} + \frac{\exp(\tilde{x}_{d_n})}{\exp(\tilde{x}_{d_n}) + 1} \sum_{n'=1}^{N-1} \lambda_{d_{n'}} - \frac{TW_s \exp(\tilde{\tau})}{(1 + \exp(\tilde{x}_{d_n})) \log 2} \mu_{d_n} \frac{\exp(\tilde{x}_{d_n})}{Q_{d_n} + TW_s \exp(\tilde{\tau}) \log_2(1 + \exp(\tilde{x}_{d_n}))} \quad (26)$$

$$\frac{\partial L(\cdot)}{\partial \tilde{\alpha}_{d_n}} = -1 - \nu_{d_n} + \xi \frac{\exp(\tilde{\alpha}_{d_n} + \tilde{s}_{d_n})}{\sum_{n=1}^N \exp(\tilde{\alpha}_{d_n} + \tilde{s}_{d_n})} \quad (27)$$

$$\frac{\partial L(\cdot)}{\partial \tilde{s}_{d_n}} = -1 + \mu_{d_n} - \nu_{d_n} + \xi \frac{\exp(\tilde{\alpha}_{d_n} + \tilde{s}_{d_n})}{\sum_{n=1}^N \exp(\tilde{\alpha}_{d_n} + \tilde{s}_{d_n})} + \phi_{d_n} \quad (28)$$

$$\frac{\partial L(\cdot)}{\partial \tilde{\tau}} = \sum_{n=1}^N \lambda_{d_n} \frac{E_{d_n}}{E_{d_n} - TP_N \exp(\tilde{\tau})} + \sigma \exp(\tilde{\tau}) - \sum_{n=1}^N \left( \mu_{d_n} \times \frac{TW_s \log_2(1 + \exp(\tilde{x}_{d_n})) \exp(\tilde{\tau})}{Q_{d_n} + \exp(\tilde{\tau}) TW_s \log_2(1 + \exp(\tilde{x}_{d_n}))} \right) \quad (29)$$

$$\frac{\partial L(\cdot)}{\partial \tilde{\tau}} = \sigma \exp(\tilde{\tau}) - \xi + \frac{h_r E_r \exp(-\tilde{\tau})}{\xi \frac{N_s T + h_r E_r \exp(-\tilde{\tau}) - h_r P_R T}{\log \left( 1 + \frac{h_r E_r \exp(-\tilde{\tau})}{N_s T} - \frac{h_r P_R}{N_s} \right)}} \quad (30)$$

令  $[\tilde{x}^{(k-1)}, \tilde{\alpha}^{(k-1)}, \tilde{s}^{(k-1)}, \tilde{\tau}^{(k-1)}, \tilde{\tau}^{(k-1)}]$  为第  $(k-1)$  次迭代更新得到的变量,  $[\lambda^{(k-1)}, \mu^{(k-1)}, \nu^{(k-1)}, \xi^{(k-1)}, \sigma^{(k-1)}, \phi^{(k-1)}]$  为第  $(k-1)$  次迭代更新得到的拉格朗日乘子, 则变量的梯度下降方向可以表达为:

$$\Delta_{\tilde{x}_{d_n}}^{(k)} = - \frac{\partial L(\cdot)}{\partial \tilde{x}_{d_n}} \Big|_{\substack{\tilde{x}_{d_n}^{(k-1)}, \tilde{\tau}^{(k-1)}, \lambda^{(k-1)}, \nu_{d_n}^{(k-1)}}} \quad (31)$$

$$\Delta_{\tilde{\alpha}_{d_n}}^{(k)} = - \frac{\partial L(\cdot)}{\partial \tilde{\alpha}_{d_n}} \Big|_{\substack{\tilde{\alpha}_{d_n}^{(k-1)}, \tilde{s}^{(k-1)}, \nu_{d_n}^{(k-1)}, \xi^{(k-1)}}} \quad (32)$$

$$\Delta_{\tilde{s}_{d_n}}^{(k)} = - \frac{\partial L(\cdot)}{\partial \tilde{s}_{d_n}} \Big|_{\substack{\tilde{\alpha}_{d_n}^{(k-1)}, \tilde{s}^{(k-1)}, \nu_{d_n}^{(k-1)}, \mu_{d_n}^{(k-1)}, \xi^{(k-1)}, \phi_{d_n}^{(k-1)}}} \quad (33)$$

$$\Delta_{\tilde{\tau}}^{(k)} = - \frac{\partial L(\cdot)}{\partial \tilde{\tau}} \Big|_{\substack{\tilde{x}_{d_n}^{(k-1)}, \tilde{\tau}^{(k-1)}, \lambda^{(k-1)}, \mu^{(k-1)}, \sigma^{(k-1)}}} \quad (34)$$

$$\Delta_{\tilde{\tau}}^{(k)} = - \frac{\partial L(\cdot)}{\partial \tilde{\tau}} \Big|_{\substack{\tilde{\tau}^{(k-1)}, \xi^{(k-1)}, \sigma^{(k-1)}}} \quad (35)$$

其次,通过线性搜索更新拉格朗日函数式(24)中的变量  $[\tilde{x}^{(k)}, \tilde{\alpha}^{(k)}, \tilde{s}^{(k)}, \tilde{\tau}^{(k)}, \tilde{\tau}^{(k)}]$ 。具体地,得到:

$$\tilde{x}_{d_n}^{(k)} = \tilde{x}_{d_n}^{(k-1)} + \kappa^{(k)} \Delta_{\tilde{x}_{d_n}}^{(k)} \quad (36)$$

$$\tilde{\alpha}_{d_n}^{(k)} = [\tilde{\alpha}_{d_n}^{(k-1)} + \kappa^{(k)} \Delta_{\tilde{\alpha}_{d_n}}^{(k)}]_0 \quad (37)$$

$$\tilde{s}_{d_n}^{(k)} = [\tilde{s}_{d_n}^{(k-1)} + \kappa^{(k)} \Delta_{\tilde{s}_{d_n}}^{(k)}]_{\log(Q_{d_n})} \quad (38)$$

$$\tilde{\tau}^{(k)} = \tilde{\tau}^{(k-1)} + \kappa^{(k)} \Delta_{\tilde{\tau}}^{(k)} \quad (39)$$

$$\tilde{\tau}^{(k)} = \tilde{\tau}^{(k-1)} + \kappa^{(k)} \Delta_{\tilde{\tau}}^{(k)} \quad (40)$$

其中,  $[y]_a^b$  表示  $\max\{a, \min\{y, b\}\}$ 。  $\kappa^{(k)}$  表示第  $k$  次迭代的步长。当更新变量  $\tilde{x}^{(k)}, \tilde{\alpha}^{(k)}, \tilde{s}^{(k)}, \tilde{\tau}^{(k)}$  和  $\tilde{\tau}^{(k)}$  时,每次迭代的步长可以不同。

然后,用次梯度下降法更新拉格朗日乘子  $[\lambda^{(k)}, \mu^{(k)}, \nu^{(k)}, \xi^{(k)}, \sigma^{(k)}, \phi^{(k)}]$ , 表达式如下:

$$\lambda_{d_n}^{(k)} = [\lambda_{d_n}^{(k-1)} + \mathbf{l}^{(k)} (\tilde{\tau}^{(k)} + \tilde{x}_{d_n}^{(k)} + \sum_{j=n+1}^N \log(\exp(\tilde{x}_{d_j}^{(k)}) + 1) -$$

$$\log \left( \frac{E_{d_n}}{T} - \exp(\tilde{\tau}^{(k)}) P_N - \log \frac{h_{d_n}}{N_r} \right)]_0 \quad (41)$$

$$\mu_{d_n}^{(k)} = [\mu_{d_n}^{(k-1)} + \mathbf{l}^{(k)} (\tilde{s}_{d_n}^{(k)} - \log(Q_{d_n} + \exp(\tilde{\tau}^{(k)}) TW_s \log(1 + \exp(\tilde{x}_{d_n}^{(k)})))]_0 \quad (42)$$

$$\nu_{d_n}^{(k)} = [\nu_{d_n}^{(k-1)} + \mathbf{l}^{(k)} (\log(TR_{\min}) - \tilde{\alpha}_{d_n}^{(k)} - \tilde{s}_{d_n}^{(k)})]_0 \quad (43)$$

$$\xi^{(k)} = [\xi^{(k-1)} + \mathbf{l}^{(k)} (\log(\sum_{n=1}^N \exp(\tilde{\alpha}_{d_n}^{(k)} + \tilde{s}_{d_n}^{(k)})) - \tilde{\tau}^{(k)} -$$

$$\log(TW_r) - \log \log \left( 1 + \frac{h_r E_r \exp(-\tilde{\tau}^{(k)})}{N_s T} - \frac{h_r P_R}{N_s} \right)]_0 \quad (44)$$

$$\sigma^{(k)} = [\sigma^{(k-1)} + \mathbf{l}^{(k)} (\exp(\tilde{\tau}^{(k)}) + \exp(\tilde{\tau}^{(k)}) - 1)]_0 \quad (45)$$

$$\phi_{d_n}^{(k)} = [\phi_{d_n}^{(k-1)} + \mathbf{l}^{(k)} (\tilde{s}_{d_n}^{(k)} - \log(Q_{\max}))]_0 \quad (46)$$

其中,  $\mathbf{l}^{(k)}$  表示第  $k$  次迭代的步长。更新拉格朗日乘子  $\lambda^{(k)}, \mu^{(k)}, \nu^{(k)}, \xi^{(k)}, \sigma^{(k)}$  和  $\phi^{(k)}$  时,每次迭代的步长可以不同。

重复上述流程,直到截止条件成立。截止条件定义为:  $\|[\Delta_{\tilde{x}}^{(k)}, \Delta_{\tilde{\alpha}}^{(k)}, \Delta_{\tilde{s}}^{(k)}, \Delta_{\tilde{\tau}}^{(k)}, \Delta_{\tilde{\tau}}^{(k)}]\|_2 \leq \epsilon$ 。这里,  $\epsilon$  是一个足够小的正数,同时  $\Delta_{\tilde{x}}^{(k)}, \Delta_{\tilde{\alpha}}^{(k)}$  和  $\Delta_{\tilde{s}}^{(k)}$  分别是  $\Delta_{\tilde{x}_{d_n}}^{(k)}$ ,  $\Delta_{\tilde{\alpha}_{d_n}}^{(k)}$  和  $\Delta_{\tilde{s}_{d_n}}^{(k)}$  的向量。最优资源分配算法的详细步骤如图 2 所示。

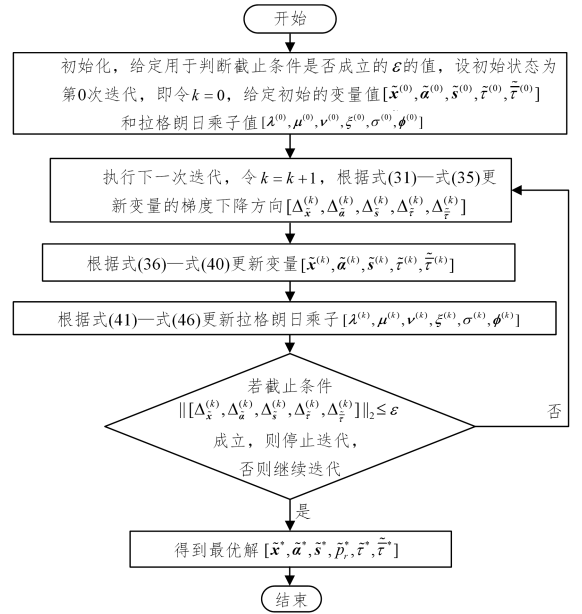


图 2 最优资源分配算法流程图

Fig. 2 Flowchart of optimal resource allocation algorithm

## 4 仿真实验及分析

### 4.1 参数设定

通过仿真对算法的性能进行分析,仿真参数设定如下。考虑一个上行的 NB-IoT 网络, EH 中继节点距汇聚节点 2000 m;  $N$  个设备均匀分布在以 EH 中继为圆心、半径为 30 m 的扇形区域内; EH 中继节点的带宽设置为 0.1 MHz; 设备共享带宽设置为 180 kHz; 室内与室外的信道衰落模型分别设置为  $(38 + 30 \log_{10}(d))$  dB ( $d$  以 m 为单位)<sup>[26-29]</sup> 和  $(128.1 + 37.6 \log_{10}(d))$  dB ( $d$  以 km 为单位)<sup>[30]</sup>; 载波频率设置为 2 GHz; 噪声的功率谱密度设置为  $-174$  dBm/Hz<sup>[31]</sup>; 最小的数据速率需求设置为 64 kbps; 时隙长度设置为 1 s; EH 中继

上收集到的能量为 2 J; EH 中继为各个 NB-IoT 设备分配的数据队列的长度为 1 Mbits; NB-IoT 设备含有的电池能量均匀分布在 0.1~0.2 J 范围内。

### 4.2 算法验证

算法的有效性分析如图 3、图 4 所示。图 3 给出了所提网络中分别包含 2 个、8 个、16 个 NB-IoT 设备时,使用本文所提算法使目标函数数据速率比例公平性最大化的收敛过程。可以看出,所提网络在 3 种不同 NB-IoT 设备数量情况下的数据速率比例公平性都随着迭代的进行而不断变化,直至相对稳定,即收敛。比较图 3 中的 3 条曲线还可以发现,随着网络中 NB-IoT 设备数量的增加,数据速率比例公平性的收敛值增大,数据速率比例公平性达到收敛值,所需的迭代次数增加。图 4 给出了在 3 种不同 NB-IoT 设备数量的网络中,使用所提算法最大化数据速率比例公平性后各个 NB-IoT 设备获得的数据速率。从图 4 (a)、图 4 (b)、图 4 (c) 中都可以看出,接入同一网络中的 NB-IoT 设备之间获得的数据速率差别很小,说明本文所提的资源分配算法有效地保证了接入同一网络的 NB-IoT 设备之间的数据速率公平性;同时,网络中接入的 NB-IoT 设备数量越多, NB-IoT 设备获得的数据速率就越低。

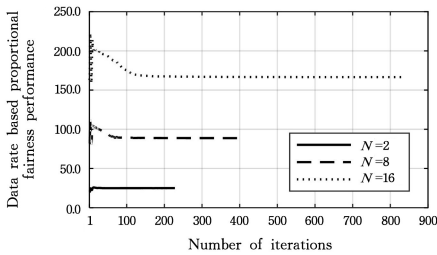


图 3 数据速率比例公平性的收敛

Fig. 3 Convergence of data rate based proportional fairness performance

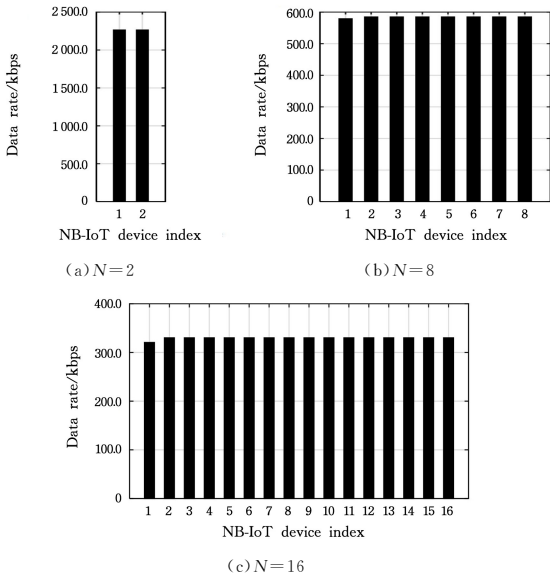


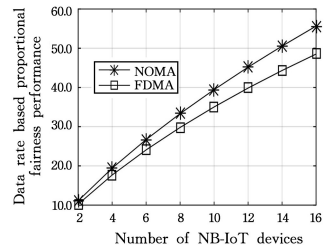
图 4 不同 NB-IoT 设备数量下 NB-IoT 设备获得的数据速率  
Fig. 4 Obtained data rate of each NB-IoT device with different number of NB-IoT devices

### 4.3 性能分析

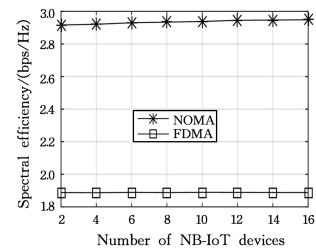
为了进一步分析 NOMA EH 中继传输方案的性能,将本文提出的传输方案与传统的传输方案作对比,进一步研究了 FDMA 的传输性能。在 FDMA 的传输方案中, NB-IoT 设备在 NOMA 中共享的带宽被平均分给各个 NB-IoT 设备。为了更全面地分析各个方案的网络性能,除了分析数据速率比例公平性,还分析了频谱效率及能效。

#### 4.3.1 NB-IoT 设备数量对性能的影响

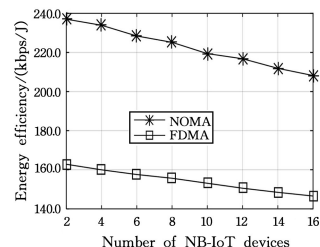
在验证算法有效性的过程中,我们发现,随着网络中 NB-IoT 设备数量的增加,数据速率比例公平性增加,但网络中的 NB-IoT 设备获得的数据速率却减小。为更好地权衡网络中 NB-IoT 设备数量对网络性能的影响,通过将 NB-IoT 设备数量从 2 变化到 16 来对网络性能进行分析,结果如图 5 所示。图 5(a)、图 5(b)显示,随着 NB-IoT 设备数量的增加,网络数据速率比例公平性及频谱效率逐渐增加。图 5(c)显示,随着 NB-IoT 设备数量的增加,网络能效下降。这主要是因为随着 NB-IoT 设备数量的增加,频谱效率增加, EH 中继的承载压力增大,受 EH 中继采集能量的限制, EH 中继对单个 NB-IoT 设备提供的承载支持减少,单个 NB-IoT 设备获得的数据速率减小,导致能效降低,网络能效下降。分别比较图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)中 NOMA 和 FDMA 的性能可以看出, NOMA 的网络性能始终优于 FDMA。与 FDMA 相比, NOMA 的数据速率比例公平性平均提升 11.9%, 频谱效率平均提升 55.4%, 网络能效平均提升 44.1%。



(a) Data rate based proportional fairness performance



(b) Spectral efficiency

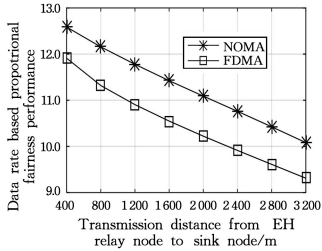


(c) Energy efficiency

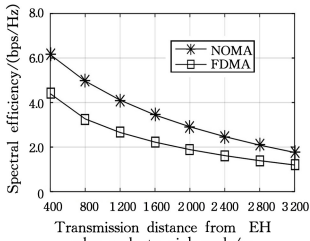
图 5 变化 NB-IoT 设备数量情况下的性能分析  
Fig. 5 Performance vs. number of NB-IoT devices

#### 4.3.2 EH 中继节点到汇聚节点的传输距离对性能的影响

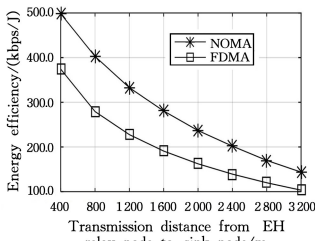
图 6 给出了变换 EH 中继节点到汇聚节点的传输距离情况下的性能分析。传输距离从 400m 变化到 3200m。从图 6 可以看出,随着 EH 中继节点到汇聚节点的传输距离的增加,NOMA 的数据速率比例公平性、频谱效率及能效都逐渐下降。这是由于传输距离的增加,使 EH 中继节点到汇聚节点的信道增益减小,降低了 EH 中继节点的数据速率,从而削弱了网络的性能。同样地,比较图 6(a)~图 6(c)中 NOMA 与 FDMA 的性能,结果表明,与 FDMA 相比,NOMA 的数据速率比例公平性平均提升 7.9%,频谱效率平均提升 50.7%,网络能效平均提升 42.8%。



(a) Data rate based proportional fairness performance



(b) Spectral efficiency



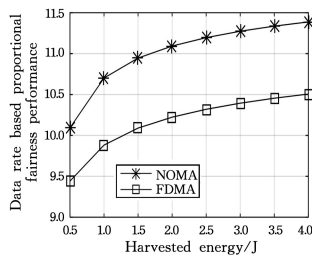
(c) Energy efficiency

图 6 变化 EH 中继节点到汇聚节点的传输距离情况下的性能分析

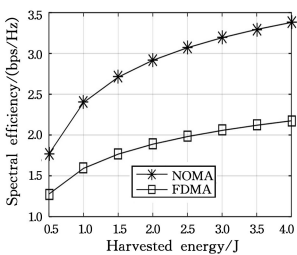
Fig. 6 Performance vs. transmission distance EH relay to sink node

#### 4.3.3 EH 中继采集能量对性能的影响

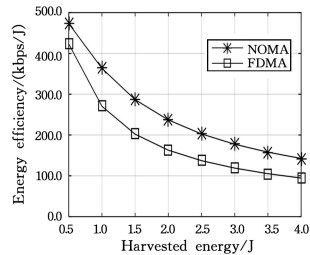
图 7 给出了变化 EH 中继采集能量情况下的性能分析,EH 中继采集能量从 0.5J 变化到 4J。



(a) Data rate based proportional fairness performance



(b) Spectral efficiency



(c) Energy efficiency

图 7 变化 EH 中继采集能量情况下的性能分析

Fig. 7 Performance vs. harvested energy

从图 7(a)和图 7(b)可以看出,EH 中继采集能量越多,EH 中继的数据速率越大,网络的数据速率比例公平性及频谱效率越高。从图 7(b)还可以看出,频谱效率相对于 EH 中继采集能量的增加是呈对数型增长的,即 EH 中继采集能量的增加不能线性地增加网络吞吐量。从数据速率公式也可以看出,数据速率是随着功率呈对数增长的,因此如图 7(c)所示,随着 EH 中继采集能量的增加,网络能效下降。由于 EH 中继通过采集利用环境中的能量为网络供能,因此可以依靠这一优势,通过增加 EH 中继采集能量来提升网络的数据速率比例公平性和频谱效率,而不会造成额外的负担。与传统的供能方式相比,其提升了网络的应对能力。此外,比较图 7 中 NOMA 与 FDMA 的性能可得,NOMA 的数据速率比例公平性、频谱效率和网络能效较 FDMA 平均提升了 7.9%、50.7%和 42.8%。

**结束语** 本文研究了 NOMA 和 EH 中继在 NB-IoT 网络中的应用,提出了 NOMA EH 中继 NB-IoT 网络。基于该网络模型,本文首先建立了以 NB-IoT 设备数据速率比例公平性为优化目标,同时兼顾了 NB-IoT 设备最小数据速率、能量约束及 EH 中继的能量和数据缓存约束的传输功率、数据调度以及时隙调度多维资源分配优化模型。然后,通过变量转化,将该非凸优化问题等价转化为凸优化问题,并基于拉格朗日函数和 KKT 条件提出了资源分配的最优化算法。仿真结果表明,本文所提算法可以有效地获得最佳资源分配方案,并且通过性能分析可知,与传统的正交多址接入相比,NOMA 能够有效提升 EH 中继 NB-IoT 网络的性能。

当前工作主要考虑了单 EH 中继情况下的 NOMA NB-IoT 网络。随着 NB-IoT 设备数量的增加,NB-IoT 设备之间的共信道干扰增大,进而影响了 NOMA 的性能提升。在未来的研究工作中,我们将研究多 EH 中继 NOMA NB-IoT 网络,在优化发射功率和时隙调度的同时,联合优化设备分组以保证 NOMA NB-IoT 网络的高性能。

## 参考文献

- [1] CHANAK P, BANERJEE I. Congestion Free Routing Mechanism for IoT-Enabled Wireless Sensor Networks for Smart Healthcare Applications [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2020, 66(3): 223-232.
- [2] LI Z C, XIE B, ZHANG W X. Region Segmentation Algorithm for Mobile Internet of Things Based on Multi-Layered Perception [J]. Computer Engineering, 2021, 47(9): 51-58.
- [3] ZHAO J, ZHANG X T, LI J M, et al. Research Review of Crowd Intelligence 2.0 [J]. Computer Engineering, 2019, 45(12): 1-7.
- [4] CHEN S, XU H, LIU D, et al. A Vision of IoT: Applications, Challenges, and Opportunities With China Perspective [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2014, 1(4): 349-359.
- [5] AL-FUQUHA A, GUIZANI M, MOHAMMADI M, et al. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2347-2376.
- [6] PALATTELLA M R, DOHLER M, GRIECO A, et al. Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business

- Models [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(3): 510-527.
- [7] LI D Y, YANG G, QIAN B. Research on Architecture of Internet of Things [J]. *Computer Science*, 2018, 45(S2): 27-31.
- [8] CHETTRI L, BERA R. A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(1): 16-32.
- [9] WANG Y E, LIN X, ADHIKARY A, et al. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(3): 117-123.
- [10] BALLERINI M, POLONELLI T, BRUNELLI D, et al. NB-IoT Versus LoRaWAN: An Experimental Evaluation for Industrial Applications [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(12): 7802-7811.
- [11] VERMA S, KAUR S, KHAN M A, et al. Toward Green Communication in 6G-Enabled Massive Internet of Things [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(7): 5408-5415.
- [12] WU Q, LI G Y, CHEN W, et al. An Overview of Sustainable Green 5G Networks [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2017, 24(4): 72-80.
- [13] LIU Y, QIN Z, ELKASHLAN M, et al. Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(12): 2347-2381.
- [14] HU S, CHEN X, NI W, et al. Modeling and Analysis of Energy Harvesting and Smart Grid-Powered Wireless Communication Networks: A Contemporary Survey [J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2020, 4(2): 461-496.
- [15] ULUKUS S, YENER A, ERKIP E, et al. Energy Harvesting Wireless Communications: A Review of Recent Advances [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(3): 360-381.
- [16] KU M, LI W, CHEN Y, et al. Advances in Energy Harvesting Communications: Past, Present, and Future Challenges [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(2): 1384-1412.
- [17] LI C R, LI A. Energy Efficient Routing Algorithm for Linear WSN with Solar Energy Harvesting [J]. *Computer Engineering*, 2020, 46(9): 178-185.
- [18] CHEN X, JIA R, NG D W K. The Application of Relay to Massive Non-Orthogonal Multiple Access [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(11): 5168-5180.
- [19] LIU H, DING Z, KIM K J, et al. Decode-and-Forward Relaying for Cooperative NOMA Systems With Direct Links [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(12): 8077-8093.
- [20] XU Y J, LI G Q, CHEN Q B, et al. Robust resource allocation algorithm for heterogeneous wireless network with SWIPT [J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(2): 84-96.
- [21] QI Q, CHEN X. Wireless Powered Massive Access for Cellular Internet of Things With Imperfect SIC and Nonlinear EH [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(2): 3110-3120.
- [22] WANG D, QU Y, FU Y, et al. A Non-orthogonal Random Access Scheme Based on NB-IoT [J]. *Wireless Personal Communications*, 2020, 111(4): 2625-2639.
- [23] RESHMA K, BABU A V. Throughput Analysis of Energy Harvesting Enabled Incremental Relaying NOMA System [J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(7): 1419-1423.
- [24] TSE D, VISWANATH P. *Fundamentals of Wireless Communication* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 229-234.
- [25] VANDENBERGHE L, BOYD S. *Convex optimization* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 243-246.
- [26] 3GPP. TR 36. 814 V9. 2. 0; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects [EB/OL]. (2017-03). [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36\\_series/36.814/36814-920.zip](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.814/36814-920.zip).
- [27] European Commission. COST Action 231: Digital mobile radio towards future generation systems; Final Report [M]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1999: 115-133.
- [28] HATA M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1980, 29(3): 317-325.
- [29] MOTLEY A J, KEENAN J M P. Personal communication radio coverage in buildings at 900 MHz and 1700 MHz [J]. *Electronics Letters*, 1988, 24(12): 763-764.
- [30] 3GPP. TR 25. 942 V15. 0. 0; Radio Frequency (RF) system scenarios [EB/OL]. (2018-06). [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/25\\_series/25.942/25942-f00.zip](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/25_series/25.942/25942-f00.zip).
- [31] MOLISCH A F. *Wireless Communication* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 28-29.



**SHEN Jia-fang**, born in 1996, postgraduate. Her main research interests include wireless communication and networking.



**QIAN Li-ping**, born in 1981, Ph.D, professor, Ph.D supervisor, is a member of China Computer Federation. Her main research interests include wireless communication and networking, IoT and vehicle network.

(责任编辑:李亚辉)