

缓存辅助的协作 NOMA 携能传输

杨龙, 赵丽, 周雨晨, 贺冰涛, 陈健

(西安电子科技大学通信工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 为提升多用户无线携能通信系统吞吐量, 设计了一种缓存辅助的协作非正交多址接入 (NOMA) 携能传输方案, 在平均/峰值功耗、用户速率、缓存队列稳定性等约束条件下, 最大化系统平均吞吐量。为降低优化复杂度, 引入 Lyapunov 方法, 将长期平均优化问题转化为一组时间离散的子优化问题, 并提出了一种自适应传输与资源分配优化算法, 能根据时变信道/缓存状态, 动态优化工作模式、用户调度和功率分配。仿真结果表明, 与已有方案相比, 所提方案可显著提升平均吞吐量, 且实现时延与吞吐量间性能的折中。

关键词: 协作非正交多址接入; 缓存辅助; 能量收集; 用户调度

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2023107

Buffer-aided cooperative NOMA with power transfer

YANG Long, ZHAO Li, ZHOU Yuchen, HE Bingtao, CHEN Jian

School of Telecommunication Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China

Abstract: To improve the throughput of multiuser simultaneous wireless information and power transfer systems, a buffer-aided cooperative non-orthogonal multiple access scheme with power transfer was designed to maximize the average throughput under the constraints of average/peak power, user's rate, and the buffer stability. To reduce the optimization complexity, the Lyapunov's method was introduced to convert the long-term average optimization problem into a series of time-discrete subproblems, and an adaptive transmission and resource allocation optimization algorithm was proposed, where the working mode, the user scheduling and the power allocation were dynamically optimized according to the time-varying channel/buffer state. Simulation results demonstrate that compared with the existing schemes, the proposed scheme can significantly enhance the average throughput whilst achieving the tradeoff between the delay and throughput.

Keywords: cooperative non-orthogonal multiple access, buffer-aided, energy harvesting, user scheduling

0 引言

非正交多址接入 (NOMA, non-orthogonal multiple access) 技术利用相同的时间和频率资源为多个用户提供服务, 可实现大规模接入、高系统吞

吐量以及高频谱利用率, 被认为是 5G 关键技术之一^[1-3]。其实现方式是在功率域区分多用户信息, 由源端为用户分配不同的功率, 将信息叠加发送, 用户通过串行干扰消除 (SIC, successive interference cancellation) 解码自己的信息。

收稿日期: 2023-01-03; 修回日期: 2023-05-16

通信作者: 赵丽, zhaolijingyu@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61971320, No.62201421); 陕西省重点产业创新链基金资助项目 (No.2023-ZDLGY-50); 陕西省自然科学基金基础研究计划基金资助项目 (No.2021JQ-206); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目 (No.2020A1515110084)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61971320, No.62201421), The Shaanxi Key Industrial Innovation Chain Project (No.2023-ZDLGY-50), The Natural Science Basic Research Plan of Shaanxi Province (No.2021JQ-206), The Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No.2020A1515110084)

为提升 NOMA 系统的吞吐量及传输可靠性, 协作通信机制已被引入 NOMA 系统, 其形式可分为两类, 即中继协作 NOMA^[4-9] 和用户协作 NOMA^[10-14]。中继协作 NOMA 须部署中继节点, 并由中继节点转发远用户信息, 从而提升远用户信噪比^[4]。针对中继协作 NOMA, 文献[5-6]研究了多中继场景的中继选择策略, 通过机会式中继选择, 获取空间分集增益, 提升中继协作 NOMA 传输可靠性。在此基础上, 文献[7-9]进一步将数据缓存引入中继协作 NOMA, 通过实时调度中继缓存/转发行为, 提升中继协作 NOMA 的传输时间自由度, 进一步改善其可靠性。另一方面, 在 NOMA 系统中, 多用户信息流在源端叠加发送, 近用户在 SIC 过程中可天然获取远用户期望信息, 因此, 可由近用户充当中继节点向远用户转发信息, 规避中继节点的部署开销, 从而实现用户协作 NOMA^[10]。针对多用户协作 NOMA, 文献[11-12]根据信道状态信息 (CSI, channel state information) 调度用户, 实现了完全分集, 提高了频谱效率。文献[13]进一步研究了用户的公平性调度, 同时保证完全分集和用户公平调度。文献[14]研究了 CSI 反馈信息对用户协作 NOMA 系统的影响, 通过深度学习提升 CSI 反馈准确性, 保证系统分集增益。

在用户协作 NOMA 中, 近用户通常没有稳定的能量供给, 持续的协作转发导致自身能量快速消耗。因此, 可引入能量收集 (EH, energy harvesting) 技术, 解决近用户能耗不足的问题^[15-23]。在新兴物联网与无线传感器中, 无线携能通信 (SWIPT, simultaneous wireless information and power transfer) 技术使设备从周围射频信号中获取能量, 有效延长设备使用寿命。文献[16-17]论述了使用时间切换 (TS, time switching) 与功率分割 (PS, power splitting) 实现 SWIPT, 将接收信号从时域或功率域分割后, 分别用于能量收集和信码解码。文献[18-19]将 SWIPT 应用于中继协作 NOMA 和用户协作 NOMA, 相比应用于传统正交多址接入 (OMA, orthogonal multiple access) 中继网络, NOMA 系统可以显著降低网络的中断概率。文献[20]在近用户处考虑能量缓存, 收集到的能量可以存储后再使用, 提升远用户处吞吐量。文献[21-22]研究了数据能量双缓存辅助的中继协作 NOMA 系统, 结果表明, 在时延允许的情况下可实现更低的能耗和更高的吞吐量。

由上述理论可知, 现有用户协作 NOMA-SWIPT

研究大多针对用户调度问题。由于协作用户没有考虑缓存, 传输过程只能局限于顺序执行源端到近用户传输和近用户到远用户传输, 导致系统分集潜力未被完全开发。随着硬件发展, 现有设备大多具备缓存能力, 因此考虑在近用户处引入数据缓存, 增加传输自由度; 考虑引入能量缓存, 收集来自源端与近用户发送信号的能量^[23], 提高能量利用率。综上所述, 研究数据-能量双缓存辅助协作 NOMA 携能通信系统的用户调度及资源分配问题, 对时延不敏感协作 NOMA 网络具有重要的理论价值。本文主要的研究工作概括如下。

1) 针对具有能量收集的多用户通信系统, 设计了一种缓存辅助的协作 NOMA 携能传输方案, 由能量受限的近用户协助基站与远用户之间的通信。根据传输方案特性, 给出数据和能量缓存队列统一表达, 建立最大化系统平均吞吐量优化问题, 在满足平均/峰值功耗、用户速率以及缓存队列稳定性等约束条件下, 联合优化功率分配、近用户调度和工作模式选择, 保证系统长期稳定运行下性能效果的最大化。

2) 利用 Lyapunov 方法, 将长期优化问题拆分为一系列时间离散子优化问题, 提出了一种自适应传输及资源分配优化算法。根据信道状态和缓存状态, 利用变量等价替换、连续凸规划等方式求解, 实时调整工作模式、用户调度和功率分配, 来获得更高的吞吐量。此外, 给出了算法的最优性、计算复杂度、信令开销等性能分析。

3) 仿真结果表明, 通过控制参数 V , 系统平均吞吐量可达到渐近最优解, 同时, 系统平均吞吐量与平均时延存在内在权衡折中。此外, 与传统用户调度策略和无缓存辅助的协作 NOMA 方案相比, 本文方案可显著提高系统平均吞吐量, 验证了本文优化算法的有效性。

1 系统模型及传输方案

1.1 系统模型

如图 1 所示, 考虑了一个带有数据-能量缓存辅助的协作 NOMA 系统。该系统包含一个单天线基站 (BS, base station) 发送节点和一个单天线远用户 (FU, far user), 由于建筑物遮挡, BS 与 FU 之间没有直传链路, 因此寻找到 K 个单天线近用户 (NU, near user) 协作完成传输, 近用户个数集合表示为 $A_{\text{NU}} = \{1, 2, \dots, K\}$ 。其中, 近用户具有到 BS 和 FU 的链路, BS 通过 NOMA 技术向提供协作的近

用户 $NU_k (k \in A_{NU})$ 发送叠加信息, NU_k 解码转发绕开遮挡物, 实现 BS 对 FU 的服务。此外, 每个近用户都配有数据缓存和能量缓存。数据缓存可以存储成功解码的 FU 数据, 考虑到数据缓存足够大, 通过合理调度不会产生数据积压。能量缓存可以存储近用户从射频信号中收集的能量, 考虑到能量缓存可储能的峰值最大为 \hat{E} , 能量可以连续存储和消耗。将传输时间按时隙划分, 每个时隙索引为 i , $i \in \{0, 1, \dots, N-1\}$, N 表示整个传输过程的总时隙数; 每个时隙数据传输的持续时间为 T 。第 i 个时隙数据队列和能量队列状态分别用 $Q_k(i)$ 、 $E_k(i)$ 表示。系统内所有节点都工作在半双工模式下。

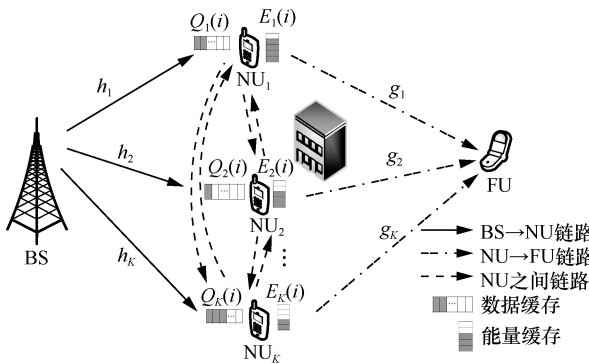


图1 缓存辅助的协作 NOMA 系统

假设 $h_k(i)$ 和 $g_k(i)$ 分别表示 $BS \rightarrow NU_k$ 和 $NU_k \rightarrow FU$ 链路的信道增益, 同时考虑大尺度衰落和小尺度衰落, 分别定义为 $h_k(i) = \frac{\hat{h}_k(i)}{\sqrt{L_0 d_{Sk}^m}}$ 和 $g_k(i) = \frac{\hat{g}_k(i)}{\sqrt{L_0 d_{kD}^m}}$ 。其

中, $\hat{h}_k(i)$ 和 $\hat{g}_k(i)$ 分别表示 $BS \rightarrow NU_k$ 和 $NU_k \rightarrow FU$ 链路的小尺度衰落, d_{Sk} 和 d_{kD} 分别表示对应传输距离, m 表示路径损耗指数, L_0 表示参考距离为 1 m 时的路径损耗。每个接收机处具有均值为 0、方差为 σ^2 的加性白高斯噪声。本文考虑一种集中式自适应传输方案, 假设基站作为中心控制节点, 每个时隙传输前获取所有节点之间的信道状态信息、各近用户的数据缓存状态信息 (DBSI, data buffer state information) 和能量缓存状态信息 (EBSI, energy buffer state information), 自适应确定传输方案, 并通知所有近用户^[22]。

1.2 传输方案

本文基站到远用户之间的协作传输共包含 2 种工作模式: 基站发送模式和近用户转发模式。在每个时隙, 基站会根据 CSI、DBSI 和 EBSI 决定传输

工作模式, 使用二进制变量 $q_l(i) \in \{0, 1\}, \forall l \in \{1, 2\}$ 分别表示第 i 个时隙中 2 种工作模式的选择结果。若执行基站发送模式, 则 $q_1(i) = 1$, 否则 $q_1(i) = 0$; 若执行近用户转发模式, 则 $q_2(i) = 1$, 否则 $q_2(i) = 0$ 。此外, 每个时隙只能执行一种工作模式, 即 $q_1(i) + q_2(i) = 1$ 。执行每种工作模式的详细内容、每个时隙中缓存队列动态特性的统一表达在下文中给出。

1) 基站发送模式

在基站发送模式中, 假设近用户 NU_{k^*} 被调度接收信息, BS 发送该用户和 FU 的叠加信息, NU_{k^*} 将成功解码的 FU 信息存储到数据缓存 Q_{k^*} 中, 未被调度的近用户则收集来自 BS 发送信号中的能量, 存储到能量缓存中用于未来转发。因此, 在近用户 NU_{k^*} 处接收到的信号为

$$y_{k^*}^{q_1}(i) = \sqrt{\alpha(i)P_S^{k^*}} h_{k^*}(i) x_{FU}(i) + \sqrt{\beta(i)P_S^{k^*}} h_{k^*}(i) x_{NU_{k^*}}(i) + n_0(i) \quad (1)$$

其中, $x_{NU_{k^*}}(i)$ 和 $x_{FU}(i)$ 分别为发送给 NU_{k^*} 和 FU 的信号, $P_S^{k^*}(i)$ 为本时隙 BS 的发射功率, $\alpha(i)$ 和 $\beta(i)$ 为功率分配因子, $n_0(i)$ 为加性白高斯噪声。功率分配因子满足

$$\alpha(i) + \beta(i) = 1 \quad (2)$$

NU_{k^*} 在收到 BS 的信号后, 首先解码关于 FU 的信息, 并存入数据缓存 Q_{k^*} 中, 再通过串行干扰消除解码自身信息。定义 $R_{x_0}^{k^*}(i)$ 和 $R_{x_1}^{k^*}(i)$ 分别表示在第 i 个时隙中 BS 发送给 NU_{k^*} 和 FU 的可达速率, 表示为

$$R_{x_0}^{k^*}(i) = \text{lb} \left(1 + \frac{P_S^{k^*}(i) \alpha(i) |h_{k^*}(i)|^2}{P_S^{k^*}(i) \beta(i) |h_{k^*}(i)|^2 + \sigma^2} \right) \quad (3)$$

$$R_{x_1}^{k^*}(i) = \text{lb} \left(1 + \frac{P_S^{k^*}(i) \beta(i) |h_{k^*}(i)|^2}{\sigma^2} \right) \quad (4)$$

其中, $h_{k^*}(i)$ 为从 BS 到 NU_{k^*} 的信道增益。

未被调度的近用户经过这一时隙的储能, 收集到的能量可表示为

$$E_u(i) = \eta P_S^k(i) |h_u(i)|^2 T, \quad \forall u \in A_{NU}, u \neq k^* \quad (5)$$

其中, $\eta \in [0, 1]$ 表示能量转换效率。

2) 近用户转发模式

在近用户转发模式中, 调度近用户 NU_{k^*} 开始转发, 利用其数据缓存内的数据和已存储的能量, 将信息转发给 FU, 未被调度的近用户收集来自

NU_{k⁺} 发送信号的能量, 存储在能量缓存中。因此, FU 处接收到的信号可表示为

$$y_D^{q_2}(i) = \sqrt{P_{k^+}(i)g_{k^+}(i)x_{k^+}(i) + n_0(i)} \quad (6)$$

其中, $P_{k^+}(i)$ 表示近用户 NU_{k⁺} 的发送功率, $g_{k^+}(i)$ 表示从 NU_{k⁺} 到 FU 的信道增益, $x_{k^+}(i)$ 表示 NU_{k⁺} 发送给 FU 的信号。

定义 R_{k^+} 表示在第 i 时隙中 NU_{k⁺} 转发给 FU 的可达速率, 表示为

$$R_{k^+}(i) = \min \left\{ C_{k^+D}(i), \frac{Q_{k^+}(i)}{T} \right\} \quad (7)$$

其中, $C_{k^+D}(i)$ 为第 i 个时隙中 NU_{k⁺} 到 FU 的信道容量, 表示为

$$C_{k^+D}(i) = \text{lb} \left(1 + \frac{P_{k^+}(i) |g_{k^+}(i)|^2}{\sigma^2} \right) \quad (8)$$

本时隙 NU_{k⁺} 转发消耗的能量可表示为

$$E_T^{k^+}(i) = P_{k^+}(i)T \quad (9)$$

未被调度的近用户经过这一时隙的储能, 从 NU_{k⁺} 发送信号收集到的能量可表示为

$$E_v(i) = \eta P_{k^+}(i) |h_{k^+,v}(i)|^2 T, \forall v \in A_{\text{NU}}, v \neq k^+ \quad (10)$$

其中, $h_{k^+,v}(i)$ 表示从 NU_{k⁺} 到 NU_v 的信道增益。

3) 缓存队列动态特性

本文为每个近用户都配备数据缓存和能量缓存, 传输过程中 2 种工作模式对数据队列和能量队列都有影响。因此本节将每个时隙所有近用户的数据队列和能量队列状态给出统一表示。

首先, 定义 $\mathbf{m}(i) = (m_1(i), m_2(i), \dots, m_K(i))$, $m_k(i) \in \{0, 1\}$ 表示各近用户在基站发送模式中是否被调度, 其中, $m_k(i) = 1$ 表示第 k 个近用户 NU_k 被调度接收消息。此外, 每个时隙只能有一个近用户被调度, 即 $\sum_{k \in A_{\text{NU}}} m_k(i) = 1$ 。近用户接收到 FU 的实际比特量定义为 $\mathbf{a}(i) = (a_1(i), a_2(i), \dots, a_K(i))$, 其中, 第 k 个近用户收到 FU 的实际比特量 $a_k(i)$ 为

$$a_k(i) = q_1(i)m_k(i)R_{x0}^k(i)T, \forall k, i \quad (11)$$

同理, 定义 $\mathbf{n}(i) = (n_1(i), n_2(i), \dots, n_K(i))$, $n_k(i) \in \{0, 1\}$ 表示各近用户在近用户转发模式中是否被调度, 其中, $n_k(i) = 1$ 表示 NU_k 被调度向 FU

转发信息, 未被调度的近用户从 NU_k 发送的信号中收集能量。每个时隙中只能有一个近用户启动发送, 即 $\sum_{k \in A_{\text{NU}}} n_k(i) = 1$ 。近用户 NU_k 转发的实际比特

量定义为 $\mathbf{b}(i) = (b_1(i), b_2(i), \dots, b_K(i))$, 其中, 第 k 个近用户转发的实际比特量 $b_k(i)$ 为

$$b_k(i) = q_2(i)n_k(i)R_k(i)T, \forall k, i \quad (12)$$

每个时隙结束后, 各近用户的数据队列可写为

$$Q_k(i+1) = \max \{ Q_k(i) + a_k(i) - b_k(i), 0 \}, \forall k, i \quad (13)$$

由式(5)、式(9)和式(10)可得, 每个时隙中第 k 个近用户消耗的能量和收集到的能量分别表示为

$$E_{Tk}(i) = q_2(i)n_k(i)P_k(i)T, \forall k, i \quad (14)$$

$$E_{Hk}(i) = q_1(i)(1 - m_k(i))\eta P_S(i) |h_k(i)|^2 T +$$

$$q_2(i)(1 - n_k(i))\eta P_{k^+}(i) |h_{k^+,k}(i)|^2 T, \forall k, i \quad (15)$$

则每个时隙后, 各近用户的能量队列可写为

$$E_k(i+1) = \min \left\{ (E_k(i) + E_{Hk}(i) - E_{Tk}(i))^+, \hat{E} \right\}, \forall k, i \quad (16)$$

2 缓存感知的自适应传输方案设计

2.1 问题描述

传输过程中考虑功率分配优化, 在基站发送模式中, 每个时隙中 BS 的发射功率限制应该满足

$$0 \leq P_S(i) \leq \hat{P}_S \quad (17)$$

其中, \hat{P}_S 为每个时隙中 BS 的峰值发射功率, 同时其长期平均发射功率应该满足

$$\overline{P}_S = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} q_1(i)P_S(i) \leq \overline{P}_S^{\max} \quad (18)$$

其中, \overline{P}_S^{\max} 为 BS 长期平均发射功率允许的最大值。

在近用户转发模式中, 用户的发射功率应小于对应能量队列中所存储的能量, 即

$$0 \leq P_k(i) \leq \frac{E_k(i)}{T}, \forall k, i \quad (19)$$

同时 BS 长期平均发射功率应满足

$$\overline{P}_k = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} q_2(i)n_k(i)P_k(i) \leq \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{E_{Hk}(i)}{T}, \forall k, i \quad (20)$$

为了保证数据缓存中的数据都能被顺利转发, 需满足队列的流入流出保持稳定, 即各近用户数据的长期平均到达量要小于或等于长期平均离开量

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \mathbb{E}[a_k(i)] \leq \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \mathbb{E}[b_k(i)], \forall k, i \quad (21)$$

为保障各近用户参与协作时自身速率需求, $R_{x_1}^k(i)$ 需满足

$$R_{x_1}^k(i) \geq \gamma_{x_1}^k, \quad \forall k, i \quad (22)$$

其中, 不同的近用户对不同的速率要求, 即 $\gamma = (\gamma_{x_1}^1, \gamma_{x_1}^2, \dots, \gamma_{x_1}^K)$ 。

同时, 考虑传输过程中式(2)、式(11)、式(12)、式(14)、式(15)等式约束, 最大化系统平均吞吐量可以描述为问题 P_1

$$\begin{aligned} P_1: & \max_{\substack{\mathbf{P}(i), \alpha(i), \beta(i), \\ \mathbf{q}(i), \mathbf{m}(i), \mathbf{n}(i)}}} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} \mathbb{E}[a_k(i)] \\ \text{s.t.} & \text{式(2), 式(11), 式(12), 式(14), 式(15), 式(17) ~ 式(22)} \\ & \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} n_k(i) = 1, \quad n_k(i) \in \{0, 1\} \\ & \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} m_k(i) = 1, \quad m_k(i) \in \{0, 1\} \\ & q_1(i) + q_2(i) = 1, \quad q_l(i) \in \{0, 1\} \\ & \forall k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}, \forall l \in \{1, 2\} \end{aligned} \quad (23)$$

优化变量包括基站和各近用户的功率分配 $\mathbf{P}(i) = (P_S(i), P_1(i), P_2(i), \dots, P_K(i))$, 基站处 NOMA 叠加信号的功率分配因子 $\alpha(i)$ 和 $\beta(i)$, 工作模式选择变量 $\mathbf{q}(i) = (q_1(i), q_2(i))$, 以及近用户是否被调度变量 $\mathbf{m}(i)$ 和 $\mathbf{n}(i)$ 。可以观察到, 问题 P_1 是一个长期平均优化问题, 优化目标和约束中的式(18)、式(20)和式(21)都是长期表达, 其中极限和期望实际不可得, 问题难以直接求解。这类优化问题可以使用 Lyapunov 方法, 将长期平均优化问题转化为一列时间离散子优化问题进行求解计算。

2.2 自适应传输与资源分配优化

首先, 根据式(18), 定义 $Z_S(i)$ 为基站平均功耗虚拟队列, 其中 $Z_S(0) = 0$, 则虚拟队列的动态特性为

$$Z_S(i+1) = \max\{Z_S(i) + q_1(i)P_S(i) - \overline{P_S}^{\max}, 0\}, \forall i \quad (24)$$

根据实际的数据队列、能量队列和构造的虚拟队列, 可以得到引理 1。

引理 1 $\forall k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}$, 如果所有的队列

$$Q_k(i), E_k(i), Z_S(i) \text{ 都稳定时, 即 } \frac{\lim_{N \rightarrow \infty} \mathbb{E}\{Q_k(N)\}}{N} = 0,$$

$$\frac{\lim_{N \rightarrow \infty} \mathbb{E}\{E_k(N)\}}{N} = 0, \quad \frac{\lim_{N \rightarrow \infty} \mathbb{E}\{Z_S(N)\}}{N} = 0, \text{ 长期约束}$$

式(18)、式(20)和式(21)得到满足。

证明 详见附录 1。

根据上述队列, 使用 Lyapunov 优化方法解决问题 P_1 , 引入 Lyapunov 二次函数 L , 来度量当前时隙的队列积压

$$L(\Theta(i)) = \frac{\psi}{2} \sum_{k=1}^K (\hat{E} - E_k(i))^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K Q_k^2(i) + \frac{1}{2} Z_S^2(i) \quad (25)$$

其中, $\Theta(i) = [\mathbf{E}(i); \mathbf{Q}(i); Z_S(i)]$ 为广义队列, 表示每个时隙所有队列的状态; ψ 为能量队列的加权非负因子, 保证式(25)中各部分为相同数量级。

Lyapunov 漂移表示相邻两时隙的 L 的变化, 可表示为

$$\Delta(\Theta(i)) = \mathbb{E}[L(\Theta(i+1)) - L(\Theta(i)) | \Theta(i)] \quad (26)$$

其中, 期望是为了消除 CSI 和相同控制决策的随机性。为保证各队列的稳定性和能耗约束, 应最小化每个时隙的 Lyapunov 漂移; 同时考虑优化目标最大化系统吞吐量, 给每个时隙的 Lyapunov 漂移加惩罚项, 将优化问题 P_1 转变为最小化 Lyapunov 漂移加惩罚

$$\Delta(\Theta(i)) - V \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} \mathbb{E}[a_k(i) | \Theta(i)] \quad (27)$$

其中, V 为非负权重因子。

引理 2 Lyapunov 漂移加惩罚具有上界

$$\begin{aligned} & \Delta(\Theta(i)) - V \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} \mathbb{E}[a_k(i) | \Theta(i)] \leq \\ & B - V \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} \mathbb{E}[a_k(i) | \Theta(i)] + \\ & \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} Q_k(i) \mathbb{E}[a_k(i) - b_k(i) | \Theta(i)] + \\ & \psi \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} (\hat{E} - E_k(i)) \mathbb{E}[E_{Tk}(i) - E_{Hk}(i) | \Theta(i)] + \\ & Z_S(i) \mathbb{E}[q_1(i)P_S(i) - \overline{P_S}^{\max} | \Theta(i)] \end{aligned} \quad (28)$$

其中, B 为常数, 与 V 互相独立, 且 B 满足

$$\begin{aligned} B \geq & \frac{\psi}{2} \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} \mathbb{E}[E_{Tk}^2(i) + E_{Hk}^2(i) | \Theta(i)] + \\ & \frac{1}{2} \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} \mathbb{E}[a_k^2(i) + b_k^2(i) | \Theta(i)] + \\ & \frac{1}{2} \mathbb{E}[(q_1(i)P_S(i))^2 + (\overline{P_S}^{\max})^2 | \Theta(i)] \end{aligned} \quad (29)$$

证明 详见附录 2。

根据式(28), 在每个时隙 $\Theta(i)$ 和 CSI 确定的情况下, 通过求解最小 Lyapunov 漂移加惩罚的上界, 将优化问题转变为 P_2

$$\begin{aligned}
 P_2 : \min_{\substack{P(i), \alpha(i), \beta(i), \\ q(i), m(i), n(i)}}} & -V \sum_{k \in A_{\text{NU}}} a_k(i) + \sum_{k \in A_{\text{NU}}} Q_k(i) a_k(i) - \\
 & \sum_{k \in A_{\text{NU}}} Q_k(i) b_k(i) + Z_S(i) (q_1(i) P_S(i) - \overline{P_S}^{\max}) + \\
 & \psi \sum_{k \in A_{\text{NU}}} (\hat{E} - E_k(i)) (E_{\text{Tr}}(i) - E_{\text{Hk}}(i)) \\
 \text{s.t. 式(2), 式(11), 式(12), 式(14), 式(15), 式(17), 式(19), 式(22)} & \\
 & \sum_{k \in A_{\text{NU}}} n_k(i) = 1, \quad n_k(i) \in \{0, 1\} \\
 & \sum_{k \in A_{\text{NU}}} m_k(i) = 1, \quad m_k(i) \in \{0, 1\} \\
 & q_1(i) + q_2(i) = 1, \quad q_l(i) \in \{0, 1\} \\
 & \forall k \in A_{\text{NU}}, \forall l \in \{1, 2\}, i \in \{0, 1, \dots, N-1\}
 \end{aligned} \tag{30}$$

从式(30)可以看出, P_2 是一个混合整数非凸问题, 由于本文方案每个时隙只能执行一种工作模式, 因此可以根据二进制变量 $q(i)$ 将问题拆分, 分别针对 2 种工作模式下的优化问题进行求解, 再根据对应优化目标自适应地选择具体执行的工作模式。

1) 基站发送模式下的功率分配和近用户调度
如果本时隙选择基站发送模式, 则 $q_1(i) = 1$,

$q_2(i) = 0$, 优化问题转变为

$$\begin{aligned}
 P_3 : \min_{\substack{m(i), P_S(i), \\ \alpha(i), \beta(i)}}} & \sum_{k \in A_{\text{NU}}} (Q_k(i) - V) a_k(i) + \\
 & Z_S(i) P_S(i) - \psi \sum_{k \in A_{\text{NU}}} (\hat{E} - E_k(i)) E_{\text{Hk}}(i) \\
 \text{s.t. 式(2), 式(11), 式(15), 式(17), 式(22)} & \\
 & \sum_{k \in A_{\text{NU}}} m_k(i) = 1, \quad m_k(i) \in \{0, 1\}, \forall k \in A_{\text{NU}}
 \end{aligned} \tag{31}$$

由于近用户调度方案只存在有限种可能, 因此可以分别考虑每个近用户被选择时的优化问题, 即对应的 $m_k(i) = 1$, 将问题转变为近用户的调度。假设近用户 NU_{k^*} 被选定时, 优化问题转变为如下功率分配问题

$$\begin{aligned}
 P_{3.1} : \min_{\substack{P_S(i), \\ \alpha(i), \beta(i)}}} & (Q_{k^*}(i) - V) \text{lb} \left(1 + \frac{P_S(i) \alpha(i) |h_{k^*}(i)|^2}{P_S(i) \beta(i) |h_{k^*}(i)|^2 + \sigma^2} \right) T - \\
 & \psi \sum_{k \in A_{\text{NU}}} (\hat{E} - E_k(i)) (1 - m_k(i)) \eta P_S(i) |h_k(i)|^2 T + \\
 & Z_S(i) P_S(i) \\
 \text{s.t. 式(2), 式(11), 式(15), 式(17), 式(22)} & \\
 & m_{k^*}(i) = 1
 \end{aligned} \tag{32}$$

由于 $P_{3.1}$ 仍是一个非凸问题, 通过功率与速率之间的等价替代

$$P_S = \frac{1}{|h_k|^2} \left(2^{R_{x_0}^k + R_{x_1}^k} \sigma^2 - \sigma^2 \right) \tag{33}$$

用传输速率 $R_{x_0}^{k^*}$ 、 $R_{x_1}^{k^*}$ 替代 P_S 、 α 、 β , 并令

$$\Delta_2^{k^*} = \frac{Z_S(i) \sigma^2}{|h_{k^*}(i)|^2} - \psi \sum_{k \in A_{\text{NU}}} (\hat{E} - E_k(i)) (1 - m_k(i)) \eta \left(\frac{\sigma^2}{|h_{k^*}(i)|^2} \right) \cdot |h_k(i)|^2 T, \text{ 将问题转变为}$$

$$\begin{aligned}
 P_{3.2} : \min_{R_{x_0}^{k^*}(i), R_{x_1}^{k^*}(i)} & (Q_{k^*}(i) - V) R_{x_0}^{k^*}(i) T + \Delta_2^{k^*} 2^{R_{x_0}^{k^*}(i) + R_{x_1}^{k^*}(i)} \\
 \text{s.t.} & 2^{R_{x_0}^{k^*}(i) + R_{x_1}^{k^*}(i)} \sigma^2 - \sigma^2 \leq \hat{P}_S |h_{k^*}(i)|^2 \\
 & R_{x_0}^{k^*}(i) \geq 0, \quad R_{x_1}^{k^*}(i) \geq \gamma_{x_1}^{k^*} \\
 & m_{k^*}(i) = 1
 \end{aligned} \tag{34}$$

当 $\Delta_2^{k^*} \geq 0$ 时, $P_{3.2}$ 为凸问题, 使用凸优化工具求解。当 $\Delta_2^{k^*} < 0$ 时, 目标函数为 2 个凸函数之差, 采用连续凸近似 (SCA, successive convex approximation) 方法, 对 $2^{R_{x_0}^{k^*}(i) + R_{x_1}^{k^*}(i)}$ 用一阶泰勒展开近似替代, 得到 $P_{3.2}$ 目标函数的上界, 将问题重写为

$$\begin{aligned}
 P_{3.3} : \min_{R_{x_0}^{k^*}(i), R_{x_1}^{k^*}(i)} & (Q_{k^*}(i) - V) R_{x_0}^{k^*}(i) T + \Delta_2^{k^*} \left[2^{\overline{R}_{x_0}^{k^*} + \overline{R}_{x_1}^{k^*}} + \right. \\
 & \left. (\ln 2) 2^{\overline{R}_{x_0}^{k^*} + \overline{R}_{x_1}^{k^*}} (R_{x_0}^{k^*}(i) - \overline{R}_{x_0}^{k^*}) + \right. \\
 & \left. (\ln 2) 2^{\overline{R}_{x_0}^{k^*} + \overline{R}_{x_1}^{k^*}} (R_{x_1}^{k^*}(i) - \overline{R}_{x_1}^{k^*}) \right] \\
 \text{s.t.} & 2^{R_{x_0}^{k^*}(i) + R_{x_1}^{k^*}(i)} \sigma^2 - \sigma^2 \leq \hat{P}_S |h_{k^*}(i)|^2 \\
 & R_{x_0}^{k^*}(i) \geq 0, \quad R_{x_1}^{k^*}(i) \geq \gamma_{x_1}^{k^*} \\
 & m_{k^*}(i) = 1
 \end{aligned} \tag{35}$$

接下来随机给出 $\overline{R}_{x_0}^{k^*}$ 和 $\overline{R}_{x_1}^{k^*}$ 初始值, 迭代求解更新 $R_{x_0}^{k^*}$ 和 $R_{x_1}^{k^*}$, 逐步收紧上界直到收敛, 作为最终求解结果。每次迭代 $\overline{R}_{x_0}^{k^*}$ 和 $\overline{R}_{x_1}^{k^*}$ 由上一轮迭代的求解结果 $R_{x_0}^{k^*}$ 和 $R_{x_1}^{k^*}$ 给出。

由于每个时隙仅调度一个近用户, 因此

可以通过以下选择策略确定最佳的近用户

$$k^* = \arg \max_k \left[1 - \frac{Q_k(i)}{V} \right] R_{x_0}^k(i) T - \frac{Z_S(i)}{V} (P_S^k(i) - \overline{P_S}^{\max}) + \frac{1}{V} \psi \eta P_S^k(i) \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} (\hat{E} - E_k(i)) (1 - m_k(i)) |h_k(i)|^2 T, \\ m_{k^*}(i) = 1, m_u(i) = 0, \quad \forall u \in \mathcal{A}_{\text{NU}}, u \neq k^*, P_S^*(i) = P_S^{k^*}(i), \\ \alpha^*(i) = \frac{2^{R_{x_1}^{k^*}(i)} (2^{R_{x_0}^{k^*}(i)} - 1) \sigma^2}{P_S^{k^*}(i) |h_{k^*}(i)|^2}, \beta^*(i) = \frac{(2^{R_{x_1}^{k^*}(i)} - 1) \sigma^2}{P_S^{k^*}(i) |h_{k^*}(i)|^2} \quad (36)$$

当近用户的 $Q_k(i)$ 更小并且其余用户收集的能量更多时, 被选择接收的概率更大, 既保证了各近用户之间较公平的数据缓存使用率, 又保证了其他近用户后续转发信息时的能量消耗需求。

2) 近用户转发模式下的功率分配和近用户调度

如果本时隙选择近用户转发模式, 则 $q_2(i) = 1$, $q_1(i) = 0$, 优化问题转变为

$$P_4: \min_{n(i), P(i)} - \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} Q_k(i) b_k(i) + \psi \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} (\hat{E} - E_k(i)) [E_{T_k}(i) - E_{H_k}(i)] \\ \text{s.t. 式(12), 式(14), 式(15), 式(19)} \\ \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} n_k(i) = 1, n_k(i) \in \{0, 1\}, \forall k \in \mathcal{A}_{\text{NU}} \quad (37)$$

与基站发送模式下求解相同, 分别考虑每个近用户被选择时的优化问题, 即对应的 $n_k(i) = 1$, 优化问题 P_4 转变为近用户的调度。假定近用户 NU_{k^*} 被选定时, 优化问题可写为

$$P_{4.1}: \min_{P_{k^*}(i)} - Q_{k^*}(i) \text{lb} \left(1 + \frac{P_{k^*} |g_{k^*}(i)|^2}{\sigma^2} \right) T + \psi (\hat{E} - E_{k^*}(i)) P_{k^*}(i) T - \psi \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} (\hat{E} - E_k(i)) (1 - n_k(i)) \eta P_{k^*}(i) |h_{k^*,k}(i)|^2 T \\ \text{s.t. } n_{k^*}(i) = 1 \\ 0 \leq P_{k^*}(i) \leq \frac{E_{k^*}(i)}{T} \quad (38)$$

其中, 目标函数为 2 个凸函数相加, 问题 $P_{4.1}$ 为凸问题, 令 $\Delta_3^+ = \psi T \left[(\hat{E} - E_{k^*}(i)) - \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} (\hat{E} - E_k(i)) \eta \cdot (1 - n_k(i)) |h_{k^*,k}(i)|^2 \right]$, 可得最优发射功率为

$$P_{k^*}(i) = \begin{cases} \left(\frac{Q_{k^*}(i) T}{\ln 2 \Delta_3^+} - \frac{\sigma^2}{|g_{k^*}(i)|^2} \right)^+, \Delta_3^+ > 0 \\ \frac{E_{k^*}(i)}{T}, \Delta_3^+ \leq 0 \end{cases} \quad (39)$$

同样, 由于每个时隙仅调度一个近用户转发, 因此最佳选择策略为

$$k^+ = \arg \max_k Q_k(i) R_k(i) T - \psi (\hat{E} - E_k(i)) P_k(i) T + \psi \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} (\hat{E} - E_k(i)) (1 - n_k(i)) \eta P_k(i) |h_{k^+,k}(i)|^2 T, \\ n_{k^+}(i) = 1, n_v(i) = 0, \quad \forall v \in \mathcal{A}_{\text{NU}}, v \neq k^+, \\ P_{k^+}(i) = P_{k^*}(i) \quad (40)$$

当近用户的 $Q_k(i)$ 和 $E_k(i)$ 更大, 并且其余用户收集的能量更多时, 被选择转发的概率更大, 既保证了数据队列不会长期积压, 又保证了传输能耗需求。

3) 工作模式选择

根据 2 个子问题分析, 相应工作模式下的功率分配和近用户调度得到解决。根据问题 P_2 , 应选择使两时隙 Lyapunov 漂移加惩罚函数改变更小的工作模式, 因此, 每个时隙工作模式可以表示为

$$q_l^*(i) = \begin{cases} 1, A_o(i) = \arg \max_{l=1,2} A_l(i) \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (41)$$

其中, $A_1(i)$ 和 $A_2(i)$ 分别表示执行基站发送模式和近用户转发模式的加权功耗与传输速率之和, 对应各模式的优化目标, 分别表示为

$$A_1(i) = \left[1 - \frac{Q_{k^*}(i)}{V} \right] R_{x_0}^{k^*} T - \frac{Z_S(i)}{V} (P_S^{k^*}(i) - \overline{P_S}^{\max}) + \frac{\psi \eta}{V} P_S^{k^*}(i) \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} (\hat{E} - E_k(i)) (1 - m_k(i)) |h_k(i)|^2 T \quad (42) \\ A_2(i) = Q_{k^*}(i) R_{k^*}(i) T - \psi (\hat{E} - E_{k^*}(i)) P_{k^*}(i) T + \psi \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} (\hat{E} - E_k(i)) (1 - n_k(i)) \eta P_{k^*}(i) |h_{k^*,k}(i)|^2 T \quad (43)$$

从工作模式选择过程中可以看出, 若执行基站发送模式, 被调度的近用户的数据队列增大, 未被调度的近用户的能量队列增大。随着数据队列和能量队列的增加, 系统倾向于执行近用户转发模式, 被调度的近用户数据队列和能量队列都会减小, 使系统返回执行基站发送模式。由此, 2 种模式自适应交替执行, 可以保证系统中数据队列与能量队列的稳定流入流出。

综上所述, 为了清楚地说明本文方案, 算法 1 给出了具体实现的伪代码。算法主要包含 3 个部分, 分别为初始化 (步骤①)、联合优化功率分配、近用户调度和工作模式选择 (步骤③~步骤⑭) 以及队列更新 (步骤⑮)。

算法 1 自适应传输与资源分配优化算法

输入 $K, N, \hat{P}_S, \overline{P}_S^{\max}, \hat{E}, V, T$

输出 $\mathbf{P}^*(i), \alpha^*(i), \beta^*(i), \mathbf{m}^*(i), \mathbf{n}^+(i), \mathbf{q}^*(i)$

- ① 初始化: $i=0, Q_k(0)=0, E_k(0)=0, Z_S(0)=0$
- ② for $i=0:N-1$
- ③ 获取各节点间的 CSI、各近用户的 DBSI 和 EBSI;
- ④ 求解问题 P_3 , 其步骤如下
- ⑤ for $k=1:K$
- ⑥ 求解问题 $P_{3.2}$, 获得各近用户可达的传输速率 $R_{x0}^k(i)、R_{x1}^k(i)$;
- ⑦ end for
- ⑧ 根据式(36), 获得近用户调度 $\mathbf{m}^*(i)$ 及功率分配 $P_S^*(i)、\alpha^*(i)、\beta^*(i)$;
- ⑨ 求解问题 P_4 , 其步骤如下
- ⑩ for $k=1:K$
- ⑪ 根据式(39), 获得各近用户的发射功率 $P_k(i)$;
- ⑫ end for
- ⑬ 根据式(40), 获得近用户调度 $\mathbf{n}^+(i)$ 及功率分配 $P_k^+(i)$;
- ⑭ 根据式(41), 获得本时隙执行的工作模式 $\mathbf{q}^*(i)$;
- ⑮ 根据式(13)、式(16)、式(24)更新数据队列、能量队列、虚拟队列;
- ⑯ end for

2.3 性能分析

1) 算法性能分析

针对上述自适应传输方案给出系统平均吞吐量的上限分析和平均缓存队列积压的上限分析。

定理 1 对于任意的 $V > 0, \epsilon > 0$, 所有队列的稳定性可以得到保证。同时, 平均吞吐量和平均缓存队列长度满足

$$R^* - \frac{B}{V} \leq \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} \mathbb{E}[a_k(i)] \leq R^* \quad (44)$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} \mathbb{E}[Q_k(i)] \leq \frac{B}{\epsilon} + \frac{V}{\epsilon} [R^* - \Psi(\epsilon)] \quad (45)$$

其中, R^* 是理论上最优的平均吞吐量, $\Psi(\epsilon) < R^*$ 。

证明 详见附录 3。

从定理 1 中可以观察到, 对于任意的 $V > 0$,

本文方案保证了式(28)的 Lyapunov 漂移条件, 从而保证各队列的稳定性。

同时, 本文方案的平均时延通过利特尔定理^[24]得出

$$\bar{D} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} Q_k(i)}{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} a_k(i)} \leq \frac{BV + V^2(R^* - \Psi(\epsilon))}{\epsilon(R^*V - B)} \quad (46)$$

从式(46)可以看出, 如果 V 足够大, 则 $R^*V \gg B$, 平均时延可表示为 $\bar{D} \leq \frac{B + V(R^* - \Psi(\epsilon))}{\epsilon R^*}$, 其与 V 成正比。当 V 增大

时, 平均时延线性增大。由定理 1 中式(44)可知, 系统理论最优值与实际平均吞吐量的差值减小。因此, 当 V 足够大时, 能以平均时延为代价, 使系统平均吞吐量渐近达到理论最优值, 即本文方案需要在平均吞吐量和平均时延之间进行 $\left[O\left(\frac{1}{V}\right), O(V)\right]$

的权衡折中。

2) 算法复杂度分析

在算法 1 中, 基站发送模式通过式(36)在 K 维向量中选择最大值作为近用户调度结果, 其中功率分配问题通过求解问题 P_3 获得。在求解过程中将非凸问题转化, 部分情况下问题为凸问题求解, 若使用常见的内点法求解, 计算复杂度为 $O\left(K \log\left(\frac{1}{\theta}\right)\right)$, 其中 θ 为计算精确度; 部分情况下使用连续凸近似求解, 计算复杂度为 $O(KI)$, 其中 I 为迭代次数^[25]。近用户转发模式通过式(40)得出具体转发的近用户, 功率分配由式(39)直接给出, 计算复杂度为 $O(K)$ 。综上, 本文方案整体计算复杂度为 $O\left(N\left(K \log\left(\frac{1}{\theta}\right) + K\right)\right)$, 这取决于系统运行时长 N 、近用户数量 K 和计算精确度 θ 。

3) 信令开销分析

算法 1 步骤③中系统内各节点间的 CSI、各近用户的 DBSI 和 EBSI, 可由基站作为中心控制节点, 利用信道互易性获取, 具体实现方式如下^[22]。

① CSI 获取。每个 NU 依次广播导频信息, BS 可以获得 BS 与每个 NU 之间的 CSI, FU 可以获得所有 NU 与 FU 之间的 CSI, 未广播的 NU 可以获得该广播 NU 与自身之间的 CSI。

② 报告过程。每个 NU 依次向基站报告自身的 DBSI、EBSI 及自身与其余 NU 之间的 CSI; 随后, FU 向第一个广播导频的 NU 报告所有 NU 与 FU 之间的 CSI, 并由其转发给 BS。

③ 决策通知。BS 运行算法 1, 并将算法 1 输出的调度决策广播给所有 NU。

综上所述, 设 T_0 、 T_1 和 T_2 分别表示 CSI 获取、报告过程和决策通知所需的通信时间。在 CSI 获取过程中, 共需要 K 个导频信息传输, 设 l_p 为导频序列长度, 则 $T_0 = \frac{Kl_p}{W}$, 其中, W 为带宽。设 l_C 、 l_D 和 l_E 为 CSI、DBSI 和 EBSI 的量化比特, 信令信道的平均传输速率为 C 比特/信道, 则 $T_1 = \frac{K((K-1)l_C + l_D + l_E) + 2Kl_C}{CW}$ 。设决策通知中工作模式选择量化为 l_q , 近用户转发功率量化为 l_r , 则 $T_2 = \frac{l_q + l_r}{CW}$ 。因此, 调度过程所需的通信总开销可以表示为

$$T_0 + T_1 + T_2 = \frac{Kl_p}{W} + \frac{K[(K+1)l_C + l_D + l_E] + l_q + l_r}{CW} \sim O(K^2) \quad (47)$$

得到信令交互所需要的时间后, 每个时隙的持续时间为 $T_0 + T_1 + T_2 + T$, 其中数据传输时间 T 保持不变, 系统实际有效平均吞吐量和平均时延分别为

$$\tilde{a} = \frac{T}{T_0 + T_1 + T_2 + T} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} a_k(i) \quad (48)$$

$$\tilde{D} = \frac{T_0 + T_1 + T_2 + T}{T} \bar{D} = \left(1 + \frac{T_0 + T_1 + T_2}{T}\right) \bar{D} \quad (49)$$

从式(47)可以看出, 信令开销主要与近用户数量 K 有关, 其中 $T_0 \sim O(K)$, $T_1 \sim O(K^2)$, T_2 为固定开销。因此, 当系统中近用户数量较小时, $T_0 + T_1 + T_2 \ll T$, 信令开销对系统吞吐量的影响较小, 即 $\tilde{a} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} a_k(i)$ 。但随着系统中近用户数量不断增加, 信令开销时间在每个时隙占比增加, 对系统平均吞吐量的影响增大, 系统实际有效平均吞吐量小于计算结果。

3 仿真分析

本节通过蒙特卡罗仿真对本文方案进行性能

评估, 验证了方案的有效性。然后与最佳能量中继选择 (BERS, best energy relay selection) [23]、最大最小中继选择 (MNRS, max-min relay selection) [26] 和最大链路中继选择 (MLRS, max-link relay selection) [27] 这 3 种传输方案进行了比较。在后续所有仿真场景中, BS 与 FU 之间的距离 D 为 100 m, 分别位于 (0,0) 和 (0,100) 坐标处, 近用户随机分布在以 (0,50) 为圆心、25 m 为半径的圆内。除另外设定, 设路径损耗指数 $m=2.7$, 所有节点的噪声方差 $\sigma^2 = -70$ dBm, 基站的平均发射功率 $\bar{P}_S^{\max} = 30$ dBm, 峰值发射功率 $\hat{P}_S = 2\bar{P}_S^{\max}$, 能量转换效率 $\eta=0.5$, 近用户可储能的最大值为 $\hat{E}=1$ J, 能量队列的加权非负因子 $\psi=10^4$ 。所有的仿真为运行 10 万个时隙的结果, 每个时隙持续时长 $T=3$ 。

图 2 描述了当 NU 分别为 3 和 5 时, V 与平均数据队列长度、平均时延的关系。从图 2 可以看出, 平均数据队列长度和平均时延都与 V 保持正比关系逐渐增加, 印证了式(45)和式(46)的结论。此外, NU=5 时的平均数据队列长度和平均时延都小于 NU=3 的情况。这是因为 NU 越多, 可使用数据队列的自由度越高, 执行近用户转发模式的概率变大, 因此平均数据队列长度越短, 进而使平均时延越小。

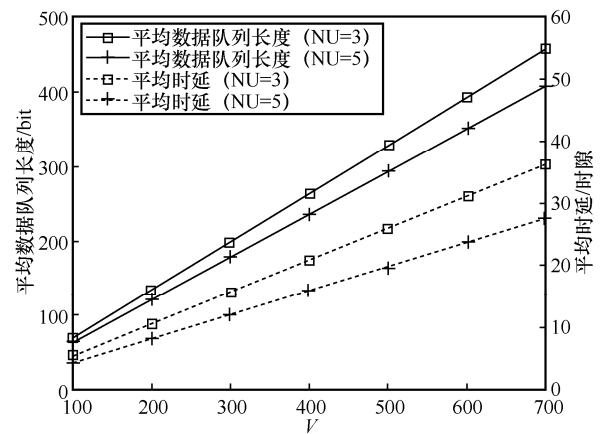


图 2 V 与平均数据队列长度、平均时延的关系

图 3 描述了当 NU 分别为 3、4、5 时, V 与平均吞吐量的关系。从图 3 可以看出, 随着 V 的增加, 系统平均吞吐量先快速增长, 接着增速变缓, 逐渐趋于平稳, 印证了式(44)中的结论, 理论最优值与实际可实现平均吞吐量之差与 V 成反比关系, 即随着 V 的增加, 实际的平均吞吐量接近理论最优值,

增速变缓。此外, NU 越多, 系统平均吞吐量增速变换对应的 V 值越大, 当 NU=3 时, $V > 50$ 后的系统平均吞吐量已经趋于平稳, 但当 NU=4 和 NU=5 时, 分别在 $V > 70$ 和 $V > 90$ 后系统平均吞吐量增速才变缓。这是因为当 V 值相同时, NU 越多, 平均数据队列长度越短, 不易发生数据堵塞, 可以允许更大的 V 值提高系统平均吞吐量, 因此增速变缓对应的 V 值更大。

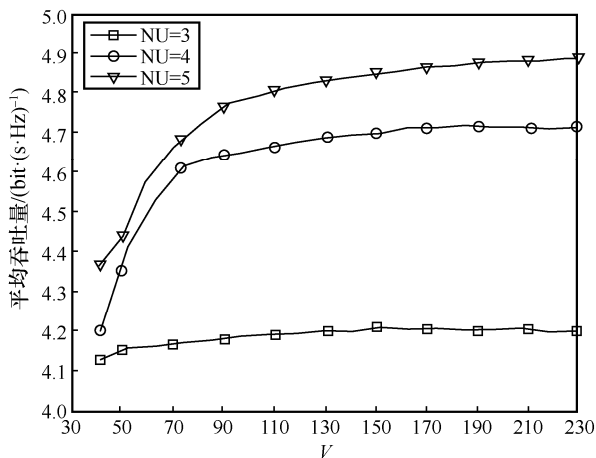


图 3 V 与平均吞吐量的关系

图 4 描述了当 NU 分别为 3、4、5 时, 平均时延与平均吞吐量之间的关系。其中, V 从 40 开始取值, 从左至右逐渐增加, 相邻两点的 V 相差 10。从图 4 可以看出, 较大的 V 值引入了较高的平均时延, 但对应的系统平均吞吐量也会更大, 同时, 当 V 大于 100 时, 系统平均吞吐量增速变缓, 渐近逼近理论最优值, 但平均时延增速保持不变。这符合 2.3 节所述的算法自适应传输与资源分配性能分析, 即 V 的取值可在平均吞吐量和平均时延之间实现 $\left[O\left(\frac{1}{V}\right), O(V) \right]$ 的权衡折中。因此, 在高平均吞吐量场景下, 应选择较大的 V 值, 而在低时延场景下, 则应选择较小的 V 值, 同时 V 的取值仅在目标应用场景改变时需要更新。此外, 从图 4 还可以看出, 在不同 NU 下, 若达到的系统平均吞吐量相同, NU 越多, 平均时延越小。这是因为 NU 越多, 平均数据队列长度越短, 根据式(46)结论可得, 平均时延越小。

图 5 描述了系统运行中数据队列的动态特性, 分别给出了 $V = 40, 100, 200$ 时的数据, 为了方便观察, 其中每个点是取 100 次平均所得到的。从图 5

可以看出, V 的增加使数据队列的长度增加并保持稳定, 但是始终保持在 V 值以下。这表明本文方案可以控制队列在有限的缓存区内运作, 不会造成队列无限长积压的问题。此外, 从图 5 可以看出, 随着 V 从 40 增加到 200, 队列的活动区间逐渐增加。根据式(28)可知, 在优化目标中 V 越大, 关于最大化平均吞吐量的惩罚项比重越大, 连续多次执行同一种模式的概率越大, 因此队列的整体活动区间变大, 需要更长的时间维持队列稳定。

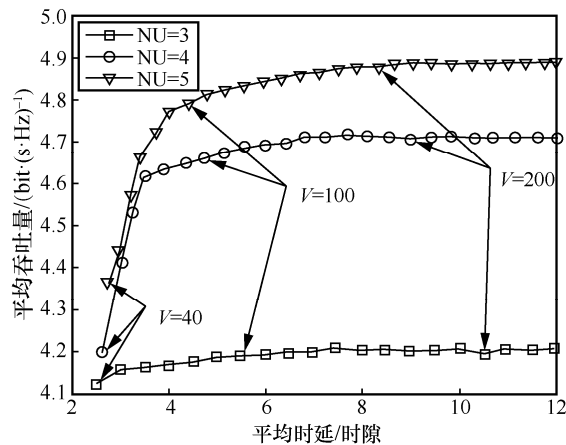


图 4 平均时延与平均吞吐量之间的关系

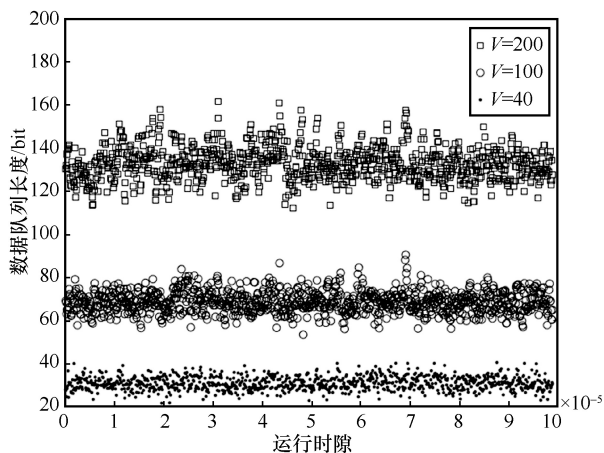


图 5 数据队列的动态特性

将本文方案与以下 3 种传输方案进行了性能对比。

- 1) BERS 方案, 根据 $k^* = \arg \max_{k \in A_{\text{NU}}} \{E_k\}$ 确定调度的近用户, 并在接下来的 2 个时隙中顺序执行基站发送模式和近用户转发模式。
- 2) MNRS 方案, 根据 $k^* = \arg \max_{k \in A_{\text{NU}}} \{\min\{R_{k_0}^k, R_k\}\}$ 确定近用户调度, 并在接下来的 2 个时隙中顺序执行基站发送模式和近用户转

发模式。

3) MLRS 方案, 根据 $k^* = \arg \max_{k \in A_{\text{NU}}} \{U_{k \in A_{\text{NU}}} R_{x_0}^k, U_{k \in A_{\text{NU}}} R_k\}$ 确定每个时隙调度的近用户, 并执行最大速率对应的工作模式。

图 6 描述了本文方案 and 对比方案系统平均吞吐量与近用户数量的关系。从图 6 可以看出, 随着近用户数量的增加, 系统平均吞吐量增加, 但增加趋势逐渐变缓。这是因为随着近用户数量的不断增加, 虽然提供协作的近用户选择变多, 但达到相似效果的近用户数量也会更多, 此时选择哪个近用户产生的效果类似, 因此系统平均吞吐量增长幅度减缓, 逐渐达到饱和。此外, 本文方案的系统平均吞吐量都优于现有的传输方案。相较 MNRS 方案, 本文方案由于加入缓存辅助, 在传输中基站发送与近用户转发的占比可以自由调配, 不需要在连续 2 个时隙中顺序执行 2 种工作模式, 因此系统平均吞吐量显著提升。相比 BERS 与 MLRS 方案, 本文方案性能更优是由于综合考虑了 CSI、DBSI 和 EBSI, 在数据队列积压较大同时能量队列充足时, 本文方案的近用户转发模式被更多次执行, 队列的流出促进更多的数据流入数据缓存中, 进而提升吞吐量。

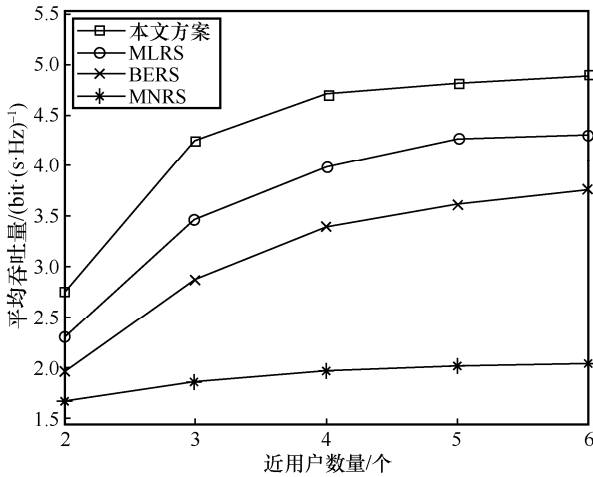


图 6 本文方案 and 对比方案系统平均吞吐量与近用户数量的关系

图 7 描述了本文方案 and 对比方案系统平均吞吐量与 BS 峰值发射功率的关系。从图 7 可以看出, 随着 BS 允许的峰值发射功率越大, 本文方案系统的平均吞吐量越高, 同时对比其他 3 种传输方案有明显性能增益。这表明若实现相同的系统平均吞吐量, 本文方案消耗的能量更少。

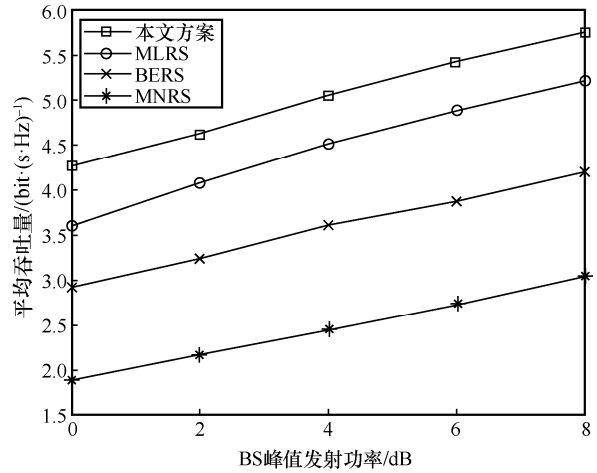


图 7 本文方案 and 对比方案系统平均吞吐量与 BS 峰值发射功率的关系

4 结束语

本文针对具有能量收集的多用户通信系统进行了研究, 设计了一种缓存辅助的协作 NOMA 携能传输方案, 考虑平均和峰值功耗约束、用户速率要求和缓存队列稳定性约束下最大化系统平均吞吐量。利用 Lyapunov 方法将原问题转化拆分, 提出自适应传输与资源分配优化算法, 基于每个时隙 CSI、DBSI 和 EBSI, 实时调整功率分配、近用户调度和工作模式。本文方案鼓励所有近用户参与协作, 为近用户考虑多种能量收集来源, 在解决协作能耗问题的同时提升系统平均吞吐量。分析结果表明, 本文方案可以显著提高系统平均吞吐量, 并在平均时延和平均吞吐量之间实现权衡折中。

附录 1 引理 1 证明

根据式(13)、式(16)、式(24)中队列的动态特性, 可以得到

$$Q_k(i+1) \geq Q_k(i) + a_k(i) - b_k(i), \forall k, i \quad (50)$$

$$E_k(i+1) \leq E_k(i) + E_{Hk}(i) - E_{Tk}(i), \forall k, i \quad (51)$$

$$Z_S(i+1) \geq Z_S(i) + q_1(i)P_S(i) - \overline{P_S}^{\max}, \forall i \quad (52)$$

将式(50)~式(52)从 $i=0$ 加到 $i=N-1$, 再除以 N 并取极限, 可得到

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{Q_k(N) - Q_k(0)}{N} \geq \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \mathbb{E}[a_k(i)] - \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \mathbb{E}[b_k(i)], \forall k \quad (53)$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{E_k(N) - E_k(0)}{N} \leq - \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} q_2(i)n_k(i)P_k(i) + \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{E_{Hk}(i)}{T}, \forall k \quad (54)$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{Z_S(N) - Z_S(0)}{N} \geq \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} q_1(i) P_S(i) - \overline{P_S}^{\max} \quad (55)$$

在不失一般性情况下, 假设初始值 $Q_k(0)$ 、 $E_k(0)$ 、

$Z_S(0)$ 都为 0, 如果队列是稳定的, 即 $\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\mathbb{E}\{Q_k(N)\}}{N} = 0$,

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\mathbb{E}\{E_k(N)\}}{N} = 0, \quad \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\mathbb{E}\{Z_S(N)\}}{N} = 0, \text{ 代入式(50)~式(52)}$$

中, 即可得到引理 1。

证毕。

附录 2 引理 2 证明

对于各数据队列、能量队列和虚拟队列, 在每个时隙都有

$$Q_k^2(i+1) \leq Q_k^2(i) + 2(a_k(i) - b_k(i))Q_k(i) + a_k^2(i) + b_k^2(i), \quad \forall k \in \mathcal{A}_{\text{NU}} \quad (56)$$

$$\begin{aligned} (\hat{E} - E_k(i+1))^2 &\leq (\hat{E} - E_k(i))^2 + \\ &2(\hat{E} - E_k(i))(E_{T_k}(i) - E_{H_k}(i)) + \\ &E_{H_k}^2(i) + E_{T_k}^2(i), \quad \forall k \in \mathcal{A}_{\text{NU}} \end{aligned} \quad (57)$$

$$\begin{aligned} Z_S^2(i+1) &\leq Z_S^2(i) + 2(q_1(i)P_S(i) - \overline{P_S}^{\max})Z_S(i) + \\ &(q_1(i)P_S(i))^2 + (\overline{P_S}^{\max})^2 \end{aligned} \quad (58)$$

将式(56)~式(58)代入式(27)中, 即可得到式(28)和式(29)。

证毕。

附录 3 定理 1 证明

由于在每个时隙信道状态都是独立同分布的, 因此存在一个功率分配、可达传输速率和模式选择可以满足

$$\mathbb{E}\left[\sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} a_k(i) \mid \Theta(i)\right] = \mathbb{E}\left[\sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} a_k(i)\right] = \Psi(\epsilon) \quad (59)$$

$$\mathbb{E}[a_k(i) - b_k(i) \mid \Theta(i)] = \mathbb{E}[a_k(i) - b_k(i)] \leq -\epsilon \quad (60)$$

$$\mathbb{E}[\overline{P_S}(i) - \overline{P_S}^{\max} \mid \Theta(i)] = \mathbb{E}[\overline{P_S}(i) - \overline{P_S}^{\max}] \leq -\epsilon \quad (61)$$

$$\mathbb{E}[E_{T_k}(i) - E_{H_k}(i) \mid \Theta(i)] = \mathbb{E}[E_{T_k}(i) - E_{H_k}(i)] \leq -\epsilon \quad (62)$$

将(59)~式(62)代入式(28)可得

$$\begin{aligned} \Delta(\Theta(i)) - V \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} \mathbb{E}[a_k(i) \mid \Theta(i)] &\leq B - V\Psi(\epsilon) - \\ \epsilon \psi \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} (\hat{E} - E_k(i)) - \epsilon \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} Q_k(i) - \epsilon Z_S(i) \end{aligned} \quad (63)$$

将式(63)从 $i=0$ 加到 $i=N-1$ 并求条件期望, 可得

$$\frac{\mathbb{E}[L(\Theta(N)) - L(\Theta(0))]}{N} - \frac{V}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} \mathbb{E}[a_k(i)] \leq B - V\Psi(\epsilon) -$$

$$\frac{\epsilon}{N} \psi \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} (\hat{E} - \mathbb{E}[E_k(i)]) -$$

$$\frac{\epsilon}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} \mathbb{E}[Q_k(i)] - \frac{\epsilon}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \mathbb{E}[Z_S(i)] \quad (64)$$

若 $L(\Theta(0)) \geq 0$, 可得

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} \mathbb{E}[a_k(i)] \geq \Psi(\epsilon) - \frac{B}{V} \quad (65)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} \mathbb{E}[Q_k(i)] \leq \frac{B}{\epsilon} + \frac{V}{\epsilon} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k \in \mathcal{A}_{\text{NU}}} \mathbb{E}[a_k(i)] - \Psi(\epsilon) \right\} \quad (66)$$

证毕。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] DING Z G, YANG Z, FAN P Z, et al. On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(12): 1501-1505.
- [3] 张长青. 面向 5G 的非正交多址接入技术(NOMA)浅析[J]. 邮电设计技术, 2015(11): 49-53.
- ZHANG C Q. Initial analysis of NOMA for 5G mobile networks[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2015(11): 49-53.
- [4] JIAO R C, DAI L L, ZHANG J Y, et al. On the performance of NOMA-based cooperative relaying systems over Rician fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(12): 11409-11413.
- [5] XU P, YANG Z, DING Z G, et al. Optimal relay selection schemes for cooperative NOMA[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(8): 7851-7855.
- [6] 宋传旺, 刘栋, 李恩玉, 等. NOMA 系统的被动中继选择策略[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2021, 48(3): 56-62.
- SONG C W, LIU D, LI E Y, et al. Reactive relay selection strategy for NOMA systems[J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2021, 48(3): 56-62.
- [7] LUO S, TEH K C. Adaptive transmission for cooperative NOMA system with buffer-aided relaying[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(4): 937-940.
- [8] KOCHI J, NAKAI R, SUGIURA S. Hybrid NOMA/OMA broadcasting-and-buffer-state-based relay selection[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(2): 1618-1631.
- [9] HUANG C, CHEN G J, GONG Y, et al. Buffer-aided relay selection for cooperative hybrid NOMA/OMA networks with asynchronous deep reinforcement learning[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(8): 2514-2525.
- [10] 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.
- [11] LV L, CHEN J, NI Q. Cooperative non-orthogonal multiple access in cognitive radio[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(10): 2059-2062.
- [12] LV L, CHEN J, NI Q, et al. Design of cooperative non-orthogonal multicast cognitive multiple access for 5G systems: user scheduling and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(6): 2641-2656.
- [13] YANG L, JIANG H, YE Q, et al. On the impact of user scheduling on diversity and fairness in cooperative NOMA[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(11): 11296-11301.
- [14] 殷志远, 陈瑾, 李国鑫, 等. 延迟 CSI 反馈下的协作 NOMA 系统用户选择方法[J]. 陆军工程大学学报, 2022(2): 21-28.
- YIN Z Y, CHEN J, LI G X, et al. A user selection scheme for cooperative NOMA system with delayed CSI feedback[J]. Journal of Army Engineering University of PLA, 2022(2): 21-28.
- [15] SANISLAV T, MOIS G D, ZEADALLY S, et al. Energy harvesting techniques for Internet of things (IoT)[J]. IEEE Access, 2021, 9: 39530-39549.
- [16] ZHOU X, ZHANG R, HO C K. Wireless information and power transfer: architecture design and rate-energy tradeoff[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(11): 4754-4767.
- [17] NASIR A A, ZHOU X Y, DURRANI S, et al. Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7): 3622-3636.
- [18] 李陶深, 宁倩丽, 王哲. SWIPT-NOMA 机会协作系统的优化方案[J]. 通信学报, 2020, 41(8): 141-154.
- LI T S, NING Q L, WANG Z. Optimization scheme for the SWIPT-NOMA opportunity cooperative system[J]. Journal on Communications, 2020, 41(8): 141-154.
- [19] XU Y Q, SHEN C, DING Z G, et al. Joint beamforming and power-splitting control in downlink cooperative SWIPT NOMA systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(18): 4874-4886.
- [20] BAPATLA D, PRAKRIYA S. Adaptive multiuser cooperative NOMA scheme with energy buffer-aided near-users for high spectral and energy efficiency[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(17): 16643-16662.
- [21] LAN X L, ZHANG Y M, CHEN Q C, et al. Energy efficient buffer-aided transmission scheme in wireless powered cooperative NOMA relay network[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(3): 1432-1447.
- [22] LIU Y, CHEN Q C, TANG X H, et al. On the buffer energy aware adaptive relaying in multiple relay network[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(9): 6248-6263.
- [23] RAHMAN A B, KADER M F. Best relay transmission aided energy harvesting in a multi relay cooperative network[C]//Proceedings of 2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP). Piscataway: IEEE Press, 2020: 106-109.
- [24] LITTLE J D C. A proof for the queuing formula: $L = \lambda W$ [J]. Operations Research, 1961, 9(3): 383-387.
- [25] BOYD S P, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cam-

bridge: Cambridge University Press, 2004.

- [26] YUE X W, LIU Y W, LIU R K, et al. Full/half-duplex relay selection for cooperative NOMA networks[C]//Proceedings of 2017 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [27] KRIKIDIS I, CHARALAMBOUS T, THOMPSON J S. Buffer-aided relay selection for cooperative diversity systems without delay constraints[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(5): 1957-1967.

[作者简介]



杨龙(1988-), 男, 陕西潼关人, 博士, 西安电子科技大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为非正交多址接入、移动边缘计算、协作通信等。



赵丽(1997-), 女, 山西阳高人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为非正交多址接入、协作通信等。



周雨晨(1991-), 女, 陕西咸阳人, 博士, 西安电子科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为物联网、信息物理系统、无线网络虚拟化等。



贺冰涛(1991-), 男, 陕西西安人, 博士, 西安电子科技大学讲师, 主要研究方向为协作通信、物理层安全和非正交多址接入。



陈健(1968-), 男, 江苏如东人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为物理层安全、无线传感网络、非正交多址接入等。