

基于连续凸逼近的协作式非正交多址接入联合无线携能通信的能效优化方案

冯 熯* 胡忠颖 巴特尔

(东南大学信息科学与工程学院 南京 211189)

摘要: 在传统的非正交多址(NOMA)系统中, 通常将更多的功率分配给边缘用户以此来保证其通信质量, 系统公平性以牺牲系统容量为代价。基于协作通信的NOMA系统虽可解决上述问题, 但在协作阶段中心用户需承担中继的作用, 这种方式必将给中心用户带来一定的负担。为了兼顾系统容量和公平性, 该文提出一种基于协作通信和无线携能通信(SWIPT)的新型资源分配方案, 该方案在满足边缘用户通信质量情况下, 使用能量收集设备完成能量收集, 通过连续凸逼近(SCA)求解目标问题最大化系统能效。仿真结果表明, 与传统NOMA和协作式非正交多址接入系统(CNOMA)相比, CNOMA-SWIPT系统的能量效率得到了较大的提高, 在基站最大发射功率为30 dBm时相比NOMA系统能达到60.8%的增益, 相比CNOMA系统能达到比CNOMA系统高出约11.5%的增益, 更符合绿色通信的发展理念。

关键词: 非正交多址接入; 无线携能通信; 协作通信; 凸优化

中图分类号: TN914.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2023)04-1147-07

DOI: [10.11999/JEIT220170](https://doi.org/10.11999/JEIT220170)

Energy Efficiency Optimization Algorithm of Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access joint Simultaneous Wireless Information and Power Transfer Based on Successive Convex Approximation

FENG Man HU Zhongying Bateer

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: In a traditional Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) system, more power is usually allocated to edge users to ensure its communication quality. However, the fairness of the system comes at the expense of system capacity. Introducing collaborative communication into the NOMA system, the central user also needs to assume the role of relay in the collaboration phase. This method will inevitably bring a certain burden to the central user. In order to balance system capacity and fairness, a new resource allocation scheme based on cooperative communication and Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT) is proposed. Energy harvesting equipment is used for energy harvesting, and maximizes the energy efficiency of the system by solving the target problem through Successive Convex Approximation (SCA). Compared with the traditional NOMA and Cooperative NOMA, the energy efficiency of the CNOMA-SWIPT system is greatly improved. When the maximum transmit power of the base station is 30 dBm, CNOMA-SWIPT can achieve a gain of 60.8% compared to the NOMA system and can achieve a gain of about 11.5% higher than that of the CNOMA system, which is more in line with the development concept of green communication.

Key words: Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA); Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT); Cooperative communication; Convex optimization

1 引言

随着移动互联网海量用户的接入, 移动数据流

量呈爆炸式增长, 传统的正交多址接入(Orthogonal Multiple Access, OMA)无法满足5G通信高频谱效率、低传输延时和海量连接的需求。非正交多址接入(Non Orthogonal Multiple Access, NOMA)技术通过功率复用或特征码设计, 允许不同用户占用相

收稿日期: 2022-02-22; 改回日期: 2020-10-30; 网络出版: 2022-11-01

*通信作者: 冯熯 fengman@seu.edu.cn

同的频谱、时间和空间等资源,并通过高级接收机来实现多用户信号的区分,相比于OMA技术可以取得明显的性能增益,受到学术界和工业界的广泛关注。文献[1]讨论了NOMA的实际应用,系统级NOMA相比OMA性能高出30%,并且能够达到更好的中断性能。文献[2]探讨5G的两大关键技术MIMO和NOMA结合,进一步提高系统的频谱效率。

在NOMA的研究中,功率分配系数对系统性能而言非常重要。文献[3]从定性分析和数值仿真的角度探讨了功率分配对系统容量和可靠性的影响。除了全空间搜索功率分配算法(Full Search Power Allocation, FSPA)、固定功率分配算法(Fixed Power Allocation, FPA)、分数阶功率分配算法(Fractional Transmit Power Allocation, FTPA)、平均功率分配算法(Equal Power Allocation, EPA)、注水功率分配算法这些传统的功率分配算法外,文献[4]设计了最大化容量的NOMA系统功率分配方案,建立用户配对和功率分配联合优化问题,由KKT (Karush-Kuhn-Tucker)方程求得最优解;文献[5]则提出了基于强用户的功率分配算法,在确保NOMA小组内弱用户的通信需求前提下实现容量最大化。然而,传统的NOMA系统为了最大化容量,选择将尽可能多的功率分配给小组的强用户,破坏了系统的公平性。

为保证系统公平性,进一步增加系统频谱利用率,文献[6]提出了用户协作式非正交多址接入(Cooperated Non Orthogonal Multiple Access, CNOMA),其中将NOMA小组的中心用户作为中继,增加了一条从中心用户到边缘用户的协作链路用于消息转发,以此来提高边缘用户的吞吐量。在CNOMA中,中心用户需要为中继通信提供额外的能量消耗,因此,无线携能通信(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)作为一种有前景的绿色技术,可以节省能耗,提高整个通信系统的能量效率^[7]。文献[8]进一步探讨解码转发(Decode and Forward, DF)、放大转发(Amplify and Forward, AF)以及混合方式(hybrid DF/AF)对系统性能的影响。文献[9-13]研究了基于SWIPT的NOMA协作传输系统(Cooperated Non Orthogonal Multiple Access- Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, CNOMA-SWIPT),推导了系统的容量及用户的中断概率。文献[14]研究了使用 SWIPT 中时隙切换模式(Time Switching, TS)的NOMA系统的能效优化问题,使用一个双层Dinkelbach方法:在内层固定TS比例的条件下进行资源分配,并在外层控制

时间切换比例,与传统的正交多址接入方法相比,获得了显著的能效增益,证实将SWIPT集成到NOMA系统的优势。文献[15]将文献[14]的系统应用到多天线场景中,为了高效地解决非凸问题,通过联合优化波束形成器和SWIPT功率分割(Power Splitting, PS)系数,提出了一种基于内部近似的算法,其中在每次迭代中解决的凸问题可以转换为一个2阶锥规划问题,并且证明该算法的收敛性。文献[16]研究了配置非理想信道状态信息用户的SWIPT-NOMA系统,并给出基于能效最优的资源分配方案,使用Dinkelbach方法用于将非线性分数问题转化为减法问题,并结合拉格朗日对偶法计算功率。文献[17]分析了应用了携能技术的全双工中继场景下的NOMA系统,使用了一个联合设计方案来完成PS系数和功率分配系数的设计,旨在最大限度地提高系统的能效,使用分数规划方法和半定松弛来处理目标问题,最后提出基于连续凸逼近的能效优化算法,通过仿真证明该算法的收敛速度并且能够显著降低能耗。基于以上研究现状,Dinkelbach、连续凸逼近、拉格朗日对偶等方法都是处理能效优化问题的有效手段,但是这些文献没有考虑基于PS携能模式的半双工协作NOMA系统的能效优化方案。

基于以上研究现状,本文针对PS携能模式和解码转发模式的CNOMA-SWIPT系统提出了一种基于SCA和分数规划能效优化方案,用分数规划将目标问题写成分数形式的对偶问题并利用连续凸逼近的方法处理其非凸性,在保证NOMA系统公平性的前提下能够达到最优能效。本文后续内容如下:第2节给出系统模型;第3节提出CNOMA-SWIPT系统最优化能效的目标函数,理论推导了基于分数规划的求解算法并用对数逼近的方法求解优化问题;第4节对比了NOMA, CNOMA和CNOMA-SWIPT系统的中断性能和最优能效,给出了CNOMA-SWIPT系统以能效和以容量最优这两种资源分配方式的仿真结果;最后总结全文。

2 系统模型

本文考虑一个基于功率分割的SWIPT两用户NOMA下行协作通信场景,用户的信号在发送端使用叠加编码(Superposition Coding, SC)进行多路复用,接收端使用串行干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)技术来检测信号,其中小区中心用户充当一个射频(Radio Frequency, RF)能量收集(Energy Harvesting, EH)中继,以帮助提高边缘用户的性能。如图1所示,基站(Base

Station, BS)通过采用NOMA方案,同时有一个名为用户1的中心用户和一个名为用户2的边缘用户通信,所有节点均配置单天线,以半双工模式工作。用户1作为中继以PS模式执行能量吸收和消息转发(Information Forward, IF),如图2所示, $\beta(0 < \beta < 1)$ 表示功率分割比,时间 T 被分为两个子块,在持续时间为 $T/2$ 的第1个子块中,用户1将接收信号的一部分 β 用于能量收集,同时将接收信号的其余部分 $(1-\beta)$ 用于信息解码;在持续时间为 $T/2$ 的第2个子块中,用户1使用所收集的能量完成协作通信的过程。

基于SWIPT协作传输的时间框架,将CNOMA-SWIPT系统下行场景分为两个阶段:(1)在第1个子块进行能量收集和信息直接传输阶段,图1以实线表示;(2)在第2个子块中执行的协作传输阶段,图1以虚线表示。

(1)直接传输阶段。图1的实线表示直接传输阶段,根据NOMA原理基站向小区用户发送信息, $x_n(n=1,2)$ 分别是基站发送给两个用户的信号,满足 $E|x_n|^2=1$, $y_n^{(1)}(n=1,2)$ 分别是两个用户在第1阶段的接收信号,表示为

$$y_n^{(1)} = \sqrt{P_s} \cdot h_n \sum_{k=1}^2 \sqrt{a_k} x_k + n_{n,1} \quad (1)$$

其中, P_s 为BS发射功率, h_n 为从基站到用户 n 的瑞利衰落信道增益, $n_{n,1}$ 为该阶段的加性高斯白噪声,噪声方差为 σ_n^2 , $a_n(n=1,2)$ 是NOMA系统分配给两个用户的功率分配系数,有 $a_1 + a_2 = 1$ 。

根据图2的PS框架,直接传输阶段用户1的接

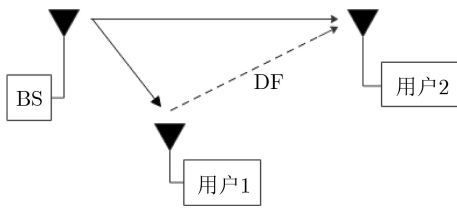


图1 CNOMA-SWIPT传输示意图

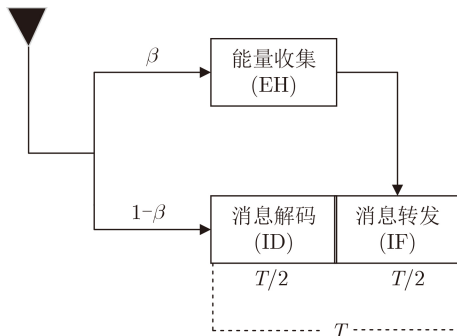


图2 基于PS的SWIPT策略的原理

收信号 $y_1^{(1)}$ 要分为 β 和 $1-\beta$ 两部分,其中 β 部分用于能量收集, $1-\beta$ 部分用于消息解码,系统以半双工形式工作, T 为整个传输时段,直传阶段和协作阶段占用的时隙相等,分别为整个传输时段的 $1/2$ 。

接收端利用SIC进行解码,用户1用于消息解码的部分信号为

$$y_1^{\text{ID}} = \sqrt{1-\beta} \cdot \sqrt{P_s} \cdot h_1 (\sqrt{a_1} x_1 + \sqrt{a_2} x_2) + n_{1,1} \quad (2)$$

用户1处检测用户2消息的信干噪比为

$$\text{SINR}_{1 \rightarrow 2} = \frac{(1-\beta)\rho a_2 |h_1|^2}{(1-\beta)\rho a_1 |h_1|^2 + 1} \quad (3)$$

为了保证DF的执行,需要满足: $\text{SINR}_{1 \rightarrow 2} \geq \text{SINR}_{\text{th},2}$,其中 $\text{SINR}_{\text{th},2}$ 是满足用户2通信需求的信干噪比门限值, $\rho = P_s/\sigma^2$ 表示信噪比(假设噪声方差均为 σ^2)。用户1处检测自身消息的信干噪比为

$$\text{SINR}_1 = (1-\beta)\rho a_1 |h_1|^2 \quad (4)$$

用户1用于能量收集的部分信号为

$$y_1^{\text{EH}} = \sqrt{\beta} \cdot \sqrt{P_s} \cdot h_1 (\sqrt{a_1} x_1 + \sqrt{a_2} x_2) + n_{1,1} \quad (5)$$

基于此,用户1从BS处收集的能量 E 可以表示为

$$E = \frac{T\beta\eta P_s |h_1|^2}{2} \quad (6)$$

两个时段都为 $T/2$,所以用户1可获得的用于消息转发的功率 P_t 可以表示为

$$P_t = \beta\eta P_s |h_1|^2 \quad (7)$$

其中, T 为整个传输时段, $\eta(0 < \eta < 1)$ 为能量转换系数。

此外,在直接传输阶段用户2从BS接收的信号和用户2处检测自身消息的信干噪比为

$$\text{SINR}_{2 \rightarrow 2} = \frac{\rho a_2 |h_2|^2}{\rho a_1 |h_2|^2 + 1} \quad (8)$$

(2)协作传输阶段。图2的虚线表示协作传输。在用户1处采用DF模式,即要求在用户1处将用户2的消息成功解码,再利用从BS处收集的能量,将解码出的消息转发给用户2,完成协作传输。在此阶段,用户2接收的信号可以表示为

$$y_2^{(2)} = \sqrt{P_t} \cdot h_{12} x_2 + n_{2,2} \quad (9)$$

其中, P_t 表示用户1的发射功率, h_{12} 表示从用户1到用户2的瑞利衰落信道增益, $n_{2,2}$ 表示用户2在该阶段的加性高斯白噪声,假设噪声方差均为 σ^2 。

所以在协作传输阶段,用户2检测自身消息的信干噪比可以表示为

$$\text{SINR}_{2, \text{DF}} = \beta\eta\rho |h_1|^2 |h_{12}|^2 \quad (10)$$

在这一阶段最后，用户2处采用最大比合并(Maximal Ratio Combining, MRC)技术，处理直接传输和协作传输两个阶段获得的信干噪比，所以用户2接收到的信干噪比 $SINR_2 = SINR_{2 \rightarrow 2} + SINR_{2,DF}$ ，即

$$SINR_2 = \frac{\rho a_2 |h_2|^2}{\rho a_1 |h_2|^2 + 1} + \beta \eta \rho |h_1|^2 |h_{12}|^2 \quad (11)$$

将用户的瞬时速率低于预设目标速率的概率定义为该用户的中断概率(Outage Probability, OP)。对于用户1，中断事件发生在无法通过SIC解码用户2的消息或者在成功解码用户2的消息后错误解码了自身消息的时候，因此用户1的中断概率可以表示为

$$P_1^{OUT} = \Pr(SINR_{1 \rightarrow 2} < SINR_{th,2}) + \Pr(SINR_{1 \rightarrow 2} \geq SINR_{th,2}, SINR_1 < SINR_{th,1}) \quad (12)$$

其中， $SINR_{th,1}$ 是用户1能够保持正常通信的信干噪比门限值。对于用户2，中断事件发生在其接收端无法解码自身消息的时候

$$P_2^{OUT} = \Pr(SINR_2 < SINR_{th,2}) \quad (13)$$

系统能效定义为总吞吐量和总功耗的比值，则CNOMA-SWIPT系统能效为

$$\eta_{EE} = \frac{R_{sum}}{P_{sum}} = \frac{R_1 + R_2}{\zeta \cdot P_s + P_c} \quad (14)$$

其中， $R_n = B \cdot \log_2(1 + SINR_n)$ ， B 为信道带宽， ζ 定义为系统的功率放大系数， P_c 表示为基站的功率损耗。

3 最优化目标函数

能效优化问题可以表示为

$$\left. \begin{aligned} P1: & \max_{\beta, P_s, a_1, a_2} \eta_{EE} \\ C1: & SINR_{1 \rightarrow 2} \geq SINR_{th,2} \\ C2: & SINR_2 \geq SINR_{th,2} \\ C3: & 0 < P_s \leq P_{max} \\ C4: & a_1 > 0, a_2 > 0, a_1 + a_2 = 1 \\ C5: & 0 < \beta < 1 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

约束C1表示在用户1处能成功解码用户2消息的条件，也是保证能执行解码转发的必要条件；条件C2可保证用户2的通信需求用于保证系统的公平性；C3, C4和C5分别是BS发射功率、功率分配系数和PS分割系数的取值范围。将公式代入并用 a 和 $1-a$ 替代 a_1 和 a_2 ，整理后，P1可以写成如式(16)的形式。

根据式(16)给出的能效优化表达式，需要从发射功率选择、NOMA功率分配和功率分配系数3个方面优化目标函数。通过Dinkelbach分数规划求解P1，将求解分数形式的最大值问题写成求解减式形式的最大值问题如算法1所示。

算法1 Dinkelbach分数规划

初始化：迭代次数 $n=0$ ，准许误差 $\epsilon = 10^{-4}$ ， $\lambda^n = 0$
 若 $F(\lambda) = R_{sum} - \lambda^n P_{sum} \geq \epsilon$ ，则执行：
 用 λ^n 求解 $\max(R_{sum} - \lambda^n P_{sum})$ ；
 更新 $R_{sum} - \lambda^n P_{sum}$ ， λ^n ， $n=n+1$ ；
 否则： $\eta_{EE}^* = \lambda^n$

$$\left. \begin{aligned} P1: & \max_{\beta, P_s, a} \frac{B \log_2(1 + (1 - \beta)\rho a |h_1|^2) + B \log_2(1 + \frac{\rho(1-a)|h_2|^2}{\rho a |h_2|^2 + 1} + \beta \eta \rho |h_1|^2 |h_{12}|^2)}{\zeta \cdot P_s + P_c} \\ C1: & \frac{(1 - \beta)\rho(1 - a)|h_1|^2}{(1 - \beta)\rho a |h_1|^2 + 1} \geq SINR_{th,2} \\ C2: & \frac{\rho(1 - a)|h_2|^2}{\rho a |h_2|^2 + 1} + \beta \eta \rho |h_1|^2 |h_{12}|^2 \geq SINR_{th,2} \\ C3: & 0 < P_s \leq P_{max} \\ C4: & 0 < a < 1 \\ C5: & 0 < \beta < 1 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

设 $P2: \max(R_{sum} - \lambda^n P_{sum})$ 是分数规划算法中的一个内部问题，是一个非凸的函数。为了求解出最优的 η_{EE} ，本文提出一种基于SCA的凸优化方案将原问题转化为凸优化问题。SCA的基本思想是通过一系列凸问题迭代逼近非凸问题，在每次迭代中，将所有非凸约束替换为它们的凸近似。

定理1^[18] 对于任意非负的 z_0 和 z ，有 $\log_2(1 + z) \geq$

$a \log_2(z) + b$ ，当 $z=z_0$ 时，不等式取到等号，其中 $a = \frac{z_0}{1 + z_0}$ ， $b = \log_2(1 + z_0) - \frac{z_0}{1 + z_0} \log_2(z_0)$ 。

对于函数 $\log_2(1 + z)$ 以及任意非负的初值 z_0 ，可以用下界 $\frac{z_0}{1 + z_0} \log_2(z) + \log_2(1 + z_0) - \frac{z_0}{1 + z_0} \log_2(z_0)$ 替换完成凸近似，并且不断更新 z_0 来逼近 $\log_2(1 + z)$ ， $\log_2(1 + z)$ 可以此下界近似表征。所以， R_{sum} 可用式(17)逼近

$$R_{\text{sum}} \geq B \left(a_1 \log_2 \left((1-\beta) \rho a |h_1|^2 \right) + (a_2 - a_2 a_3) \log_2 \left(\beta \eta \rho |h_1|^2 |h_{12}|^2 \right) + a_2 a_3 \log_2 \left(\rho (1-a) |h_2|^2 \right) \right. \\ \left. - a_2 a_3 \log_2 \left(\rho a |h_2|^2 + 1 \right) + a_2 b_3 + b_1 + b_2 \right) \quad (17)$$

其中, $z_1 = (1-\beta) \rho a |h_1|^2$, $a_1 = \frac{z_1}{1+z_1}$, $b_1 = \log_2(1+z_1) - \frac{z_1}{1+z_1} \log_2(z_1)$, $z_2 = \frac{\rho(1-a)|h_2|^2}{\rho a |h_2|^2 + 1} + \beta \eta \rho |h_1|^2 |h_{12}|^2$, $a_2 = \frac{z_2}{1+z_2}$, $b_2 = \log_2(1+z_2) - \frac{z_2}{1+z_2} \log_2(z_2)$, $z_3 = \frac{\rho(1-a)|h_2|^2}{\rho a |h_2|^2 + 1} \frac{1}{\beta \eta \rho |h_1|^2 |h_{12}|^2}$, $a_3 = \frac{z_3}{1+z_3}$, $b_3 = \log_2(1+z_3) - \frac{z_3}{1+z_3} \log_2(z_3)$ 。

进一步, 定义 $2^{q_1} = \rho$, $2^{q_2} = \beta$, $2^{q_3} = 1 - \beta$, $2^{q_4} = a$, $2^{q_5} = 1 - a$, P2改写为式(18)

$$\left. \begin{aligned} \text{P2: } & \max_{q_1, q_2, q_3, q_4, q_5} B(a_1(q_1 + q_3 + q_4 + \log_2(|h_1|^2))) + (a_2 - a_2 a_3) \left(q_1 + q_2 + \log_2 \left(\eta |h_1|^2 |h_{12}|^2 \right) \right) \\ & + a_2 a_3 \left(q_1 + q_5 + \log_2(|h_2|^2) \right) - a_2 a_3 \log_2 \left(\rho a |h_2|^2 + 1 \right) + a_2 b_3 + b_1 + b_2 - \lambda (\zeta \cdot 2^{q_1} \sigma^2 + P_c) \\ \text{C1: } & \frac{2^{q_3} 2^{q_1} 2^{q_5} |h_1|^2}{2^{q_3} 2^{q_1} 2^{q_4} |h_1|^2 + 1} \geq \text{SINR}_{\text{th},2} \\ \text{C2: } & \frac{2^{q_1} 2^{q_5} |h_2|^2}{2^{q_1} 2^{q_4} |h_2|^2 + 1} + 2^{q_1} 2^{q_2} \eta |h_1|^2 |h_{12}|^2 \geq \text{SINR}_{\text{th},2} \\ \text{C3: } & 0 < 2^{q_1} \sigma^2 \leq P_{\text{max}} \\ \text{C4: } & 2^{q_4} + 2^{q_5} = 1 \\ \text{C5: } & 2^{q_2} + 2^{q_3} < 1 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

算法2总结了Dinkelbach分数规划算法中用 λ^n 求解中间问题 $\max(R_{\text{sum}} - \lambda^n P_{\text{sum}})$ 的步骤。通过连续凸逼近将P2改写成凸优化问题, 在第 j 次迭代给定 $z_i^j, b_i^j, a_i^j, b_i^j$, 使用标准的凸优化求解器CVX来解决。从这些步骤中, 可以通过所得到的解在**算法1**中更新用于求解P2的初值。将Dinkelbach与SCA算法整理为**算法3**。

4 仿真与性能分析

假设两个用户随机部署在一个 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的正方形区域内, 基站位于正方形的顶点, 坐标为 $(0,0)$ 。信道建模时同时考虑了小尺度衰落和路径损耗, $h_1 = d_1^{-\alpha_1} \tilde{h}_1$, $h_2 = d_2^{-\alpha_2} \tilde{h}_2$, $h_{12} = d_{12}^{-\alpha_{12}} \tilde{h}_{12}$,

其中 d_1, d_2, d_{12} 分别表示用户1与BS之间、用户2与BS之间、用户1与用户2之间的距离, 分别设置为

算法2 基于SCA的P2求解算法

初始化: 迭代次数 $j=1, a_i^j, b_i^j=0(i=1,2,3)$, $\Delta=1$, 准许误差 $\epsilon = 10^{-4}$

若 $\Delta \geq \epsilon$, 则执行:

通过CVX工具箱求解P2, 得到 $q_1^j, q_2^j, q_3^j, q_4^j, q_5^j$

更新 $z_i^j, b_i^j, a_i^j, b_i^j$

更新: $\Delta = |F(\lambda)^j - F(\lambda)^{j-1}|$;

$j=j+1$;

否则: 输出 $\lambda = \frac{R_{\text{sum}}(q_1^j, q_2^j, q_3^j, q_4^j, q_5^j)}{P_{\text{sum}}(q_1^j, q_2^j, q_3^j, q_4^j, q_5^j)}$

算法3 基于SCA的CNOMA-SWIPT系统能效优化算法

初始化: 迭代次数 $n=0$, 准许误差 $\epsilon = 10^{-4}$, $\lambda^n = 0$

若 $F(\lambda^n) \geq \epsilon$, 则执行:

设 $j=0, a_i^j, b_i^j=0(i=1,2,3)$, $\Delta = 1$;

若 $\Delta \geq \epsilon$, 则执行:

通过CVX工具箱求解P2, 得到 $q_1^j, q_2^j, q_3^j, q_4^j, q_5^j$;

更新 $z_i^j, b_i^j, a_i^j, b_i^j$, $\Delta = |F(\lambda)^j - F(\lambda)^{j-1}|$;

$j=j+1$;

直到 $\Delta < \epsilon$, 执行:

$$F(\lambda^n) = R_{\text{sum}}(q_1^j, q_2^j, q_3^j, q_4^j, q_5^j) - \lambda^n P_{\text{sum}}(q_1^j, q_2^j, q_3^j, q_4^j, q_5^j); \lambda^n = \frac{R_{\text{sum}}(q_1^j, q_2^j, q_3^j, q_4^j, q_5^j)}{P_{\text{sum}}(q_1^j, q_2^j, q_3^j, q_4^j, q_5^j)}$$

$n=n+1$;

若 $F(\lambda^n) < \epsilon$: 输出 $\lambda = \frac{R_{\text{sum}}(q_1^j, q_2^j, q_3^j, q_4^j, q_5^j)}{P_{\text{sum}}(q_1^j, q_2^j, q_3^j, q_4^j, q_5^j)}$

$d_1=3$ m, $d_2=10$ m, $d_{12}=8$ m; $\alpha_1 = 2$, $\alpha_2=\alpha_{12} = 4$ 表示路径损耗系数, $\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \tilde{h}_{12}$ 分别表示瑞利衰落系数, 将瑞利因子设为3, 系统可用带宽为1 MHz, 噪声功率谱密度设为 -90 dBm/Hz, 用户要求的最小速率为1 Mbit/s, 能效转换系数 $\eta=0.7$, 功率放大系数 $\zeta=10$, 基站的功耗 $P_c=1$ W。首先对传统的NOMA系统、中心用户处提供转发功率的CNOMA系统和CNOMA-SWIPT系统用户的中断性能进行蒙特卡洛仿真, 假设用户1和用户2的功率分配系数为0.1和0.9, CNOMA中用户1用于转发的功率 $P_t = 0.1P_s$, 结果如图3所示, 相比传统的NOMA系统, CNOMA和CNOMA-SWIPT系统都利用协作为用户2增加一条中继链路, 提升了用户2的中断性能, CNOMA中用户2中断性能提升的程度由转发功率的大小决定, CNOMA和NOMA系统中用户1的中断概率相等, 由于采用SWIPT技术, 用户1的接收信号一部分用户能量收集, 一部分用于消息解码, 相比其他系统用于信号检测的部分减少, 降低了用户1处的信干噪比, 相应增加了用户1处发生中断事件的概率。

仿真了CNOMA-SWIPT系统容量最优和能效最优两种资源方式下基站发射功率对能效的影响, 其中在以容量最优作为优化目标时采用了基于黄金分割搜索(Golden Section Search, GSS)的优化算法, 仿真结果如图4所示。

对于能效最优的分配方案, 目标问题是最大化能效, 不需要将所有的发射功率分配给用户, 能效随着最大发射功率的增加而增加。而对于容量最优的分配方案, 会将整个发射功率分配给用户, 以获得最大的数据速率。当发射功率较低时, 两种分配方案获得的能效相等, 但当发射功率提高到一定程度时, 由于对数函数的特性, 对提高容量的效果并不显著, 因此, 所获得的能效会下降。

同时对比了CNOMA-SWIPT和传统的NOMA系统以及没有应用携能技术的CNOMA系统的能效, 都使用log逼近的能效优化方案, 仿真结果如图5所示。结果表明, 在基站发射功率小于10 dBm时, CNOMA-SWIPT能达到的最优能效增益有限, 但当发射功率大于10 dBm后系统达到的最优能效差异逐渐明显, 随着发射功率增高, 最终稳定在0.42 bit/(s·J·Hz)。发射功率为30 dBm后该系统能效相比传统NOMA高出60.8%, 比CNOMA系统高出约11.5%, 验证了本文提出的CNOMA-SWIPT能效优化方案的有效性。CNOMA系统中, 由于设置转发功率为发射功率的1/10, 对系统功耗的影响较小, 增加了协作链路进而提高了系统的容量, 使

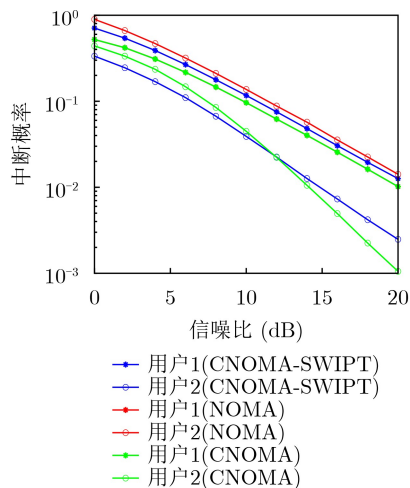


图3 中断性能对比

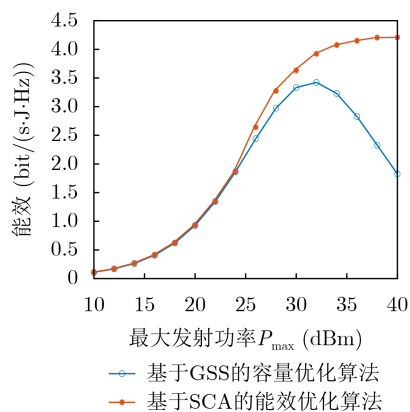


图4 两种资源分配方式下的能效对比图

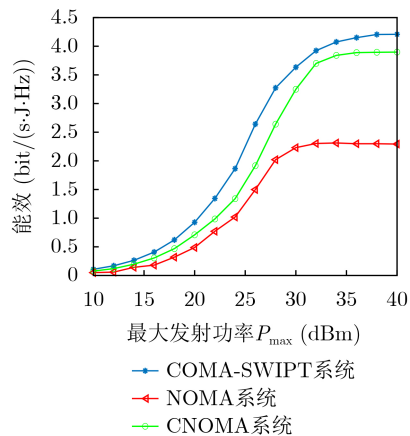


图5 CNOMA-SWIPT和传统NOMA能效对比

得CNOMA系统能够实现的最优能效值高传统NOMA系统; 应用了SWIPT技术的CNOMA系统, 从用户1的接收信号中收集能量转化为协作链路转发功率, 不耗费额外的功率, 因此CNOMA-SWIPT能达到的能效最高。

5 结论

本文研究了应用无线携能通信技术的协作NOMA

系统, 在满足边缘用户通信质量情况下, 使用能量收集设备完成能量收集, 并在满足公平性的情况下以系统能效最优建立目标函数, 其待优化问题是一个复杂的分数形式的非凸问题, 难以求解。本文提出了基于Dinkelbach分数规划的SCA优化方案将非凸问题转化为可以用CVX求解的凸优化问题。仿真结果表明, 与传统NOMA和CNOMA系统相比, 本文提出的CNOMA-SWIPT系统能效有明显优势, 在基站最大发射功率为30 dBm时相比NOMA系统能达到60.8%的增益, 相比CNOMA系统能达到比CNOMA系统高出约11.5%的增益, 验证了将携能技术应用到NOMA系统中的优势。

参 考 文 献

- [1] DING Zhiguo, YANG Zheng, FAN Pingzhi, *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. doi: [10.1109/LSP.2014.2343971](https://doi.org/10.1109/LSP.2014.2343971).
- [2] HIGUCHI K and KISHIYAMA Y. Non-orthogonal access with random beamforming and intra-beam SIC for cellular MIMO downlink[C]. 2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference, Las Vegas, USA, 2013: 1–5. doi: [10.1109/VTCFall.2013.6692307](https://doi.org/10.1109/VTCFall.2013.6692307).
- [3] SHAHAB M B and SHIN S Y. User pairing and power allocation for non-orthogonal multiple access: Capacity maximization under data reliability constraints[J]. *Physical Communication*, 2018, 30: 132–144. doi: [10.1016/j.phycom.2018.05.010](https://doi.org/10.1016/j.phycom.2018.05.010).
- [4] SHAHAB M B, KADER F, and SHIN S Y. On the power allocation of non-orthogonal multiple access for 5G wireless networks[C]. 2016 International Conference on Open Source Systems & Technologies (ICOSST), Lahore, Pakistan, 2016: 89–94. doi: [10.1109/ICOSST.2016.7838583](https://doi.org/10.1109/ICOSST.2016.7838583).
- [5] KIMY B, LIM S, KIM H, *et al.* Non-orthogonal multiple access in a downlink multiuser beamforming system[C]. MILCOM 2013 - 2013 IEEE Military Communications Conference, San Diego, USA, 2014: 1278–1283. doi: [10.1109/MILCOM.2013.218](https://doi.org/10.1109/MILCOM.2013.218).
- [6] DING Zhiguo, PENG Mugen, and POOR H V. Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(8): 1462–1465. doi: [10.1109/LCOMM.2015.2441064](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2015.2441064).
- [7] KRIKIDIS I, TIMOTHEOU S, NIKOLAOU S, *et al.* Simultaneous wireless information and power transfer in modern communication systems[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(11): 104–110. doi: [10.1109/MCOM.2014.6957150](https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6957150).
- [8] GUO Shengjie, ZHOU Xiangwei, and ZHOU Xiangyun. Energy-efficient resource allocation in SWIPT cooperative wireless networks[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14(3): 4131–4142. doi: [10.1109/JSYST.2019.2961001](https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2961001).
- [9] LIU Yuanwei, DING Zhiguo, ELKASHLAN M, *et al.* Cooperative non-orthogonal multiple access with simultaneous wireless information and power transfer[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(4): 938–953. doi: [10.1109/JSAC.2016.2549378](https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2549378).
- [10] ZHANG Zhenwei, QU Hua, ZHAO Jihong, *et al.* Energy efficient transmission design of cooperative NOMA with SWIPT network[C]. 2019 IEEE 4th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), Wuxi, China, 2019: 566–572. doi: [10.1109/SIPROCESS.2019.8868752](https://doi.org/10.1109/SIPROCESS.2019.8868752).
- [11] RAUNIYAR A, ENGELSTAD P E, and ØSTERBØ O N. On the performance of bidirectional NOMA-SWIPT enabled IoT relay networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(2): 2299–2315. doi: [10.1109/JSEN.2020.3018905](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3018905).
- [12] LEE C, JANG G, and CHO S. Energy-efficient adaptive directional queue-stable stochastic scheduling for SWIPT in NOMA[C]. 2020 International Conference on Information Networking (ICOIN), Barcelona, Spain, 2020: 76–79. doi: [10.1109/ICOIN48656.2020.9016476](https://doi.org/10.1109/ICOIN48656.2020.9016476).
- [13] PARIHAR A S, SWAMI P, BHATIA V, *et al.* Performance analysis of SWIPT enabled cooperative-NOMA in heterogeneous networks using carrier sensing[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(10): 10646–10656. doi: [10.1109/TVT.2021.3110806](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3110806).
- [14] TANG Jie, LUO Jingci, LIU Mingqian, *et al.* Energy efficiency optimization for NOMA with SWIPT[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2019, 13(3): 452–466. doi: [10.1109/JSTSP.2019.2898114](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2019.2898114).
- [15] NGUYEN V D and SHIN O S. An efficient design for NOMA-assisted MISO-SWIPT systems with AC computing[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 97094–97105. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2928877](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2928877).
- [16] BUDHIRAJA I, KUMAR N, TYAGI S, *et al.* An energy-efficient resource allocation scheme for SWIPT-NOMA based femtocells users with imperfect CSI[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(7): 7790–7805. doi: [10.1109/TVT.2020.2991466](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2991466).
- [17] YUAN Yi, XU Yanqing, YANG Zheng, *et al.* Energy efficiency optimization in full-duplex user-aided cooperative SWIPT NOMA systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(8): 5753–5767. doi: [10.1109/TCOMM.2019.2914386](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2914386).
- [18] RAZAVIYAYN M. Successive convex approximation: Analysis and applications[D]. [Ph. D. dissertation], University of Minnesota, 2014.

冯 熲: 女, 副教授, 研究方向为超窄带通信、军事抗干扰通信。
 胡忠颖: 女, 硕士生, 研究方向为非正交多址接入、无线携能通信。
 巴特尔: 男, 副研究员, 研究方向为5G非地面网络、卫星通信。