

## 反向散射NOMA赋能的混合多播-单播协作传输方案

阔永红 薛彦文 吕璐 贺冰涛\* 陈健

(西安电子科技大学通信工程学院 西安 710071)

**摘要:** 针对协作中继通信系统频谱效率低和链路利用率低的问题, 面向多播、单播业务共存场景, 该文提出一种反向散射NOMA赋能的混合多播-单播协作传输方案。机会式选择一个多播用户作为协作节点, 将其接收信号的一部分功率用于自身解码, 剩余功率反向散射以增强其余用户的接收质量。为提升系统性能, 通过联合优化基站功率分配系数、协作用户反向散射系数和协作节点选择变量, 在保障多播服务质量的前提下, 实现单播用户最小可达速率的最大化。为解决上述高度非凸联合优化问题, 该文设计了一种协作用户选择准则并提出了一种迭代算法来获取原问题的最优解。仿真结果验证了所提迭代算法的快速收敛性, 相较于传统非协作传输方案, 所提方案可将单播用户最小可达速率提升11.5%, 有效保证多业务服务质量。

**关键词:** 反向散射; 非正交多址接入; 协作式多播-单播; 用户选择

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)00-0001-10

DOI: [10.11999/JEIT230672](https://doi.org/10.11999/JEIT230672)

## Backscatter-NOMA Enabled Hybrid Multicast-Unicast Cooperative Transmission Scheme

KUO Yonghong XUE Yanwen LÜ Lu HE Bingtao CHEN Jian

(School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In order to address the low spectral efficiency and inefficient link utilization problem in cooperative relay communication system, a Backscatter-NOMA enabled hybrid multicast-unicast cooperative transmission scheme is proposed for the scenario of coexistence of multicast and unicast services. A multicast user is opportunistically selected as a cooperative node, which used a part of the power of the received signal for its own decoding, and backscatter the residual power to enhance the reception quality of other users. To improve system performance, the minimum achievable rate for unicast users is maximized by jointly optimizing the base station power allocation coefficients, cooperative user backscatter coefficient and cooperative node selection variable, while guaranteeing the quality of service for multicast. To solve the above highly non-convex joint optimization problem, a cooperative user selection criterion was designed and an iterative algorithm was proposed to obtain the optimal solution to the original problem. The simulation results verify the fast convergence of the proposed iterative algorithm, which can improve the minimum achievable rate of unicast users by 11.5% compared to the non-cooperative transmission scheme, and effectively ensure the quality of multi-service.

**Key words:** Backscatter communications; Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA); Cooperative unicast-multicast; User selection

收稿日期: 2023-07-07; 改回日期: 2024-03-25; 网络出版: 2024-04-08

\*通信作者: 贺冰涛 [bthe@xidian.edu.cn](mailto:bthe@xidian.edu.cn)

基金项目: 国家自然科学基金(62271368, 61971320, 62201421), 中国博士后科学基金(BX20190264, 2019M650258), 陕西省重点研发计划项目(2023-YBGY-041), 陕西省自然科学基金基础研究计划(2021JQ-206), 广东省基础与应用基础研究基金(2020A1515110084)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62271368, 61971320, 62201421), China Postdoctoral Science Foundation Project (BX20190264, 2019M650258), The Key R&D Program Project of Shaanxi Province (2023-YBGY-041), The Natural Science Basic Research Plan of Shaanxi Province (2021JQ-206), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2020A1515110084)

## 1 引言

非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)允许多个用户使用相同的无线信道资源,通过给不同的信息流赋予不同的功率进行传送从而实现功率域的多址接入,可以显著提升系统的频谱效率和用户接入能力<sup>[1]</sup>。将协作通信技术引入NOMA系统中,可以通过提供分集来有效提高通信系统可靠性<sup>[2]</sup>,相比于非协作NOMA,协作式NOMA因其更高的无线传输可靠性和更广的传输范围<sup>[3]</sup>,受到了研究者的广泛关注。文献<sup>[4]</sup>研究了一个协作NOMA系统,提出利用专用半双工中继协助基站与远用户之间通信的系统架构,并推导了系统中断概率。文献<sup>[5]</sup>将NOMA与认知无线电(Cognitive Radio, CR)集成到一个网络中,提出的协作中继策略可以有效降低系统的中断概率。文献<sup>[6]</sup>提出了一种用户协作式NOMA传输方案,将信道条件较好的用户作为中继,以提高与基站连接不佳的用户的连接可靠性,分析了方案实现的中断概率和分集,证明能够在所有 $K$ 用户处实现分集阶数为 $K$ 的增益。文献<sup>[7]</sup>假设基站和用户之间的直连链路被阻塞,研究了中继选择策略对协作下行链路性能的影响,提出了一种两阶段的中继选择策略,并证明这种两阶段策略可以在所有可能的中继选择方案中实现最小的中断概率和最大的分集增益。

通过利用无线信道的广播特性,无线多播可以同时向每个用户传递相同的信息,从而有效节省带宽和利用链路。然而,在传统多播传输机制中,多播组内用户的等效接收速率由具有最差信道增益的用户决定,多播业务的吞吐量受到组内信道最差用户的限制,这就是多播传输技术的瓶颈所在。因此,在协作NOMA系统中,当一些用户有相同信息需求时(例如,体育直播流、视频会议等),将无线多播集成到协作NOMA中可以结合他们的优势,从而提高系统容量和可靠性,解决上述多播传输的瓶颈问题。在该场景下,文献<sup>[8]</sup>为多天系统设计了一种NOMA多播-单播策略,该策略通过设计波束成形来提高用户接收质量。对这种混合多播-单播传输的研究还基于一个重要的观察结果,即在多播网络中,空间自由度不能被充分利用,根据NOMA原理将单播传输与多播叠加,其中多余的空间自由度可用于提高单播性能,同时保持多播的可靠性<sup>[8]</sup>。文献<sup>[9]</sup>研究了NOMA在多播认知无线电(Multicast Cognitive Radio, MCR)网络中的应用,提出一种动态协作MCR-NOMA方案,其中多播用户充当中继,以提高主网络和次网络的传输性能。文献<sup>[10]</sup>中,提出了一种两阶段的混合多播-单

播协作策略,在第一阶段,基站广播由所有用户信息组成的叠加消息,在第二阶段,选择多播用户来转发未成功解码的用户所需的信息。为最小化系统中断概率,研究了最佳协作用户选择方案,并从理论上分析了中断概率和分集阶数。尽管上述中继协作NOMA方案能够提高系统可靠性,但中继采用半双工模式,给系统带来了额外的时隙开销并会导致系统容量下降。为了解决这个问题,一种解决办法是利用文献<sup>[11]</sup>中提出的开/关方案,只有当基站到小区边缘用户直接链路的信道条件难以保证边缘用户成功解码时,才会激活中继传输的附加时隙。然而,这种方案仍然会以牺牲小区中心用户的部分时间资源为代价。另一种方案是采用全双工(Full-Duplex, FD)技术,然而,全双工中继会引入了不可忽略的环路自干扰,这会削弱中继节点的接收质量<sup>[12,13]</sup>。此外,在上述多播-单播混合传输场景中,由于基站与各用户间的无线信道质量各不相同且随时间、空间、频率等因素动态变化,很难确保所有用户均成功解码所需信息。因此,如何灵活调度与分配资源保证多业务服务质量是NOMA混合多播-单播面临的重要技术挑战。

另一方面,环境反向散射通信(Ambient Backscatter Communication, AmBC)由于其低成本、低复杂度、低功耗和高频谱利用率等特点,近年来受到了学术界的广泛研究。环境反向散射设备通过改变负载阻抗,调制或反射接收到的射频信号源的信号从而传输信息,无需配备额外的主动射频器件,不仅有效节约了通信系统的成本和能耗,也极大地提高了频谱资源的利用率。研究表明<sup>[14,15]</sup>,通过利用反向散射产生构造性的多径信号,可以有效提高设备间通信的可靠性。文献<sup>[16]</sup>将AmBC引入NOMA系统中,以充分利用NOMA下行链路信号的频谱和能量。文献<sup>[17-19]</sup>分别针对反向散射网络中能效公平性和能效最大化问题,设计了不同的资源分配方案。文献<sup>[20]</sup>提出了一种用于两用户下行NOMA传输的反向散射协作方案。其关键思想是,在一个用户处反向散射接收到的下行链路信号中除用于自身解码外的剩余功率,以增强无法恢复其信息的用户的接收。利用AmBC技术全双工无干扰的特性,将其引入协作NOMA系统的优势在于,相比于半双工中继协作NOMA系统,不需要额外的协作传输时隙,可以在不影响频谱效率的前提下提高传输可靠性,从而有效解决频谱效率损失的问题;相比于放大转发中继协作NOMA系统,不会引入环路自干扰,同时也不会有额外的能量消耗,从而有助于实现更可靠、更高效的无线网络传输。

然而，上述研究仅考虑了系统中仅有两个用户的简化场景，系统设计存在一定局限性。

受反向散射通信特点启发，鉴于对现有基于中继的协作式NOMA系统的潜在性能提升，考虑不同业务模式，在多播用户和单播用户共存的一般性网络中，本文首先设计了一种反向散射NOMA (Back-Scatter-NOMA, BS-NOMA) 赋能的混合多播-单播协作传输方案。在多播用户群中机会式选择一个最优用户作为协作节点，将其接收到的下行链路信号的一部分功率用于保证自身解码，信号剩余功率反向散射到其余用户，以改善其余用户的接收质量。其次，为兼顾多播用户群公共信息和单播用户群定制信息的并行传输，合理的功率资源分配和协作用户选择是影响系统性能的关键因素。为此，本文根据不同业务的服务质量需求，在保证多播用户服务质量的基础上，考虑用户整体公平性，通过联合优化基站功率分配系数、协作用户反向散射系数和协作节点选择变量，建立了最大化所有单播用户的最小可达速率的优化问题。最后，为了解决上述多变量耦合的非凸优化问题，设计了一种有效的协作用户选择方案对原问题进行了简化，并通过连续凸近似(Successive Convex Approximation, SCA)技术对简化后的问题进行重构，进而提出了一种迭代算法来获取原问题的最优解。仿真结果中表明：(1) 本文提出的协作用户选择准则和资源分配算法能够有效提升系统性能；(2) 相较于其他方案，本文方案可以在不牺牲额外时间资源的情况下实现空间分集，有效提升频谱效率，保障多业务服务质量；(3) 在本文系统中，多播用户数量越多带来的性能增益越显著。仿真结果表明，相较于其他方案，本文方案可以在不牺牲额外时间资源的情况下实现空间分集，有效提升频谱效率，且多播用户数量越多带来的性能增益越显著。

## 2 BS-NOMA协作方案

本文考虑由一个基站、 $N$ 个单播用户、 $M$ 个多播用户组成的反向散射辅助无线网络，如图1所示。系统采用下行NOMA在同一时间/空间/频域中服务所有用户。基站(Base Station, BS)给一组主用户(称为多播用户)发送多播消息， $M$ 个多播用户需要相同的信息 $x_{N+1}$ ，给一组次用户(称为单播用户)发送单播消息， $N$ 个用户需要不同信息 $x_1, x_2, \dots, x_N$ 。假设所有用户所有节点均配备的是单天线，并在全双工模式下工作。采用 $g_m^{SR}$ ,  $g_n^{SD}$ ,  $g_{qm}^{RD}$ ,  $g_{qm}^{RR}$ 分别表示链路 $BS-R_m$ ,  $BS-D_n$ ,  $R_q-R_m$ ,  $R_q-D_n$ 的信道增益，其中， $m, q \in \mathcal{R} \triangleq \{1, 2, \dots, M\}$ ,  $m \neq q$ ,  $n \in \mathcal{D} \triangleq \{1, 2, \dots, N\}$ 。所有信

道都经历瑞利块衰落，在每个传输块内保持不变，接收端的噪声为方差为 $\sigma^2$ 的加性高斯白噪声。

基站处广播所有用户信息组成的叠加信号 $\sum_1^{N+1} \sqrt{P_S a_n} x_n$ ，其中 $P_S$ 代表基站的发射功率， $a_n$ 表示信号 $x_n$ 的功率分配系数，并满足 $\sum_1^{N+1} a_n = 1$ 。图1示出了本文所提出的BS-NOMA协作方案的传输模型。在多播用户群中机会式选择一个最优用户作为协作节点，利用其接收信号中的一部分进行自身信息恢复，并通过调整负载阻抗，反向散射其接收信号的剩余部分，以提高其余用户的接收性能。

为了实现下行链路NOMA传输，假设下行链路信道信息在基站处可用。不失一般性，本文假设单播用户的信道增益遵循 $g_1^{SD} < g_2^{SD} < \dots < g_N^{SD}$ ，这意味着，对于单播用户，串行干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)的连续检测应遵循 $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow \dots \rightarrow x_N$ 的顺序，同时将 $x_{N+1}$ 视为干扰。由于所有用户都是随机分布的，因此每个多播用户的下行链路信道增益应该是不同的。如果多播用户应用与确定单播用户检测顺序相同的基本原理，则每个多播用户的检测顺序也应当是不同的，但是这会导致多播用户的检测顺序设计相当复杂。为了简化设计并揭示网络性能，本文假设串行干扰消除的连续检测遵循相同的顺序 $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow \dots \rightarrow x_{N+1}$ 。此时，每个多播用户均可以充当其余多播/单播用户的中继，这种相同的检测顺序有助于最大程度上利用系统的分集性能来提高传输可靠性。因此，尽管连续检测顺序在每个多播用户处可能不是统计最优的，但是可以通过利用系统固有的分集顺序来补偿性能损失<sup>[10]</sup>。

具体而言，假设在一个传输块内多播用户 $R_q$ 作为协作用户，用 $\beta$ 表示多播用户 $R_q$ 反向散射的功率百分比，则 $R_q$ 的接收信号为

$$y_q^R = (1 - \beta) \sum_{n=1}^{N+1} \sqrt{P_S a_n} x_n g_q^{SR} + \sigma^2 \quad (1)$$

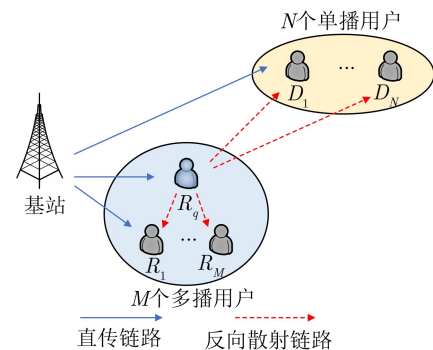


图1 BS-NOMA协作传输系统

其中,  $\beta \in [0, 1)$  表示多播用户  $R_q$  反向散射的接收功率百分比。特别地, 文中将由于电路固有损耗而导致的反向散射效率  $\rho (0 < \rho < 1)$  均合并写入信道系数中, 即  $g \triangleq \sqrt{\rho}g^*$ , 其中  $g^*$  表示原始信道系数, 意味着在式(1)中,  $g_q^{SR} = \sqrt{\rho}g_q^{*SR}$ 。这样可以简化公式, 但并不影响计算结果。

协作用户  $R_q$  如果正确解码信号  $x_1 \rightarrow x_2 \cdots \rightarrow x_{n-1}$ , 则解码信号  $x_n$  的信干噪比(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR)为

$$\gamma_{qn}^R = \frac{(1-\beta)P_S a_n g_q^{SR}}{(1-\beta)P_S \sum_{j=n+1}^{N+1} a_j g_q^{SR} + \sigma^2} \quad (2)$$

当  $x_1 \rightarrow x_2 \cdots \rightarrow x_N$  均正确解码后, 解码自身所需消息, 解码  $x_{N+1}$  信号的信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)为

$$\gamma_q^R = \frac{(1-\beta)P_S a_{N+1} g_q^{SR}}{\sigma^2} \quad (3)$$

则协作用户  $R_q$  的可达速率可以表示为

$$R_q^R = \log_2 \left( 1 + \frac{P_S a_{N+1} (1-\beta) g_q^{SR}}{\sigma^2} \right) \quad (4)$$

其余用户在收到基站发送信号的同时也收到协作用户反向散射来的信号, 同理, 其余多播用户的可达速率可以表示为

$$\begin{aligned} R_m^R &= \log_2 (1 + \Gamma_m^R) \\ &= \log_2 \left( 1 + \frac{P_S a_{N+1} (g_m^{SR} + \beta g_q^{SR} g_{qm}^{RR})}{\sigma^2} \right), \\ m &\in \mathcal{R}, m \neq q \end{aligned} \quad (5)$$

单播用户的可达速率可以表示为

$$\begin{aligned} R_n^D &= \log_2 (1 + \gamma_n^D) \\ &= \log_2 \left( 1 + \frac{P_S a_n (g_n^{SD} + \beta g_q^{SR} g_{qn}^{RD})}{P_S \sum_{j=n+1}^{N+1} a_j (g_n^{SD} + \beta g_q^{SR} g_{qn}^{RD}) + \sigma^2} \right), \\ n &\in \mathcal{D} \end{aligned} \quad (6)$$

### 3 协作用户选择与资源分配方案

#### 3.1 问题建模

本文的目标是在这种多业务并存的场景中, 考虑不同业务的服务质量约束, 在保证所有多播用户接收质量的条件下, 考虑用户公平性, 最大化所有单播用户的最小传输可达速率, 提高系统的整体服务质量。

为了便于协作用户选择处理, 首先构建一个

$1 \times m$  的中继选择行向量  $\mathbf{V}$ , 满足  $\sum_1^M V_i = 1$ 。当  $V_q = 1, q \in \mathcal{R}$  时即意味着多播用户  $R_q$  被选择为协作用户。进一步, 构建两个关于单播用户和多播用户的等效反射信道矩阵  $\mathbf{G}$  和矩阵  $\mathbf{H}$ 。

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{q_1}^{SR} g_{q_1 1}^{RD} & g_{q_1}^{SR} g_{q_1 2}^{RD} & \cdots & g_{q_1}^{SR} g_{q_1 N}^{RD} \\ g_{q_2}^{SR} g_{q_2 1}^{RD} & g_{q_2}^{SR} g_{q_2 2}^{RD} & \cdots & g_{q_2}^{SR} g_{q_2 N}^{RD} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{q_M}^{SR} g_{q_M 1}^{RD} & g_{q_M}^{SR} g_{q_M 2}^{RD} & \cdots & g_{q_M}^{SR} g_{q_M N}^{RD} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} -g_{q_1}^{SR} & g_{q_1}^{SR} g_{q_1 2}^{RR} & \cdots & g_{q_1}^{SR} g_{q_1 m}^{RR} \\ g_{q_2}^{SR} g_{q_2 1}^{RR} & -g_{q_2}^{SR} & \cdots & g_{q_2}^{SR} g_{q_2 1}^{RR} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{q_M}^{SR} g_{q_M 1}^{RD} & g_{q_M}^{SR} g_{q_M 2}^{RR} & \cdots & -g_M^{SR} \end{bmatrix} \quad (8)$$

对于矩阵  $\mathbf{G}$  和矩阵  $\mathbf{H}$ , 矩阵中的任一列  $G_n$ ,  $H_m$  中的第 1, 2, ...,  $M$  个元素分别代表的是选择不同多播用户  $R_1, R_2, \dots, R_M$  作为协作用户时, 当前用户  $D_n$  和  $R_m$  的等效级联信道。特别地, 在矩阵  $\mathbf{H}$  中是第  $m$  列的第  $m$  个元素与本列其他元素形式不同。当选择第  $m$  个用户作为协作用户时, 它自身的等效信道是负的, 因为它只接收基站的直传信号并且要反射部分接收信号到其余用户。

进一步可以把单播用户  $D_n$  和多播用户  $R_m$  的可达速率表达式转换为

$$R_n^D = \log_2 \left( 1 + \frac{P_S a_n (g_n^{SD} + \beta \mathbf{G}_n \mathbf{V})}{P_S \sum_{j=n+1}^{N+1} a_j (g_n^{SD} + \beta \mathbf{G}_n \mathbf{V}) + \sigma^2} \right) \quad (9)$$

$$R_m^R = \log_2 \left( 1 + \frac{P_S a_{N+1} (g_m^{SR} + \beta H_m \mathbf{V})}{\sigma^2} \right) \quad (10)$$

本节通过联合优化中继选择行向量  $\mathbf{V}$ 、基站处的功率分配系数  $a_n$  和反向散射系数  $\beta$ , 最大化所有单播用户的最小可达速率, 建立优化问题为

$$\begin{aligned} (P1) \quad & \max_{V, \beta, a_i} \min_{n=1, 2, \dots, N} R_n^D \\ \text{s.t.} \quad & C_1: R_1^R, R_2^R, \dots, R_M^R \geq R^* \\ & C_2: \sum_{i=1}^M \mathbf{V}(i) = 1 \\ & C_3: \sum_1^{N+1} a_n = 1 \\ & C_4: 0 \leq \beta \leq 1 \end{aligned} \quad (11)$$

其中, 约束  $C_1$  表示保证多播用户服务质量的速率约束, 约束  $C_2$  表示从多播用户中选择一个用户作为协作用户, 约束  $C_3$  和  $C_4$  分别为功率分配系数以



及反向散射系数取值范围的约束。由于目标函数和约束 $C_1$ 中均存在多个耦合变量，且问题需要优化整数变量 $V(q), q \in \mathcal{R}$ ，因此优化问题P1是一个多变量耦合的混合整数非凸优化问题，难以直接通过现有的凸优化理论进行求解。

### 3.2 协作用户选择策略

引言中对现有协作NOMA系统研究工作的分析表明，传统的中继选择准则多数基于中断概率最小化或能量效率最大化等性能指标的提升，然而，在多播-单播混合传输网络中，以上方案难以保证不同业务的整体服务质量，缺乏了对不同业务需求的关注。此外，传统中继传输系统多数考虑了协作节点的主动传输，在协作传输阶段对信号进行了重新编码或放大转发，对于本文所设计的被动传输网络不具备适用性，因此需进一步对系统开展协作节点选择方案的研究。

本文所提出的BS-NOMA协作传输方案中，通过机会式选出一个多播用户通过反向散射其接收信号的一部分来改善其余用户的接收质量，所建立的优化问题的整体目标是最大化所有单播用户中的最小速率。合理的协作用户选择策略是影响系统性能的关键因素。对于单播用户来说，主要的性能增益来源于通过多播用户反向散射所构建的这一条反射链路，这一条反射链路的质量取决于基站到多播用户以及多播用户到单播用户的信道质量。因为多播用户的服务质量在约束中已经得到保证，所以关于协作用户的选择没有涉及多播用户之间的信道。综合上述原因，根据反射链路信道增益，设计了如下协作用户选择准则

$$R_{q^*} = \arg \max_{q \in \{1, 2, \dots, M\}} \left[ \min_{n \in \{1, 2, \dots, N\}} g_q^{SR} g_{qn}^{RD} \right] \quad (12)$$

通过该准则选择一个最佳协作用户，可最大化单播用户最差反射链路的信道增益，尽可能的提高系统性能，使系统同时满足多用户共同的信息需求和个体用户的信息需求。

根据所设计的协作用户选择准则，可将本章所提出的BS-NOMA协作方案分为系统调度与直传-反向散射协同传输两个阶段。其中系统调度阶段占用 $N+3$ 个时长为 $t$ 的调度子时隙，用于获取信道状态信息以及确定协作用户，直传-反向散射协同传输占用一个时长为 $T$ 的传输时隙。具体的协作传输策略如下：

步骤1 在调度子时隙1，基站广播获取多播用户直传链路信道增益请求信号，多播用户 $R_m$ 通过接收请求信号得到对应信道增益 $g_m^{SR}$ 。

步骤2 在调度子时隙2，基站广播获取多播-

单播反向散射链路信道增益请求信号，单播用户收到请求信号后，准备在调度子时隙3至调度子时隙 $N+2$ 中分别发送请求信号给各多播用户。

步骤3 在调度子时隙3至 $N+2$ ，单播用户广播获取信道增益请求信号， $R_m$ 多播用户根据收到的请求信号获取对应的反射链路信道增益 $g_{mn}^{RD}$ 。在调度子时隙结束之后， $R_m$ 根据获得的自身与所有单播用户间的链路信道增益计算得出最差反射链路信道增益 $g_m^{\min} \triangleq \min_{m=1, 2, \dots, M} g_m^{SR} g_{mn}^{RD}$ 。

步骤4 在调度子时隙 $N+3$ ，所有多播用户开启一个本地计时器，将初始值设置为 $T_m = te^{-g_m^{\min}}$ 并开始倒计时。率先倒计时至0的多播用户 $R_q$ 广播信令“协作用户”及相应的用户ID。其余多播用户在收到广播信令后停止倒计时，并进入空闲状态，基站在收到广播信令后准备开始信号传输。

步骤5 在传输时隙，基站处广播所有用户信息组成的叠加信号，多播用户 $R_q$ 在收到基站信号的同时通过调整负载阻抗，反向散射其中部分出去进行协作传输。

### 3.3 问题转化

针对问题原始问题，本文整体的转化思路是采用连续凸近似对原问题进行重构，最终得到的半正定规划问题是原问题的安全近似。

首先，根据上节所设计的准则选择出最佳的协作用户，并通过引入松弛变量 $\hat{R}$ ，将原问题进一步转化为

$$\begin{aligned} & \max_{\beta, a_i} \hat{R} \\ \text{s.t. } & C_1 : R_1^D, R_2^D, \dots, R_N^D \geq \hat{R} \\ & C_2 : R_1^R, R_2^R, \dots, R_M^R \geq R^* \\ & C_3 : \sum_1^{N+1} a_n = 1 \\ & C_4 : 0 \leq \beta \leq 1 \end{aligned} \quad (13)$$

显然，由于 $C_1$ 和 $C_2$ 的非凸性，问题仍然是一个多变量耦合的非凸优化问题，需对问题做进一步的转化。

关于约束 $C_1$ ，可以将它转化为如下形式

$$\begin{aligned} & \log_2 \left( P_S \sum_{j=n}^{N+1} a_j^* \right) \\ & \left( g_n^{SD} + \beta g_q^{SR} g_{qn}^{RD} \right) + \sigma^2 \\ & - \log_2 \left( P_S \sum_{j=n+1}^{N+1} a_j^* \right) \\ & \left( g_n^{SD} + \beta g_q^{SR} g_{qn}^{RD} \right) + \sigma^2 \geq \hat{R}, n \in \mathcal{D} \end{aligned} \quad (14)$$

引入变量 $F, \Gamma$ ，对式(14)做等价转化

$$\log_2 F_n - \log_2 \Gamma_n \geq \hat{R}, n \in \mathcal{D} \quad (15)$$

$$P_S \sum_{j=n}^{N+1} a_j (g_n^{SD} + \beta g_q^{SR} g_{qn}^{RD}) + \sigma^2 \geq F, n \in \mathcal{D} \quad (16)$$

$$P_S \sum_{j=n+1}^{N+1} a_j (g_n^{SD} + \beta g_q^{SR} g_{qn}^{RD}) + \sigma^2 \leq \Gamma, n \in \mathcal{D} \quad (17)$$

关于约束(15), 对 $\log_2 \Gamma$ 做1阶泰勒近似

$$\log_2 F_n - \log_2 \Gamma_n^{(i)} - \frac{\log_2(e) (\Gamma_n - \Gamma_n^{(i)})}{\Gamma_n^{(i)}} \geq \hat{R}, n \in \mathcal{D} \quad (18)$$

为了使式(16)便于处理, 引入变量 $u, v$ , 可以将式(16)转换为

$$\sum_{j=n}^{N+1} a_j (g_n^{SD} + \beta g_q^{SR} g_{qn}^{RD}) \geq v_n^2, n \in \mathcal{D} \quad (19)$$

$$v_n^2 \geq u_n, n \in \mathcal{D} \quad (20)$$

$$u_n \geq \frac{F_n - \sigma^2}{P_S}, n \in \mathcal{D} \quad (21)$$

其中, 式(19)可以采用凸线性矩阵不等式约束来表示

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=n}^{N+1} a_j & v_n \\ v_n & g_n^{SD} + \beta g_q^{SR} g_{qn}^{RD} \end{bmatrix} \geq 0, n \in \mathcal{D} \quad (22)$$

约束(20)为非凸二次不等式, 对 $v_n^2$ 做1阶泰勒近似, 将约束转换为

$$2v_n^{(i)} v_n - (v_n^{(i)})^2 \geq u, n \in \mathcal{D} \quad (23)$$

关于约束(17), 可以观察到它具有与 $xy \leq z$ 相同的结构, 其中 $x, y, z$ 均为非负变量。然后, 应用算术几何平均(Arithmetic Geometry Mean, AGM)不等式来获得非凸约束(17)的安全近似<sup>[21]</sup>。AGM不等式可以描述为:  $2xy \leq (\lambda x)^2 + (y/\lambda)^2 \leq 2z$ , 当且仅当 $\lambda \neq 0, \lambda = (y/x)^{1/2}$ 时成立。因此, 式(17)可以重写为凸形式

$$\begin{aligned} & \left( \lambda_n^{(i)} \sum_{j=n+1}^{N+1} a_j \right)^2 + \left( \frac{g_n^{SD} + \beta g_q^{SR} g_{qn}^{RD}}{\lambda_n^{(i)}} \right)^2 \\ & \leq \frac{2(\Gamma_n - \sigma^2)}{P_S}, n \in \mathcal{D} \end{aligned} \quad (24)$$

$$\lambda_n^{(i)} = \sqrt{\frac{g_n^{SD} + \beta g_q^{SR} g_{qn}^{RD}}{\sum_{j=n+1}^{N+1} a_j^{(i-1)}}}, n \in \mathcal{D} \quad (25)$$

关于约束 $C_2$ , 可以分为两种情况讨论, 当多

播用户 $R_q$ 被选择为协作用户时, 引入辅助变量 $C(R^* = \log_2 C)$ , 首先将原约束转化为

$$\begin{aligned} & \log_2 \left( 1 + \frac{P_S a_{N+1} (g_m^{SR} + \beta g_q^{SR} g_{qm}^{RR})}{\sigma^2} \right) \\ & \geq \log_2 C, m \in \mathcal{R}, m \neq q \end{aligned} \quad (26)$$

$$\log_2 \left( 1 + \frac{P_S a_{N+1} (1 - \beta) g_q^{SR}}{\sigma^2} \right) \geq \log_2 C \quad (27)$$

根据对数函数性质, 可以将不等式两边对数运算同时去掉, 进一步将式(26)和式(27)转换为等价约束

$$a_{N+1} (g_m^{SR} + \beta g_q^{SR} g_{qm}^{RR}) \geq \frac{\sigma^2(C - 1)}{P_S}, m \in \mathcal{R}, m \neq q \quad (28)$$

$$a_{N+1} (1 - \beta) g_q^{SR} \geq \frac{\sigma^2(C - 1)}{P_S} \quad (29)$$

在不等式(28)和式(29)两边同时取对数运算, 可以将约束转换为凸约束

$$\begin{aligned} & \log_2 a_{N+1} + \log_2 (g_m^{SR} + \beta g_q^{SR} g_{qm}^{RR}) \\ & \geq \log_2 \left( \frac{\sigma^2 C - \sigma^2}{P_S} \right), m \in \mathcal{R}, m \neq q \end{aligned} \quad (30)$$

$$\log_2 a_{N+1} + \log_2 ((1 - \beta) g_q^{SR}) \geq \log_2 \left( \frac{\sigma^2 C - \sigma^2}{P_S} \right) \quad (31)$$

基于上述讨论, 本文所提出优化问题在第 $i$ 次迭代中的凸近似为

$$\begin{aligned} & (P2) \max_{\beta, a_i, F, \Gamma, u, v} \hat{R} \\ & \text{s.t.} \quad (18), (21), (22), (23), (24), \\ & \quad (28), (29), (C_3), (C_4) \end{aligned} \quad (32)$$

问题P2是一个半正定规划问题, 可使用现有的求解器有效求解, 算法1概述了求解问题的详细过程。

### 3.4 算法性能分析

本小节将对所提算法的收敛性和计算复杂度进行分析。

收敛性分析: 算法1描述了问题P2的求解步骤。具体来讲, 将优化目标值表示为优化变量集 $\chi = \{\beta, a_i, R^*, F, \Gamma, u, v\}$ 的函数 $f(\chi)$ 。根据文献[23]中的引理2.2, 由SCA算法迭代生成的结果序列 $\{f(\chi)\}$ 在非空的可行集合上保持非递减, 即 $f(\chi(n)) \leq f(\chi(n+1))$ 。因此, 所设计的迭代算法可以保证问题P2的优化目标在每次的迭代求解中以非递减的趋势变化, 并且由于目标函数在问题P2的可行解合集上是连续的<sup>[22]</sup>, 因而算法1是可以收敛的。

### 算法 1 基于连续凸近似的优化算法

1. **初始化:** 给定  $n = 1, \Delta = 1, \Gamma_1^{(0)} = \Gamma_2^{(0)} = \dots = \Gamma_N^{(0)} = 10, v_1^{(0)} = v_2^{(0)} = \dots = v_N^{(0)} = 1.2, \lambda_1^{(0)} = \lambda_2^{(0)} = \dots = \lambda_N^{(0)} = 1.5, \tau = 0.001, R^{(0)} = 0$ .
2. **while**  $\Delta > \tau$  **do**
3. 求解问题P2, 得到  $R^{(n)}, \Gamma_1^{(n)}, \Gamma_2^{(n)} \dots \Gamma_N^{(n)}$  和  $v_1^{(n)}, v_2^{(n)}, \dots, v_N^{(n)}$ ;
4.  $n \leftarrow n + 1$ ;
5. 更新  $\Delta = |R^{(n)} - R^{(n-1)}|$ ;
6. 根据式3-34更新  $\lambda_1^{(n)}, \lambda_2^{(n)}, \dots, \lambda_N^{(n)}$ ;
7. **end**
8. **输出:** 最优速率  $R^*$ .

复杂度分析：关于优化问题P2，其中的约束仅涉及线性矩阵不等式(Linear Matrix Inequality, LMI)和2阶锥体(Second-Order Cone, SOC)约束，采用标准内点法(Interior-Point Method, IPM)求解的复杂度为  $\mathcal{O}(l_s \log(1/\varepsilon) \sqrt{\Delta} \{(5N+3)[(11N+M+3) + (5N+3)(7N+M+3) + (5N+3)^2]\})$ ，其中  $l_s$  表示迭代次数， $\Delta = 7N + M + 3$ 。

## 4 仿真分析

本节将使用蒙特卡洛仿真来评估系统性能并进行结果分析。考虑一个瑞利衰落场景，其中基站位于坐标(0,0)处，用户随机位于在第1象限以基站为中心且半径为100 m的圆内。平均信道增益设置为  $\lambda_{i,j} = d_{i,j}^{-\eta}$ ， $d_{i,j}$  为节点  $i$  和  $j$  之间的归一化距离， $\eta$  表示路径损耗系数，设置为3， $\sigma^2$  设置为  $-80$  dBm， $\rho$  设置为0.8。此外，为体现本文方案的性能优势，仿真中同时引入了8种基准方案与本文方案进行比较，在不同参数设定下与本文所提方案进行了全面比较：

(1) 对比方案1为传统无协作NOMA传输方案，基站处广播所有用户信息组成的叠加信号，用户在接收端仅解码自身所需信号，不进行协作。

(2) 对比方案2为最优解码重传中继(Best-DF)传输方案<sup>[23]</sup>，所有中继工作在半双工模式下。在第1阶段，基站采用下行NOMA的方式向所有中继节点发送叠加信息，在第2阶段应用最大-最小准则从候选中继中选择一个最佳中继进行消息传输。

(3) 对比方案3为反向散射系数采用固定值的协作方案。

(4) 对比方案4采用遍历所有多播用户的方式选择最优的协作用户。

(5) 对比方案5采用文献<sup>[24]</sup>中提出的中继选择策略，根据多播用户-单播用户链路的信道增益，

选择能够最大化多播用户最差转发链路信道增益的用户作为协作用户。

(6) 对比方案6采用随机中继选择策略<sup>[25]</sup>，从多播用户中随机选择一个用户作为协作用户。

(7) 对比方案7采用文献<sup>[26]</sup>中提出的资源分配方案。

(8) 对比方案8遍历所有的多播用户并将反向散射系数与资源分配系数功率分配系数离散化，通过穷举的方式求出原问题最优值，其中  $\Delta$  为最小离散间隔。

上述8种对比方案中，本文方案与对比方案1和2为不同的传输方案之间的性能对比，与对比方案4-6是不同的中继选择方案之间的性能对比，与对比方案3、对比方案7和8是不同的资源分配方案之间的对比，其中对比方案8为采用离散化穷举的方式得到的原问题的最优解。

图2描述了将多播用户和单播用户数均设置为3时，将发射功率设置为10 dBm, 5 dBm, 0 dBm时本章设计的迭代算法的收敛过程。可以看出，所提出的算法在每次迭代中都单调地提高了单播用户的最小速率，此外，算法需要大约15次迭代即可达到最佳速率，这表明了本文所提算法的计算是有效的。

图3描述了将多播用户和单播用户数均设置为3，改变多播用户目标速率时，单播用户最小可达

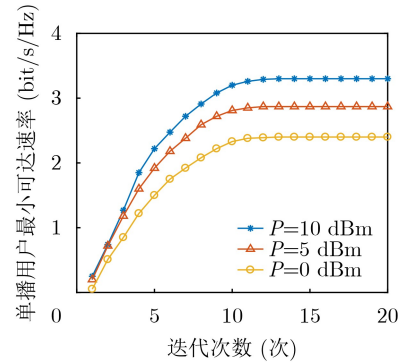


图2 算法收敛性分析

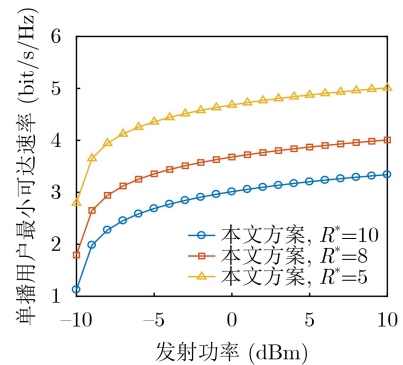


图3 多播用户不同服务质量需求下的性能比较

速率随发射功率的变化情况。可以看出,当多播用户的目标速率增大时,单播用户的最小可达速率呈下降趋势。这是因为,当多播用户有更高服务质量需求时,系统优先保证多播信息传输,发射功率的分配会向多播用户倾斜,导致所有单播用户信号分得的总功率下降,进而导致单播用户的最小可达速率呈下降趋势。

图4描述了单播用户最小可达速率随系统中的多播用户数量和单播用户数量的变化趋势。可以看出,多播用户的数量越多,也就是中继数量越多时,性能提升的效果越明显。出现这个现象的原因就在于,本文所提出的反向散射协作方案得到性能增益的原因主要是因为产生构造性的多径信号,当多播用户数量增多时,新的空间自由度带来的分集增益要远高于因多播用户数量增多而导致的性能损失。并且还可以看出,当多播用户数量不变时,单播用户的数量越多,最小可达速率越小。这是因为,单播用户数越多,总功率的分配就越分散,因此会导致单播用户的最小速率有一个下降的趋势。

图5描述了采用本文方案与采用对比方案1和对比方案2时,单播用户最小可达速率随发射功率的变化情况。可以看出本文方案和对比方案1中的单播用户最小可达速率要高于对比方案2,并且,本文方案的性能始终优于对比方案1这种无协作传输

方案。当发射功率升高到10 dBm时,相比于对比方案1和对比方案2,本文方案可将单播用户最小可达速率分别提升11.5%和91.1%。这是因为对比方案2采用解码重传的方式,分为两个时隙进行传输,所以传输效率低于另外两种方案。在本文方案中,具有更好瞬时信道条件的用户分反向散射其接收信号的一部分,以产生建设性的多径信号,从而改善其他用户的接收。相比于中继协作传输方案,本文方案可以在不牺牲额外时间资源的情况下实现空间分集,能够有效提升频谱效率。

图6描述了将多播用户的目标速率设为10 bit/s/Hz时,采用本文方案、对比方案3,并将 $\beta$ 分别设为0.1, 0.2, 0.8, 以及对比方案7的资源分配方案和对比方案8将最小离散化间隔设置为0.01时遍历得到的原问题最优解之间的性能对比。首先,和方案3之间的对比可以看出,反向散射系数的设置与单播用户最小信息速率并不存在单调关系,当把反向散射设置为0.8时,有协作传输方案的性能甚至会差于无协作的传输方案。这是因为,反向散射系数越小时,意味着多播用户大部分的接收功率都被用于自身解码,此时对单播用户的增益有限;反向散射系数越大时,意味着多播用户大部分的接收功率都被用于辅助传输,但是由于系统要首先保证多播用户的服务质量,所以基站会提升多播用户的功率分配比例,导致单播用户群整体分到的功率变少。因此,功率分配与反向散射系数之间存在一个动态平衡,当反向散射系数设置为一个最优值时,既能保证多播用户的服务质量,又能有效改善单播用户的接收质量。其次,可以看出本文方案的性能优于对比方案7,本文所设计的资源分配算法的性能更高且与对比方案8由空间离散化穷举得到的最优解之间的性能十分接近。仿真结果中体现出了本文问题转换以及资源分配方案设计的有效性,通过对反向散射系数以及功率分配系数进行动态的调整,实现对无线通信资源的合理调度。

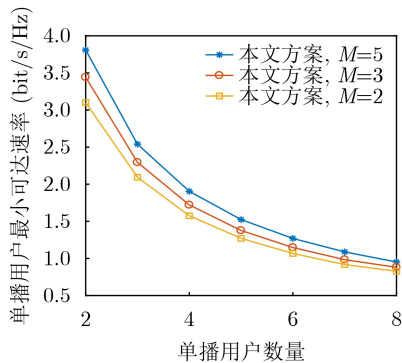


图4 不同用户数量的性能比较

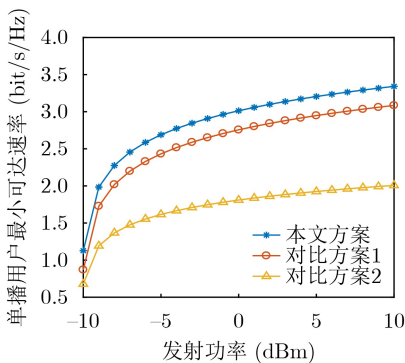


图5 不同传输方案的性能比较

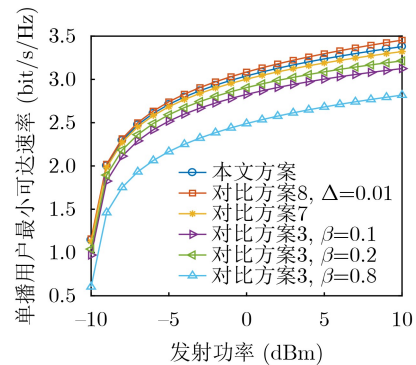


图6 不同资源分配方案的性能比较



图7描述了本文方案与另外3种采用不同协作用户选择准则对比方案的性能比较。可以看出，本文提出的协作用户选择方案性能仅次于采用遍历方式选择的对比方案4，两者的性能是十分接近的。此外还可以看出，本文方案优于对比方案5中仅考虑多播用户-单播用户链路信道增益的选择准则，4种方案中，采用随机中继选择策略的性能最差。仿真结果体现出了本文方案中协作用户选择准则的有效性。

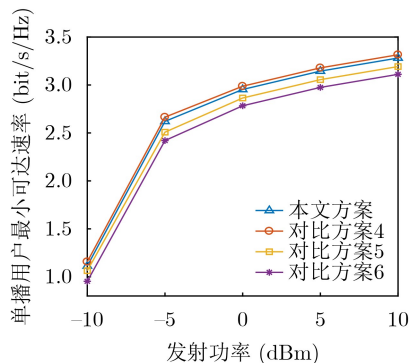


图7 不同协作用户选择方案性能对比

## 5 结束语

本文提出了一种反向散射NOMA赋能的混合多播-单播协作传输方案，将多播用户作为潜在的协作节点，反向散射其接收信号的剩余功率，以增强其余用户的接收质量。考虑多播业务的服务质量约束，建立了基站功率分配系数、协作用户反向散射系数和协作节点选择变量的联合优化问题，以最大化单播用户最小可达速率。针对上述问题，提出一个有效的协作用户选择方案，相比于遍历选择的方案，性能接近但复杂度更低。设计了一种迭代算法来得到优化问题的最优解，并分析了算法的收敛性和计算复杂度。仿真结果验证了所提方案的有效性和优越性，与传统方案相比，本文方案能够有效提升频谱效率，兼顾多播和单播用户信息并行传输。

## 参考文献

- [1] YANG Long, JIANG Hai, YE Qiang, *et al.* On the application of cooperative NOMA to spatially random wireless caching networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(11): 12055–12071. doi: [10.1109/TVT.2021.3115128](#).
- [2] MIANDOAB F T, FAZEL M S, and MAHDAVI M. Outage analysis of multiuser MIMO-NOMA transmissions in uplink full-duplex cooperative system[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(10): 2076–2079. doi: [10.1109/LWC.2022.3193489](#).
- [3] SALEM A and MUSAVIAN L. NOMA in cooperative communication systems with energy-harvesting nodes and wireless secure transmission[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(2): 1023–1037. doi: [10.1109/TWC.2020.3030133](#).
- [4] KIM J B and LEE I H. Non-orthogonal multiple access in coordinated direct and relay transmission[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(11): 2037–2040. doi: [10.1109/LCOMM.2015.2474856](#).
- [5] LV Lu, CHEN Jian, NI Qiang, *et al.* Cognitive non-orthogonal multiple access with cooperative relaying: A new wireless frontier for 5G spectrum sharing[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(4): 188–195. doi: [10.1109/MCOM.2018.1700687](#).
- [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](#).
- [7] DING Zhiguo, DAI Huaiyu, and POOR H V. Relay selection for cooperative NOMA[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(4): 416–419. doi: [10.1109/LWC.2016.2574709](#).
- [8] DING Zhiguo, ZHAO Zhongyuan, PENG Mugen, *et al.* On the spectral efficiency and security enhancements of NOMA assisted multicast-unicast streaming[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(7): 3151–3163. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2696527](#).
- [9] LV Lu, CHEN Jian, NI Qiang, *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. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2677942](#).
- [10] YANG Long, CHEN Jian, NI Qiang, *et al.* NOMA-enabled cooperative unicast-multicast: Design and outage analysis[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(12): 7870–7889. doi: [10.1109/TWC.2017.2754261](#).
- [11] DO T N, DA COSTA D B, DUONG T Q, *et al.* Improving the performance of cell-edge users in NOMA systems using cooperative relaying[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(5): 1883–1901. doi: [10.1109/TCOMM.2018.2796611](#).
- [12] ZHANG Zhongshan, CHAI Xiaomeng, LONG Keping, *et al.* Full duplex techniques for 5G networks: Self-interference cancellation, protocol design, and relay selection[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(5): 128–137. doi: [10.1109/MCOM.2015.7105651](#).
- [13] ZHONG Caijun and ZHANG Zhaoyang. Non-orthogonal multiple access with cooperative full-duplex relaying[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(12): 2478–2481.

- doi: [10.1109/LCOMM.2016.2611500](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2611500).
- [14] ASIF M, IHSAN A, KHAN W U, *et al.* Energy-efficient backscatter-assisted coded cooperative NOMA for B5G wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2023, 7(1): 70–83. doi: [10.1109/TGCN.2022.3216209](https://doi.org/10.1109/TGCN.2022.3216209).
- [15] ASIF M, IHSAN A, KHAN W U, *et al.* Energy-efficient beamforming and resource optimization for AmBSC-assisted cooperative NOMA IoT networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(14): 12434–12448. doi: [10.1109/JIOT.2023.3247021](https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3247021).
- [16] LI Suyue, BARIAH L, MUHAIDAT S, *et al.* Outage analysis of NOMA-enabled backscatter communications with intelligent reflecting surfaces[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(16): 15390–15400. doi: [10.1109/JIOT.2022.3150418](https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3150418).
- [17] 叶迎晖, 施丽琴, 卢光跃. 反向散射辅助的无线供能通信网络中用户能效公平性研究[J]. 通信学报, 2020, 41(7): 84–94. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2020133](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2020133).  
YE Yinghui, SHI Liqin, and LU Guangyue. User-centric energy efficiency fairness in backscatter-assisted wireless powered communication network[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(7): 84–94. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2020133](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2020133).
- [18] 施丽琴, 叶迎晖, 卢光跃. 无线供能边缘计算网络中系统计算能效最大化资源分配方案[J]. 通信学报, 2020, 41(10): 59–69. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2020182](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2020182).  
SHI Liqin, YE Yinghui, and LU Guangyue. Computation energy efficiency maximization based resource allocation scheme in wireless powered mobile edge computing network[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(10): 59–69. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2020182](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2020182).
- [19] 徐勇军, 杨浩克, 李国军, 等. 多标签无线供电反向散射通信网络能效优化算法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(10): 3492–3498. doi: [10.11999/JEIT210772](https://doi.org/10.11999/JEIT210772).  
XU Yongjun, YANG Haoke, LI Guojun, *et al.* Energy-efficient optimization algorithm in multi-tag wireless-powered backscatter communication networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(10): 3492–3498. doi: [10.11999/JEIT210772](https://doi.org/10.11999/JEIT210772).
- [20] CHEN Weiyu, DING Haiyang, WANG Shilian, *et al.* Backscatter cooperation in NOMA communications systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(6): 3458–3474. doi: [10.1109/TWC.2021.3050600](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3050600).
- [21] ZHANG Wei, CHEN Jian, KUO Yonghong, *et al.* Artificial-noise-aided optimal beamforming in layered physical layer security[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(1): 72–75. doi: [10.1109/LCOMM.2018.2881182](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2881182).
- [22] BECK A, BEN-TAL A, and TETRUASHVILI L. A sequential parametric convex approximation method with applications to nonconvex truss topology design problems[J]. *Journal of Global Optimization*, 2010, 47(1): 29–51. doi: [10.1007/s10898-009-9456-5](https://doi.org/10.1007/s10898-009-9456-5).
- [23] HUANG Ronglan, WAN Dehuan, JI Fei, *et al.* Performance analysis of NOMA-based cooperative networks with relay selection[J]. *China Communications*, 2020, 17(11): 111–119. doi: [10.23919/JCC.2020.11.010](https://doi.org/10.23919/JCC.2020.11.010).
- [24] LV Lu, CHEN Jian, and NI Qiang. Cooperative non-orthogonal multiple access in cognitive radio[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(10): 2059–2062. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2596763](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2596763).
- [25] HU Yang, ZHANG Xuedan, and DONG Yuhan. A novel sub-domain cooperative scheme in random relay selection wireless networks[C]. 2013 47th Annual Conference on Information Sciences and Systems, Baltimore, USA, 2013: 1–6. doi: [10.1109/CISS.2013.6552301](https://doi.org/10.1109/CISS.2013.6552301).
- [26] MANGLAYEV T, KIZILIRMAK R C, and KHO Y H. Optimum power allocation for non-orthogonal multiple access (NOMA)[C]. The IEEE 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, Baku, Azerbaijan, 2016: 1–4. doi: [10.1109/ICAICT.2016.7991730](https://doi.org/10.1109/ICAICT.2016.7991730).
- 阔永红: 女, 教授, 研究方向为无线通信与信号处理。  
薛彦文: 男, 硕士生, 研究方向为协作非正交多址接入、反向散射通信。  
吕璐: 男, 副教授, 研究方向为物理层安全、隐蔽通信等。  
贺冰涛: 男, 讲师, 研究方向为非正交多址接入、协作通信等。  
陈健: 男, 教授, 研究方向为无线网络虚拟化、非正交多址接入。

责任编辑: 马秀强