

Performance Analysis of Physical Layer Security of Non-Orthogonal Multiple Access System in Coordinated Multi-Point Network

Yong Huang, Jiang Wu*

Department of Electronic Information and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang
Email: 1341436456@qq.com, *wujiang@zstu.edu.cn

Received: Nov. 8th, 2019; accepted: Nov. 26th, 2019; published: Dec. 3rd, 2019

Abstract

The physical layer security of non-orthogonal multiple access systems based on cooperative multi-point network is studied. Considering the presence of eavesdroppers in a coordinated multi-point network, the relay adopts an amplification and forwarding (AF) strategy to analyze the physical layer security performance of NOMA-CoMP system and derive the expression of the global secret outage probability and the secret outage probability of each subchannel. It is verified that the physical layer security performance of the NOMA-CoMP system is better than that of the non-CoMP multi-cell NOMA system.

Keywords

Coordinated Multi-Point, Non-Orthogonal Multiple Access, Physical Layer Security

基于协作多点网络的非正交多址系统的物理层安全研究

黄勇, 吴江*

浙江理工大学信息学院, 浙江 杭州
Email: 1341436456@qq.com, *wujiang@zstu.edu.cn

收稿日期: 2019年11月8日; 录用日期: 2019年11月26日; 发布日期: 2019年12月3日

*通讯作者。

摘要

研究了基于协作多点网络的非正交多址系统的物理层安全问题, 在协作多点网络中存在一个窃听者且中继采用放大转发策略的场景下, 对NOMA-CoMP系统的物理层安全性能进行理论分析, 推导了全局保密中断概率和各子信道保密中断概率的闭式解。经验证, NOMA-CoMP系统的物理层安全性能优于非CoMP的多小区NOMA系统。

关键词

协作多点, 非正交多址, 物理层安全, 放大转发

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

非正交多址(NOMA)技术具有频谱效率高和网络吞吐量大等特点, 被认为是未来第五代(5G)和超 5G 蜂窝网络系统的多址技术[1] [2] [3]。协作多点技术具有减轻小区间干扰、提高小区吞吐量和小区边缘用户性能等特点。在同一小区不同扇区或不同小区之间可以利用 CoMP 技术协作调度, 对小区间干扰进行减轻甚至利用[4] [5]。文献[6]最先提出把 NOMA 技术引入到 CoMP 无线网络进行性能分析, 研究结果表明所提出协作叠加编码算法能够提高边缘用户的速率的同时, 不降低中心用户速率。最近几年, 基于 NOMA-CoMP 系统的资源调度和性能分析得到了大量研究[7] [8] [9] [10] [11]。

无线通信的广播特性使得它比有线通信存在更大的安全性问题, 随着量子计算机等技术的发展使得基于计算量加密的传统加密方法适用受限, 在未来 5G 无线网络中, 保证通信安全显得尤为重要。文献[12]最先提出了物理层安全的概念, 并且设计了无线网络中存在窃听者的信道模型。文献[13]研究了异构蜂窝网络物理层安全的性能, 构建了基于几何理论的物理层安全模型, 推导了用户接入中继基站、宏基站、为基站的中断概率闭式解。

最近, 基于 NOMA 系统的网络安全性能分析成为了研究热点[14] [15] [16] [17]。文献[14]针对 NOMA 系统的保密性提出了用户的解码顺序、传输速率和功率最优设计, 并推导了最小发射功率和最大化保密速率问题受到保密中断和服务质量约束限制的闭式解。文献[15]研究了合作 NOMA 系统的物理层安全, 对 NOMA 系统使用放大转发(AF)和解码转发(DF)协议的保密性能进行了研究, 实验结果表明 AF 和 DF 协议达到的保密性能几乎相同, 且 NOMA 系统的保密性能与中继和弱用户之间的信道条件无关。文献[16]针对存在多个窃听者的情况, 提出了一种两阶段的 NOMA 安全中继选择算法, 该算法保证了一个信源到目标用户的容量最大化并且确保另一信源到目标可成功接收。文献[17]考虑了存在自干扰的现实假设下, 提出了用户在 NOMA 中继系统中使用解码转发协议的全双工模型, 并导出了在延迟受限的传输模式下的停机概率、分集阶数、遍历率和系统吞吐量的闭式解。然而, 目前关于 NOMA 系统的物理层安全的大量研究工作中, 大部分并没有考虑 NOMA 子信道差异化情况, 而且并没有研究工作考虑在 CoMP 网络中研究 NOMA 系统的物理层安全。因此, 这就是本文的研究动机。

本文考虑基于协作多点网络研究多小区的 NOMA 子信道化差化的非正交多址系统的物理层安全, 考虑了存在窃听者情况下, 中继处实施放大转发(AF)策略的 NOMA-CoMP 系统性能, 分析并推导了

NOMA 子信道的保密速率, 全局保密中断概率和各子信道保密中断概率的表达式。最后, 通过仿真证明了随着信噪比增加, 全局保密中断概率和各子信道保密中断概率均趋向于定值, 并且验证了影响 NOMA-CoMP 系统全局中断概率的因素。

2. 系统模型

如图 1 所示, 考虑一个存在窃听者的双小区 NOMA-CoMP 模型, $\mathbf{B} = \{1, \dots, B\}$ 表示基站集, $\mathbf{M} = \{1, \dots, M\}$ 表示每个小区的移动用户集, 假设用户和基站均为单天线。基站将可用带宽划分为子信道集 $\mathbf{S} = \{1, \dots, S\}$ 。假设 BS 可获知完整的信道状态信息(CSI), BS 可根据完整的 CSI 对用户进行联合子信道调度和功率分配。假设各小区基站与边缘用户之间无直接链路, 需通过各小区中继与边缘用户进行通信。窃听者可在中继到用户的下行链路中被动窃听。 $P_{v,j}^{(s)}$ 表示子信道 s 分配给用户 j 的功率, 满足 $\sum_{j \in \mathbf{M}} P_{v,j}^{(s)} \leq P_v^{(s)}$ 和 $P_v^{(s)} = P/S$, 其中 P 为每个基站的总发射功率, 我们假设各个基站总发射功率相等。假设各个基站总发射功率相等。考虑传输信道为块衰落信道, $h_v^{(s)}$ 表示基站与中继之间的子信道 s 的信道条件复系数, 且 $h_v^{(s)} = g_v^{(s)} / G(d_v^{(s)})$, 其中 $g_v^{(s)}$ 表示瑞利信道衰落增益, d_v 表示中继 v 与基站 b 之间的距离, $G(\cdot)$ 表示路径损耗函数。假设 $x_j^{(s)}$ 表示子信道 s 上的传输信号, 每个子信道可同时传输两个用户, 则基站到中继 v 在子信道 s 上的传输信号在中继 v 的接收端表示为:

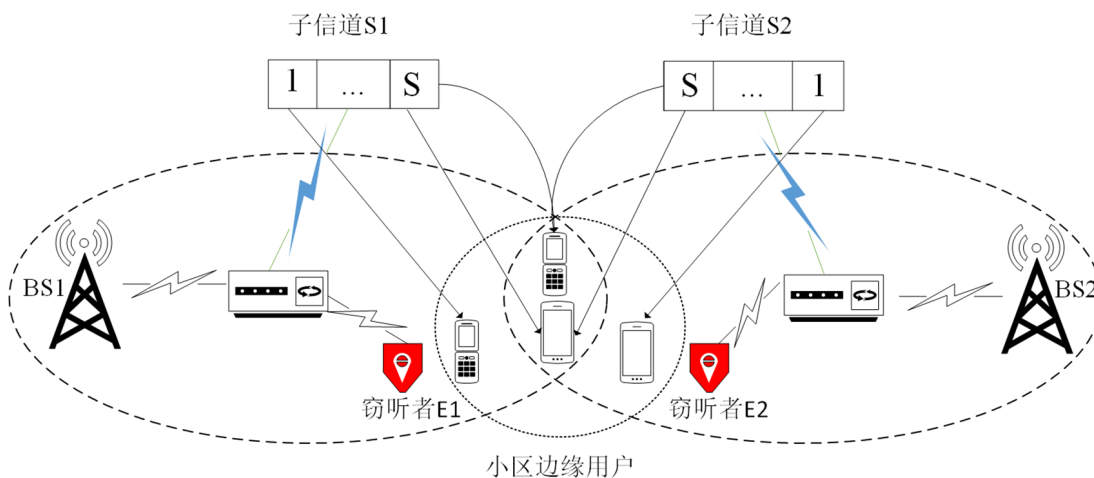


Figure 1. Double-cell NOMA-CoMP model with eavesdropper
图 1. 存在窃听者的双小区 NOMA-CoMP 模型

$$y_v^{(s)} = h_v^{(s)} \left(P_{v,1}^{(s)} x_1^{(s)} + P_{v,2}^{(s)} x_2^{(s)} \right) + n_v^{(s)} \tag{1}$$

其中, $n_v^{(s)} \sim \text{CN}(0, \sigma_n^2)$ 表示叠加高斯白噪声(AWGN), σ_n^2 是噪声变量。

在中继 v 处采用放大转发(AF)协议, θ 表示放大因子, $H_{v,j}^{(s)}$ 表示中继 v 到用户 j 的子信道 s 的信道条件复系数, $n_{v,j}^{(s)}$ 表示中继 v 到用户 j 的子信道 s 的叠加高斯白噪声, 则中继 v 在子信道 s 上的传输信号到用户 j 的接收端表示为:

$$y_{v,j}^{(s)} = \theta H_{v,j}^{(s)} \sum_{i=1}^V y_v^{(s)} + n_{v,j}^{(s)} \tag{2}$$

其中, $\theta = \sqrt{\frac{1}{|h_v^{(k)}|^2 + 1/\tau}}$, $\tau = \text{SNR} = \frac{P_s^{(s)}}{\sigma^2} = \frac{P_v^{(s)}}{\sigma^2}$ 表示下行链路的平均信噪比。

窃听器 E 的接收端截获的信号表示为:

$$y_{v,E}^{(s)} = \theta H_{v,E}^{(s)} \sum_{i=1}^V y_v^{(s)} + n_{v,E}^{(s)} \quad (3)$$

因此, 在 NOMA-CoMP 系统中, 中继 v 到用户 j 的传输速率可以表示为:

$$R_{v,j}^{(s)} = lb\left(1 + \varphi_{v,i}^{(s)}\right) \quad (4)$$

中继 v 到窃听器 E 的传输速率表示为:

$$R_{E,i}^{(s)} = lb\left(1 + \varphi_{E,i}^{(s)}\right) \quad (5)$$

令各基站到中继和中继到各用户的接收端处叠加的高斯白噪声相等, $t_{v,1}^{(s)} + t_{v,2}^{(s)} = 1$, $P_{v,j}^{(s)} = t_{v,j}^{(s)} P_v^{(s)}$, 则

$$\varphi_{v,1}^{(s)} = \frac{\theta^2 |H_{v,1}^{(s)}|^2 |h_v^{(k)}|^2 (P_{1,1}^{(k)} + P_{2,1}^{(k)})^2}{|H_{v,1}^{(s)}|^2 |h_v^{(k)}|^2 (P_{1,2}^{(k)} + P_{2,2}^{(k)})^2 + \theta^2 |H_{v,1}^{(s)}|^2 \sigma^2 + \sigma^2} \quad (6)$$

$$\varphi_{v,2}^{(s)} = \frac{\theta^2 |H_{v,2}^{(s)}|^2 |h_v^{(s)}|^2 (P_{1,2}^{(s)} + P_{2,2}^{(s)})^2}{\theta^2 |H_{v,1}^{(s)}|^2 \sigma^2 + \sigma^2} \quad (7)$$

$$\varphi_{E,i}^{(s)} = \frac{\theta^2 |H_{v,E}^{(s)}|^2 |h_v^{(s)}|^2 (P_{1,i}^{(s)} + P_{2,i}^{(s)})^2}{\theta^2 |H_{v,E}^{(s)}|^2 \sigma^2 + \sigma_E^2} \quad (8)$$

由(4)和(5)可得在 NOMA-CoMP 系统中子信道 k 上的用户 j 的保密中断速率表示为:

$$R_j^{(s)} = \left[R_{v,j}^{(s)} - R_{v,E}^{(s)} \right]^+ \quad (9)$$

其中 $[w]^+ = \max\{w, 0\}$ 。

3. NOMA-CoMP 系统保密性能分析

保密中断概率定义为可达保密速率小于目标保密速率的概率, 是评估无线移动网的物理层安全性能的重要指标。由(12)可以得到子信道 s 上的用户 j 的保密中断概率为:

$$P_{out}^{(s)} = \Pr\left\{R_1^{(s)} < R_1 \parallel R_2^{(s)} < R_2\right\} = 1 - \Pr\left\{R_1^{(s)} > R_1, R_2^{(s)} > R_2\right\} \quad (10)$$

由于各子信道是否发生中断是相互独立的, 则全局中断概率表示为:

$$P_{out} = \prod_{s=1}^S P_{out}^{(s)} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \Pr\left\{R_1^{(s)} > R_1, R_2^{(s)} > R_2\right\} \\ &= \Pr\left\{lb\left(1 + \varphi_{v,1}^{(s)}\right) - lb\left(1 + \varphi_{E,1}^{(s)}\right) > R_1, lb\left(1 + \varphi_{v,2}^{(s)}\right) - lb\left(1 + \varphi_{E,2}^{(s)}\right) > R_2\right\} \\ &= \Pr\left\{\min\left(|h_v^{(s)}|^2, |H_{v,2}^{(s)}|^2\right) > |H_{v,2}^{(s)}|^2 X_1 + X_2\right\} \\ &= \Pr\left\{\min\left(|h_v^{(s)}|^2 \tau, |H_{v,E}^{(s)}|^2 \tau_E\right) > T_1, \min\left(|h_v^{(s)}|^2, |H_{v,2}^{(s)}|^2\right) > |H_{v,2}^{(s)}|^2 X_1 + X_2\right\} \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$T_1 = \frac{1 - (t_{1,2}^{(s)} + t_{2,2}^{(s)})^2 2^{R_1}}{(t_{1,2}^{(s)} + t_{2,2}^{(s)})^2 (t_{1,1}^{(s)} + t_{2,1}^{(s)})^2 2^{R_1}} \quad (13)$$

$$T_2 = \frac{|H_{v,E}^{(s)}|^2 |h_v^{(s)}|^2 \tau \tau_E 2^{R_2} (t_{1,2}^{(s)} + t_{2,2}^{(s)})^2}{|H_{v,E}^{(s)}|^2 \tau_E + \tau |h_v^{(s)}|^2} + 2^{R_2} - 1 \quad (14)$$

$$X_1 = 2^{R_2} \tau_E / \tau \quad (15)$$

$$X_2 = (2^{R_2} - 1) / \left(\tau (t_{1,2}^{(s)} + t_{2,2}^{(s)})^2 \right) \quad (16)$$

等式(15)的第一部分可简化为:

$$\begin{aligned} P_a &= \Pr \left\{ \min \left(|h_v^{(s)}|^2, |H_{v,2}^{(s)}|^2 \right) > |H_{v,E}^{(s)}|^2 X_1 + X_2 \right\} \\ &= \Pr \left\{ |h_v^{(s)}|^2 > |H_{v,E}^{(s)}|^2 X_1 + X_2, |H_{v,2}^{(s)}|^2 > |H_{v,E}^{(s)}|^2 X_1 + X_2 \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

令 $z = |H_{v,E}^{(s)}|^2$, $x_1 = |h_v^{(s)}|^2$, $x_2 = |H_{v,2}^{(s)}|^2$, $x_3 = \lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2 + \lambda_E$ 由定理: 事件 A, B 相互独立, 有

$P(AB) = P(A)P(B)$, 指数概率密度函数 $f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x > 0, \lambda > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$ 和分布函数

$P(X \leq x) = F(x) = 1 - e^{-\lambda/\theta}$, $x > 0$, 可求得(16)的进一步简化:

$$\begin{aligned} P_a &= \int_0^{+\infty} \Pr \{ x_1 > zX_1 + X_2, x_2 > zX_1 + X_2 \} \lambda_E e^{-\lambda_E z} dz \\ &= \frac{\lambda_E e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)X_2}}{x_3} \int_0^{+\infty} e^{-x} dx \end{aligned} \quad (18)$$

同理, 等式(15)的第二部分可简化为:

$$P_b = \frac{\lambda_E e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)X_2}}{x_3} e^{-x_3 T_1 / \tau_E} \quad (19)$$

因此, NOMA-CoMP 系统各子信道的中断概率表示为:

$$P_{out}^{(s)} = 1 - (P_a - P_b) \quad (20)$$

4. 仿真结果

在以上 NOMA-COMP 系统物理层安全理论分析的基础上, 本部分将利用 MATLAB 软件得到上述 NOMA-CoMP 物理层安全模型的仿真结果, 对所提出的算法性能进行评估, 并且与传统的 NOMA-非 CoMP 物理层安全算法进行性能对比。在以下仿真中, 基站峰值功率设为 3 dBm, 联合子信道数设为 3, 每个 NOMA 子信道上叠加的配对用户数为 2, 每个子信道在用户接收端上叠加的高斯白噪声均相等。

图 2 表明了存在窃听者的 NOMA-CoMP 系统的全局中断概率、各联合子信道中断概率与信噪比的关系, 其中各子信道上强用户与弱用户的目标速率分别为 $R_1 = 0.5BPCU$ 和 $R_2 = 2BPCU$ 。由图 2 可知, 当信噪比小于 30 dB 时, 全局保密中断概率和各子信道保密中断概率随着信噪比增加而下降, 中继处采用放大转发协议的 NOMA-CoMP 系统的总体性能随着信噪比增加而增加; 当系统处于高信噪比时, 全局保

密中断概率和各子信道保密中断概率趋向于定值, 仿真结果表明子信道上叠加的高斯白噪声对系统物理层安全性能有着关键影响。从图 2 可以看到, 各子信道的保密中断概率随着信噪比的变化, 呈现出的差异更加明显, 这表明子信道的信道条件也是影响 NOMA-CoMP 系统物理层安全的因素, 且信道条件越好, 保密中断概率越小, NOMA-CoMP 系统物理层安全性能越好。

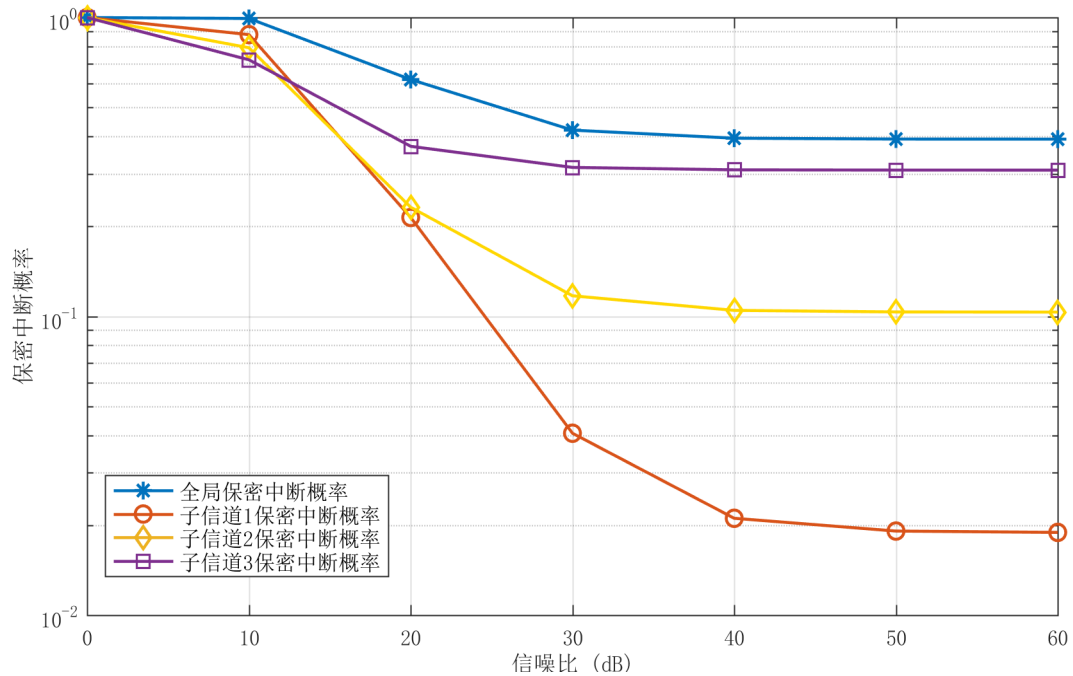


Figure 2. The relationship between the secrecy outage probability and the SNR in the NOMA-CoMP system
图 2. NOMA-CoMP 系统中保密中断概率与信噪比之间的关系

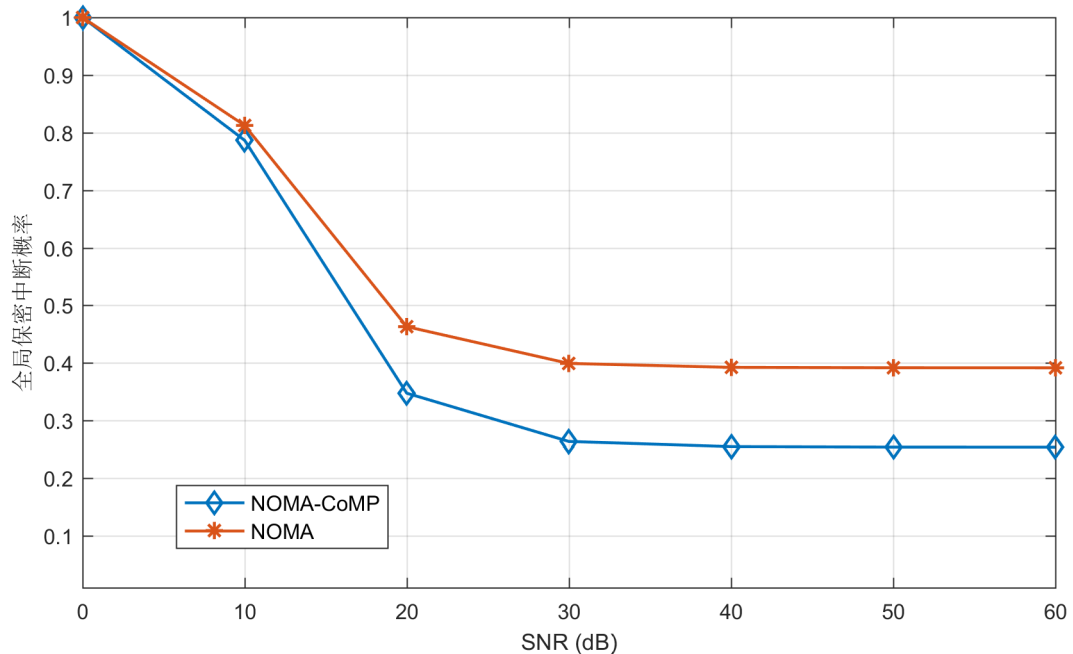


Figure 3. Comparison of security performance between NOMA-CoMP system and NOMA-non-CoMP system
图 3. NOMA-CoMP 系统与 NOMA-非 CoMP 系统的安全性能对比关系

图 3 对使用 CoMP 技术和不使用 CoMP 技术的多小区 NOMA 系统的物理层安全性能进行了对比, 其中各子信道上强用户与弱用户的目标速率分别为 $R_1 = 0.5BPCU$ 和 $R_2 = 1BPCU$ 。由图 3 分析可知, 多小区 NOMA-CoMP 网络在同等条件下的保密中断概率要比多小区 NOMA-非 CoMP 网络高。

5. 总结

本文研究了基于协作多点网络的非正交多址系统的物理层安全, 考虑了协作多点网络中存在窃听者的情况下, 中继采用放大转发(AF)策略, 分析并推导了 CoMP 网络中 NOMA 子信道的保密速率, 全局保密中断概率和各子信道保密中断概率的表达式。最后, 仿真结果表明, 随着信噪比增加, 全局保密中断概率和各子信道保密中断概率均趋向于定值, 验证了影响 NOMA-CoMP 系统全局中断概率的因素, 并且证明了 NOMA-CoMP 系统的物理层安全性能要比非 CoMP 的多小区 NOMA 系统好。

基金项目

本课题获得泛网无线通信教育部重点实验室(BUPT) (批准编号 KFKT-2018101)的资助。

参考文献

- [1] Saito, Y., Kishiyama, Y., Benjebbour, A., Nakamura, T., Li, A. and Higuchi, K. (2013) Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access. *IEEE 77th Vehicular Technology Conference*, Dresden, 1-5. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2013.6692652>
- [2] Ding, Z., Fan, P. and Poor, H.V. (2016) Impact of User Pairing on 5G Nonorthogonal Multiple-Access Downlink Transmissions. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **65**, 6010-6023. <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2480766>
- [3] Ali, M.S., Tabassum, H. and Hossain, E. (2016) Dynamic User Clustering and Power Allocation for Uplink and Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) Systems. *IEEE Access*, **4**, 6325-6343. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2604821>
- [4] Bassoy, S., Farooq, H., Imran, M.A. and Imran, A. (2017) Coordinated Multi-Point Clustering Schemes: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **19**, 743-764. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2662212>
- [5] Liu, D., Han, S., Yang, C. and Zhang, Q. (2016) Semi-Dynamic User-Specific Clustering for Downlink Cloud Radio Access Network. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **65**, 2063-2077. <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2431917>
- [6] Choi, J. (2014) Non-Orthogonal Multiple Access in Downlink Coordinated Two-Point Systems. *IEEE Communications Letters*, **18**, 313-316. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2013.123113.132450>
- [7] Tian, Y., et al. (2016) On the Performance of Opportunistic NOMA in Downlink CoMP Networks. *IEEE Communications Letters*, **20**, 998-1001. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2545672>
- [8] Tian, Y., Nix, A. and Beach, M. (2017) On the Performance of a Multi-Tier NOMA Strategy in Coordinated Multi-Point Networks. *IEEE Communications Letters*, **21**, 2448-2451. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2725258>
- [9] Ali, M.S., Hossain, E. and Kim, D.I. (2018) Coordinated Multipoint Transmission in Downlink Multi-Cell NOMA Systems: Models and Spectral Efficiency Performance. *IEEE Wireless Communications*, **25**, 24-31. <https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1700094>
- [10] Singh, R. (2017) Sub-Channel Assignment and Resource Scheduling for Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in Downlink Coordinated Multi-Point Systems. *20th Conference on Innovations in Clouds, Internet and Networks*, Paris, 17-22. <https://doi.org/10.1109/ICIN.2017.7899244>
- [11] Sun, X., et al. (2018) Joint Beamforming and Power Allocation in Downlink NOMA Multiuser MIMO Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **17**, 5367-5381. <https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2842725>
- [12] Wyner, A.D. (1975) The Wire-Tap Channel. *The Bell System Technical Journal*, **54**, 1355-1387. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1975.tb02040.x>
- [13] 钟州, 张波, 戚晓慧, 黄开枝. 多天全双工中继辅助的异构蜂窝网物理层安全性能分析[J]. 通信学报, 2019, 40(5): 24-31.
- [14] He, B., Liu, A., Yang, N. and Lau, V.K.N. (2017) On the Design of Secure Non-Orthogonal Multiple Access Systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **35**, 2196-2206. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2725698>

- [15] Chen, J., Yang, L. and Alouini, M. (2018) Physical Layer Security for Cooperative NOMA Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **67**, 4645-4649. <https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2789223>
- [16] Feng, Y., Yan, S., Liu, C., Yang, Z. and Yang, N. (2019) Two-Stage Relay Selection for Enhancing Physical Layer Security in Non-Orthogonal Multiple Access. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, **14**, 1670-1683. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2018.2883273>
- [17] Wang, X., Jia, M., Ho, I.W., Guo, Q. and Lau, F.C.M. (2019) Exploiting Full-Duplex Two-Way Relay Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access. *IEEE Transactions on Communications*, **67**, 2716-2729. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2890264>