

UAV 辅助 NOMA-V2X 通信网络 性能的优化

Performance Optimization of UAV-assisted NOMA-V2X Communication Network

薛建彬,武清清,张海军(兰州理工大学,甘肃 兰州 730050)

Xue Jianbin, Wu Qingqing, Zhang Haijun (Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

摘要:

在能量受限的无人机辅助 NOMA-V2X (Non-Orthogonal Multiple Access Assisted Vehicle-to-Everything) 网络中引入无线信息和能量同时传输技术,解决了无人机续航能力差的问题。以最大化系统的传输速率为优化目标,在联合优化过程中,采用逐次凸逼近 (Successive Convex Approximation, SCA) 方法,将非凸复杂优化问题分解为无人机位置、发射功率、基站对用户的功率分配 3 个子优化问题,找到了无人机轨迹、基站分配给车辆的发射功率和中继节点发射功率的最优值。最后通过仿真验证了所提方案的有效性。

关键词:

非正交多址接入技术; UAV 中继通信; SWIPT; V2X 网络

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2023.05.008

文章编号: 1007-3043(2023)05-0045-05

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

It introduces wireless information and energy simultaneous transmission technology in the energy-limited UAV-assisted NOMA-V2X network to solve the problem of poor UAV endurance. Taking maximizing the transmission rate of the system as the optimization goal, it adopts the successive convex approximation (SCA) method to decompose the non-convex complex optimization problem into three sub-optimization problems: UAV position, transmit power, and power allocation of base station to users in the joint optimization process, and then the optimal value of the UAV trajectory, the transmission power allocated by the base station to the vehicle, and the transmission power of the relay node are found. Finally, the effectiveness of the proposed scheme is verified by simulation.

Keywords:

Non-orthogonal multiple access; UAV relay communication; SWIPT; V2X network

引用格式: 薛建彬,武清清,张海军. UAV辅助NOMA-V2X通信网络性能的优化[J]. 邮电设计技术, 2023(5): 45-49.

1 概述

近年来,车辆通信因其在提高道路安全性和缓解交通压力方面的巨大潜力而受到了广大学者的青睐^[1]。V2X 应用对大连接的要求很高,这给车连网络带来了新的挑战,尤其是密集的环境下会造成严重的数据拥塞^[2]。由于现有的 LTE 网络是基于正交多址 (Orthogonal Multiple Access, OMA) 的,有限的频谱资源得不到充分有效的利用,且密集网络中数据拥塞和接入效率低的严重情况无法避免^[3],因而出现了基于

发射端的功率域复用^[4]和接收端的连续干扰消除 (Successive Interference Cancellation, SIC)^[5] 的 NOMA 技术。NOMA 作为 5G 无线网络的潜在解决方案,能够充分利用其容量,从而实现更高的传输速率、更低的系统延迟和更高的可靠性^[6]。沿着将 NOMA 集成到各种场景这一方向,文献[7-9]的学者已经做了大量的研究并取得了一些成果。

在复杂城市环境中,由于高楼等的阻挡,V2X 的实现面临着严重压力,因此需要通过采用中继辅助方式来扩展车辆连接的覆盖范围,而无人机 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 作为空中基站应当是首选方式。在文献[10-11]中,考虑了采用无人机作为中继。数

收稿日期: 2023-04-10

据显示,目前无人机续航能力普遍较差,这对利用无人机作为空中中继站辅助车辆间的通信是一个挑战,例如文献[12]虽然提到了无人机由于蓄电池供电而导致能量受限从而限制了中继的计算能力,但没提出相应的解决办法。为增加无人机的续航能力,本文考虑了目前被广泛关注的无线携能(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)技术,并考虑了一个基于SWIPT的UAV辅助NOMA-V2X网络,地面基站通过空中中继为断开连接的地面车辆提供服务。

2 系统模型

本文考虑了一个UAV做空中中继R来辅助通信的NOMA-V2X网络,系统模型如图1所示。

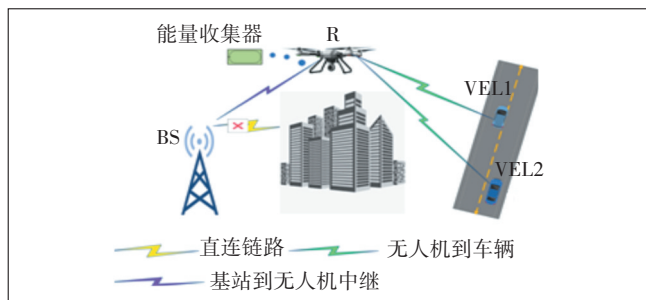


图1 不同SNR的识别结果

2个未连接的车辆VEL1和VEL2分别以恒定的速度在不同的车道上行驶,由于建筑物的阻碍,基站(BS)与车辆之间没有直接通路。整个信息交互过程需要2个阶段来完成。第1阶段,BS将发送给目标车辆的信号 S_1 和 S_2 进行叠加编码,并将混合信号 $\sqrt{P_1}S_1 + \sqrt{P_2}S_2$ 发送给中继R,其中 P_1 和 P_2 分别是BS分配给VEL1和VEL2的功率。第2阶段,UAV中继根据DF中继协议的处理方式把接收到的信号分别转发给VEL1和VEL2,假设中继R遵循半双工的工作模式。中继采用解码转发(DF)的工作方式而没有采用放大转发(AF)方式,是为了适用NOMA传输网络中的接收机采用串行干扰消除技术(SIC)的工作方式而做的选择。中继采用DF的工作方式可以很好地与SIC工作原理配合起来,采用分时隙转发的方式,更加适合NOMA的传输原理。此系统中,假设一定的时间 T 内UAV以固定的高度飞行,则BS、VEL1和VEL2的水平位置可表示为: $W_i = [x_i, y_i]^T, i \in \{r, 1, 2\}$,无人机的水平位置是 $q = [x, y]^T$,BS到UAV、UAV到VEL1和VEL2的信道增益分别用 h_r, h_1 和 h_2 表示。在不失通用性的

前提下,采用自由空间路径损耗模型的传输模型作为空对地的无线信道模型^[13],则有:

$$h_i = \frac{\beta_0}{\|w_i - q\| + H^2} = \frac{\beta_0}{\left[(x - x_i(n))^2 + (y - y_i(n))^2 + H^2 \right]^{1/2} + H^2} \quad (1)$$

其中, $i \in \{r, 1, 2\}$, H 为无人机的飞行高度, β_0 是参考距离 $d=1$ m时的无人机对地链路的信道增益,其与地面用户天线的发射增益和无人机天线的接收增益以及发射信号的波长等有关^[14]。假设所有信道是AWGN信道, $Z_k \sim \text{CN}[0, \sigma_k^2(n)]$, $k \in \{1, 2\}$, $\sigma_k^2(n)$ 表示节点 k 的噪声功率。第1阶段,BS分别以功率 P_1 和 P_2 将目的信号 S_1 和 S_2 发送给UAV,则中继UAV接收到的信号为:

$$y_r = \sqrt{P_1} h_r S_1 + \sqrt{P_2} h_r S_2 + Z_r \quad (2)$$

其中, $Z_r \sim \text{CN}(0, \sigma_r^2)$ 是中继处引入的噪声。根据下行NOMA链路的原理,有 $h_1 > h_2$,即VEL1的信道增益大于VEL2的。在中继UAV处部署SWIPT能量收集器,通过SWIPT技术,UAV在接收信息的同时,也根据自身的需求收集一部分能量,并加以存储。第2阶段,中继节点基于信号功率分割比 $\rho_k:1 - \rho_k$ 将接收到的信息 y_r 进行处理后发送给VEL1和VEL2。UAV发送信息可以表示为:

$$x_{R_i} = \sqrt{(1 - \rho_k) b_i P_{rk}} y_r + Z_{ri} \quad (3)$$

其中, $Z_{ri} \sim \text{CN}(0, \sigma_{ri}^2)$ 表示UAV处引入的噪声。 b_i 为中继节点发射功率系数, $b_2 = 1 - b_1$,且设有 $\sigma_{ri}^2 = \sigma_k^2(n) = \sigma^2$ 。其中, P_{rk} 表示UAV的发送功率,且有^[13]:

$$P_{rk} = \eta \rho_k (P_1 |h_1|^2 + P_2 |h_2|^2) \quad (4)$$

其中, η 表示能量转化效率, $\eta \in [0, 1]$ 。在VEL1处,利用SIC技术首先解码VEL2的消息,然后从接收的信号中删除,最后再解码自己的信息。则在VEL1解码VEL2信息和解码自身信息的速率分别为:

$$R_{1,2} = \log_2 \left[1 + \frac{(1 - \rho_k) b_2 P_{rk} h_1}{(1 - \rho_k) b_1 P_{rk} h_1} \right] \quad (5)$$

$$R_{1,1} = \log_2 \left[1 + \frac{(1 - \rho_k) b_1 P_{rk} h_1}{\sigma_1^2} \right] \quad (6)$$

则VEL2解码自身信息的速率为:

$$R_{2,2} = \log_2 \left[1 + \frac{(1 - \rho_k) b_2 P_{rk} h_2}{(1 - \rho_k) b_1 P_{rk} h_2 + \sigma_2^2} \right] \quad (7)$$

其中, σ_1^2 和 σ_2^2 分别为VEL1和VEL2处引入的高

斯噪声,为了计算方便,令 $\sigma^2 = \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ 。

3 问题分析

通过优化中继轨迹、基站分配给车辆的功率系数、中继节点功率分配系数和中继节点处的能量分割比来建立本文的优化目标,目标函数可以表示为:

$$\text{PM1:} \quad \max_{q, \rho_k} (R_{1,1} + R_{2,2}) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. C1: } & R_k \geq R_k^{\text{th}} \\ \text{C2: } & \{x - x[i]\}^2 + \{y - y[i]\}^2 \leq V_{\text{th}}^2 \\ \text{C3: } & x_{\min} \leq x[i] \leq x_{\max}, y_{\min} \leq y[i] \leq y_{\max} \\ \text{C4: } & P_1 + P_2 \leq E_{\text{BS}} \\ \text{C5: } & P_{rk} \leq E_{\text{rth}} \\ \text{C6: } & P_{rk} \geq 0, P_1 \geq 0, P_2 \geq 0 \end{aligned}$$

C1~C6的约束条件的 i 表示任意一个时隙, K 表示车辆数。其中C1表示最低的传输速率约束,C2是中继节点的运动速度约束,C3表示UAV可以飞行的距离,即其具有特定的初始和结束位置,这在现实生活中则表现为无人机的空域飞行限制。C4和C5分别表示基站BS和中继节点的能量约束, E_{BS} 和 E_{rth} 分别是基站和中继节点处的能量限制,且 $E_{\text{rth}} = NP_r$, $E_{\text{BS}} = N\bar{P}_s$,其中 \bar{P}_s 和 \bar{P}_r 分别表示基站和无人机的平均发射功率, N 为总的时隙数。C6表示了所有的发射功率都是非负的。显然,目标函数相对于UAV的飞行轨迹和功率变量是非凸的,目标问题无法用标准的凸优化方法去解决。因此,本文采用了交替优化的方法,分别用主次凸逼近(SCA)和凸差(DC)方法来求解轨迹和功率分配的方法,此外中继节点处的功率分割比的优化采用了黄金分割算法。

3.1 固定功率分配的UAV轨迹优化

将分配功率固定,以求得UAV的最佳运行轨迹。因此,目标问题可以表示为:

$$\text{PM1.1:} \quad \max_q (R_{1,1} + R_{2,2}) \quad (9)$$

$$\text{C1: } R_k \geq R_k^{\text{th}}$$

此子目标函数仍然是一个非凸问题,因此可以通过SCA技术和在第 m 次迭代中UAV的位置 $q[m]$ 来解决。由式(1)、(6)和(7)可得到:

$$R_{1,1} = \log_2 \left[\frac{(1 - \rho_k)\beta_0 P_{rk} b_1}{\|w_1 - q\|^2 + H^2} + \sigma_1^2 \right] \quad (10)$$

$$R_{2,2} = \log_2 \left[\frac{(1 - \rho_k)\beta_0 P_{rk} b_2}{\|w_1 - q\|^2 + H^2} + \sigma_2^2 \right] -$$

$$\log_2 \left[\frac{(1 - \rho_k)\beta_0 P_{rk} b_1}{\|w_2 - q\|^2 + H^2} + \sigma_2^2 \right] \quad (11)$$

$$L_1 = \log_2 \left\{ \frac{(1 - \rho_k)\beta_0 P_{rk} b_1}{\|w_1 - q[m]\|^2 + H^2} + \sigma_1^2 \right\} -$$

$$\frac{(1 - \rho_k)\beta_0 P_{rk} b_1}{\left[\|w_1 - q[m]\|^2 + H^2 \right]^2} \times \frac{\|w_1 - q\|^2 - \|w_1 - q[m]\|^2}{\left\{ \frac{(1 - \rho_k)\beta_0 b_1 P_{rk}}{\|w_1 - q[m]\|^2 + H^2} + \sigma_1^2 \right\} \times \ln 2}$$

$$L_2 = \log_2 \left\{ \frac{(1 - \rho_k)\beta_0 P_{rk} b_2}{\|w_1 - q[m]\|^2 + H^2} + \sigma_2^2 \right\} -$$

$$\frac{(1 - \rho_k)\beta_0 P_{rk} b_2}{\left[\|w_1 - q[m]\|^2 + H^2 \right]^2} \times \frac{\|w_1 - q\|^2 - \|w_1 - q[m]\|^2}{\left\{ \frac{(1 - \rho_k)\beta_0 b_2 P_{rk}}{\|w_1 - q[m]\|^2 + H^2} + \sigma_2^2 \right\} \times \ln 2}$$

$$L_3 = \log_2 \left\{ \frac{(1 - \rho_k)\beta_0 P_{rk} b_1}{\|w_2 - q[m]\|^2 + H^2} + \sigma_2^2 \right\} -$$

$$\frac{(1 - \rho_k)\beta_0 P_{rk} b_1}{\left\{ \|w_2 - q[m]\|^2 + H^2 \right\}^2} \times$$

$$\frac{\|w_2 - q\|^2 - \|w_2 - q[m]\|^2}{\left\{ \frac{(1 - \rho_k)\beta_0 b_1 P_{rk}}{\|w_2 - q[m]\|^2 + H^2} + \sigma_2^2 \right\} \ln 2}$$

其中, L_1 、 L_2 和 L_3 分别是第 m 次迭代时 $q[m]$ 的一阶泰勒展开式。则PM1.1可以进一步转化为:

$$\text{PM1.1.1:} \quad \max_q (R_{1,1} + R_{2,2}) = L_1 + L_2 - L_3 \quad (12)$$

$$\text{s.t. } L_1 \geq R_k^{\text{th}}, L_2 - L_3 \geq R_k^{\text{th}}$$

此时,可以使用标准的凸优化工具(例如CVX)来求解UAV的最佳位置。具体细节详见图2。

3.2 固定UAV的轨迹优化中继功率分配

$$\text{PM1.2:} \quad \max_{\rho_k} (R_{1,1} + R_{2,2}) = L_1 + L_2 - L_3 \quad (13)$$

$$\text{s.t. C8: } P_{rk} \leq E_{\text{rth}}$$

迭代UAV轨迹变量、基站功率分配和中继发射功率
①初始化 $m=0, q[m], P_1[m], P_2[m], P_{rk}[m]$ 。
②重复迭代。
③给定 $\{q[m], P_1[m], P_2[m], P_{rk}[m]\}$, 则 $q[m+1]$ 可以通过式(12)进行优化得到。
④给定 $\{q[m+1], P_1[m], P_2[m]\}$, 则 $P_{rk}[m+1]$ 可以通过式(13)进行优化得到。
⑤给定 $\{q[m+1], P_{rk}[m+1]\}$, 则 $P_1[m+1], P_2[m+1]$ 可以通过式(14)进行优化得到。
⑥更新迭代次数 $m=m+1$ 。
⑦直到结果收敛则停止迭代。

图2 算法1:迭代优化算法

此时,约束条件和目标函数是凸的,所以可以使用常规凸优化方法解决此问题。在中继节点处布置了能量收集器,收集的能量的 ρ_k 部分储存, $1-\rho_k$ 部分用于信息传输,采用黄金分割法来获取最优的分割比,即 ρ_k^* ,如图3所示。

获取 ρ_k^*
①假定 $c_1 = \rho_{k_{\min}}, f_1 = \rho_{k_{\max}}, k=1$,公差 ε 用来停止算法迭代且其值取决于所需要的精度, $\varepsilon > 0$,然后计算 $f(\omega_1)$ 和 $f(v_1)$,其中, $\omega_1 = c_1 + 0.382(f_1 - c_1)$, $v_1 = c_1 + 0.618(f_1 - c_1)$ 。
②若 $ f_k - c_k < \varepsilon$,则 $\rho_k^* = (c_k + f_k)/2$,停止迭代,否则继续迭代。若 $f(\omega_1) > f(v_1)$,则执行第3步,否则执行第4步。
③假定 $c_{k+1} = \omega_k, f_{k+1} = f_k, \omega_{k+1} = v_k$,则 $v_{k+1} = c_{k+1} + 0.618(f_{k+1} - c_{k+1})$ 。计算 $f(v_{k+1})$,然后执行第5步。
④假定 $c_{k+1} = c_k, f_{k+1} = v_k, v_{k+1} = \omega_k$,则 $\omega_{k+1} = c_{k+1} + 0.382(f_{k+1} - c_{k+1})$ 。计算 $f(\omega_{k+1})$,然后执行第5步。
⑤假定 $k = k + 1$,然后执行第2步。

图3 算法2:获取最佳功率分割比

3.3 优化基站功率分配

给定UAV的轨迹变化和中继发射功率,基站分配给用户的发射功率可以通过PM1.3子问题来优化,即获得 P_1^*, P_2^* 。

$$\text{PM1.3: } \max_{P_1, P_2} (R_{1,1} + R_{2,2}) = L_1 + L_2 - L_3 \quad (14)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{aligned} P_1 + P_2 &\leq E_{\text{BS}} \\ P_1 &\geq 0, P_2 &\geq 0 \end{aligned}$$

此约束条件与目标函数都是凸的,所以可以通过常规凸优化方法解决此问题。

4 仿真分析

本章对前述理论分析进行了相应的仿真,验证算法的有效性。在无人机辅助的NOMA-V2X系统中,2辆车沿着与y轴相同的方向前后行驶。中继无人机在 $T=0.4$ s内固定高度100m。 $\beta_0=10^{-4}$, $\sigma^2=-110$ dBm, $\bar{P}_s = \bar{P}_r = 1$ W, $R_k^{\text{th}} = 1$ bit/s/Hz, $\eta = 0.8, N=600$ 。

图4所示为系统和速率与无人机发射功率之间的关系示意。从图4可以看出,随着无人机发射功率的增加,系统和速率也随之增加,但最终会趋于稳定,这是由香农公式的约束导致的结果。因此,无人机发射功率的无限增加并不能使系统的和速率继续提高。

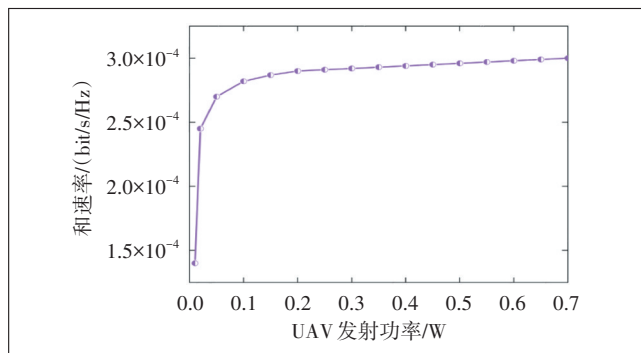


图4 和速率与无人机发射功率

图5所示为不同中继发射功率下的系统和速率随着能量分割比 ρ 的变化而变化的趋势。从图5可以看出,速率先是随着 ρ 的增加而增大,但是随着分割比在0.7处速率达到最大值后则逐渐减小,这是由于当 ρ 增加到一定程度时,其已经不能成为影响能效的主要积极因素。

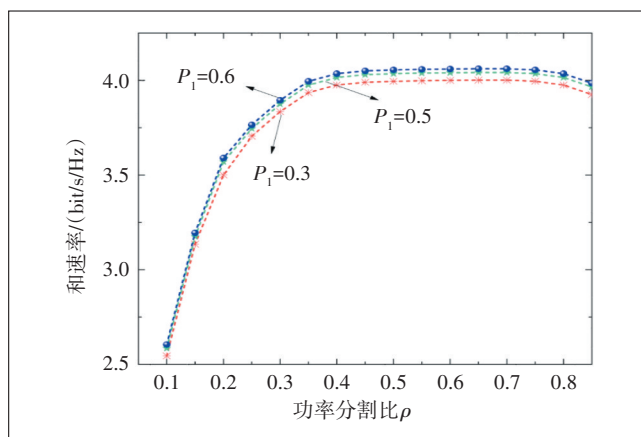


图5 和速率与功率分割比

图6所示为最佳系统中继无人机的位置分布,可以看出UAV的最佳位置是 $(x, y)=(351, 270)$ 。在无人机飞行的初止位置相同的情况下,无人机在 $x=351$ m的线路上飞行多个时隙,其中车辆的和速率较好。此外还可以看到无人机的初止位置是分别是2个不同点 $(200, 300), (500, 500)$ 时,UAV在 $x=351$ m的直线上花费了更多的时隙。使用前述小节给出的算法2,经过有限次的迭代,可以得到系统在不同中继发射功率条件下的和速率(见图7)。从图7可以看出,系统模型具

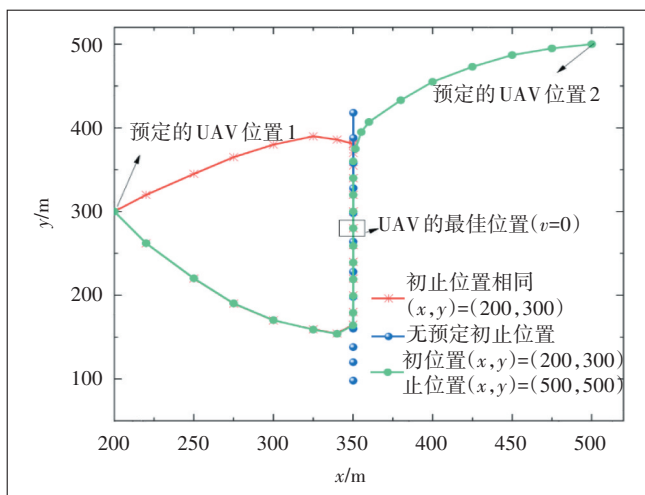


图6 最佳系统中继无人机的位置分布

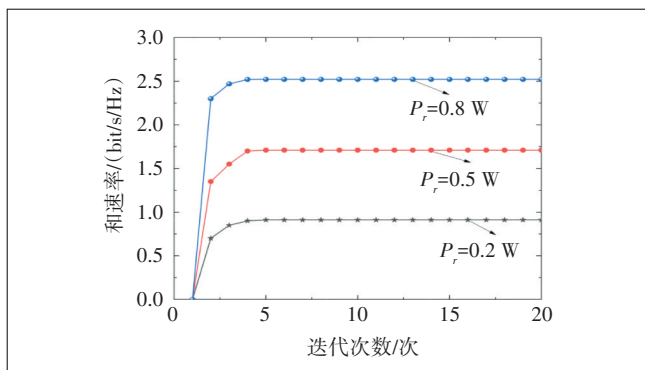


图7 和速率与迭代次数

有很好的迭代速度和收敛性,在第4次迭代的时候均能收敛,并且随着功率的增加,系统速率也增加。

5 结论

本文研究了能量受限的无人机作为中继节点辅助NOMA-V2X网络的功率分配和轨迹规划问题,通过SCA技术和常规凸优化方法将最大化系统传输速率的目标优化问题通过3个子问题一一解决。通过在中继处引入SWIPT技术,使得无人机的续航能力大大增强,更加切合实际场景的应用要求,最后通过仿真验证了文章的结论。

参考文献:

[1] LIU G, WANG Z Q, HU J W, et al. Cooperative NOMA broadcasting/multicasting for low-latency and high-reliability 5G cellular V2X communications [J]. IEEE Internet of things journal, 2019, 6(5): 7828-7838.
[2] SONI T, ALI A R, GANESAN K, et al. Adaptive numerology — A solution to address the demanding QoS in 5G-V2X [C]//2018 IEEE

Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Barcelona, Spain: IEEE, 2018: 1-6.
[3] SONG L Y, LI Y H, DING Z G, et al. Resource management in non-orthogonal multiple access networks for 5G and beyond [J]. IEEE Network, 2017, 31(4): 8-14.
[4] SAITO Y, KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A, et al. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access [C]//2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Dresden, Germany: IEEE, 2013: 1-5.
[5] SUN Q, HAN S F, I C L, et al. On the ergodic capacity of MIMO NOMA systems [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(4): 405-408.
[6] THAPAR S, MISHRA D, SAINI R. Novel outage-aware NOMA protocol for secrecy fairness maximization among untrusted users [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 69(11): 13259-13272.
[7] LIU G, WANG Z Q, HU J W, et al. Cooperative NOMA broadcasting/multicasting for low-latency and high-reliability 5G cellular V2X communications [J]. IEEE Internet of things journal, 2019, 6(5): 7828-7838.
[8] ABBASI O, YANIKOMEROGLU H, EBRAHIMI A, et al. Dynamic NOMA/OMA for V2X networks with UAV relaying [C]//2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall). Victoria, BC, Canada: IEEE, 2020: 1-7.
[9] DO D T, ANH LE T, NGUYEN T N, et al. Joint impacts of imperfect CSI and imperfect SIC in cognitive radio-assisted NOMA-V2X communications [J]. IEEE Access, 2020, 8: 128629-128645.
[10] JIANG X, WU Z L, YIN Z D, et al. Joint power and trajectory design for UAV-relayed wireless systems [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(3): 697-700.
[11] MASARACCHIA A, NGUYEN L D, DUONG T Q, et al. Energy-efficient and throughput fair resource allocation for TS-NOMA UAV-assisted communications [J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(11): 7156-7169.
[12] LIU C X, QUEK T Q S, LEE J. Secure UAV communication in the presence of active eavesdropper (invited paper) [C]//2017 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Nanjing, China: IEEE, 2017: 1-6.
[13] HAN D S, SHI T H. Secrecy capacity maximization for a UAV-assisted MEC system [J]. China Communications, 2020, 17(10): 64-81.
[14] ZHANG Y Y, GE J H, MEN J J, et al. Joint relay selection and power allocation in energy harvesting AF relay systems with ICSI [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2016, 10(15): 1656-1661.

作者简介:

薛建彬,博士,主要研究方向为无线通信理论与技术、信息系统建模与仿真、通信网络与通信系统、多天线系统与技术等;武清清,硕士,主要研究方向为移动边缘计算;张海军,硕士,主要研究方向为非正交多址接入。