



专题：网络数字孪生

面向智慧城市数字孪生网络的资源分配方案

郑明明¹, 彭薇¹, 刘川^{1,2}, 高炜³, 陶静^{2,4}

(1. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 210003;
3. 海南大学, 海南 海口 570228; 4. 南京邮电大学, 江苏 南京 210003)

摘要: 智慧城市旨在提高城市管理效率, 改善市民生活质量。作为智慧城市的重要元素, 大量物联网 (Internet of things, IoT) 设备的接入对实时性数据和资源管理提出了更高要求。然而, 各实体之间数据共享不足, 数据“孤岛”现象普遍存在, 成为智慧城市深入发展的障碍。数字孪生 (digital twin, DT) 作为一种新兴的通信模式, 具有消除智慧城市中数据共享障碍的潜力。提出了一种嵌入式认知无线电 (cognitive radio, CR) 辅助的非正交多址接入 (NOMA) (CR_NOMA) 系统频谱资源分配方案, 在智慧城市数字孪生网络中实现无障碍数据共享。首先, 提出一种新颖的CR模式, 以嵌入方式使用频谱空穴, 即允许次用户接入主用户释放的频谱空穴而不对其他活跃主用户造成额外干扰; 其次, 针对信道老化现象进行信道预测, 以改善系统性能下降问题; 最后, 设计基于在线学习的频谱调度方案, 借助孪生体之间数据共享的先天优势, 实现实时资源调度。仿真结果表明, 所提方案的性能显著优于现有的CR_NOMA和NOMA方法。在等同资源块长情况下, 系统和速率较CR_NOMA方法提升66%, 而较传统NOMA方法提升103%。尤其当设备处于运动状态时, 性能提升更为显著。

关键词: 智慧城市; 物联网; 数字孪生; 嵌入式认知无线电; 非正交多址接入

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025210

Resource allocation scheme for digital twin networks in smart cities

ZHENG Mingming¹, PENG Wei¹, LIU Chuan^{1,2}, GAO Wei³, TAO Jing^{2,4}

1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China

3. Hainan University, Haikou 570228, China

4. Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: Smart cities aim to improve urban management efficiency and enhance residents' quality of life. As a key

收稿日期: 2025-05-22; 修回日期: 2025-09-01

通信作者: 彭薇, pengwei@hust.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划“安全可信的计算互连体系架构与检测技术研究”项目 (No.2023YFF0612900)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China: Research on Secure and Trusted Computing Interconnection Architecture and Detection Technology (No.2023YFF0612900)



element of smart cities, the massive Internet of things (IoT) devices access put higher demands on real-time data and resource management. However, due to insufficient data sharing among entities, data islands are prevalent, becoming an obstacle to the in-depth development of smart cities. Digital twin (DT), as an emerging communication mode, has the potential to eliminate data-sharing barriers in smart cities. A spectrum resource allocation scheme for embedded cognitive radio (CR) assisted non-orthogonal multiple access (NOMA) (CR_NOMA) system was proposed to achieve barrier-free data sharing in the digital twin network of smart cities. Specifically, a novel CR paradigm was firstly proposed, which utilized the spectrum holes in an embedded mode. Namely, the secondary users (SUs) were allowed to access the holes released by idle primary users (PUs) without causing additional interference to other active PUs. Then, considering the channel aging phenomenon, channel prediction was performed to reduce the performance degradation. Finally, an online learning-based spectrum scheduling scheme was designed to realize real-time resource scheduling with the advantage of data sharing between twins. Simulation results demonstrate that the proposed scheme significantly outperforms existing CR_NOMA and traditional NOMA methods. For the same resource block length, the system sum rate increases by 66% compared to the CR_NOMA method, and by 103% compared to the traditional NOMA method. Especially, when the devices are in motion, the performance improvement is more significant.

Key words: smart city, Internet of things, digital twin, embedded cognitive radio, non-orthogonal multiple access

0 引言

经济和人口的持续快速增长为城市化铺平了道路。在过去的几十年里，城市发展经历了从数字城市到智慧城市，再到新型智慧城市的阶段^[1]。随着通信技术发展以及城市规模扩张，无线通信连接数密度和复杂性也大幅增加，频谱短缺问题变得愈加突出，对智慧城市发展带来前所未有的挑战^[2]。

作为智慧城市的重要元素，物联网（Internet of things, IoT）使得所有智能对象可以相互通信。结合5G，IoT实时收集与传输各类城市数据。这些数据种类繁多、规模庞大，对频谱及资源管理提出了更高要求。实时数据分析对于城市管理的动态交互和及时决策至关重要^[3]。城市实体移动会导致数据过时和信息滞后，对数据的实时分析提出了挑战。另一方面，城市中不同实体之间的数据共享对于智慧城市的深入发展不可或缺。然而，数据“孤岛”现象在智慧城市中普遍存在。城市应用如智能交通和智能电网常常处于相互孤立状态，缺乏有效的连接和互动，无法对

城市决策提供有力支持^[4]。

近年来，数字孪生（digital twin, DT）技术的兴起为智慧城市的发展注入了新动力。作为一种新兴的通信范式，它有消除智慧城市中数据共享障碍的潜力^[5]。通过将智慧城市中的物理实体（physical entity, PE）映射到数字虚拟代理，使数据在数字孪生网络（digital twin network, DTN）中畅通无阻地共享，突破了物理城市的限制。经过算法决策后，这些数据可以反馈并指导物理实体的操作。因此，DT技术可以协助解决智慧城市中的频谱资源分配挑战，以及实现城市管理中的实时数据分析和动态决策，对于促进智慧城市发展至关重要^[6-7]。

目前，一些研究已将DT应用于智慧城市以改善其功能。例如，Fan等^[8]提出了一种利用DT技术提高智能交通系统变道效率的方法。Luis等^[9]基于5G网络创建了校园环境的DT模型，用于预测能源消耗、教室使用、建筑占用等事件，为校内研究人员、教师和学生提供有价值的服务。新型冠状病毒（COVID-19）大流行对世界人口产生了深远影响，带来了前所未有的挑战。

智慧城市系统通过模拟气候条件和人类轨迹，为 COVID-19 的预防和控制提供了潜在的解决方案^[10]。借助 DTN，城市管理者可以在孪生城市中模拟和预测物理城市的运行状态，优化资源配置并提高管理效率^[11]。然而，如何利用 DT 辅助解决智慧城市中频谱资源分配不足，以及数据过时现象导致的系统性能下降问题仍是一个挑战^[12-13]。

非正交多址接入 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 作为 5G 关键技术，通过功率域^[14]或码域^[15]复用，多个用户能够共享通信资源，从而在频谱效率、最大连接数和时延等方面，相较于传统正交多址接入 (orthogonal multiple access, OMA) 实现显著的性能提升。与此同时，认知无线电 (cognitive radio, CR) 技术^[16]能够重用频谱，它与 NOMA 的结合已被证明能够有效提升频谱效率，支持更多用户接入^[17]。CR 技术之所以能从 NOMA 技术中获益，源于它们都致力于实现高效的频谱利用，并从不同视角提升频谱效率。CR 通过衬底 (Underlay) 模式或覆盖 (Overlay) 模式^[18]，以机会式接入方式协助低优先级的次用户 (secondary user, SU) 使用主用户 (primary user, PU) 的频谱；而 NOMA 则通过区分多用户的功率等级或签名，使多个用户能够同时传输。CR_NOMA 的概念起源于 2016 年^[19]，实际上是将 NOMA 视为 CR 在两种传统模式中的一种特例。使用服务质量 (quality of service, QoS) 来确定串行干扰消除 (successive interference cancellation, SIC) 的解码顺序。具体而言，时延敏感与低数据速率需求的用户作为 PU，而时延容忍和高数据速率需求的用户作为 SU。在衬底模式下，只要 PU 受到的干扰在可接受范围内，PU 和 SU 就可以同时进行传输；而在覆盖模式下，SU 仅在授权频谱未被任何 PU 占用时才能使用频谱。

由于覆盖模式不允许 PU 与 SU 之间共享频谱，

频谱效率相对较低，因此，大多数 CR_NOMA 相关的研究采用了衬底模式^[17,19]。然而该模式会给 PU 带来额外干扰，从而降低 PU 性能。另外，物理城市中频谱资源分配依赖于准确的信道状态信息 (channel state information, CSI)。然而，IoT 设备运动将导致通信信道老化和反馈延迟，使得理想 CSI 条件仅具有理论意义^[16]。此外，过时的 CSI 会降低用户速率，因此信道老化现象对频谱资源分配提出了挑战^[20]。

针对上述问题，本文提出一种嵌入式 CR 辅助的 NOMA 频谱资源分配方案，贡献有以下 3 方面。

(1) 提出一种嵌入式 CR 模式，该模式允许 SU 以嵌入方式接入空闲 PU 释放的频谱空穴，而不会对其他活跃 PU 产生额外干扰，嵌入式 CR 模式如图 1 所示。该模式有效避免了衬底模式和覆盖模式的缺陷，提高了频谱利用率。

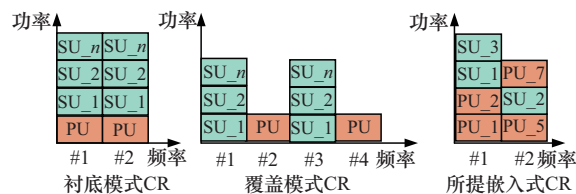


图1 嵌入式CR模式

(2) 针对动态信道的老化模型，提出实时 CSI 预测的闭合表达式，有效补偿了 CSI 过时导致的用户速率下降。

(3) 提出基于在线学习的动态频谱调度方法。通过 DTN 与物理世界之间的数据共享与实时交换，协助实时频谱分配，获得最优的系统频谱效率。

1 系统模型与问题描述

智慧城市中的每一个实体，如交通信号灯、路边基础设施等，都可以通过云上的数字孪生虚拟再现。DT 可以代替 PE 以点对点方式连接来共享数据。在 DTN 中，数字孪生通过两种不同类型的通信来实现数据共享，即孪生间通信和孪生内通信^[21]，智慧城市 DTN 系统如图 2 所示。

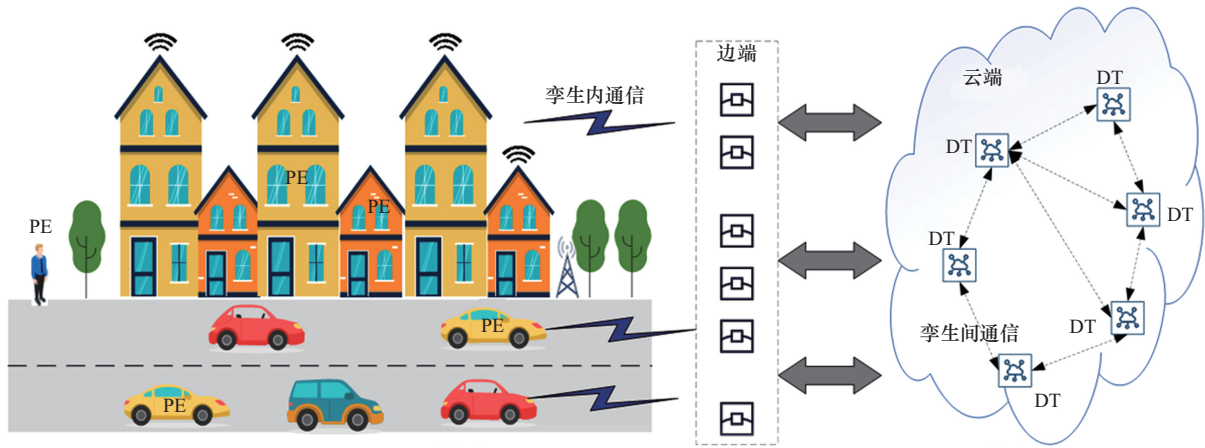


图2 智慧城市DTN系统

(1) 孪生间通信：孪生空间中的DT可以根据PE的要求自发地从其他孪生体发现和获取必要信息，可以为两个孪生体之间的数据访问和数据共享活动建立孪生间连接。由于孪生体位于云/边缘环境中，孪生体之间的通信打破了现实空间中的时空限制，便于原本位于较远位置的PE进行数据传输和协作活动。

(2) 孪生内通信：通过在PE和DT之间建立私有数据流链接，孪生内通信为PE和DT之间架起了桥梁。从本质上讲，虚拟孪生由PE的实时原始数据驱动，并通过反馈和DT的智能决策对PE进行优化。孪生内通信具有双向性特点。这里双向性指PE与其虚拟孪生体之间的双向交互。

图2展示了基于云-边-端网络的智慧城市DTN系统，其中，DT位于云端，边缘节点负责本地数据的初步过滤、分析与存储。在物理城市场景中，考虑一个CR网络覆盖范围内的上行链路，包含一个基站和若干个需求迥异的用户。这些用户不限于各式各样的传感器、交通装置以及城市中的人。存在 M 个PU，用集合 $T_m^{pu} \in \{T_1^{pu}, T_2^{pu}, \dots, T_M^{pu}\}$ 表示。频谱资源按照功率域NOMA分配给各个PU，即PU信号在同一信道中以不同的传输功率叠加传输。为了方便起见，PU的信道增益按升序排序为 $h_{c,1} < h_{c,2} < \dots < h_{c,M}$ 。每个PU都有两种

状态：活跃状态和空闲状态。物理城市中存在一个融合中心（fusion center, FC），负责资源分配。在某个特定时刻，假设有 N 个SU，用集合 $T_n^{su} \in \{T_1^{su}, T_2^{su}, \dots, T_N^{su}\}$ 表示。这些PU与SU在图2中统一标注为PE。

利用DT技术，物理城市中的PE被映射到孪生城市中的DT。具体而言，PE与DT之间通过“孪生内通信”进行数据上传与决策反馈；而孪生城市内的DT之间则通过“孪生间通信”进行数据分析与信息交换。因此，FC可以容易获取到PU和SU的所有CSI和QoS信息。

1.1 信道老化模型

信道被建模为独立同分布的瑞利衰落模型。假设所有移动用户均配备单根天线，用户 k 到基站第 i 根天线之间的信道系数定义为 $h_{k,i}$ ，服从复高斯分布，有 $E[|h_{k,i}|^2] = \beta_{k,i}$ 成立。

在物理城市中，假定接入用户均以不同的速度移动，而移动速度将影响信道变化。通常假设用户与基站天线之间的信道经历块衰落，即在一个数据块中信道不变。本文采用一种更实用的模型。其中信道在数据块内也将不断变化，同时在相邻信道时隙之间是相互关联的。

在一个特定数据块的第 $t+\tau$ 时隙，信道系数 $h_{k,i}(t+\tau)$ 可以建模为其初始状态和附加增量的

函数:

$$h_{k,i}[t+\tau] = \rho_k[\tau]h_{k,i}[t] + \bar{\rho}_k[\tau]\Psi_{k,i}[t+\tau] \quad (1)$$

其中, $\Psi_{k,i}[t+\tau] \sim \text{CN}(0, \beta_{k,i})$ 表示在 $t+\tau$ 时隙的自主更新分量。 $\rho_k[\tau]$ 表示第 k 个用户的信道在 t 时隙与 $t+\tau$ 时隙之间的时间相关系数。 $\bar{\rho}_k[\tau] = \sqrt{1 - \rho_k^2[\tau]}$ 。通常假设信道按照 Jakes 模型^[22]演进, $\rho_k[\tau] = J_0(2\pi f_{D,k} T_s(\tau))$ 。其中, $J_0(\cdot)$ 是第一类零阶贝塞尔函数^[23]。 T_s 表示采样时间, $f_{D,k} = \frac{v_k f_c}{g}$ 是第 k 个用户的多普勒频移, 其速度为 v_k , f_c 和 g 分别表示载波频率和光速。需要说明的是, 对于终端突发变速导致的多普勒频移扰动 $\Delta f_{D,k}$, 本文在每帧导频更新时动态重估 CSI, 间接补偿了 $\Delta f_{D,k}$ 对信道老化的影响。且模型 (1) 中的 $\rho_k[\tau]$ 会随更新的 $f_{D,k}$ 实时调整, 内生地考虑了速度扰动引起的频移变化。

在图 2 所示上行通信中, 假设每个数据块由 L 个信道时隙组成, 其中 L_p 个时隙被分配用于导频传输, 余下的 $L - L_p$ 个时隙用来传输用户数据。在通信过程中, 不同子频带之间的信号保持正交, 但在子频带内采用 NOMA 传输技术, 多个用户将相互叠加。每个数据块的前 L_p 个时隙用于信道估计。在此期间, 不同子频带的用户组向基站传输正交导频。假设分配给子频带 c 内用户 $T_{c,k}$ 的时隙索引为 $t_k \in \{1, \dots, L_p\}$, 而在该子频带内与用户 $T_{c,k}$ 共享同一时隙进行导频传输的其他用户表示为: $\Gamma_k = \{l: t_j = t_k\} \subset \{1, \dots, U_c\}$, 其中, U_c 表示子频带 c 内活跃用户的最大个数。假设子频带 c 内的用户 $T_{c,j}$ 分别以不同功率 $\varepsilon_{c,j}$ 同时向基站传输相同的导频 $\psi_c[t_j]$, 则基站端天线 i 在第 t_k 时隙 ($1 \leq t_k \leq L_p$) 接收到子频带 c 的信号可以表示为:

$$z_{c,i}[t_k] = \sum_{j \in \Gamma_k} \sqrt{\varepsilon_{c,j}} h_{c,j,i}[t_j] \cdot \psi_c[t_j] + \sqrt{N_0} \omega_i[t_k] \quad (2)$$

其中, N_0 是噪声方差, $\omega_i[t_k] \sim \text{CN}(0, 1)$ 是加性高斯白噪声。

所接收的信号可用于估计当前信道或预测后续时刻的信道状态。然而, 信道估计的准确性随着导频传输和相应信道实现之间的时延升高而降低。因此, 本文专注于估计第 $L_p + 1$ 时隙的信道, 然后将此作为初始条件, 推导其他时刻的信道状态。为了简化符号, 定义 $\lambda = L_p + 1$ 。所以, 子频带 c 内用户 k 到基站端天线 i 的信道系数, 在第 t_j 时隙 ($1 \leq t_j \leq L_p$) 的信道实现, 用第 λ 时隙的信道系数表示如下。

$$h_{c,j,i}[t_j] = \rho_j[\lambda - t_j] h_{c,j,i}[\lambda] + \bar{\rho}_j[\lambda - t_j] \zeta_{c,j,i}[t_j] \quad (3)$$

其中, $\zeta_{c,l,i}[t_l] \sim \text{CN}(0, 1)$ 表示 $h_{c,l,i}[t_l]$ 和 $h_{c,l,i}[\lambda]$ 之间相关联成分以外的独立附加分量。将式 (3) 代入式 (2), 可以得到式 (4):

$$z_{c,i}[t_k] = \sqrt{\varepsilon_{c,k}} \rho_k[\lambda - t_k] h_{c,k,i}[\lambda] \psi_c[t_k] + \sum_{j \in \Gamma_k \setminus \{k\}} \sqrt{\varepsilon_{c,j}} \rho_j[\lambda - t_j] h_{c,j,i}[\lambda] \psi_c[t_j] + \sum_{j \in \Gamma_k} \sqrt{\varepsilon_{c,j}} \bar{\rho}_j[\lambda - t_j] \zeta_{c,j,i}[t_j] \psi_c[t_j] + \sqrt{N_0} \omega_i[t_k] \quad (4)$$

采用标准最小均方误差 (minimum mean square error, MMSE) 估计^[24], 可以得出信道系数 $h_{c,k,i}[\lambda]$ 的 MMSE 估计值 $\hat{h}_{c,k,i}[\lambda]$ 如下。

$$\hat{h}_{c,k,i}[\lambda] = \frac{\rho_k[\lambda - t_k] \sqrt{\varepsilon_{c,k}} \beta_{k,i}}{\sum_{j \in \Gamma_k} \varepsilon_{c,j} \beta_{j,i} + \sigma^2} y_{c,i}[t_k] \quad (5)$$

信道系数的估计值 $\hat{h}_{c,k,i}[\lambda]$ 和估计误差 $\tilde{h}_{c,k,i}[\lambda] = h_{c,k,i}[\lambda] - \hat{h}_{c,k,i}[\lambda]$ 分别服从分布 $\text{CN}(0, \gamma_{k,i})$ 和 $\text{CN}(0, \beta_{k,i} - \gamma_{k,i})$ 。其中:

$$\gamma_{k,i} \triangleq \frac{\rho_k^2[\lambda - t_k] \varepsilon_{c,k} \beta_{k,i}^2}{\sum_{j \in \Gamma_k} \varepsilon_{c,j} \beta_{j,i} + \sigma^2} \quad (6)$$

值得注意的是, 信道估计 $\hat{h}_{c,k,i}[\lambda]$ 会受共享导频的其他用户在 t 时隙所发送的信号影响。这种现象也被称为导频污染现象^[25]。



1.2 DT辅助的可获速率分析

在智慧城市数字孪生网络中，云端的DT长期存储与分析PU过去一段时间内的活动状态（如活跃频率、活跃时段等）。DT利用时间序列建模分析其周期性活动特征，预测未来某时段PU处于空闲状态概率。该概率作为FC决策频谱分配方案时的依据，可有效降低接入冲突风险。

基于上述导频阶段的CSI估计结果，DT可预测数据传输阶段时隙 t ($\lambda \leq t \leq L$)的CSI如下。

$$h_{c,k,i}[t] = \rho_k[t-\lambda]h_{c,k,i}[\lambda] + \bar{\rho}_k[t-\lambda]\theta_{k,i}[t] \quad (7)$$

其中， $\theta_{k,i}[t] \sim \text{CN}(0, \beta_{k,i})$ 表示信道 $h_{c,k,i}[t]$ 和其信道初始态 $h_{c,k,i}[\lambda]$ 之间的独立更新分量。

通过孪生内通信，DT传输各预测的CSI至FC开始进行以下系统可获速率分析。需要注意的是，相比于单点预测，DT聚合历史多时隙CSI可显著提升预测精度，进而提高资源调度与SU接入判决的稳定性。

在加性白高斯噪声（additive white Gaussian noise, AWGN）条件下，所有接入用户的系统和速率可以表示为：

$$R = \sum_{c=1}^C \sum_{n=1}^{U_c} \text{lb}(1 + \gamma_{c,n}) \quad (8)$$

其中， C 是子频带个数， $\gamma_{c,n}$ 表示子频带 c 中用户 $T_{c,n}$ 的瞬时信干噪比（signal to interference plus noise ratio, SINR）。

接下来，本文将研究在信道老化现象存在情况下的系统上行链路通信性能。

在上行数据通信过程中，基站天线 i 在 t 时隙 ($\lambda \leq t \leq L$) 接收到子频带 c 的接收信号 $y_{c,i}[t]$ 表示为：

$$y_{c,i}[t] = \sum_{k=1}^{U_c} \sqrt{\varepsilon_{c,k}} h_{c,k,i}[t] S_{c,k,i}[t] + \sqrt{N_0} \omega_i[t] \quad (9)$$

其中， N_0 是噪声方差， $\omega_i[t] \sim \text{CN}(0, 1)$ 是基站处的AWGN。 $S_{c,k,i}[t] \sim \text{CN}(0, 1)$ 是子频带 c 内用户 k 到基站天线 i 的传输信号， $\varepsilon_{c,k}$ 表示传输功率。

$\theta_{k,i}[t] \sim \text{CN}(0, \beta_{k,i})$ 表示信道 $h_{c,k,i}[t]$ 和其信道初始态 $h_{c,k,i}[\lambda]$ 之间的独立更新分量。将式(7)代入式(9)，则基站端接收到子频带 c 的信号 $y_{c,i}[t]$ 表示如下。

$$\begin{aligned} y_{c,i}[t] = & \sum_{k=1}^{U_c} \sqrt{\varepsilon_{c,k}} h_{c,k,i}[t] S_{c,k,i}[t] + \sqrt{N_0} \omega_i[t] = \\ & \rho_k[t-\lambda] \hat{h}_{c,k,i}[\lambda] \sqrt{\varepsilon_{c,k}} S_{c,k,i}[t] + \\ & \underbrace{\rho_k[t-\lambda] \tilde{h}_{c,k,i}[\lambda] \sqrt{\varepsilon_{c,k}} S_{c,k,i}[t]}_{I_{cki,t,1}} + \\ & \underbrace{\bar{\rho}_k[t-\lambda] \theta_{k,i}[t] \sqrt{\varepsilon_{c,k}} S_{c,k,i}[t]}_{I_{cki,t,2}} + \\ & \underbrace{\sum_{j=1, j \neq k}^{T_{c,n}} h_{c,j,i}[t] \sqrt{\varepsilon_{c,j}} S_{c,j,i}[t]}_{I_{cki,t,3}} + \sqrt{N_0} \omega_i[t] \end{aligned} \quad (10)$$

其中，第一项为期望接收的子频带 c 内用户 k 的信号， $I_{cki,t,1}$ 为信道估计误差引起的干扰， $I_{cki,t,2}$ 为信道老化效应引起的干扰， $I_{cki,t,3}$ 为同一子频带 c 内其他活跃用户引起的干扰（multi-user interference, MUI）。定义： $\partial[t] = I_{cki,t,1} + I_{cki,t,2} + I_{cki,t,3}$ 。所以，子频带 c 内用户 k 在第 t 时隙的速率 R 可表示如下。

$$R_{c,k,i}[t] = \text{E} \left\{ \text{lb} \left[1 + \frac{\rho_k^2[t-\lambda] \varepsilon_{c,k} |\hat{h}_{c,k,i}[\lambda]|^2}{\text{E} \left\{ |\partial[t]|^2 |\hat{h}_{c,k,i}[\lambda]|^2 \right\} + N_0} \right] \right\} \quad (11)$$

其中，可推导 $\text{E} \left\{ |\partial[t]|^2 |\hat{h}_{c,k,i}[\lambda]|^2 \right\}$ 如下：

$$\begin{aligned} \text{E} \left\{ |\partial[t]|^2 |\hat{h}_{c,k,i}[\lambda]|^2 \right\} = & \sum_{l \in \Gamma_k \setminus \{k\}} \frac{\rho_l^2[t-\lambda] \rho_l^2[\lambda-t_l] \varepsilon_{c,l}^2 \beta_{l,i}^2}{\rho_k^2[\lambda-t_k] \varepsilon_{c,k} \beta_{k,i}^2} \times |\hat{h}_{c,k,i}[\lambda]|^2 + \\ & \sum_{l=1}^{U_c} \varepsilon_{c,l} \beta_{l,i} - \sum_{l \in \Gamma_k} \rho_l^2[t-\lambda] \varepsilon_{c,l} \gamma_{l,i} \end{aligned} \quad (12)$$

式(11)可继续推导为：

$$R_{c,k,i} = \frac{1}{L} \sum_{t=\lambda}^L \left(\frac{e^{\frac{1}{\chi_{c,k,i}[t](1+A_{c,k,i}[t])}} E_1\left(\frac{1}{\chi_{c,k,i}[t](1+A_{c,k,i}[t])}\right) - e^{\frac{1}{\chi_{c,k,i}[t]A_{c,k,i}[t]}} E_1\left(\frac{1}{\chi_{c,k,i}[t]A_{c,k,i}[t]}\right)}{\ln 2} \right) \quad (13)$$

其中,

$$A_{c,k,i}[t] = \sum_{l \in \Gamma_k \setminus \{k\}}^{U_c} \left(\frac{\rho_l[t-\lambda] \rho_l[\lambda-t_l] \varepsilon_{c,l} \beta_{c,l,i}}{\rho_k[t-\lambda] \rho_k[\lambda-t_k] \varepsilon_{c,k} \beta_{c,k,i}} \right)^2 \quad (14)$$

$$\chi_{c,k,i}[t] = \frac{\rho_k^2[t-\lambda] \varepsilon_{c,k} \gamma_{k,i}}{\sum_{l=1}^{U_c} \varepsilon_{c,k} \beta_{l,i} - \sum_{l \in \Gamma_k} \rho_l^2[t-\lambda] \varepsilon_{c,l} \gamma_{l,i} + N_0} \quad (15)$$

$E_1(x) = \int_1^{\infty} \frac{e^{-xs}}{s} ds$ 表示指数积分。

子频带 c 内的和速率为所有用户的速率之和, 即:

$$R_c = \sum_{k=1}^{U_c} R_{c,k} \quad (16)$$

系统和速率为各子频带的和速率总和, 即:

$$R = \sum_{c=1}^C \sum_{k=1}^{U_c} R_{c,k} \quad (17)$$

2 嵌入式CR辅助的NOMA资源调度

与传统基于衬底模式的SU接入方式不同, 本文所提解决方案是将SU直接嵌入空闲PU的频谱空穴中, 如图1所示。为了保证PU通信不受影响, SU在接入频谱前后对同一频段内其他活跃PU所造成的干扰与空闲PU处于其活跃状态时产生的干扰相等或者更少。

在智能交通信号灯集群场景中, 假设交通信号灯上摄像头作为PU, 它们通常在高峰时段活跃传输实时交通数据。车载终端作为SU, 当其需要向基站发送数据时, 会首先发起频谱感知, 检测PU是否空闲。随后, 感知结果将被发送至融合中心(FC), FC根据汇总的CSI和QoS需

求, 确定最佳频谱分配策略并反馈至SU。因此, SU将在PU持续空闲时段内以嵌入模式接入许可频谱。

具体地, 以图1中子频带#2为例进行分析。如图1所示, 子频带#2内原有活跃用户PU_5、PU_6和PU_7, 此时接收端的解码顺序为PU_7、PU_6、PU_5。当PU_6完成通信任务时释放其占用的频谱, 出现的频谱空穴将被SU_2使用。SU_2使用该频谱空穴的前提条件是, 不影响PU_5和PU_7的通信质量。即, SU_2对PU_5和PU_7的干扰水平应低于原来的PU_6。

记 $I_{P6,5}$ 和 $I_{P6,7}$ 分别为PU_6对PU_5和PU_7的干扰功率, $I_{S2,5}$ 和 $I_{S2,7}$ 分别为SU_2嵌入后对PU_5和PU_7的干扰功率。嵌入条件可表示为:

$$I_{S2,5} \leq I_{P6,5}, I_{S2,7} \leq I_{P6,7} \quad (18)$$

设 P_{PU6} 和 P_{SU2} 分别为PU_6和SU_2的发射功率, G_{PU6} 和 G_{SU2} 分别为PU_6和SU_2的信道增益。

相应的干扰可以表示为 $I_{PU6} = P_{PU6} \cdot G_{PU6}$, $I_{SU2} = P_{SU2} \cdot G_{SU2}$ 。将其代入式(18), 即得到:

$$P_{SU2} \cdot G_{SU2} \leq P_{PU6} \cdot G_{PU6} \quad (19)$$

将上述分析推广到一般情况可知, 嵌入频谱空穴的SU须满足以下条件:

$$\varepsilon_{c,k}^{su} \cdot \left| h_{c,k}^{su} \right|^2 \leq \varepsilon_{c,j}^{pu} \cdot \left| h_{c,j}^{pu} \right|^2 \quad (20)$$

其中, $\varepsilon_{c,j}^{pu}$ 、 $h_{c,j}^{pu}$ 和 $\varepsilon_{c,k}^{su}$ 、 $h_{c,k}^{su}$ 分别表示用户 $T_{c,j}^{pu}$ 和 $T_{c,k}^{su}$ 的发射功率和信道系数。 $T_{c,j}^{pu}$ 为子频带 c 内的空闲PU, $T_{c,k}^{su}$ 为嵌入的SU。

另外, 接入SU自身的QoS也需要作为频谱资源调度的限制条件。对QoS的影响用SINR来表征, 即接入SU的SINR应该大于或等于其要求



的阈值 τ_{su} ，即：

$$\frac{\varepsilon_{c,k}^{su} |h_{c,k}^{su}|^2}{\sum_{j=1}^{U_c} \varepsilon_{c,j} |h_{c,j}|^2 + N_0} \geq \tau_{su} \quad (21)$$

由此，求解最优频谱分配方案的问题可以表示为：

$$\begin{aligned} B_{opt} = \arg \max_B & \sum_{f_q, C_q \in F_q} \sum_{T_{c,n} \in \Phi_{c_q}} R_{c,n} \\ \text{s.t.} & \varepsilon_{c,k}^{su} \cdot |h_{c,k}^{su}|^2 \leq \varepsilon_{c,j}^{pu} \cdot |h_{c,j}^{pu}|^2, \\ & \frac{\varepsilon_{c,k}^{su} |h_{c,k}^{su}|^2}{\sum_{j=1}^{U_c} \varepsilon_{c,j} |h_{c,j}|^2 + N_0} \geq \tau_{su} \end{aligned} \quad (22)$$

其中， $B = \{B_1, B_2, \dots, B_Q\}$ 表示频谱分配策略集。

$B_q = \{f_{q,1}^{su}, f_{q,2}^{su}, \dots, f_{q,C_q}^{su}\}$ 和 $F_q = \{f_{q,1}, f_{q,2}, \dots, f_{C_q}\}$ 分别表示频谱分配策略，以及在第 q 种分配策略下共有 C_q 个子频带接入 SU。 $\Phi_{c_q, su} = \{T_{c_q,1}^{su}, T_{c_q,2}^{su}, \dots, T_{c_q, S_{c_q}}^{su}\}$ 和 $\Phi_{c_q, pu} = \{T_{c_q,1}^{pu}, T_{c_q,2}^{pu}, \dots, T_{c_q, S_{c_q}}^{pu}\}$ 分别表示在第 c_q 个子频带下，共存在 P_{c_q} 个活跃 PU，且共有 S_{c_q} 个 SU 接入。此外，等式 $\Phi_{c_q} = \Phi_{c_q, su} + \Phi_{c_q, pu}$ 表示在子频带 c_q 中，所有活跃 PU 与接入 SU 的集合。

系统和速率受子频带数量、活跃用户数量以及信道条件的影响。由于子频带相互正交，最大化系统和速率即最大化每个子频带内的和速率。式 (22) 中的优化问题可以视为一个混合整数线性规划问题。虽然启发式全局搜索可以提供近似最优策略，但当接入用户数较多时复杂度巨大，对于实时系统来说不适用。

为了解决这一问题，本文提出一种基于在线学习的频谱分配方案，在迭代过程中求解。基于在线学习的频谱分配算法步骤如算法 1 所示。请注意，此过程中将使用前文所述的信道预测方法获得 CSI。

算法 1 基于在线学习的频谱分配算法

输入： $h_{c,k,i}[\lambda], \varepsilon_{c,n}, N_{iteration}$

输出：最优频谱分配方案 B_{opt}

根据式 (7) 初始化 $h_{c,k,i}[1]$

根据式 (13) 计算初始系统和速率 $R[1]$

$n \leftarrow 1, R_{best} \leftarrow R[1], \text{Cnt}_{conv} \leftarrow 0$

Repeat

随机选择一组候选 SU

根据式 (20) ~ 式 (21) 更新候选 SU 集合

根据式 (7) 更新 $h_{c,k,i}[n+1]$ 值，根据式 (13)

更新 $R[n+1]$ 值

$\Delta \leftarrow |R[n+1] - R[n]| / R[n]$

If $\Delta < 0.01$ do

$\text{Cnt}_{conv} \leftarrow \text{Cnt}_{conv} + 1$

Else

$\text{Cnt}_{conv} \leftarrow 0$

End

If $R[n+1] > R_{best}$, then

$R_{best} \leftarrow R[n+1]$

根据 $\arg \max R[n+1]$ 记录分配方案 $B(n)$

$B_{opt} \leftarrow B(n)$

End

$n \leftarrow n + 1$

Until $(\text{Cnt}_{conv} \geq 3)$ or $n > N_{iteration}$

3 仿真结果

本节展示一些典型的仿真结果，以验证本文所提方案的有效性。为了进一步评估数字孪生体中“孪生间数据共享”机制的实际增益，引入关闭孪生间通信功能的对照组，并对比分析其在系统速率与接入性能上的差异。假设仿真中使用的载波频率为 2 GHz，信号带宽为 1 MHz。共有 9 个 PU 和 9 个 SU。所有用户最大传输功率为 0.35 W。噪声功率谱密度为 -174 dBm。本文仿真所使用的

计算机配置为：搭载Intel i7-13700H处理器（14核心，20线程，最大睿频5.0 GHz）、16 GB RAM。操作系统为Windows 11x64，仿真平台为MATLAB R2021b。

首先，观察系统和速率与用户移动速度的关系。将数据块长度固定为200，在是否启用DT协同的条件下，所提嵌入式CR_NOMA与衬底式CR_NOMA和传统NOMA方案的系统和速率与用户移动速度关系如图3所示。可以看出，在DT协同机制的支持下，本文所提嵌入式CR_NOMA方案明显优于衬底式CR_NOMA方案和传统的NOMA方案。在用户静止状态下，所提方案较传统NOMA的和速率提升了103%，较衬底式CR_NOMA方案提升了66%。当关闭孪生间数据共享功能时，尽管仍采用所提嵌入式CR接入模式，但由于缺乏全局频谱空穴信息共享，各DT仅依据本地信息进行频谱分配，系统整体性能下降，说明DT协同对频谱复用效率具有重要影响。此外，可以看出随着用户移动速度增加，信道老化引起性能下降，但所提方案依然能获得较大的性能优势。

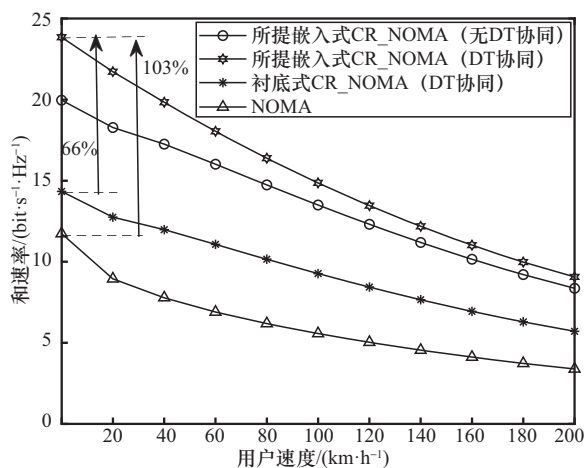


图3 系统和速率与用户移动速度关系

然后，在启用DT协同机制的条件下，观察用户静止状态下系统和速率随数据块长度变化的关系。由于所提方案采取在线学习方式，收敛过

程的迭代次数也与数据块长度有关。分别取数据块长度 L 为200和800，所提嵌入式CR_NOMA方案与衬底式CR_NOMA方案的系统和速率与迭代次数关系如图4所示。另外，采用遍历算法获得的最优解可以视为系统和速率的上界，也在图4中呈现。可以看出，更长的数据块下的系统和速率更大。原因在于，当导频长度固定不变时，增加数据块长度即增大了数据部分的比例，从而提升了系统和速率。与此同时，在线学习过程也需要更多的迭代次数达到收敛。相比较而言，衬底式CR_NOMA方案由于未采用迭代方式，其系统和速率不受迭代的影响。当数据块长度为800时，所提方案的系统和速率较衬底式CR_NOMA方案提升了60%。

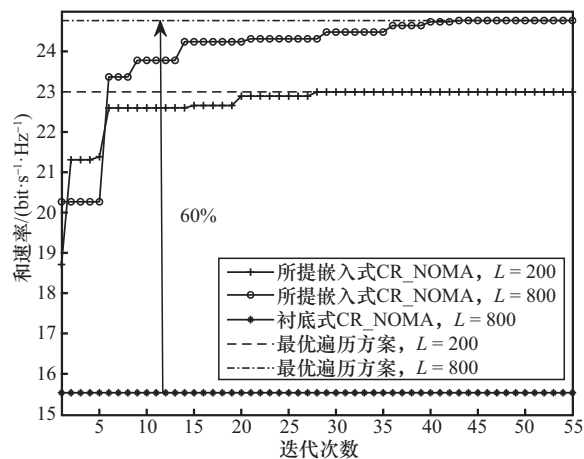


图4 系统和速率与迭代次数关系

接着，在用户运动状态下观察不同数据块长度对系统和速率的影响。导频长度设定为20，分别取数据块长度 L 为200和800，所提嵌入式CR_NOMA方案在启用DT协同与关闭DT协同两种条件下，与衬底式CR_NOMA方案在不同数据块长度影响下系统和速率与用户移动速度关系如图5所示。可以看出，当用户移动速度较低，例如，当速度小于10 km/h，数据块长度更长时的系统和速率仍然更大。然而，随着用户移动速度增加，信道老化对系统和速率的影响逐渐显



著，导致系统和速率的下降幅度更大，形成了陡坡。因此，虽然采用信道预测方法可以减轻信道老化的影响，但当用户移动速度较大时，需要选择合适的数据块长度。值得注意的是，在DT协同机制下，所提方案对信道老化具有更强的鲁棒性，尤其在中低速场景下表现更为显著，这进一步凸显了孪生体间数据共享对系统性能的积极作用。

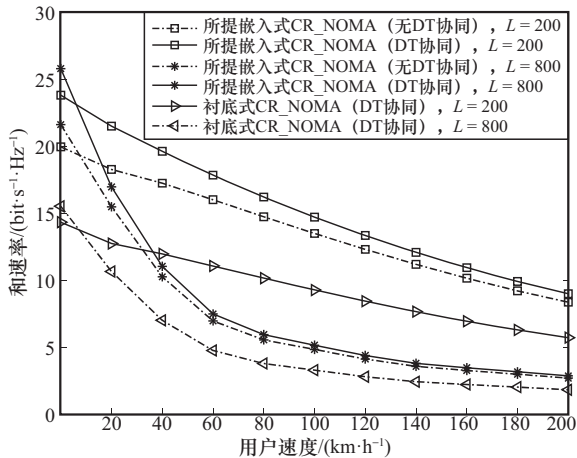


图5 不同数据块长度影响下系统和速率与用户移动速度关系

最后，在用户不同运动状态下观察系统和速率与数据块长度的关系。分别取用户静止状态、用户移动速度为54 km/h和108 km/h，所提嵌入式CR_NOMA方案在启用DT协同与关闭DT协同两种条件下，与衬底式CR_NOMA方案的系统和速率与数据块长度关系如图6所示。可以看出，当用户为静止状态时，随着数据块长度的增加，数据部分比例相应增大，因此提升了系统和速率。而当数据块长度增加到一定程度时，系统和速率逐渐趋于稳定。在此场景下，DT协同机制可充分利用历史信息与孪生体间的数据共享，从而进一步提升预测精度与资源调度效率，显著增强系统性能。而当用户为移动状态时，尤其是在54 km/h和108 km/h的高速场景中，数据块长度的初始增加会导致系统和速率迅速下降。这主要是因为信道老化引起的性能

下降远超过数据块长度增加所带来的系统和速率提升。并且，用户移动速度越大，系统性能恶化越显著。然而，随着数据块长度的持续增加，由数据块长度所带来的系统和速率提升逐渐开始抵抗信道老化导致的性能下降，最终使系统和速率趋于稳定。

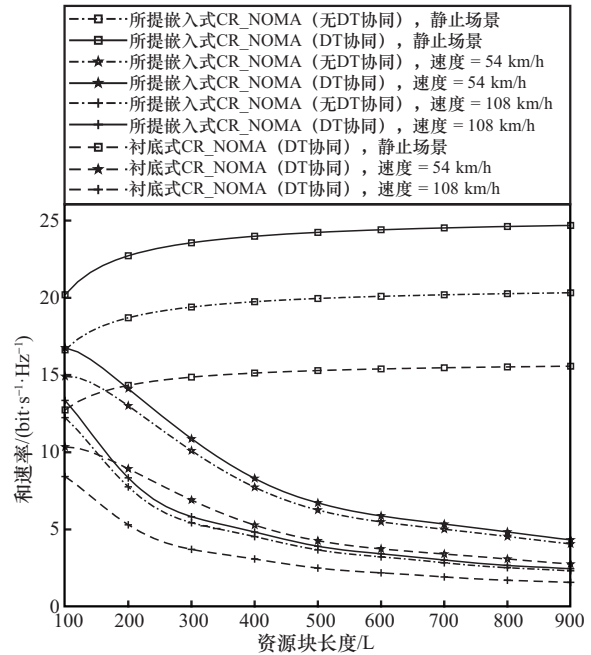


图6 系统和速率与数据块长度关系

总体而言，随着用户移动速度增加，信道老化效应加剧，系统性能下降更为明显。在高速场景下，信道的不确定性限制了DT协同的提升空间，其增益作用相对减弱；而在低速或静止状态下，DT协同的优势则更加突出。

本文所提方案使用了在线学习过程，因此评估其计算复杂度至关重要。本文所提基于信道预测的在线调度算法由3部分组成：SU选择、CSI预测和决策更新。每次迭代中，从S个SU中选择满足约束的N个SU的时间复杂度为 $O(1)$ ；根据式(7)预测CSI的复杂度为 $O(L)$ ；根据式(17)判断是否更新策略的复杂度为 $O(U \cdot L)$ ，其中U和L分别表示许可用户数和资源块长度。假设总迭代次数为 $O(N_{iter})$ ，则所提算法的总时间复杂

度为 $O(U \cdot L \cdot N_{iter})$ 。相比之下, 遍历搜索算法时间复杂度为 $O(U \cdot L \cdot N!)$ 。尽管理论分析表明所提在线学习算法在计算效率上明显更优。但由于学习过程具有一定的随机性, 难以得出明确的计算式。因此, 本文进一步通过模拟时间消耗来度量计算复杂度, 计算复杂度如图7所示。可以看出, 随着用户数量的增加, 遍历方案的计算复杂度呈指数级上升。而本文所提在线学习方案的复杂度随用户数量以近线性的速度增加。相比而言, 所提方案将大幅降低计算复杂度。例如, 在14个PU、9个SU场景中, 所提方案的计算复杂度比遍历方案降低近3个数量级。

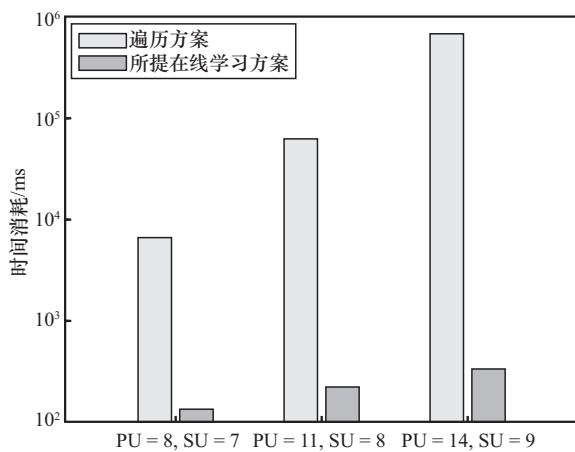


图7 计算复杂度

4 结束语

本文针对智慧城市数字孪生网络, 提出了嵌入式CR_NOMA频谱资源分配方案。在保障所有活跃PU通信质量的前提下, 允许SU使用非活跃PU释放的空穴频谱, 同时考虑嵌入SU自身的QoS, 提高了系统和速率。为了实现所提嵌入式CR_NOMA频谱资源分配方案, 本文进一步提出了基于在线学习的频谱分配算法。并且, 根据信道老化模型设计了信道预测方法, 以缓解信道老化的影响。仿真结果表明, 与现有的衬底式CR_NOMA方案及NOMA方案相比,

静止状态下所提方案的系统和速率分别提升了66%和103%; 在运动状态下, 所提方案相比现有方案仍有显著优势。另外, 所提方案还具有较低的计算复杂度。尤其当用户数量较大时, 所提方案的计算复杂度比现有方案低近3个数量级。

参考文献:

- [1] ISMAGILOVA E, HUGHES L, RANA N P, et al. Security, privacy and risks within smart cities: literature review and development of a smart city interaction framework[J]. Information Systems Frontiers, 2022, 24(2): 393-414.
- [2] ALAHI M E E, SUKKUEA A, TINA F W, et al. Integration of IoT-enabled technologies and artificial intelligence (AI) for smart city scenario: recent advancements and future trends[J]. Sensors, 2023, 23(11): 5206.
- [3] ALLAM Z, JONES D S. On the coronavirus (COVID-19) outbreak and the smart city network: universal data sharing standards coupled with artificial intelligence (AI) to benefit urban health monitoring and management[J]. Healthcare, 2020, 8(1): 46.
- [4] JIANG D F. The construction of smart city information system based on the internet of things and cloud computing[J]. Computer Communications, 2020, 150: 158-166.
- [5] WU Y W, ZHANG K, ZHANG Y. Digital twin networks: a survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(18): 13789-13804.
- [6] 吴吉义, 李文娟, 曹健, 等. 智能物联网AIoT研究综述[J]. 电信科学, 2021, 37(8): 1-17.
WU J Y, LI W J, CAO J, et al. AIoT: a taxonomy, review and future directions[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(8): 1-17.
- [7] 蒋丽, 谢胜利, 田辉. 面向数字孪生边缘网络的区块链分片及资源自适应优化机制[J]. 通信学报, 2023, 44(3): 12-23.
JIANG L, XIE S L, TIAN H. Adaptive resource optimization mechanism for blockchain sharding in digital twin edge network[J]. Journal on Communications, 2023, 44(3): 12-23.
- [8] FAN B, WU Y, HE Z B, et al. Digital twin empowered mobile edge computing for intelligent vehicular lane-changing[J]. IEEE Network, 2021, 35(6): 194-201.
- [9] RODA-SANCHEZ L, CIRILLO F, SOLMAZ G, et al. Building a smart campus digital twin: system, analytics, and lessons learned from a real-world project[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(3): 4614-4627.



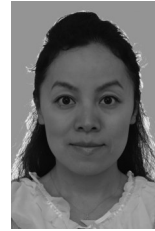
- [10] PANG J J, HUANG Y, XIE Z Z, et al. Collaborative city digital twin for the COVID-19 pandemic: a federated learning solution[J]. Tsinghua Science and Technology, 2021, 26(5): 759-771.
- [11] WANG H, CHEN X W, JIA F, et al. Digital twin-supported smart city: status, challenges and future research directions[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 217: 119531.
- [12] AK E, DURAN K, DOBRE O A, et al. T6CONF: digital twin networking framework for IPv6-enabled net-zero smart cities[J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(3): 36-42.
- [13] BOTÍN S D M, MIHAITA A S, PEIMBERT G R E, et al. Digital twin technology challenges and applications: a comprehensive review[J]. Remote Sensing, 2022, 14(6): 1335.
- [14] MOUNIR M, EL_MASHADE M B, MOHAMED ABOSHOSHA A. On the selection of power allocation strategy in power domain non-orthogonal multiple access (PD-NOMA) for 6G and beyond[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2022, 33(6): e4289.
- [15] YUAN Y F, YUAN Z F, TIAN L. 5G non-orthogonal multiple access study in 3GPP[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(7): 90-96.
- [16] LI X W, ZHANG J Y, HAN C Z, et al. Reliability and security of CR-STAR-RIS-NOMA-assisted IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(17): 27969-27980.
- [17] SUN Y S, CAO W, ZHOU M M, et al. Hybrid successive interference cancellation and power adaptation: a win-win strategy for robust uplink NOMA transmission[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 72(2): 771-785.
- [18] ZHAO Q, SADLER B M. A survey of dynamic spectrum access[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 79-89.
- [19] DING Z G, FAN P Z, POOR H V. Impact of user pairing on 5G nonorthogonal multiple-access downlink transmissions[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(8): 6010-6023.
- [20] BIEN S, SHAIK P, BHATIA V. On performance of energy harvested cooperative NOMA under imperfect CSI and imperfect SIC[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(9): 8993-9005.
- [21] WANG Y T, SU Z, GUO S L, et al. A survey on digital twins: architecture, enabling technologies, security and privacy, and future prospects[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(17): 14965-14987.
- [22] TRUONG K T, HEATH R W. Effects of channel aging in massive MIMO systems[J]. Journal of Communications and Networks, 2013, 15(4): 338-351.
- [23] OWEN D B, ABRAMOWITZ M, STEGUN I A. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables[J]. Technometrics, 1965, 7(1): 78.

- [24] HU Y L, LI Y, GURSOY M C, et al. Throughput analysis of low-latency IoT systems with QoS constraints and finite block-length codes[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(3): 3093-3104.
- [25] SANGUINETTI L, BJÖRNSSON E, HOYDIS J. Toward massive MIMO 2.0: understanding spatial correlation, interference suppression, and pilot contamination[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(1): 232-257.

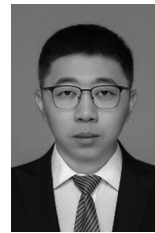
[作者简介]



郑明明 (1989-), 女, 华中科技大学博士生, 主要研究方向为多址接入、资源调度与优化。



彭薇 (1977-), 女, 华中科技大学教授, 主要研究方向为智能通信、无线网络、电力系统通信等。



刘川 (1986-), 男, 中国电力科学研究院有限公司正高级工程师, 主要研究方向为电力系统通信、能源业务数字化。



高炜 (1992-), 男, 海南大学在站博士后, 主要研究方向为无线网络、计算互联系统、无线资源调度等。



陶静 (1987-), 女, 中国电力科学研究院有限公司正高级工程师, 主要研究方向为电力系统通信、能源业务数字化。