

基于用户个性化服务质量的蜂窝车联网与车载自组织 网异构车联网资源分配方法

韩珍珍 周末 刘恩慧 徐川 赵国锋*

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

摘要: 蜂窝车联网(C-V2X)与车载自组织网络(VANET)的异构融合能够有效提高网络容量。然而,不同网络在非授权频段上共存而引起的信道冲突会导致系统吞吐量降低和用户接入时延增大,无法满足车联网用户对服务质量(QoS)的需求。针对该问题,该文提出一种基于用户个性化QoS需求的时频资源分配方法。首先,分别对C-V2X和VANET的吞吐量和时延进行建模分析,刻画用户数据传输时间配置与吞吐量和时延的数学关系;然后,基于上述模型构建吞吐量-时延联合优化函数,根据用户的个性化QoS需求实现异构网络中吞吐量和时延的优化;最后,提出一种基于改进多目标粒子群优化的时延-吞吐量联合优化算法(DT-JOA)进行求解。仿真结果表明,该文所提网络资源分配算法可以有效地保证用户的个性化QoS需求,提升异构网络综合性能。

关键词: 蜂窝车联网; 车载自组织网络; 异构网络; 资源分配

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)05-1339-10

DOI: 10.11999/JEIT200429

A Personalized QoS-based Resource Allocation for Cellular-Vehicle to Everything Network and Vehicle Ad-hoc Network Heterogeneous Vehicular Network

HAN Zhenzhen ZHOU Mo LIU Enhui XU Chuan ZHAO Guofeng

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and
Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The heterogeneous integration of Cellular-Vehicle to everything (C-V2X) and Vehicle Ad-hoc Network (VANET) can effectively increase network capacity. However, the channel conflicts caused by the coexistence of different networks on the unlicensed frequency bands will cause the system throughput to decrease and the user access delay to increase, which can not satisfy the Quality of Service (QoS) requirements. Considering this problem, a time-frequency resource allocation method based on personalized QoS is proposed. Firstly, the throughput and delay models of C-V2X and VANET are established respectively to determine the mathematical relationship between user data transmission time configuration and throughput and delay. Then, based on the above mathematical models, a Delay-Throughput Joint Optimization Algorithm (DT-JOA) is established to optimize throughput and delay in a heterogeneous network according to the personalized QoS requirements of users. Finally, a joint optimization algorithm for delay and throughput based on Particle Swarm Optimization (PSO) is proposed. The simulation results show that the proposed algorithm can meet the personalized QoS requirements of users and significantly improve the comprehensive performance of heterogeneous networks.

Key words: Cellular-Vehicle to everything(C-V2X); Vehicle Ad-hoc Network(VANET); Heterogeneous network; Resources allocation

收稿日期: 2020-05-29; 改回日期: 2021-01-22; 网络出版: 2021-02-03

*通信作者: 赵国锋 zhaogf@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2018YBF1800301, 2018YBF1800304), 重庆市研究生科研创新项目(CYB18175, BYJS201803), 重庆市技术创新与应用发展专项重大主题专项(cstc2019jscx-zdztzxX0013)

Foundation Items: The National Key Research and Development Project (2018YBF1800301, 2018YBF1800304), Chongqing Graduate Research and Innovation Project (CYB18175, BYJS201803), The Major Theme Special Project of Chongqing Technology Innovation and Application Development Special Project (cstc2019jscx-zdztzxX0013)

1 引言

得益于第5代移动通信技术(5th Generation, 5G)的商用,车联网技术得到了快速的发展。基于蜂窝网络的车载通信网络(Cellular-based Vehicle to everything, C-V2X)的数据传输量随之呈爆发式增长^[1],现有的授权频段难以满足如此大量的数据传输需求,许多研究者提出融合新的网络技术将蜂窝网络扩展至非授权频段与车载自组织网络(Vehicle Ad-hoc NETwork, VANET)组成异构网络,以达到提高系统容量的目的^[2]。然而,由于网络接入机制的不同,C-V2X与VANET共存时会引起严重的信道冲突,从而导致用户服务质量(Quality of Service, QoS)急剧下降,严重影响了车联网用户体验。另外,由于车联网的自身特性,如车辆快速移动、网络拓扑变化频繁和时延敏感,用户对QoS的需求也并非一成不变,当传输安全类与控制类的信息时,紧急用户(Emergency User, EU)需要比较低且稳定的时延;当传输非安全类的信息时,非紧急用户(non-Emergency User, nEU)对时延并不敏感,而对高传输速率的需求更大^[3]。因此,如何合理地分配C-V2X与VANET异构网络中用户数据传输时间,为不同QoS需求的用户提供个性化服务对异构车联网的融合应用有重要意义。

针对C-V2X与VANET异构网络资源分配的问题。文献[4]提出一种基于C-V2X技术以支持车对车(Vehicle to Vehicle, V2V)的资源分配方案,通过eNodeB (evolved Node B)控制V2V链路通信,消除车辆之间争用等待时间,以提高车辆间通信的可靠性,降低传输时延,提高通信质量。文献[5]针对专用短程通信的VANET承载传感数据的情况,提出了一种基于软件定义网络(Software Define Network, SDN)多域控制的车联网架构,SDN控制器以集中方式控制其域中的路侧单元(Road Side Unit, RSU)和基站(Base Station, BS),基于该管控架构设计车联网中流量区分群集路由机制,通过优化数据包传递方法优化带宽和端到端时延。文献[6]针对融合网络体系架构中非授权频谱上C-V2X和VANET用户共存的问题,提出基于能量感知的频谱共享方案,在保障车辆用户时延与吞吐量满意度的情况下最大化接入用户数量。为解决频谱分配,功率控制和频谱共享的问题,文献[7]提出一种基于LTE非授权频谱(Long Term Evolution in Unlicensed spectrum, LTE-U)的异构车联网的非授权频谱管理策略保证车辆用户之间的公平共存,在时延约束条件下通过匹配算法求解最大化吞吐量的目标函数,得到最优无线网络资源管理优化方案。

然而,现有的方案虽然考虑了时延、吞吐量等关键网络指标,但是缺少对不同用户个性化QoS需求的考虑。因此,在C-V2X与VANET可以和谐共存的基础上,本文提出一种以时延与吞吐量为优化目标的网络资源分配方案,以满足用户在不同场景下的个性化QoS需求。首先,将单位传输时间划分为竞争时间(Content Period, CP)和无竞争时间(Content Free Period, CFP)两个阶段,分别用于VANET和C-V2X传输数据以减少信道冲突,然后利用2维离散Markov链对C-V2X和VANET网络吞吐量与时延分别进行建模,构建用户吞吐量与时延与用户数量、传输时间分配比例的数学关系,并以最大化异构网络的吞吐量同时最小化用户平均时延为目标建立吞吐量-时延联合优化问题。最后,提出一种基于粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)的时延-吞吐量联合优化(Delay Throughput Joint Optimization Algorithm, DT-JOA)算法来求解这个问题,得到Pareto最优解。仿真实验结果表明,相对于现有方案,本文提出的DT-JOA算法可以有效提升车联网用户的个性化QoS体验。

2 系统模型

2.1 场景及问题描述

本文考虑一个C-V2X与VANET区域共存的网络场景。如图1所示,C-V2X车辆用户接入点BS与VANET网络车辆用户接入点RSU覆盖范围互相重叠,其中C-V2X既可以在授权频段上工作,也可以在非授权频段上工作,VANET只工作在非授权频段上^[6]。当授权频段使用率达到饱和时,C-V2X将扩展自己的工作频段到非授权频段上以获取更大的可用带宽。为了更好地执行资源分配策略,本文借鉴已有车联网异构融合体系架构^[5,8],定义了集成蜂窝网络BS和RSU功能的Hyper-BS,可以感知C-V2X和VANET的网络状态(包括每个车辆用户的信道信息、行驶速度与方向、业务类型及QoS需求等)。在应用SDN技术的条件下,控制器可以对覆盖范围内的所有车辆用户进行集中控制,并基于车辆当前状态信息进行网络资源的动态分配,实现车辆与不同BS之间接入的平滑切换^[9]。

在车联网通信中,紧急用户要求严格稳定的低时延,以便自动驾驶系统有足够的时间规避风险;而非紧急用户使用的影音娱乐业务通常对时延并不敏感,而要求更高的传输速率。因此,对用户提供个性化QoS的网络服务对提升用户体验有着重大作用^[10]。与静态网络不同,由于车辆用户的高速移动

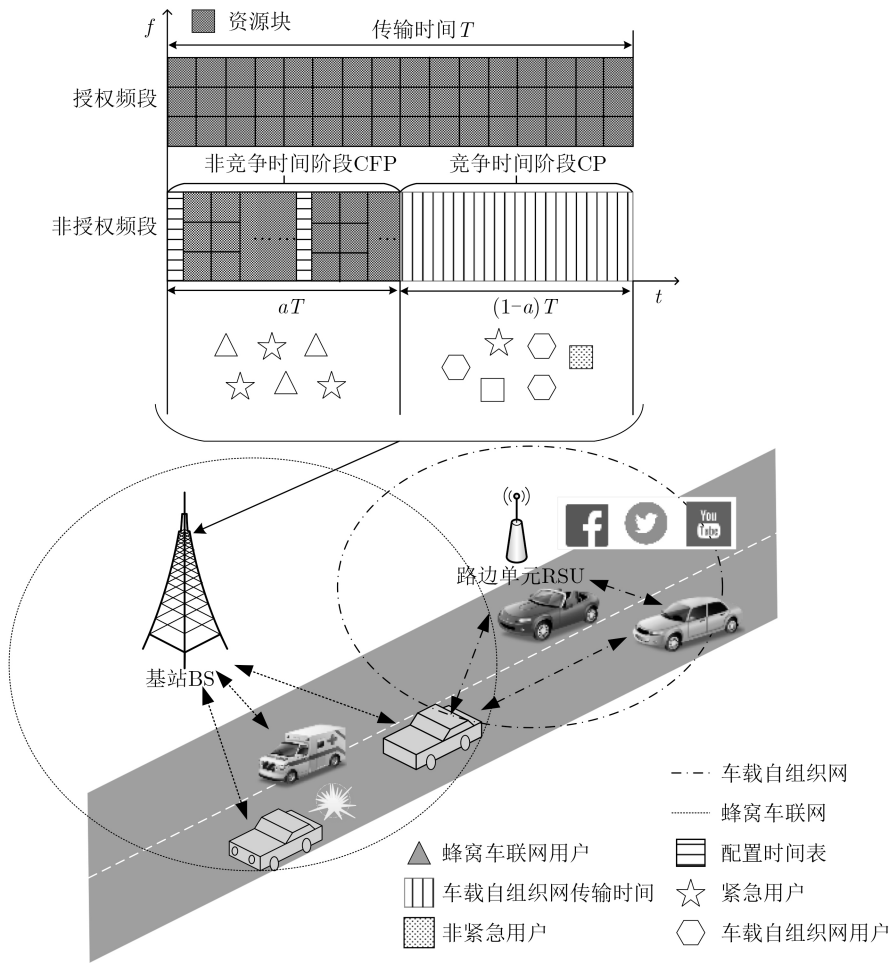


图1 C-V2X与VANET异构车联网场景模型

性而导致的短时间内车与车之间、车与BS之间距离的急剧变化，会严重影响通信链路的性能，进而影响用户体验。本文的最终目标是同时优化时延和吞吐量，而这两个指标在某种程度上是相互冲突的，相比于单目标优化，多目标联合优化更具有挑战性。基于以上描述，设计C-V2X与VANET异构车联网资源分配算法，必须解决以下3个关键问题：(1) 如何保证用户的服务体验质量。在解决C-V2X与VANET在非授权频段上和谐共存的基础上，满足不同用户的个性化QoS需求；(2) 无线网络资源的合理分配。即根据当前网络状态和用户需求，如何将有限的传输时间资源和频谱资源进行合理分配；(3) 网络吞吐量和时延的准确刻画与网络性能的优化。由于车联网环境的高动态性和复杂性，需要准确地刻画吞吐量和时延来优化网络性能。

2.2 研究思路

针对以上问题，在C-V2X和VANET异构车联网中，本文提出基于用户个性化QoS的网络时频资源分配方法，主要研究思路如图2所示。

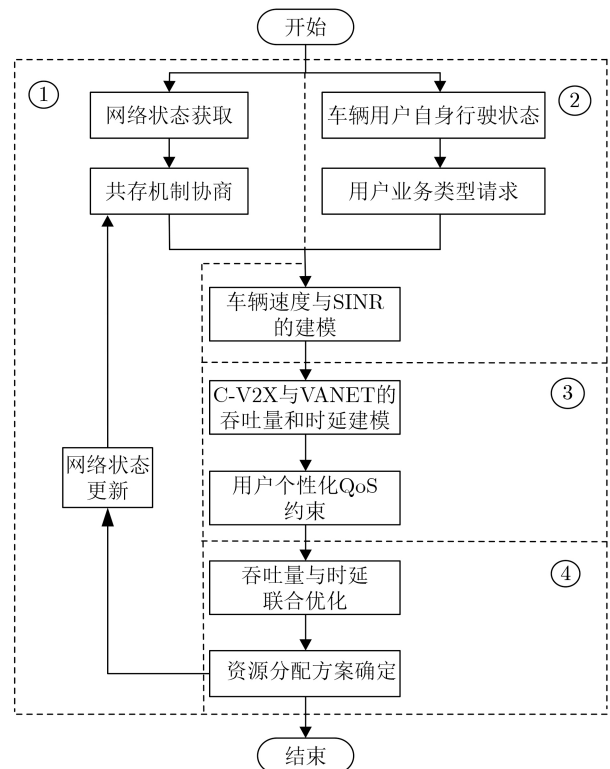


图2 C-V2X与VANET异构车联网用户个性化QoS联合优化策略

首先Hyper-BS实时监测C-V2X和VANET的网络状态, 车辆用户也会上报自身的行驶状态和业务类型, 控制器根据收集到的网络状态信息预测C-V2X和VANET的吞吐量与时延理论值。然后, 根据当前紧急用户与非紧急用户所上报的信息, 将传输时间分为CP与CFP分别给VANET与C-V2X传输以减少信道冲突, 并以所有用户的QoS需求为约束, 最大吞吐量与最小时延为目标建立异构网络联合优化模型。最后, 通过提出的DT-JOA算法得到最优传输时间分配与用户调度, 进而得到无线网络资源分配最优方案。

由于车联网的网络状态变化很快, 紧急用户与非紧急用户的数量也是频繁变化的。因此, 需要根据实际情况对无线资源进行合理分配。Hyper-BS在收集了异构车联网当前的整体网络状态后, 根据车辆用户的QoS需求和当前网络状态, 由内置的SDN控制器计算出使异构网络吞吐量和时延同时最优的 α 取值和用户调度, 作为下一个传输周期的无线资源分配方案。

3 系统模型分析

在异构网络场景中, Hyper-BS对VANET与C-V2X两种网络用户的传输时间分配和信道分配进行集中管理。场景中一共有 N_{sum} 个车联网用户, 其中有 N_V 个VANET用户, 用 $i \in N_{\text{va}} = \{1, 2, \dots, N_V\}$ 表示; 有 N_L 个C-V2X用户, 用 $j \in N_{\text{cel}} = \{1, 2, \dots, N_L\}$ 表示, $N_{\text{sum}} = N_V + N_L$ 。本文将传输信道分为 C 个子信道, 用 $c \in \Phi = \{1, 2, \dots, C\}$ 表示, 将一个单位传输时间分为 T 个子帧, 用 $t \in \Gamma = \{1, 2, \dots, T\}$ 表示。

3.1 VANET系统模型

3.1.1 VANET吞吐量分析

VANET是一种基于IEEE 802.11p协议簇的V2V自组织网络, 由于其底层MAC (Medium Access Control) 协议采用CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 竞争接入信道机制, 竞争过程可以用2维离散马尔可夫链描述^[4]。在随机过程达到平稳状态的过程中, 可以将回退计数定义为 $b(t) = m$, 其中 $m \in [0, 2^n CW_{\text{min}}]$, $2^n CW_{\text{min}}$ 是 n_{th} 回退次数后的竞争窗口大小, 回退步数记为 $s(t) = n, n \in [0, m']$, 其中 m' 是回退最大次数。则平稳状态可表示为

$$\begin{aligned} b_{n,m} &= \lim_{t \rightarrow \infty} P \{s(t) = n, b(t) = m\}, \\ m &\in [0, 2^n CW_{\text{min}}], n \in [0, m'] \end{aligned} \quad (1)$$

初始状态则是

$$b_{0,0} = \frac{2 \cdot (1 - 2P_c) \cdot (1 - P_c)}{(1 - 2P_c) \cdot (CW + 1) + CW \cdot P_c \cdot (1 - (2P_c)^{m'})} \quad (2)$$

其中, P_c 是节点在单位传输时间内的碰撞概率, 可以等效为在同一时间有多于两个的用户都试图传输数据的概率, 可以表示为

$$P_c = 1 - (1 - \tau)^{N_V - 1} \quad (3)$$

在CSMA/CA机制中, 用户在回退时间等于0时才能传输数据, 因此每一个独立节点成功传输概率 τ 可以表示为

$$\begin{aligned} \tau &= \sum_{n=0}^{m'} b_{n,0} = \frac{b_{0,0}}{1 - P_c} \\ &= \frac{2 \cdot (1 - 2P_c) \cdot (1 - P_c)}{(1 - 2P_c) \cdot (CW + 1) + CW \cdot P_c \cdot (1 - (2P_c)^{m'})} \end{aligned} \quad (4)$$

VANET用户的数量为 N_V , 在一个单位传输时间内至少有1个节点传输数据的概率是 $P_{\text{tr}} = 1 - (1 - \tau)^{N_V}$, 则用户 i 成功传输的概率 $P_{\text{suc}}(i)$ 等效于在 N_V 个VANET用户里, 只有用户 i 传输数据, 而其他 $N_V - 1$ 个用户保持静默, 则 $P_{\text{suc}}(i)$ 可以表示为

$$P_{\text{suc}}(i) = \frac{C_{N_V}^1 \cdot \tau \cdot (1 - \tau)^{N_V - 1}}{P_{\text{tr}}} \quad (5)$$

传输过程中可能出现空闲、传输成功和碰撞3种状态, 对应的概率分别用 $1 - P_{\text{tr}}$, $P_{\text{tr}} \cdot P_{\text{suc}}$ 和 $P_{\text{tr}}(1 - P_{\text{suc}})$ 表示, VANET网络的归一化吞吐量为

$$R_V(i) = \frac{P_{\text{tr}} \cdot P_{\text{suc}}(i) \cdot E[l]}{E[s]} \quad (6)$$

其中, l 代表数据包的大小, s 代表传输时间。用 $E[l]$ 表示数据包的期望, $E[s]$ 表示时隙的期望, $E[s]$ 可以表示为

$$E[s] = (1 - P_{\text{tr}}) \sigma + P_{\text{tr}} \cdot P_{\text{suc}} \cdot T_s + (1 - P_{\text{suc}}) \cdot T_c \quad (7)$$

其中, T_s 表示成功传输的阶段, T_c 表示碰撞的阶段, σ 代表空闲的阶段。

3.1.2 VANET时延分析

通过3.1.1节对吞吐量的分析, 也可以得到VANET用户的平均时延与用户数量 N_V 的数学关系。如3.1.1节所述, T_s, T_c 和 σ 分别表示成功传输、碰撞和空闲的阶段, 一个数据包被成功发送的时延和由于达到重传极限次数而被丢弃的时延是两个不同的随机过程, 下面对两种情况进行分析。

(1)数据包丢失的时延分析。根据IEEE 802.11p协议, 如果节点在试图传输数据过程中因为碰撞而导致的回退次数达到了极限次数 m , 最后一次试图发送的时候再次经历了碰撞, 那么这个数据包就会被丢弃。因此可以得到数据包被丢弃概率是 $P_{\text{drop}} = P_C^{m+1}$, 代表这个数据包经历了 $m+1$ 次碰撞, 而一个数据包要经历 $m+1$ 次碰撞所需要的时隙个数期望是

$$E[T_{\text{drop}}] = \sum_{n=0}^m \frac{CW_{N+1}}{2} = \frac{CW \cdot (2^{m'} - 1) + (m' + 1)}{2} \quad (8)$$

因此, 丢弃1个数据包所需的平均时间为

$$E[D_{\text{drop}}] = E[T_{\text{drop}}] \cdot E[s] \quad (9)$$

(2)数据包传输成功的时延分析。与数据包丢弃的情况不同, 一个成功的传输过程需要的时隙个数的期望 $E[T_{\text{suc}}]$ 可以表示为

$$E[T_{\text{suc}}] = \sum_{n=0}^m \frac{(P_{\text{suc}}' - P_{\text{suc}}^{m'+1}) \cdot \frac{CW_n + 1}{2}}{1 - P_{\text{suc}}^{m'+1}} \quad (10)$$

一个成功的传输过程的时延定义是数据包从发送端开始, 到接收端接收这个数据包为止所耗的时间, 其数学期望等于时隙长度的期望与所需时隙个数的期望的乘积

$$E[D_{\text{suc}}] = E[T_{\text{suc}}] \cdot E[s] \quad (11)$$

综上所述, VANET用户的平均时延为

$$E[D_V(i)] = \begin{cases} E[D_{\text{drop}}], & m < m' \\ E[D_{\text{suc}}], & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

3.2 C-V2X系统分析

3.2.1 C-V2X吞吐量分析

相对于C-V2X, VANET是一个V2V通信网络, 通信通常发生在相邻的车辆之间, 而无论是高速公路还是郊区、城市, 行驶车辆之间的速度差异比较小, 而且VANET本身的通信范围也不大, 车辆速度对VANET用户的通信质量没有太大影响。但是C-V2X系统中快速移动的车辆与静止的BS之间的相对速度可以很大, 高速公路上车辆行驶速度最快可以达到120~150 km/h, 车与BS之间的距离会在短时间内快速变化, 而距离对无线网络的通信质量有着显著影响。因此, 分析系统吞吐量时需要考虑C-V2X车辆用户的速度。

1个子信道在同一时刻只能分配给1个用户, 因此引入分配参数 $\beta_j^{c,t}$ 来表示C-V2X用户 j 在子帧 t 上占用了子信道 c , 这是一个0-1变量

$$\beta_j^{c,t} = \begin{cases} 1, & \text{子信道}c\text{分配给了用户}j \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (13)$$

C-V2X用户与BS通信链路中的路径衰落可以用瑞利衰落^[12]来描述, 假设BS发射功率为固定值 P^B , 用户 j 所接收到的信号功率为 $P_j^y = P^B \cdot |h_j|^2$ 。假设用户 j 的速度是 v_j , v_j 服从均值为 v_0 , 方差为 σ^2 的正态分布: $v_j \sim (v_0, \sigma^2)$ 。这样, 用户 j 在时间 Δt 内以速度 v_j 移动距离为 $\Delta d = v_j \cdot \Delta t$, 信道增益为

$$|h_j|^2 = G_0 \cdot |d_j + \Delta d|^{-\theta} \cdot |h_0|^2 \quad (14)$$

其中, G_0 表示天线和射频模块的功率增益, Δt 是上次数据传输完成到下一次传输开始的时间间隔, d_j 表示 t_0 时刻BS到用户 j 的初始距离, θ 是衰减指数, h_0 服从高斯分布 $h_0 \sim \text{CN}(0,1)$, 代表瑞利衰落。根据式(14)得到的信道增益 $|h_j|^2$, 可求得C-V2X用户 j 在子帧 t 子信道 c 上的SINR为

$$\gamma_j^{c,t} = \frac{\beta_j^{c,t} \cdot P^B \cdot |h_j|^2}{\sigma^2 + \sum_{k=1}^{N_V} \beta_k^{c,t} \cdot P_k^y \cdot |g_j(k)|^2} \quad (15)$$

其中, P_k^y 是周围其他用户 k 的发射功率, $g_j(k)$ 是周围其他用户 k 对用户 j 造成的同频干扰^[13], 则C-V2X所能达到的吞吐量为

$$R_L^{c,t}(j) = B_0 \cdot g_0 \cdot \log_2(1 + \gamma_j^{c,t}) \quad (16)$$

3.2.2 C-V2X时延分析

3GPP规定了几种Cellular通信的应用场景, 其中对时延敏感的场景例如实时游戏、车联网安全信息等业务, 需要将时延控制在50 ms以下, 本文将紧急用户 N_e 的最大忍受时延 D_e^{max} 设置为这个值。在现在已经商用的5G标准里, 空口时延可以低到1 ms, 所以数据传输时延也会进一步降低, 这也大大增强了车联网的安全性。文献[14]研究了基于Cellular网络的V2X的3种传输模式: Sidelink (SL)-based V2X, Uplink (UL)/Downlink (DL)-based V2X, Relay-based V2X。C-V2X的时延通常包括链路建立时延、传输时延和数据处理时延, 下面分别对这几个时延进行分析, 时延单位采用单位传输时间间隔(Transmission Time Interval, TTI)。

(1) 链路建立时延: 包括无线资源控制(Radio Resource Control, RRC)连接、Sidelink配置和Paging等待时间。EU从空闲状态变换到RRC状态需要经历向eNodeB请求、建立链接和EU完成设置过程, 一共需要47.5 TTI;

(2) 传输时延: eNodeB编码与排队时延1.5 TTI, eNodeB发送到EU接收1 TTI, EU解码需要1.5 TTI, EU的上层应用解码数据需要3 ms;

(3) 数据处理时延: 包括在eNodeB转发消息的时延和回程网络传输时间约20 ms, RSU数据处理时延包括上层应用进程处理时间约3 ms。

本文所考虑的C-V2X车联网场景中的V2V通信由VANET负责, 因此不考虑SL-based V2X模式, 本方案优先将紧急用户分配至C-V2X, 出于安全考虑, 这一类传输安全业务的车辆用户将只采用UL/DL-based V2X模式。因此C-V2X用户 j 的平均传输时延可以表示为

$$D_L(j) = L\text{-RRC} + L\text{-UL} + L\text{-NW} + L\text{-DL} \quad (17)$$

其中, L-RRC表示链接建立过程中RRC状态变换

时间, L-UL和L-DL分别表示上行链路与下行链路的传输时间, L-NW表示网络配置与处理时间。

3.3 无线网络资源分配

本文的目标是在保证C-V2X与VANET网络和谐共存的基础上, 满足网络系统对紧急用户和非紧急用户对吞吐量与时延的需求, 提升异构车联网的综合性能。

由C-V2X和VANET网络中吞吐量与时延分别建模分析可知, 这两个网络性能指标直接影响用户体验。因此, 选择以最大化吞吐量和最小化时延作为优化目标, 通过调整传输时间分配比例 α 和用户接入网络调度建立多目标联合优化问题。在一个单位传输时间 T 里, C-V2X用户所使用的CFP长度为 αT , 而VANET用户使用的CP长度为 $(1-\alpha)T$, 可以得到多目标联合优化目标函数

$$\left. \begin{aligned} \max_{\alpha, N_L} & \left\{ \alpha \cdot \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^{N_L} R_L^{c,t}(j) + (1-\alpha) \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_V} R_V(i) \right\} \\ \min_{\alpha, N_L} & \left\{ \alpha \cdot \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_L} \frac{D_L(j)}{N_L} + (1-\alpha) \cdot \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_V} \frac{E[D_V(i)]}{N_V} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\text{s.t.} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (19)$$

$$\sum_1^{N_L} \beta_j^{c,t} \leq 1, \beta \in \{0, 1\} \quad (20)$$

$$\gamma_j^{c,t} \geq \gamma_{\text{th}}, k \in [1, K], 1 \leq t \leq T \quad (21)$$

$$P_j^v \leq P_{\text{max}} \quad (22)$$

$$N_L \leq N_e \quad (23)$$

$$N_V \geq N_{\text{nc}} \quad (24)$$

$$D_L(j) \leq D_e^{\text{max}} \quad (25)$$

$$R_V(i) \geq R_{\text{nc}}^{\text{min}} \quad (26)$$

如式(18)所示, 目标函数1表示最大化C-V2X与VANET中车辆用户吞吐量, 目标函数2表示最小化C-V2X与VANET车辆用户的时延, 通过调整无线网络时频资源分配及用户的接入配置, 实现系统吞吐量和时延的联合优化。其中, 约束条件式(19)表示时间分配比例 α 的取值须在 $[0, 1]$ 范围内; 式(20)表示子信道在同一时间最多只被1个用户占用; 式(21)表示接收信号需大于SINR门限值, K 代表其他车辆用户的集合, 在非授权频段上其他车辆的通信会对用户 j 产生同频干扰; 式(22)表示实际发射功率应小于最大功率; 式(23)、

式(24)表示通常情况下紧急用户会接入C-V2X以获得稳定低时延, 非紧急用户会接入VANET以获得足够的速率, 但在一些特殊情况下, 比如VANET用户数量很少而C-V2X很拥挤时, 紧急用户也可以接入VANET; 式(25)、式(26)表示紧急用户对时延很敏感, 因此C-V2X的用户时延应需要低于安全业务能忍受的最大时延 D_e^{max} 。而非紧急用户的数据速率对数据速率需求较大, 因此VANET用户的吞吐量应高于非安全业务要求的最低速率 $R_{\text{nc}}^{\text{min}}$ 。通过求解式(18), 可以得到最优网络资源分配方案, 即用户分配数量 N_L , N_V 与传输时间分配比例 α 。

4 基于PSO的联合优化算法

式(18)是含有连续变量和离散变量的混合整数多目标联合优化, 属于NP-hard问题。为适应快速变化的车联网场景, 考虑到车联网时延敏感性, 本文提出一种基于PSO的吞吐量-时延联合优化算法DT-JOA, 以期在较短时间内求得最优解。

为了简便计算, 目标函数可等效转化为

$$\left. \begin{aligned} \min_{\alpha, N_L} & \left\{ \alpha \cdot \left[\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_L} \frac{D_L(j)}{N_L} - \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^{N_L} R_L^{c,t}(j) \right] \right\} \\ \min_{\alpha, N_L} & \left\{ (1-\alpha) \cdot \left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_V} \frac{E[D_V(i)]}{N_V} - \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_V} R_V(i) \right] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

将式(18)目标函数转化为式(27)中的最小化目标, 分别用objective1和objective2表示。无线网络资源有限, 吞吐量与时延无法同时取得最优值, 因此本文多目标联合优化问题无法求得同时满足多个目标的最优解, 只能得到Pareto最优解。

在用PSO算法求解的过程中, 为了解决原始PSO算法由于收敛过快而导致求解结果精确性不高的问题^[15], 本文通过引入一个多样性保持项来减缓粒子的搜索速度, 从而提高求解结果的准确性, 即粒子的位置更新公式保持不变, 而速度更新公式变为如式(28)的形式

$$\begin{aligned} v_{ij}(t+1) = & wv_{ij}(t) + r_1 C_1 [Pbest_{ij}(t) - x_{ij}(t)] \\ & + r_2 C_2 [Gbest_j(t) - x(t)] + r_3 \lambda_c \hat{v}_i(t) \end{aligned} \quad (28)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (29)$$

其中, 各项前面的系数 r_1, r_2, r_3 是取值为 $(0, 1)$ 的随机数, $\lambda_c \hat{v}_i(t)$ 是多样性保护项, 其中速度矢量 $\hat{v}_i(t)$ 是一个趋势与全局最优矢量相反的矢量, 可以表示为

$$\hat{v}_i(t) = x_i(t) - Gbest_j(t) \quad (30)$$

通常情况下，多样性保护的度量的定义是包含连续变量空间中所有候选解的最小超立方体

$$D_c = \left[\prod_{j=1}^n \frac{x^{\max,j} - x^{\min,j}}{X^{\max,j} - X^{\min,j}} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (31)$$

其中， $x^{\max,j}$ 和 $x^{\min,j}$ 分别是第 j 维所有可行解集的上界和下界， $X^{\max,j}$ 和 $X^{\min,j}$ 分别是第 j 维所有变量的上界和下界。因此， D_c 本质上表示的是包围超立方体的最小归一化边长。对于每个粒子来说，其多样性保持系数由如式(32)和式(33)

$$\lambda_{c,i} = \lambda_0 \exp\left(\frac{-\bar{D}_{c,i}^2}{2\sigma_c^2}\right) \quad (32)$$

$$\sigma_c = \frac{1}{\sqrt{2 \ln \frac{1}{\lambda_{\min}}}} \quad (33)$$

其中， λ_0 和 λ_{\min} 是用户多样性系数的尺度和形状参数。将连续变量的多样性保护项变为离散变量

$$r_3 \lambda_c \hat{v}_i(t) \Rightarrow r_3 \lambda_{c,i} [x_i(t) - Gbest_i(t)] \quad (34)$$

通过调整参数 $\lambda_{c,t}$ ，可以控制多样性保护项的适应值，从而控制粒子更新速度为一个最佳值。综上，基于PSO的联合优化算法的流程如表1，当最终全局最优位置不再更新或者最大迭代次数达到最大时，代表最优解已经找到。

表 1 基于PSO的联合优化算法

输入： 最大迭代次数: maxgen, 粒子群数量: pop, 学习因子: C_1, C_2 。
输出： Pareto最优解。
(1) 初始化: $v, p, Pbest, Gbest, \omega, t$.
(2) while $t < \text{maxgen}$ do
(3) for $i = 1, 2, \dots, \text{pop}$ do
(4) 计算适应度 $F(x_i)$
(5) if $F(x_i(t)) < F(x_i(t+1))$ then
(6) 更新局部Pbest = $x_i(t+1)$;
(7) end if
(8) if $F(Gbest(t)) < F(Gbest(t+1))$ then
(9) 更新全局 Gbest ($t+1$) < Pbest ($t+1$)
(10) end if
(11) 针对每个粒子进行
(12) 速度比较 $v_i(t+1)$;
(13) 位置比较 $x_i(t+1)$;
(14) end for
(15) $t++$;
(16) end for
(17) end while

5 实验方法及结果分析

5.1 实验设置

本节在仿真系统中进行模拟实验以验证所提算法的可行性和有效性。本实验各项参数参考文献[6,7,14]进行设置，包含1000 m×1000 m的一个区域，100个车辆用户以30~120 km/h的速度行驶，主要参数设置如表2。

表 2 仿真参数

参数	数值
仿真区域	1000 m×1000 m
发射功率	43 dBm
功率增益因子	-31.5 dB
车辆数量	100
接收功率门限	-75 dBm
SINR门限	20 dB
EU容忍最大时延	50 ms
nEU最低数据速率	5 Mbps
子信道带宽	15 kHz
子信道数量	12
数据包大小	512 B
噪声功率	-114 dBm
车辆行驶速度	30~120 km/h
MAC层	IEEE 802.11 p
仿真时间	500 s
仿真次数	50

5.2 实验结果对比及分析

5.2.1 算法有效性对比分析

本文采用快速收敛的启发式算法求解优化目标函数，相较于常用的遗传算法(Genetic Algorithm, GA)^[6]，粒子群算法的收敛速度更快。

如图3所示，PSO与GA都属于仿生算法，通过随机搜索的方式优化种群然后一次次迭代得到最优解，收敛速度与种群数量有着直接关系，随着用户数量的增加，两种算法的收敛时间都会增大。然而，PSO算法的每个粒子都保留了当次迭代最优解的位置与速度信息，相对于GA算法，PSO有一定的记忆性，导致PSO在搜索更新的过程中跟随当前最优解的轨迹，因此会有着更快的收敛速度。当然，收敛速度过快有时候会存在遇到早熟收敛和求解精确度较低的缺点，因此本文对PSO进行了优化，通过第4节对粒子速度-位置更新公式的改进，改善了PSO收敛精确度较差的问题。可以看出，相对于GA，PSO以少量收敛精确度为代价，获得了更快的收敛速度，更符合车联网对低时延敏感的需求。

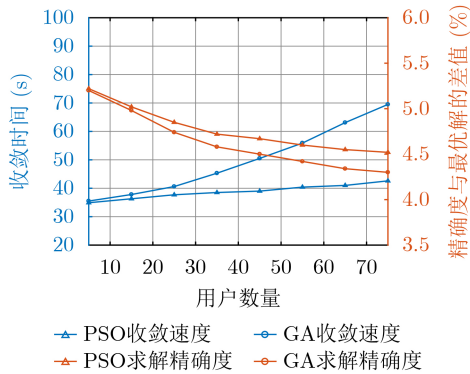


图3 MO-PSO与其他算法的对比

5.2.2 异构共存方案的网络性能分析

如图4所示，在不采用异构网络共存方案情况下，C-V2X对信道的占用将严重影响VANET网络性能。这是因为此时用户数量已接近网络容量的极限，网络吞吐量已趋于饱和；另外，由于频繁检测到信道被占用，VANET用户的回退次数也越来越多，导致接入时延逐渐上升，在达到一定用户数量以后，接入时延趋于平缓不再增加，这是由于VANET网络的IEEE 802.11 p底层协议机制，当用户达到最大回退重传次数时，数据包将会被丢弃，从而影响VANET用户的QoS接入时延和吞吐量。

如图5所示，在采用本文所提出的共存方案

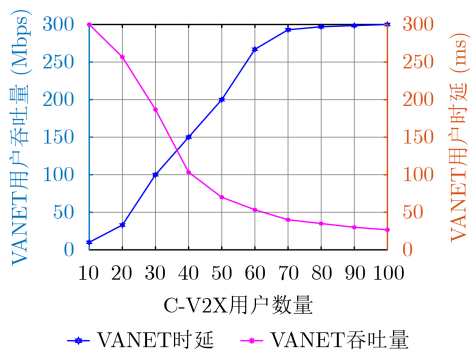


图4 C-V2X对VANET用户的影响

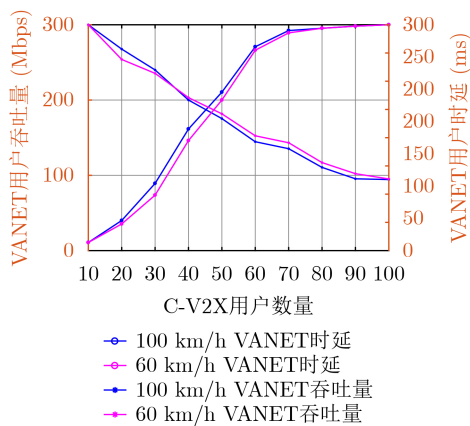


图5 采用方案后C-V2X对VANET用户的影响

后，随着C-V2X用户数量增加，VANET用户数据速率的下降趋势得到了很大缓解，VANET用户数据速率从图4中网络容量接近饱和时的25 Mbps上升到了100 Mbps；而VANET用户的接入时延并没有多大改变，因为在本文的优化方案中将所有非紧急用户都接入VANET网络，这部分用户对低时延并没有很强烈的需求，对于传输非安全类业务的VANET用户来说，较高的时延是可以忍受的。因此，本文所提出的优化方案提升VANET用户的数据速率，保证非紧急用户对吞吐量的个性化QoS需求。此外，当车辆速度为100 km/h时，VANET的吞吐量比车辆速度为60 km/h时要小，同时VANET的用户时延要更高，因为车辆速度越快，VANET网络越不稳定，网络拓扑的频繁变化会让链路断开的概率增加，导致网络性能降低。

5.2.3 用户个性化QoS分析

如图6所示，随着用户数量的增加，由于信道的繁忙程度逐渐增加，C-V2X用户与BS之间的链路干扰逐渐增大，因此C-V2X用户的时延呈上升趋势。在DT-JOA优化方案中，由于将紧急用户都接入C-V2X，因此紧急用户的接入时延即C-V2X的时延的增加较为缓慢。而文献[6]与文献[7]所提出的方案，由于没有考虑到用户传输业务类型的紧急程度，当用户需要传输对时延敏感的业务而又接入了VANET网络时，用户时延会随着用户数量增加而急剧增大，无法满足安全类业务的低时延需求，而DT-JOA能够将紧急用户的接入时延控制在50 ms内。另外，从图6中时延分布的箱型图可以看出，相比文献[6]的单目标优化和文献[7]的TS-DS优化算法，DT-JOA优化算法对时延的抖动控制更为稳定，因为C-V2X用户接入网络的过程中没有信道检测-回退机制，用户数量对C-V2X用户的接入时延影响并不大。因此，本文的DT-JOA优化方案能够更有效地保证紧急用户对低时延的个性化QoS需求。

如图7所示，随着用户数量增加，由于信道干扰逐渐增大和信道拥塞，非紧急用户的吞吐量都呈

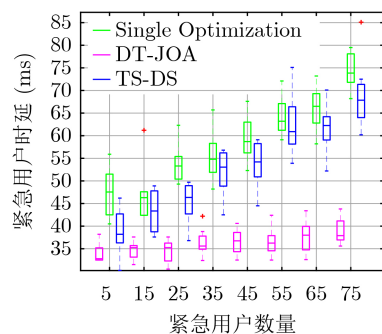


图6 紧急用户的时延分布

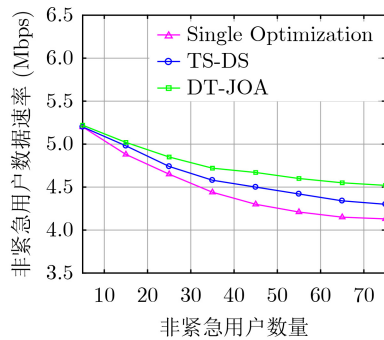


图7 非紧急用户的吞吐量下降情况

现下降趋势。相比于文献[6]的单目标优化方案和文献[7]的TS-DS优化方案, 由于DT-JOA将一部分用户分配至C-V2X网络, 因而能够在一定程度上缓解VANET的网络拥塞, 在相同用户数量条件下, 本文的方案可以为非紧急用户提供更高的数据速率, 提升了非紧急用户对更大吞吐量的QoS需求。当然, 此时紧急用户的吞吐量因为C-V2X用户的增加有一定下降, 但是在车联网中紧急用户传输的安全类业务数据量通常都很少, 对数据传输速率的需求并不大, 而对低时延的需求更大, 因此对于紧急用户而言牺牲少部分数据速率而获得更低、更为稳定的时延仍然是值得的。

综上所述, 本文所提出的DT-JOA联合优化方案可以有效地满足紧急用户与非紧急用户的个性化QoS需求, 提升用户体验。

6 结论

针对C-V2X与VANET组成的异构车联网在非授权频段上共存时互相冲突的问题, 本文通过对信道冲突和资源分配的研究, 提出了一种基于传输时间动态分配和用户接入动态调度的共存机制与资源分配方案, 在和谐共存的基础上, 保证了用户的个性化QoS需求, 从而优化异构网络的综合性能。仿真结果表明, 与现有其他算法相比, 本文所提资源分配方案有效地满足了用户个性化QoS需求, 提升了车联网用户的体验。

参考文献

- [1] 钱志鸿, 田春生, 郭银景, 等. 智能网联交通系统的关键技术与发展[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(1): 2-19. doi: [10.11999/JEIT190787](https://doi.org/10.11999/JEIT190787).
- [2] 张海霞, 李腆腆, 李东阳, 等. 基于车辆行为分析的智能车联网关键技术研究[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(1): 36-49. doi: [10.11999/JEIT190820](https://doi.org/10.11999/JEIT190820).
- [3] ZHANG Haixia, LI Tiantian, LI Dongyang, et al. Research on vehicle behavior analysis based technologies for intelligent vehicular networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(1): 36-49. doi: [10.11999/JEIT190820](https://doi.org/10.11999/JEIT190820).
- [4] CHEN Shanzhi, HU Jinling, YAN Shi, et al. Vehicle-to-everything (v2x) services supported by LTE-based systems and 5G[J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2017, 1(2): 70-76. doi: [10.1109/MCOMSTD.2017.1700015](https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2017.1700015).
- [5] ABBAS F, FAN Pingzhi, KHAN Z, et al. A novel low-latency V2V resource allocation scheme based on cellular V2X communications[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(6): 2185-2197. doi: [10.1109/ITITS.2018.2865173](https://doi.org/10.1109/ITITS.2018.2865173).
- [6] QI Weijing, LANDFELDT B, SONG Qingyang, et al. Traffic differentiated clustering routing in DSRC and C-V2X hybrid vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(7): 7723-7734. doi: [10.1109/TVT.2020.2990174](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2990174).
- [7] WANG Pengfei, DI Boya, ZHANG Hongliang, et al. Cellular V2X communications in unlicensed spectrum: Harmonious coexistence With VANET in 5G systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(8): 5212-5224. doi: [10.1109/TWC.2018.2839183](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2839183).
- [8] WEI Qing, LI Wang, FENG Zhiyong, et al. Wireless resource management in LTE-U driven heterogeneous V2X communication networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(8): 7508-7522. doi: [10.1109/TVT.2018.2823313](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2823313).
- [9] HUANG Xumin, YU Rong, KANG Jiawen, et al. Exploring mobile edge computing for 5G-enabled software defined vehicular networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2017, 24(6): 55-63. doi: [10.1109/MWC.2017.1600387](https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1600387).
- [10] DUO Ran, WU C, YOSHINAGA T, et al. SDN-based handover scheme in cellular/IEEE 802.11p Hybrid vehicular networks[J]. *Sensors*, 2020, 20(4): 1082. doi: [10.3390/s20041082](https://doi.org/10.3390/s20041082).
- [11] LI Xiaoshuai, MA Lin, SHANKARAN R, et al. Joint power control and resource allocation mode selection for safety-related V2X communication[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(8): 7970-7986. doi: [10.1109/TVT.2019.2921352](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2921352).
- [12] AMADEO M, CAMPOLO C, and MOLINARO A. Enhancing IEEE 802.11p/WAVE to provide infotainment applications in VANETs[J]. *Ad Hoc Networks*, 2012, 10(2): 253-269. doi: [10.1016/j.adhoc.2010.09.013](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2010.09.013).
- [13] CHEN Chen, WANG Baoji, and ZHANG Rongqing. Interference hypergraph-based resource allocation (IHG-RA)

- for NOMA-integrated V2X networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(1): 161–170. doi: [10.1109/JIOT.2018.2875670](https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2875670).
- [13] DI Boya, SONG Lingyang, and LI Yonghui. Sub-channel assignment, power allocation, and user scheduling for non-orthogonal multiple access networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(11): 7686–7698. doi: [10.1109/TWC.2016.2606100](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2606100).
- [14] LEE K, KIM J, PARK Y, *et al.* Latency of cellular-based V2X: Perspectives on TTI-proportional latency and TTI-independent latency[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 15800–15809. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2731777](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2731777).
- [15] TONG Weiyang, CHOWDHURY S, and MESSAC A. A multi-objective mixed-discrete particle swarm optimization with multi-domain diversity preservation[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016, 53(3): 471–488. doi: [10.1007/s00158-015-1319-8](https://doi.org/10.1007/s00158-015-1319-8).
- [16] PRASAD S and RAMESH J. Partial transmit sequence based PAPR reduction with GA and PSO optimization techniques[C]. 2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), Coimbatore, India, 2017: 1–4. doi: [10.1109/ICIIECS.2017.8276004](https://doi.org/10.1109/ICIIECS.2017.8276004).
- 韩珍珍: 女, 1989年生, 博士生, 研究方向为软件定义天地一体化网络组网路由、网络资源优化.
- 周 末: 男, 1991年生, 硕士生, 研究方向为无线网络资源优化.
- 刘恩慧: 女, 1996年生, 硕士生, 研究方向为无线网络资源优化.
- 徐 川: 男, 1980年生, 教授, 研究方向为天地一体化网络、工业互联网、软件定义网络和网络测量.
- 赵国锋: 男, 1974年生, 教授, 研究方向为天地一体化网络、工业互联网和网络测量.

责任编辑: 余 蓉