

## 面向服务的车辆网络切片协调智能体设计

吴大鹏 郑豪\* 崔亚平

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

(重庆高校市级光通信与网络重点实验室 重庆 400065)

(泛在感知与互联重庆市重点实验室 重庆 400065)

**摘要:** 针对现有研究中缺乏对车辆网络切片的部署和管理, 该文设计了车辆网络切片架构中的切片协调智能体。首先基于K-means++聚类算法将车联网通信业务根据相似度进行聚类并映射到对应的切片中。其次, 在考虑应用场景间的时空差异导致的无线资源利用不均衡现象, 提出了共享比例公平方案以实现无线资源的高效及差异化利用。最后, 为了保证切片服务需求, 采用线性规划障碍方法求解最优的切片权重分配, 使切片负载变化容忍度最大化。仿真结果表明, 共享比例公平方案相比于静态切片方案平均比特传输时延(BTD)更小, 在每切片用户数为30的情况下均匀分布用户负载场景中二者的BTD增益为1.4038, 且在不同的用户负载分布场景下都能求出最优的切片权重分配。

**关键词:** 车联网; 5G网络切片; 聚类; 资源分配

中图分类号: TN915; TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)08-1910-08

DOI: [10.11999/JEIT190635](https://doi.org/10.11999/JEIT190635)

## Service-oriented Coordination agent Design for Network Slicing in Vehicular Networks

WU Dapeng ZHENG Hao CUI Yaping

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

(Optical Communication and Networks Key Laboratory of Chongqing, Chongqing 400065, China)

(Ubiquitous Sensing and Networking Key Laboratory of Chongqing, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** In view of the lack of deployment and management of slicing in vehicular network, a slice coordination agent of vehicular network slicing structure is designed. Firstly, based on the K-means++ clustering algorithm, the vehicle network communication services are clustered according to the similarity and then mapped into different slices. Secondly, considering the imbalance of radio resource utilization caused by the space-time characteristic among application scenarios, a shared proportional fairness scheme is proposed to utilize radio resources efficiently and differently. Finally, in order to ensure the requirements of slicing service, linear programming obstacle method is used to solve the optimal slice weight distribution to maximize the slice load variation tolerance. Simulation results show that the shared proportional fairness scheme has smaller average Bit Transmission Delay (BTD) than the static slicing scheme, and the optimal slice weight distribution can be obtained under different user load distribution scenarios. The BTD gain achieves 1.4038 in the uniform user load scenario with 30 users per slice.

**Key words:** Vehicular networks; 5G network slicing; Clustering; Resource allocation

收稿日期: 2019-08-26; 改回日期: 2020-03-10; 网络出版: 2020-04-21

\*通信作者: 郑豪 547721540@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61871062, 61771082, 61801065), 重庆市高校创新团队建设计划资助项目(CXTDX201601020)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61871062, 61771082, 61801065), The Program for Innovation Team Building at Institutions of Higher Education in Chongqing (CXTDX201601020)

## 1 引言

随着移动流量的爆炸式增长,网络运营商在提供所需的容量增长方面面临着严峻的挑战。另外,5G生态系统将主要面对垂直行业用户(如汽车、电力、工业制造等<sup>[1]</sup>),并支持多种用例,因此其所需服务具有极大多样性。不仅如此,目前的网络架构没有考虑应用场景间的时空差异,导致无线资源利用极度不均衡,网络设备将出现闲置现象<sup>[2]</sup>。因此亟需设计新的网络架构及管理方法,以实现无线网络资源的高效及差异化利用。

为解决上述问题,5G研究中引入了无线网络虚拟化(Wireless Network Virtualization, WNV)及网络切片作为相耦合的概念,其中虚拟化为切片提供了重要的技术支撑,而切片则往往被视作虚拟化的理想架构<sup>[3]</sup>。WNV作为在无线领域对网络虚拟化的延伸提出,其目标是基于服务需求而非物理粒度的方式使用网络资源,对资源进行抽象及分割,以实现多个虚拟网络对底层基础设施及无线资源的共享<sup>[4,5]</sup>。而网络切片<sup>[6]</sup>则基于网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV)、软件定义网络(Software Defined Network, SDN)等虚拟化技术创建多个逻辑上隔离的网络,每个切片由一组网络功能、资源和连接关系组成,以支持灵活且多样化的应用场景。

目前关于无线网络切片仍然缺乏有效的部署和管理,不同厂商对系统架构的理解也各有不同。文献<sup>[7]</sup>提出了网络切片作为一种服务(Network Slicing as a Service, NSaaS)的概念以帮助运营商提供定制化的端到端蜂窝网络,文献<sup>[8]</sup>提出一种针对异构无线域的新型网络切片架构并同时考虑了网络的可编程性,但是上述文献并未解决切片间无线资源的分配问题。文献<sup>[9]</sup>为了提高频谱资源利用率设计了一种机会频谱共享算法,该算法考虑了在满足最低频谱需求下如何提高频谱利用率,但是没有考虑切片服务需求的差异。文献<sup>[10]</sup>研究了一种以最大化用户负载为目标的动态资源共享策略,实现了良好的性能增益,但是同样没有具体考虑切片服务需求的差异。针对车辆网络,文献<sup>[11]</sup>针对5G V2X通信的高效数据分发提出一种两级聚类方案,在高密度车载网络方案中实现了良好的吞吐量。文献<sup>[12]</sup>提出一种针对V2X服务的切片架构设计,其提出跨越RAN和CN的网络切片,以确保高灵活性,但是其并没有明确切片协调器的具体功能。

本文在文献<sup>[12]</sup>提出的切片架构的基础上,设计了切片协调智能体,其采用K-means++聚类算法根据服务需求的相似度对V2X通信业务进行聚

类,形成聚类簇同时创建与簇数目相同数目的切片,并将同一类的业务映射到对应的切片中,使同一类的业务在同一个切片中为用户提供服务。为了适应无线网络切片架构,参考文献<sup>[10]</sup>本文设计了新的无线资源管理方案,以使资源的管理和切片的用户活动保持一致。如在设计的智能体中,采用动态切片方案即共享比例公平方案(Shared Proportion Fair Scheme, SPFS)对系统的无线资源进行管理,相较于传统的静态切片方案也更加公平、合理。最后,本文通过线性规划障碍方法求解当前最优的切片权重分配,使切片负载变化容忍度最大化。

本文的其余部分安排如下,第2节介绍了系统模型,第3节介绍了所设计的切片协调智能体,第4节介绍了切片协调智能体里服务聚类模块和切片调度模块中分别用到的算法,第5节对方案和算法的性能进行了仿真分析,第6节总结了本文所做的工作。

## 2 系统模型

本文考虑蜂窝网络由 $B$ 个路侧单元(Road Side Unit, RSU) $\mathcal{B}$ 和 $V$ 个网络切片 $\mathcal{V}$ 组成。系统状态 $\mathcal{U}_b^v$ ,  $\mathcal{U}_b$ 和 $\mathcal{U}^v$ 分别表示当前与路侧单元 $b$ 通信并连接到切片 $v$ 的车辆、与路侧单元 $b$ 通信的车辆、连接到切片 $v$ 的车辆,  $n_b^v$ 和 $n^v$ 分别表示对应的车辆数目,即 $|\mathcal{U}_b^v| = n_b^v$ ,  $|\mathcal{U}^v| = n^v$ ,并假设每辆车只与一个路侧单元通信且连接到一个切片。

车辆与提供最强SINR的路侧单元通信,其下行SINR可以简单表示为

$$\text{SINR}_{ub} = \frac{P_b G_{ub}}{\sum_{k \in \mathcal{B}} P_k G_{uk} + \sigma^2} \quad (1)$$

其中,依据文献<sup>[13]</sup>,路侧单元频谱设置为20 MHz,发射功率 $P_b$ 设置为44 dBm。信道增益 $G_{ub}$ 与路径损耗,阴影衰落,快衰落有关,其中路径损耗计算公式为 $39 \lg(d_{ub}) + 25 + 20 \lg(f_c)$ <sup>[14]</sup>,  $d_{ub}$ 表示车辆与路侧单元的距离,载波频率 $f_c = 4$  GHz,阴影衰落服从均方差4 dB的对数正态分布,快衰落取决于车辆速度的瑞利分布。噪声 $\sigma^2$ 取决于噪声谱密度 $\eta = -174$  dBm/Hz,噪声系数 $\gamma = 9$  dB。

根据香农公式可以得到车辆 $u$ 在路侧单元 $b$ 中的频谱效率为

$$e_{ub} = \log_2(1 + \text{SINR}_{ub}) \quad (2)$$

每个路侧单元 $b$ 内被建模为有限的资源被所关联的车辆所共享,车辆 $u \in \mathcal{U}_b$ 被分配一部分的资源 $f_u \in [0, 1]$ ,如在一个帧中的资源块或在一段时间内分配资源。则路侧单元 $b$ 对车辆 $u$ 的传输速率为

$r_u = f_u c_u$ , 其中 $c_u$ 表示把路侧单元 $b$ 的资源都分配给车辆 $u$ 时的传输速率, 即 $c_u = B e_{ub}$ , 其中 $B$ 表示路侧单元频谱大小。

### 3 切片协调智能体设计

本节介绍了切片协调智能体的设计, 其中3.1小节介绍了车辆网络切片系统架构, 3.2和3.3小节分别对切片调度模块中的无线资源分配问题进行方案设计和问题建模。

#### 3.1 系统架构

车辆网络切片系统架构如图1所示, 包含3层, 分别为业务层、切片层以及网络功能虚拟化层。

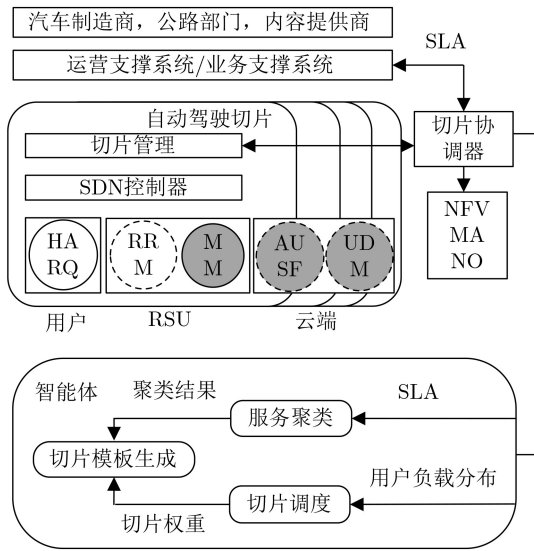


图1 车辆网络切片系统架构

业务层包含参与者和运营支撑系统/业务支撑系统(Operation Support System, OSS/Business Support System, BSS), 租户与OSS/BSS签订服务级别协议(Service Level Agreement, SLA), 其定义了一些特定于服务的需求, 包括容量、覆盖区域、QoS需求等。切片层包括切片管理模块、软件定义网络控制器以及各个切片对应的物理和虚拟网络功能。网络功能虚拟化层包含网络功能虚拟化基础设施(NFVI)和NFV管理和编排(MANagement and Orchestration, MANO)。切片协调器协调3层之间的交互, 其包含两大模块, 分别是服务聚类模块、切片调度模块。服务聚类模块用于合并具有相似服务需求的车联网业务并将同一聚类结果映射至同一切片中为用户提供服务, 切片调度模块根据用户的随机分布分配各个RSU内各切片的无线资源。最后, 将所得到的聚类结果和切片权重分配结果用于切片模板生成, 各切片模板用于切片管理器中的切片实例化。

#### 3.2 方案设计

针对切片调度模块中存在的无线资源分配问题, 本文考虑两种资源分配方案, 一种是作为对比的基准方案, 称为静态切片方案(Static Slicing, SS), 另一种是本文所提出的动态切片方案, 称为共享比例公平方案(Shared Proportion Fair Scheme, SPFS)。假设每个切片被分配一定权重的无线资源 $s^v, v \in \mathcal{V}$ , 那么 $s^v > 0, \sum_{v \in \mathcal{V}} s^v = 1$ 。

在SS中, 路侧单元 $b$ 给切片 $v$ 分配固定比例 $s^v$ 的资源, 车辆 $u \in \mathcal{U}_b^v$ 则被平均分配比例 $1/n_b^v$ 的资源, 即路侧单元 $b$ 对车辆 $u$ 的传输速率为

$$r_u^{SS} = s^v c_u / n_b^v \quad (3)$$

在SPFS中, 每个切片 $v$ 根据当前系统中的活跃车辆数目平均再分配权重, 即对于 $u \in \mathcal{U}^v, \forall v \in \mathcal{V}, w_u = s^v / n^v$ 。接下来, 路侧单元再根据与其关联车辆的权重按比例分配资源。因此路侧单元 $b$ 对车辆 $u$ 的传输速率为

$$r_u^{SPFS} = \frac{w_u c_u}{\sum_{u' \in \mathcal{U}_b} w_{u'}} = \frac{\frac{s^v}{n^v} c_u}{\sum_{v' \in \mathcal{V}} \frac{n_b^{v'} s^{v'}}{n^{v'}}} \quad (4)$$

依据文献[15], 本文选择比特传输时延(Bit Transmission Delay, BTD)作为用户性能度量标准, 其对应于传输1 bit所需的时间, 因此越低的BTD对应着越高的速率, 即更好的性能。表1列出了与下列公式的相关符号。

根据式(3), 可以得到在SS下, 连接到切片 $v$ 的车辆的平均比特传输时延为

$$\text{BTD}^{v,SS} = \sum_{b \in \mathcal{B}} \tilde{\rho}_b^v \text{BTD}_b^{v,SS} = \frac{\rho^v \|\tilde{\rho}^v\|_{\Delta_v}^2}{s^v} \quad (5)$$

根据式(4), 可以得到在SPFS下, 连接到切片 $v$ 的车辆的平均比特传输时延为

$$\text{BTD}^{v,SPFS} = \sum_{b \in \mathcal{B}} \tilde{\rho}_b^v \text{BTD}_b^{v,SPFS} = \frac{\rho^v \langle \tilde{\rho}^v, \tilde{\mathbf{g}} \rangle_{\Delta_v}}{s^v} \quad (6)$$

表1 符号缩写

符号	定义	含义
$\rho^v$	$n^v$	切片 $v$ 的总负载
$\rho^v$	$(\rho_b^v \triangleq n_b^v : b \in \mathcal{B})$	切片 $v$ 的负载分布
$\tilde{\rho}^v$	$(\tilde{\rho}_b^v \triangleq \rho_b^v / \rho^v : b \in \mathcal{B})$	切片 $v$ 的相对负载分布
$\tilde{\mathbf{g}}$	$(\tilde{g}_b \triangleq \sum_{v \in \mathcal{V}} s^v \tilde{\rho}_b^v : b \in \mathcal{B})$	总体权重相对负载分布
$\delta^v$	$(\delta_b^v \triangleq \mathbb{E} \left[ \frac{1}{c_b^v} \right] : b \in \mathcal{B})$	切片 $v$ 的平均容量倒数
$\Delta_v$	$\text{diag}(\delta^v)$	切片 $v$ 的平均容量倒数的对角矩阵

这里定义  $\langle \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \rangle_M \triangleq \mathbf{x}_1^T \mathbf{M} \mathbf{x}_2$  为向量加权内积，定义  $\|\mathbf{x}\|_M \triangleq \sqrt{\mathbf{x}^T \mathbf{M} \mathbf{x}}$  为向量加权范数， $\mathbf{M}$  为对角矩阵。

通过二者的比值可以得到SPFS相比于SS的增益为

$$G^v = \frac{\text{BTD}_b^{v, \text{SS}}}{\text{BTD}_b^{v, \text{SPFS}}} = \|\tilde{\rho}^v\|_{\Delta_v}^2 / \langle \tilde{\rho}^v, \tilde{\mathbf{g}} \rangle_{\Delta_v} \quad (7)$$

本文以动态切片方案相对于基准方案的增益作为主要性能评价指标，对所提出的SPFS进行评估。

### 3.3 问题建模

在实际中每个切片都会给用户提供服务保障，因此切片  $v$  应保证其平均比特传输时延不超过其服务需求  $d_v$ 。

首先考虑只支持单切片  $v$  流量负载的网络，因此  $s^v = 1$ ,  $\tilde{\mathbf{g}} = \tilde{\rho}^v$ 。为了满足服务需求  $d_v$ ，根据式(6)可得

$$\rho^v \leq l(d_v, \tilde{\rho}^v) \triangleq d_v / \|\tilde{\rho}^v\|_{\Delta_v}^2 \quad (8)$$

这里定义  $l(d_v, \tilde{\rho}^v)$  为切片  $v$  的最大可接入负载。

其次考虑支持切片集  $\mathcal{V}$  流量负载的网络，每个切片有着自己的服务需求。将式(8)代入式(6)中，可得

$$\sum_{v \in \mathcal{V}} s^v \mathbf{h}^v \succeq \mathbf{0} \quad (9)$$

其中， $\mathbf{h}^v = (h_u^v : u \in \mathcal{V})$  为切片  $v$  的权重耦合矢量，具体表达式为

$$h_u^v = \begin{cases} 1, & v = u \\ -\rho^u \langle \tilde{\rho}^u, \tilde{\rho}^v \rangle_{\Delta_u} / (l(d_u, \tilde{\rho}^u) - \rho^u) \|\tilde{\rho}^u\|_{\Delta_u}^2, & v \neq u \end{cases}$$

因此为了使各切片满足接入用户的服务需求，且使各切片对切片负载变化容忍度更高，以便接入更多用户，优化问题可以表述为最大最小问题

$$\left. \begin{aligned} & \max \left\{ \min_i \sum_{v \in \mathcal{V}} s^v h_i^v \right\} \\ & \text{s.t. C1: } \sum_{i=1}^V s^i = 1 \\ & \quad \text{C2: } s^i \geq 0, i = 1, 2, \dots, V \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中， $\min_i \sum_{v \in \mathcal{V}} s^v h_i^v$  为最小权重耦合分量，根据式(9)，只有其大于零，其最优权重解才有意义，才能满足当前用户负载。

## 4 算法设计

算法包括服务聚类模块中的聚类算法设计和切片调度模块中的资源分配算法设计。依据文献[16]，PC5接口支持调度式的资源分配方式(Mode-3)和终

端自主的资源分配方式(Mode-4)。由于文中提出算法侧重于应用场景间的时空差异，且其执行端在RSU端，故在聚类算法设计中只考虑工作在Mode-3下的车辆的V2X业务，在资源分配算法设计中只考虑工作在Mode-3下的车辆的上下行及sidelink信道资源。

### 4.1 基于线性规划障碍的资源分配算法

针对3.3小节中的最大最小问题，令  $p$  为最小权重耦合分量，即  $p = \min_i \sum_{v \in \mathcal{V}} s^v h_i^v$ ，那么原问题可以转化为

$$\left. \begin{aligned} & \min_{s \geq 0} -p \\ & \text{s.t. C1: } p - \sum_{v \in \mathcal{V}} s^v h_i^v \leq 0, i = 1, 2, \dots, V \\ & \quad \text{C2: } -s^i \leq 0, i = 1, 2, \dots, V \\ & \quad \text{C3: } \sum_{i=1}^V s^i = 1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由于目标函数和约束条件都是线性的[17]，所以此为等式和不等式约束下的线性规划问题，因此可采用线性规划障碍方法来求解。

首先需要将问题近似转换成等式约束问题，从而可应用牛顿方法求解。将问题式(11)重新表述，从而将不等式约束隐含在目标函数中：

$$\left. \begin{aligned} & \min -p + \sum_{i=1}^V -(1/t) \lg \left( -p + \sum_{v \in \mathcal{V}} s^v h_i^v \right) \\ & \quad + \sum_{i=1}^V -(1/t) \lg(s^i) \\ & \text{s.t. } \sum_{i=1}^V s^i = 1 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

同时为了简化符号，用  $t$  乘目标函数，考虑等价问题

$$\left. \begin{aligned} & \min f(x) = t f_0(x) + \phi(x) \\ & \text{s.t. } \mathbf{A}x = \mathbf{1} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中，定义  $f_0(x) = -p$ ， $\phi(x) = \sum_{i=1}^V -\lg \left( -p + \sum_{v \in \mathcal{V}} s^v h_i^v \right) + \sum_{i=1}^V -\lg(s^i)$ ， $\mathbf{A} = [1, 1, 1, 1, 0]$ 。

为求解问题式(13)，本文提出了基于线性规划障碍方法的资源分配算法。其分为4个阶段，分别是中心点步骤、改进、停止准则、增加精度。如表2的算法1所示，第3行为中心点步骤，用  $x^*(t)$  表示中心点步骤得到的解，称为中心点。同时也将中心点步骤称为外部迭代，把中心点步骤中的牛顿迭代称为内部迭代。每次内部迭代可以得到原问题的可行

表2 基于线性规划障碍的资源分配算法(算法1)

输入: 初始 $x_0$ , 初始确定近似的参数 $t_0$ , 比例因子 $\mu$ , 误差阈值 $\varepsilon$   
 输出: 最优解 $x^*$

- (1)  $x \leftarrow x_0, t \leftarrow t_0, \mu \leftarrow 50, \varepsilon \leftarrow 10^{-3}$
- (2) while (true) do
- (3) 执行表3所示的算法2, 从 $x$ 开始, 最小化 $tf_0 + \phi$ , 得到对偶可行解 $x^*(t)$
- (4)  $x \leftarrow x^*(t)$
- (5) 计算当前对偶间隔 $dualityGap \leftarrow \frac{2V}{t}$
- (6) If  $dualityGap < \varepsilon$  then
- (7) break
- (8) End if
- (9)  $t \leftarrow \mu t$
- (10) Endwhile
- (11) return  $x$

解, 但是只有每次外部迭代才可以得到近似最优解, 即中心点。得到中心点后, 提高精度从此中心点再进行中心点步骤, 直到其满足停止准则, 其精度随着迭代次数的升高而升高, 最终得到最优解。

#### 4.2 基于K-means++的服务聚类算法

未来移动通信论坛和车载信息服务产业应用联盟(Telematics Industry Application Alliance, TIAA)联合工作组将车联网业务分为3大类应用场

景: 交通安全类、交通效率类以及信息服务类<sup>[18]</sup>, 并定义了其相关的需求。本文提取服务需求中的时延、消息频率以及覆盖范围作为特征值, 将这些应用场景根据特征值的重复合并成16种业务, 采用聚类算法对业务进行分类形成多种服务映射到不同切片中。

本文采用K-means++聚类算法来对车联网业务进行分类, 其伪代码如表3所示。其分为4个步骤, 分别是选择聚类中心、聚类、重新计算聚类中心、迭代。为了保证输入数据集的顺序不会对结果产生影响, 在初始聚类中心的选择中应尽可能的使聚类中心间的距离较远。同时需要特别注意的是, 在步骤2中需要考虑服务需求指标的影响因子对聚类的条件的影响, 即对样本到聚类中心的距离的计算的影响。

图2显示了聚类前后的业务数据点对比, 消息频率的影响因子设置为10。可以看到16种业务根据时延、消息频率、覆盖范围等特征值的差异性被分为4类服务, 分别包含8, 5, 2和1种业务, 各类的服务需求指标不一, 其结果可用于生成切片模板。

#### 5 仿真与分析

文献[19]中提出了一种适用于不同蜂窝系统的通用统一仿真方法。为了评价方案和算法的有效

表3 K-means++服务聚类算法(算法2)

- 步骤1 选择 $K$ 个聚类 $C_1, C_2, \dots, C_k$ 的聚类中心;
- (1) 从数据集中随机选取一个样本作为初始聚类中心 $\mu_1$ ;
- (2) 首先计算每个样本与当前已有聚类中心之间的最短距离 $D(x)$ , 其次计算每个样本被选为下一个聚类中心的概率 $p(x) \leftarrow D(x)^2 / \sum_{x \in X} D(x)^2$ , 最后根据轮盘法选出下一个聚类中心;
- (3) 重复(2)直到选出 $K$ 个聚类中心 $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k)$ 。
- 步骤2 对剩下的每个样本 $x_i$ , 计算其到 $K$ 个聚类中心的距离 $\text{dist}(x_i, \mu_k)$ 并将其分到距离最小的聚类中心所对应的类中;
- 步骤3 根据公式 $\mu_k = \frac{1}{|C_k|} \sum_{i \in C_k} x_i$ 重新计算聚类中心;
- 步骤4 重复步骤2和步骤3, 直到聚类中心不再变化。

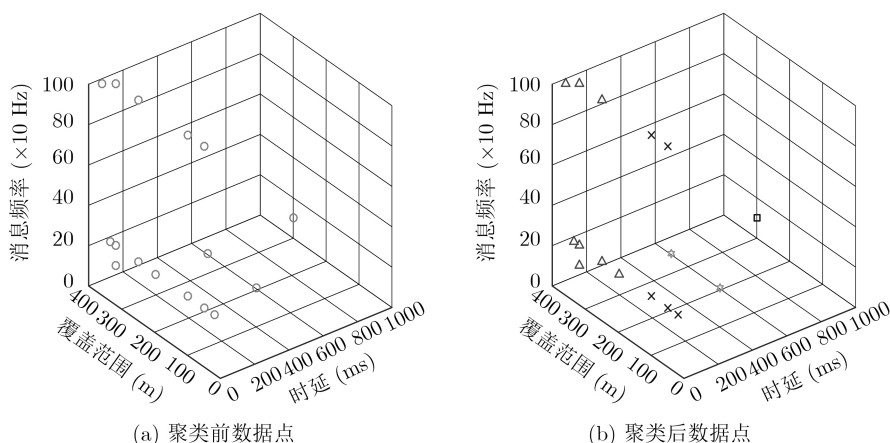


图2 聚类前后数据点对比

性，参考此方法，本文给出了SPFS相比于SS的理论和仿真增益对比，以及在不同用户负载分布场景下的最优权重分配结果。

本文模拟了多个切片共享的无线网络场景，其由19个路侧单元组成，采用六边形小区部署，路侧单元间距为200 m，模拟密集的小小区部署<sup>[20]</sup>。考虑用户负载分布的随机性，本文模拟了3种不同的用户负载分布，分别是均匀分布、非均匀分布、正交分布，并评估了SPFS相较于SS的比特传输时延增益，每个切片用户数相同。对于每个场景，都给出了其在蒙特卡洛循环10000次的理论增益和仿真增益对比。

图3中可以看到SPFS相较于SS的BTD理论和仿真增益大致相符，在每切片用户数为30的情况下，相对于静态切片方案，非均匀分布、均匀分布、正交分布场景下的BTD仿真增益分别为1.1051,1.4038和3.6879。随着每切片用户数的增加，均匀分布和非均匀分布场景下的BTD增益逐渐下降并趋近于1，正交分布场景下的BTD增益逐渐趋近平稳。考虑切片服务需求的差异性，即各切片的速率需求分别为300 kb/s, 500 kb/s, 700 kb/s和1000 kb/s，同样是切片用户数相同的情况下，在3种用户负载分布场景中评估其最优的切片权重分配。

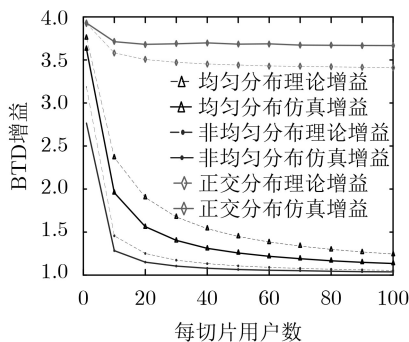


图3 3种用户负载分布场景下的理论和仿真BTD增益对比

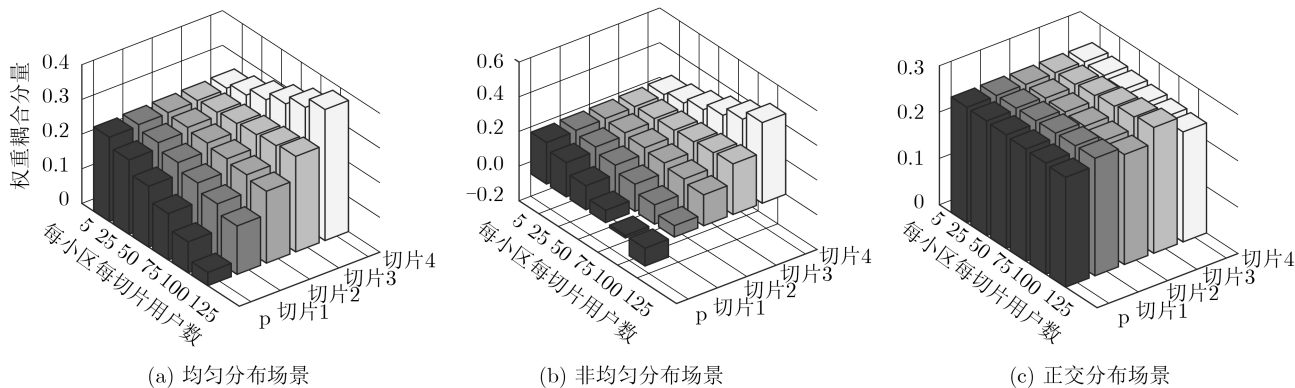


图4 不同用户负载分布场景下的最优切片权重分配

图4显示了在不同用户负载分布场景下的最优权重分配策略。由图4(a)可以明显看出，随着用户数的增加，速率需求较高的切片4被分配的权重越来越多，而速率需求较低的切片1被分配的权重则越来越少，且其最小权重耦合分量也逐渐下降，但始终大于零，在每小区每切片用户数为125时的最小权重耦合分量为0.0382，表示系统满足所有切片用户的速率需求。图4(b)与图4(a)呈现大致相同的趋势，唯一不同的是在每小区每切片用户数100和125时，其最小权重耦合分量小于零，分别为-0.0127, -0.1074，这表明此时系统已经过载，已经无法通过调整权重分配策略满足来所有切片用户的速率需求。由图4(c)可以看到其最优权重分配策略和最小权重耦合分量基本上并不随着用户数的改变而改变，这是因为不同切片的用户是呈正交分布的，即不同切片的用户分布互不影响。在此场景下，只要切片用户个数不超过最大可接入负载，可任意分配切片权重。

从以上仿真结果可以看到，在不同的用户负载分布场景下，其最优的切片权重分配策略也不一致。针对确定的用户负载分布场景，在满足最小权重耦合分量大于零的情况下求出最优的切片权重分配策略是本文的目的。然而用户负载分布是快速变化的，后续研究中应考虑对用户流量负载进行预测以先验得到其负载分布。同时为了使最小权重耦合分量大于零，后续研究中应考虑设计接入控制算法以控制用户流量。

## 6 结束语

为了解决车联网通信业务与切片的映射和切片间的无线资源分配问题，本文设计了切片协调智能体。其在服务聚类模块中通过K-means++聚类算法将V2X通信业务进行聚类并将其映射至不同的切片中，在切片调度模块中通过共享比例公平方案提

高无线资源利用率,并考虑服务需求,设计资源分配算法以得到最优的权重分配结果。仿真结果显示,共享比例公平方案相对于静态切片方案增益始终大于1,如在每切片用户数为30的情况下均匀分布用户负载场景中二者的BTD增益为1.4038,证明了方案的有效性。在不同的用户负载分布场景下都能求出最优的切片权重分配策略,其中最小权重耦合分量大于零表示系统满足所有切片用户的服务需求。最小权重耦合分量小于零表示此时系统过载,如在非均匀分布场景中每小区每切片用户数为100时的最小权重耦合分量为-0.0127,证明了算法的有效性。后续研究将对用户的负载分布进行预测以便更精确地进行无线资源的分配,并且考虑接入控制算法控制用户流量。

### 参 考 文 献

- [1] 5G PPP Architecture Working Group. 5G empowering vertical industries[EB/OL]. [https://5g-ppp.eu/wpcontent/uploads/2016/02/BROCHURE\\_5PPP\\_BAT2\\_PL.pdf](https://5g-ppp.eu/wpcontent/uploads/2016/02/BROCHURE_5PPP_BAT2_PL.pdf), 2016.
- [2] RAHMAN M M, DESPINS C, and AFFES S. Design optimization of wireless access virtualization based on cost & QoS trade-off utility maximization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(9): 6146–6162. doi: [10.1109/TWC.2016.2580505](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2580505).
- [3] LIANG Chengchao and YU F R. Wireless network virtualization: A survey, some research issues and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(1): 358–380. doi: [10.1109/COMST.2014.2352118](https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2352118).
- [4] CHATRAS B, KWONG U S T, and BIHANNIC N. NFV enabling network slicing for 5G[C]. The 20th Conference on Innovations in Clouds, Internet and Networks, Paris, France, 2017: 219–225. doi: [10.1109/ICIN.2017.7899415](https://doi.org/10.1109/ICIN.2017.7899415).
- [5] COSTA-PEREZ X, SWETINA J, GUO Tao, *et al.* Radio access network virtualization for future mobile carrier networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(7): 27–35. doi: [10.1109/MCOM.2013.6553675](https://doi.org/10.1109/MCOM.2013.6553675).
- [6] ABDELWAHAB S, HAMDAOUI B, GUIZANI M, *et al.* Network function virtualization in 5G[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(4): 84–91. doi: [10.1109/MCOM.2016.7452271](https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7452271).
- [7] ZHOU Xuan, LI Rongpeng, CHEN Tao, *et al.* Network slicing as a service: Enabling enterprises' own software-defined cellular networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(7): 146–153. doi: [10.1109/MCOM.2016.7509393](https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7509393).
- [8] KATSALIS K, NIKAEIN N, SCHILLER E, *et al.* Network slices toward 5G communications: Slicing the LTE network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(8): 146–154. doi: [10.1109/MCOM.2017.1600936](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600936).
- [9] LIU Xiangru, LI Muxuan, SONG Mei, *et al.* Wireless virtual network embedding based on spectrum sharing allocation[C]. The 11th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE), Nagoya, Japan, 2016: 670–675. doi: [10.1109/ICCSE.2016.7581660](https://doi.org/10.1109/ICCSE.2016.7581660).
- [10] ZHENG Jiaxiao, CABALLERO P, DE VECIANA G, *et al.* Statistical multiplexing and traffic shaping games for network slicing[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2018, 26(6): 2528–2541. doi: [10.1109/TNET.2018.2870184](https://doi.org/10.1109/TNET.2018.2870184).
- [11] KHAN Z, FAN Pingzhi, ABBAS F, *et al.* Two-level cluster based routing scheme for 5G V2X communication[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 16194–16205. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2892180](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2892180).
- [12] CAMPOLO C, MOLINARO A, IERA A, *et al.* 5G network slicing for vehicle-to-everything services[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2017, 24(6): 38–45. doi: [10.1109/MWC.2017.1600408](https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1600408).
- [13] 3GPP. TR 38.802(v14.2.0) Technical specification group radio access network: Study on new radio (NR) access technology physical layer aspects[S]. 2017.
- [14] KYÖSTI P, MEINILÄ J, HENTILÄ L, *et al.* WINNER II channel models[R]. IST-4-027756 WINNER II D1.1.2 V1.2, 2007.
- [15] YANG S J and DE VECIANA G. Enhancing both network and user performance for networks supporting best effort traffic[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2004, 12(2): 349–360. doi: [10.1109/TNET.2004.826280](https://doi.org/10.1109/TNET.2004.826280).
- [16] 3GPP. TS36.300 v14.0.0 Technical specification group radio access network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2[S]. 2016.
- [17] BOYD S and VANDENBERGHE L. *Convex Optimization*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 139–143.
- [18] TIAA-FUTURE车联网联合工作组. 智能网联汽车基本应

- 用[R]. 北京: 车载信息服务产业应用联盟, 2016: 18.
- TIAA-FUTURE Vehicular network Joint Working group. Intelligent and connected vehicle basic applications[R]. Beijing: Telematics Industry Application Alliance, 2016: 18.
- [19] CHENAND L, CHEN Wenwen, WANG Bin, *et al.* System-level simulation methodology and platform for mobile cellular systems[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(7): 148–155. doi: [10.1109/MCOM.2011.5936168](https://doi.org/10.1109/MCOM.2011.5936168).
- [20] YE Qiaoyang, RONG Beiyu, CHEN Yudong, *et al.* User association for load balancing in heterogeneous cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(6): 2706–2716. doi: [10.1109/TWC.2013.040413.120676](https://doi.org/10.1109/TWC.2013.040413.120676).
- 吴大鹏: 男, 1979年生, 教授, 研究方向为泛在无线网络、社会计算、无线网络服务质量控制等.
- 郑 豪: 1995年生, 硕士生, 研究方向为车联网、网络切片与虚拟化.
- 崔亚平: 1986年生, 讲师, 研究方向为毫米波通信、多天线技术、车联网等.
- 责任编辑: 马秀强