

# 车载信息物理融合系统关键技术研究

## 重庆大学博士学位论文答辩

答辩人：许新操      指导教师：刘凯 教授

重庆大学 计算机学院

2023 年 5 月 25 日



## 内容提纲

- ① 研究背景
- ② 研究内容及贡献
- ③ 总结与展望
- ④ 研究成果总结



重庆大学 计算机学院

## ① 研究背景

1.1 车联网

1.2 车载信息物理融合系统

② 研究内容及贡献

③ 总结与展望

④ 研究成果总结



## ① 研究背景

1.1 车联网

1.2 车载信息物理融合系统

② 研究内容及贡献

③ 总结与展望

④ 研究成果总结



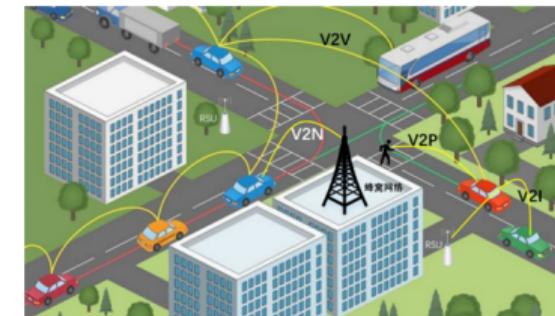
I 研究背景

1.1 车联网

## 智能交通系统驱动核心

车联网及其所驱动的  
智能交通与智慧城市

车载移动通信  
高移动性 高动态拓扑



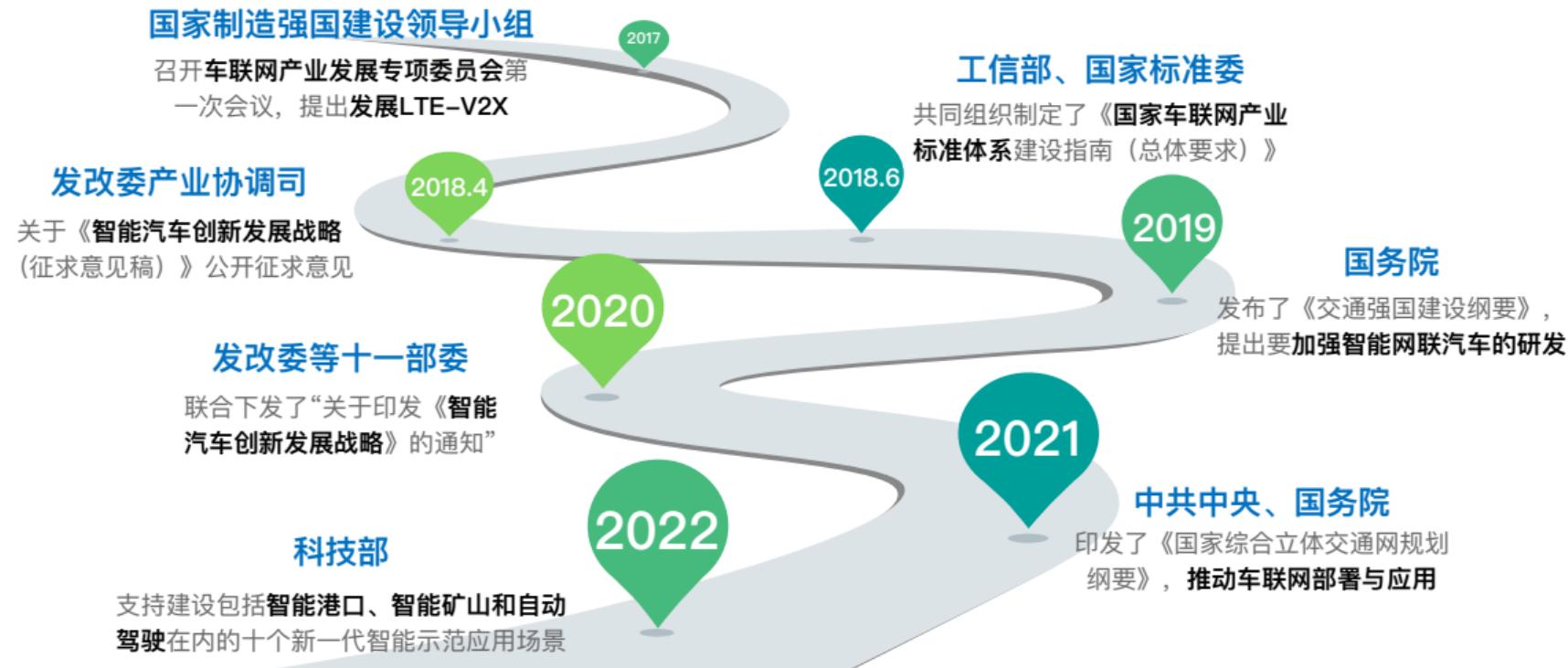
人车路协同  
低时延 分布式 高异构

计算卸载与优化  
复杂任务 多样性应用

推动汽车向网联化、智  
能化与协同化方向演进

智能交通系统  
碰撞预警 自动驾驶

# 国家战略



# V2X 车联网



## ① 研究背景

1.1 车联网

1.2 车载信息物理融合系统

② 研究内容及贡献

③ 总结与展望

④ 研究成果总结



## 1 研究背景

## 1.2 车载信息物理融合系统

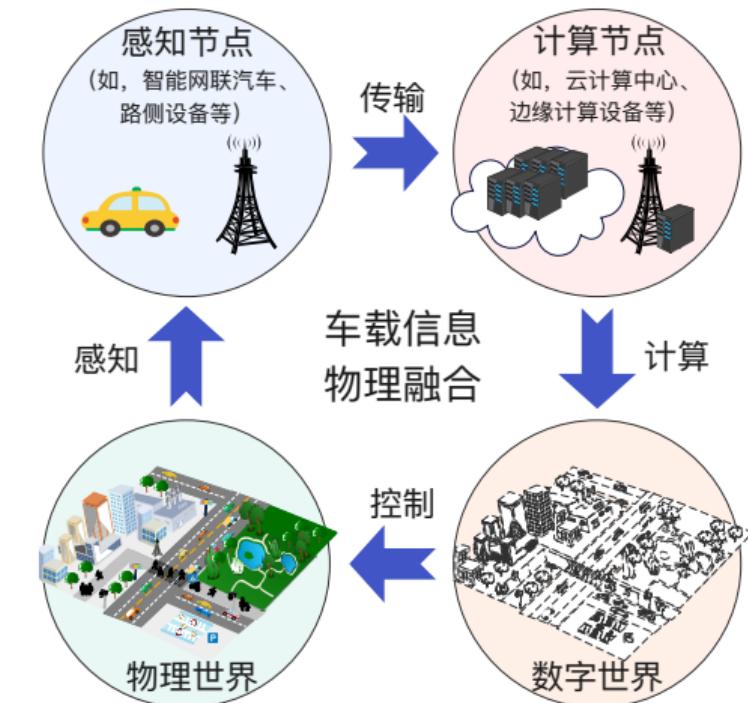
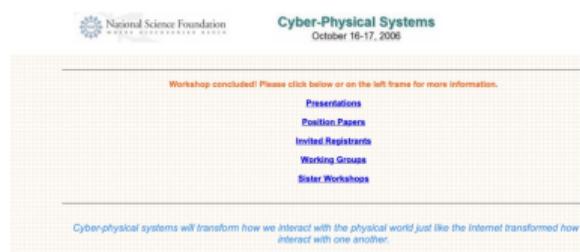
# 车载信息物理融合系统 (Vehicular Cyber-Physical Systems, VCPS)

## □ 关键思想

- 集成感知、计算、通信与控制技术
- 构建物理世界与虚拟世界的相互映射

## □ 发展历程

- 2006 年，美国 NSF 启动 CPS 研究计划
- 2011 年，LI 等人首次将 CPS 引入车联网



## 1 研究背景

## 1.2 车载信息物理融合系统

## 问题与挑战

## 挑战



高动态物理环境

时变物理信息  
节点感知能力差异  
无线连接不确定

感知难、评估难



分布式异构节点资源

异构节点资源  
动态拓扑结构  
无线通信干扰

调度难、分配难

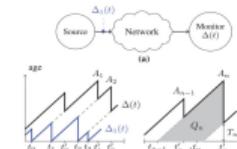


多元ITS应用需求

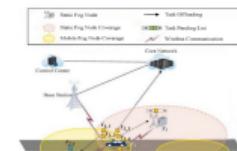
应用需求差异  
实时性需求  
能量开销

优化难、均衡难

## 现有工作



传统信息层面的评估指标



传统单一资源优化策略

视图质量建模  
时效性、完整性、一致性

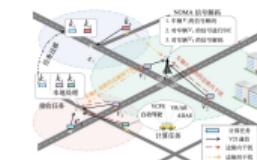
边缘间任务迁移  
非正交频谱复用

VCPS质量模型  
VCPS成本模型

## 解决方案



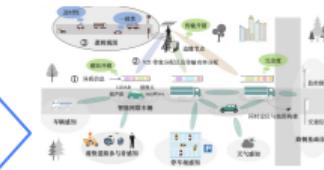
车载信息物理融合质量指标



通信与计算资源协同优化



传统面向质量/成本的优化策略



VCPS质量-开销均衡优化

## 1 研究背景

## 1.2 车载信息物理融合系统

## 主要研究内容

智能  
多元  
交通  
应用  
系统  
需求

车  
异  
构  
网  
节  
点  
分  
布  
资  
源  
式

车  
物  
理  
网  
高  
动  
境  
态

## 第四章 面向车载信息物理融合的质量-开销均衡优化关键技术

车载信息物理融合质量模型  $\leftrightarrow$  车载信息物理融合开销模型  $\rightarrow$  基于MAMO算法的VCPS质量-开销均衡

质量-开销均衡



## 第三章 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化关键技术

任务卸载势博弈模型  $\leftrightarrow$  资源分配凸优化模型  $\rightarrow$  基于MAGT算法的异构资源协同优化

协同资源优化



## 第二章 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

SDN与MEC融合分层架构  $\rightarrow$  车载信息物理融合质量指标  $\rightarrow$  基于MADR算法的边缘视图优化

系统架构及评价指标

动态复杂  
车联网环境

第五章 超视距碰撞预警原  
型系统设计及实现

基于车载信息物理融合系统优  
化的碰撞预警算法



基于C-V2X设备的  
硬件在环测试平台

超视距碰撞预警原型系统

案例研究

## ① 研究背景

## ② 研究内容及贡献

- 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化
- 2.2 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化
- 2.3 面向车载信息物理融合的质量-开销均衡优化
- 2.4 超视距碰撞预警原型系统设计及实现

## ③ 总结与展望

## ④ 研究成果总结



## ① 研究背景

## ② 研究内容及贡献

- 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化
- 2.2 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化
- 2.3 面向车载信息物理融合的质量-开销均衡优化
- 2.4 超视距碰撞预警原型系统设计及实现

## ③ 总结与展望

## ④ 研究成果总结



## 2 研究内容及贡献

## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

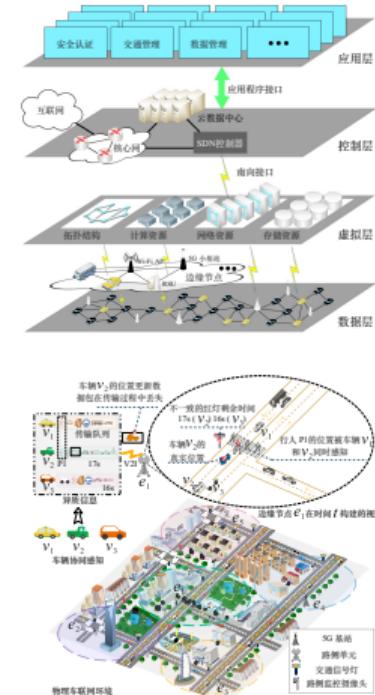
## 研究贡献

创新的服务架构和高效的数据感知与质量评估模型是 VCPS 的架构基础与驱动核心

- 架构: SDN+MEC 车联网分层架构
- 指标: Age of View 评估逻辑视图质量
  - 时效性、完整性、一致性
  - 最大化 VCPS 质量问题
- 算法: 基于差分奖励的多智能体强化学习 (MADR)
- 实验: 有效提高车载信息物理融合质量

[1] LIU K, XU X, et al. A hierarchical architecture for the future Internet of Vehicles[J]. IEEE Communications Magazine (Com-Mag), 2019, 57(7): 41-47. 影响因子: 9.03(2021), 10.892(5 年) (中科院 SCI 1 区)

[2] XU X, LIU K, et al. Cooperative sensing and heterogeneous information fusion in VCPS: A multi-agent deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (T-ITS), under major revision. (中科院 SCI 1 区)



## 2 研究内容及贡献

## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

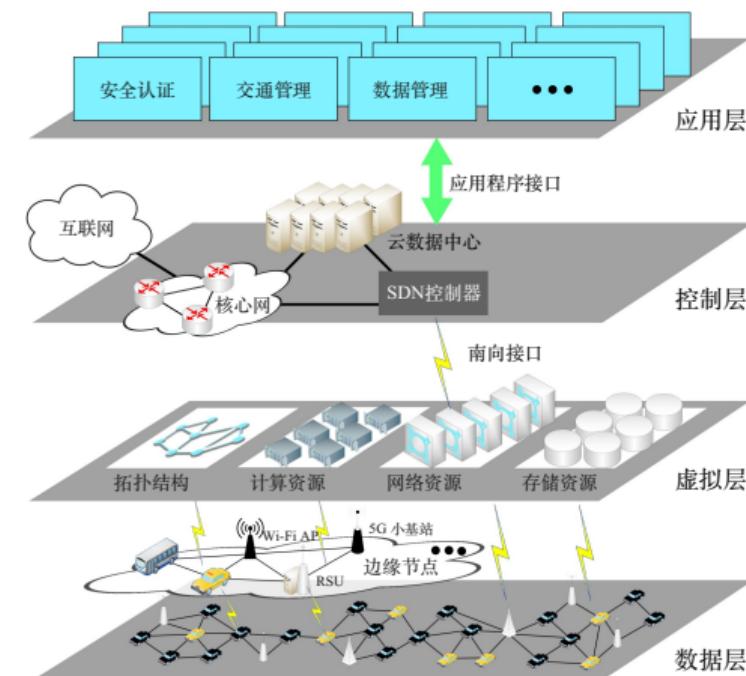
架构：车联网分层服务架构

## □ 软件定义网络 (SDN)+ 移动边缘计算 (MEC)

- SDN 逻辑上集中控制
- MEC 分布式服务

## □ 分层服务架构

- 应用层: 面向业务需求的应用
- 控制层: 网络功能集中控制
- 虚拟层: 抽象计算、网络和存储资源
- 数据层: 存储、处理数据



## 2 研究内容及贡献

## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

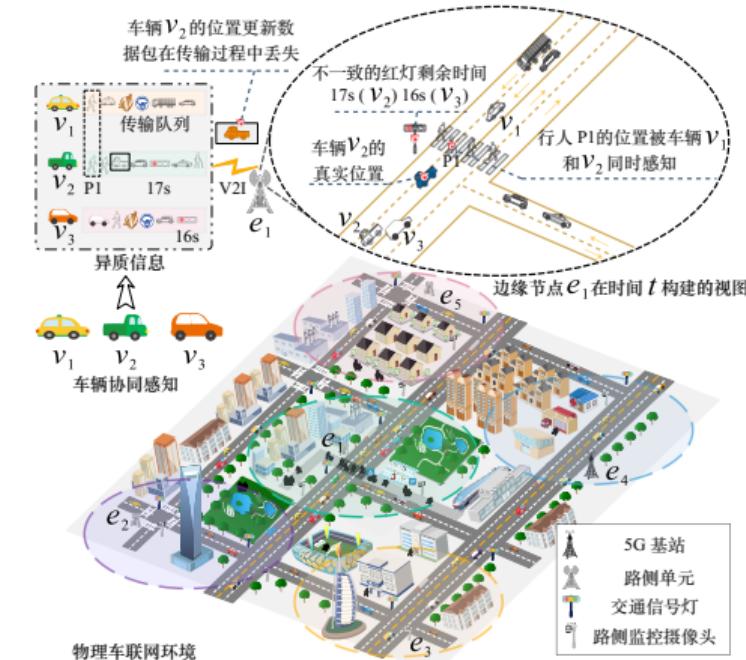
指标：感知与信息融合场景

## □ 工作流程

- 感知: 感知频率、上传优先级
- 上传: V2I 带宽
- 视图构建: 信息融合，支撑 ITS 应用

## □ 速度建议应用为例

- 信息不一致
  - † 红灯剩余时间 17s (车辆  $v_2$ ) 16s (车辆  $v_3$ )
- 重复感知
  - † 同一物理要素的状态被多车感知
- 物理环境与视图的差异
  - † 数据包丢失 (车辆  $v_2$  的位置)



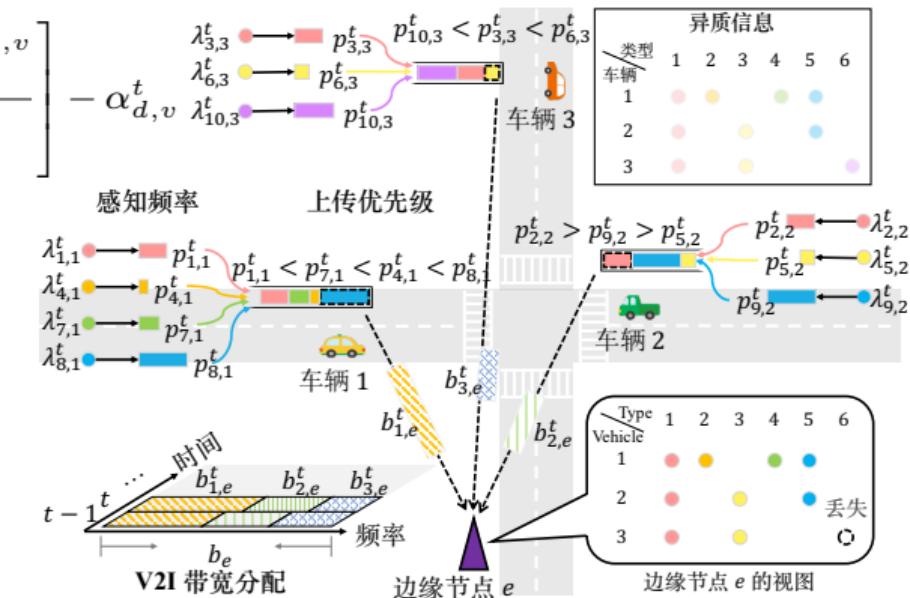
## 2 研究内容及贡献

## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

指标：协同感知模型

## □ 排队时间

$$\bar{q}_{d,v}^t = \frac{1}{1 - \rho_{d,v}^t} \left[ \alpha_{d,v}^t + \frac{\lambda_{d,v}^t \beta_{d,v}^t + \sum_{\forall d^* \in D_{d,v}^t} \lambda_{d^*,v}^t \beta_{d^*,v}^t}{2(1 - \rho_{d,v}^t - \lambda_{d,v}^t \alpha_{d,v}^t)} \right] - \alpha_{d,v}^t$$



## 2 研究内容及贡献

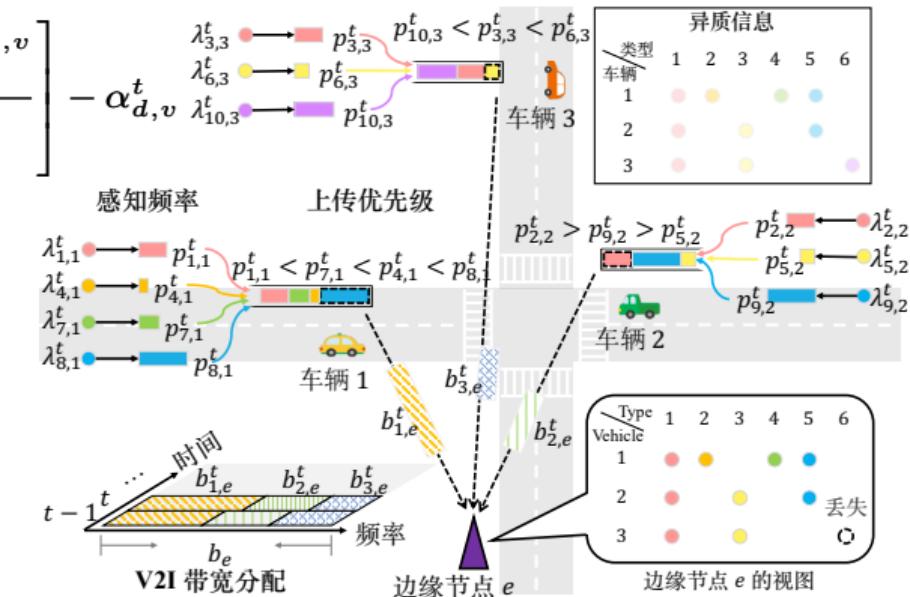
## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

指标：协同感知模型

## □ 排队时间

$$\bar{q}_{d,v}^t = \frac{1}{1 - \rho_{d,v}^t} \left[ \alpha_{d,v}^t + \frac{\sum_{\forall d^* \in D_{d,v}^t} \lambda_{d^*,s}^t \beta_{d^*,v}^t}{2(1 - \rho_{d,v}^t - \lambda_{d,v}^t \alpha_{d,v}^t)} \right] - \alpha_{d,v}^t$$

$\lambda_{d,v}^t$  : 信息感知频率



## 2 研究内容及贡献

## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

指标：协同感知模型

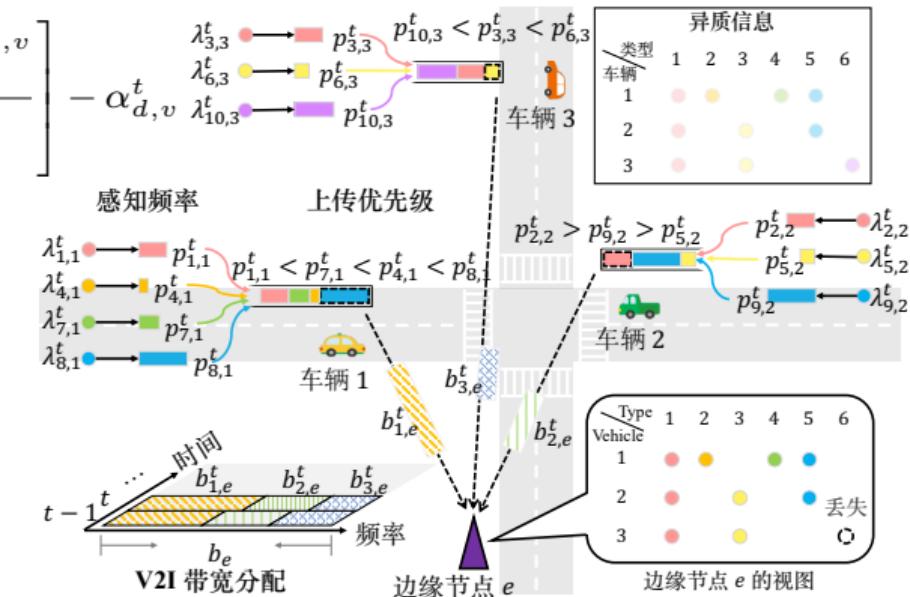
## □ 排队时间

$$\bar{q}_{d,v}^t = \frac{1}{1 - \rho_{d,v}^t} \left[ \alpha_{d,v}^t + \frac{\sum_{\forall d^* \in D_{d,v}^t} \lambda_{d^*,s}^t \beta_{d^*,v}^t}{2(1 - \rho_{d,v}^t - \lambda_{d,v}^t \alpha_{d,v}^t)} \right] - \alpha_{d,v}^t$$

$\lambda_{d,v}^t$  : 信息感知频率

## □ 传输时间

$$w_{d,v,e}^t = \frac{|d|}{b_{v,e}^t \log_2 (1 + \text{SNR}_{v,e}^t)}$$



## 2 研究内容及贡献

## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

指标：协同感知模型

## □ 排队时间

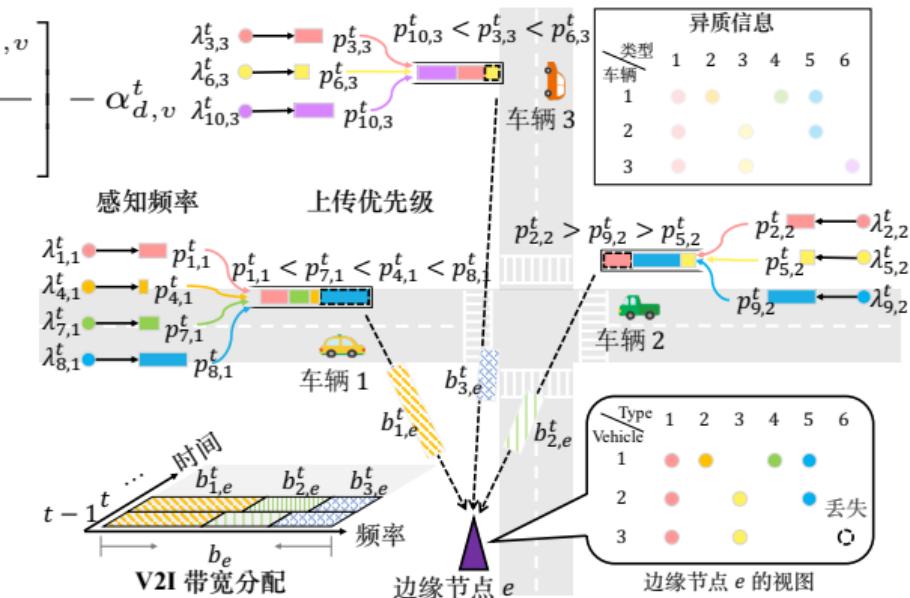
$$\bar{q}_{d,v}^t = \frac{1}{1 - \rho_{d,v}^t} \left[ \alpha_{d,v}^t + \frac{\sum_{\forall d^* \in D_{d,v}^t} \lambda_{d^*,s}^t \beta_{d^*,v}^t}{2(1 - \rho_{d,v}^t - \lambda_{d,v}^t \alpha_{d,v}^t)} \right] - \alpha_{d,v}^t$$

$\lambda_{d,v}^t$  : 信息感知频率

## □ 传输时间

$$w_{d,v,e}^t = \frac{|d|}{b_{v,e}^t \log_2 (1 + \text{SNR}_{v,e}^t)}$$

$b_{v,e}^t$  : V2I 带宽



## 2 研究内容及贡献

## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

指标：协同感知模型

## □ 排队时间

$$\bar{q}_{d,v}^t = \frac{1}{1 - \rho_{d,v}^t} \left[ \alpha_{d,v}^t + \frac{\sum_{\forall d^* \in D_{d,v}^t} \lambda_{d^*,s}^t \beta_{d^*,v}^t}{2(1 - \rho_{d,v}^t - \lambda_{d,v}^t \alpha_{d,v}^t)} \right] - \alpha_{d,v}^t$$

$\lambda_{d,v}^t$  : 信息感知频率

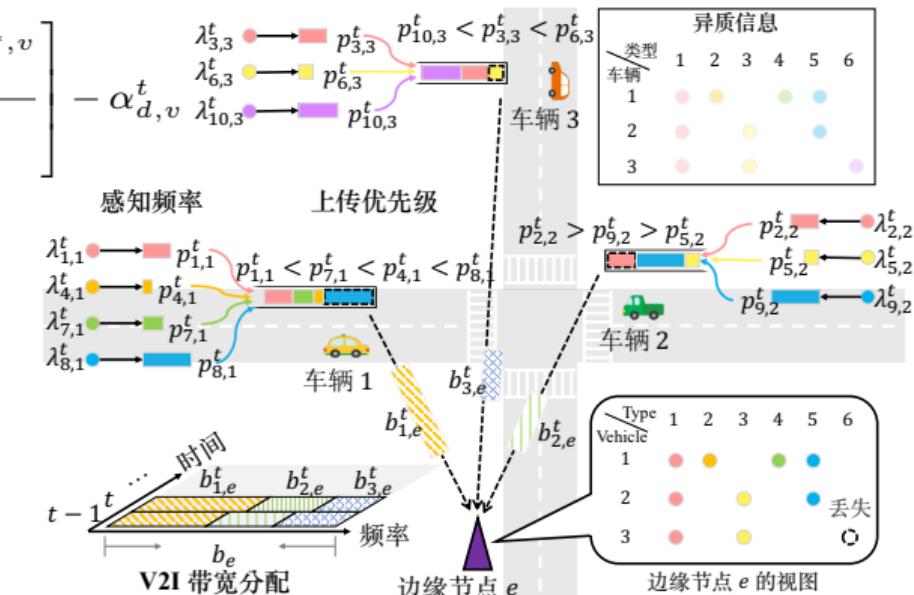
## □ 传输时间

$$w_{d,v,e}^t = \frac{|d|}{b_{v,e}^t} \log_2 (1 + \text{SNR}_{v,e}^t)$$

$b_{v,e}^t$  : V2I 带宽

## □ 传输成功与否

$$\geq \text{SNR}_{\text{wall}} = \frac{\sigma^2 - 1}{\sigma}$$



## 指标: Age of View

### □ 时效性

$$\Xi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \xi_{d,v}$$

### □ 完整性

$$\Phi_i = |D_{i,e}| / |D_i|$$

### □ 一致性

$$\Psi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \left| q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t - \psi_i \right|^2$$

## 2 研究内容及贡献

## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

指标: Age of View

## □ 时效性

$$\Xi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \xi_{d,v} \quad \xi_{d,v} = a_{d,v}^t + q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t$$

## □ 完整性

$$\Phi_i = |D_{i,e}| / |D_i|$$

## □ 一致性

$$\Psi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \left| q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t - \psi_i \right|^2$$

## 2 研究内容及贡献

## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

指标: Age of View

## □ 时效性

$$\Xi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \xi_{d,v} \quad \xi_{d,v} = a_{d,v}^t + q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t$$

$a_{d,v}^t$ : 间隔到达时间

## □ 完整性

$$\Phi_i = |D_{i,e}| / |D_i|$$

## □ 一致性

$$\Psi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \left| q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t - \psi_i \right|^2$$

## 2 研究内容及贡献

## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

指标: Age of View

## □ 时效性

$$\Xi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \xi_{d,v} \quad \xi_{d,v} = a_{d,v}^t + q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t$$

$q_{d,v}^t$ : 排队时间

## □ 完整性

$$\Phi_i = |D_{i,e}| / |D_i|$$

## □ 一致性

$$\Psi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \left| q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t - \psi_i \right|^2$$

## 2 研究内容及贡献

## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

指标: Age of View

## □ 时效性

$$\Xi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \xi_{d,v} \quad \xi_{d,v} = a_{d,v}^t + q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t$$

$w_{d,v,e}^t$ : 传输时间

## □ 完整性

$$\Phi_i = |D_{i,e}| / |D_i|$$

## □ 一致性

$$\Psi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \left| q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t - \psi_i \right|^2$$

## 2 研究内容及贡献

## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

指标: Age of View

## □ 时效性

$$\Xi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \xi_{d,v} \quad \xi_{d,v} = a_{d,v}^t + q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t$$

## □ 完整性

$$\Phi_i = |\mathbf{D}_{i,e}| / |D_i| \quad |\mathbf{D}_{i,e}|: \text{收到信息数量}$$

## □ 一致性

$$\Psi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \left| q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t - \psi_i \right|^2$$

## 2 研究内容及贡献

## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

指标: Age of View

## □ 时效性

$$\Xi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \xi_{d,v} \quad \xi_{d,v} = a_{d,v}^t + q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t$$

## □ 完整性

$$\Phi_i = |D_{i,e}| / |D_i| \quad |D_i|: \text{所需信息总量}$$

## □ 一致性

$$\Psi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \left| q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t - \psi_i \right|^2$$

## 指标: Age of View

### □ 时效性

$$\Xi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \xi_{d,v} \quad \xi_{d,v} = a_{d,v}^t + q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t$$

### □ 完整性

$$\Phi_i = |D_{i,e}| / |D_i|$$

### □ 一致性

$$\Psi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \left| q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t - \psi_i \right|^2 \quad q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t: \text{信息接收时间}$$

## 指标: Age of View

### □ 时效性

$$\Xi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \xi_{d,v} \quad \xi_{d,v} = a_{d,v}^t + q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t$$

### □ 完整性

$$\Phi_i = |D_{i,e}| / |D_i|$$

### □ 一致性

$$\Psi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \left| q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t - \psi_i \right|^2 \quad \psi_i: \text{平均接收时间}$$

## 指标: Age of View

### □ 时效性

$$\Xi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \xi_{d,v} \quad \xi_{d,v} = a_{d,v}^t + q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t$$

### □ 完整性

$$\Phi_i = |D_{i,e}| / |D_i|$$

### □ 一致性

$$\Psi_i = \sum_{\forall v \in V} \sum_{\forall d \in D_{i,e} \cap D_v^t} \left| q_{d,v}^t + w_{d,v,e}^t - \psi_i \right|^2$$

### □ Age of View

➢ 归一化时效性、完整性和一致性的加权平均值

$$AoV_i = w_1 \hat{\Xi}_i + w_2 \hat{\Phi}_i + w_3 \hat{\Psi}_i$$

## 指标：最大化 VCPS 质量问题

$$\mathcal{P}2.1 : \max_{\Lambda, \mathbf{P}, \mathbf{B}} \Upsilon$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}2.1 : \lambda_{d,v}^t \in [\lambda_{d,v}^{\min}, \lambda_{d,v}^{\max}], \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.2 : p_{d^*,v}^t \neq p_{d,v}^t, \forall d^* \in \mathbf{D}_v^t \setminus \{d\}, \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}$$

$$\mathcal{C}2.3 : b_{v,e}^t \in [0, b_e], \forall v \in \mathbf{V}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.4 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \alpha_{d,v}^t < 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.5 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_{v,e}^t \leq b_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

## 指标：最大化 VCPS 质量问题

$$\mathcal{P}2.1 : \max_{\Lambda, \mathbf{P}, \mathbf{B}} \Upsilon$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}2.1 : \lambda_{d,v}^t \in [\lambda_{d,v}^{\min}, \lambda_{d,v}^{\max}], \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.2 : p_{d^*,v}^t \neq p_{d,v}^t, \forall d^* \in \mathbf{D}_v^t \setminus \{d\}, \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}$$

$$\mathcal{C}2.3 : b_{v,e}^t \in [0, b_e], \forall v \in \mathbf{V}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.4 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \alpha_{d,v}^t < 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.5 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_{v,e}^t \leq b_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\Upsilon : \text{VCPS 质量 } \Upsilon = \frac{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} (1 - \text{AoV}_i)}{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} |\mathbf{I}_e^t|}$$

## 指标：最大化 VCPS 质量问题

$$\mathcal{P}2.1 : \max_{\Lambda, \mathbf{P}, \mathbf{B}} \Upsilon$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}2.1 : \lambda_{d,v}^t \in [\lambda_{d,v}^{\min}, \lambda_{d,v}^{\max}], \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.2 : p_{d^*,v}^t \neq p_{d,v}^t, \forall d^* \in \mathbf{D}_v^t \setminus \{d\}, \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}$$

$$\mathcal{C}2.3 : b_{v,e}^t \in [0, b_e], \forall v \in \mathbf{V}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.4 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \alpha_{d,v}^t < 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.5 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_{v,e}^t \leq b_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$\Lambda$ : 感知频率  $\Lambda = \left\{ \lambda_{d,v}^t | \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T} \right\}$

## 指标：最大化 VCPS 质量问题

$$\mathcal{P}2.1 : \max_{\Lambda, \mathbf{P}, \mathbf{B}} \Upsilon$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}2.1 : \lambda_{d,v}^t \in [\lambda_{d,v}^{\min}, \lambda_{d,v}^{\max}], \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.2 : p_{d^*,v}^t \neq p_{d,v}^t, \forall d^* \in \mathbf{D}_v^t \setminus \{d\}, \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}$$

$$\mathcal{C}2.3 : b_{v,e}^t \in [0, b_e], \forall v \in \mathbf{V}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.4 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \alpha_{d,v}^t < 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.5 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_{v,e}^t \leq b_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

**P:** 上传优先级  $\mathbf{P} = \{p_{d,v}^t | \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}\}$

## 指标：最大化 VCPS 质量问题

$$\mathcal{P}2.1 : \max_{\Lambda, \mathbf{P}, \mathbf{B}} \Upsilon$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}2.1 : \lambda_{d,v}^t \in [\lambda_{d,v}^{\min}, \lambda_{d,v}^{\max}], \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.2 : p_{d^*,v}^t \neq p_{d,v}^t, \forall d^* \in \mathbf{D}_v^t \setminus \{d\}, \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}$$

$$\mathcal{C}2.3 : b_{v,e}^t \in [0, b_e], \forall v \in \mathbf{V}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.4 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \alpha_{d,v}^t < 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.5 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_{v,e}^t \leq b_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

**B:** V2I 带宽分配  $\mathbf{B} = \{b_{v,e}^t | \forall v \in \mathbf{V}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}\}$

## 指标：最大化 VCPS 质量问题

$$\mathcal{P}2.1 : \max_{\Lambda, \mathbf{P}, \mathbf{B}} \Upsilon$$

s.t.  $\mathcal{C}2.1 : \lambda_{d,v}^t \in [\lambda_{d,v}^{\min}, \lambda_{d,v}^{\max}], \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$

$$\mathcal{C}2.2 : p_{d^*,v}^t \neq p_{d,v}^t, \forall d^* \in \mathbf{D}_v^t \setminus \{d\}, \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}$$

$$\mathcal{C}2.3 : b_{v,e}^t \in [0, b_e], \forall v \in \mathbf{V}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.4 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \alpha_{d,v}^t < 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.5 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_{v,e}^t \leq b_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$\mathcal{C}2.1$ : 车辆  $v$  中的信息  $d$  在时间  $t$  的感知频率应满足其感知能力的要求

## 指标：最大化 VCPS 质量问题

$$\mathcal{P}2.1 : \max_{\Lambda, \mathbf{P}, \mathbf{B}} \Upsilon$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}2.1 : \lambda_{d,v}^t \in [\lambda_{d,v}^{\min}, \lambda_{d,v}^{\max}], \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.2 : p_{d^*,v}^t \neq p_{d,v}^t, \forall d^* \in \mathbf{D}_v^t \setminus \{d\}, \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}$$

$$\mathcal{C}2.3 : b_{v,e}^t \in [0, b_e], \forall v \in \mathbf{V}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.4 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \alpha_{d,v}^t < 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.5 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_{v,e}^t \leq b_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$\mathcal{C}2.2$ : 保证时间  $t$  内车辆  $v$  中信息  $d$  的上传优先级

## 指标：最大化 VCPS 质量问题

$$\mathcal{P}2.1 : \max_{\Lambda, \mathbf{P}, \mathbf{B}} \Upsilon$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}2.1 : \lambda_{d,v}^t \in [\lambda_{d,v}^{\min}, \lambda_{d,v}^{\max}], \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.2 : p_{d^*,v}^t \neq p_{d,v}^t, \forall d^* \in \mathbf{D}_v^t \setminus \{d\}, \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}$$

$$\mathcal{C}2.3 : b_{v,e}^t \in [0, b_e], \forall v \in \mathbf{V}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.4 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \alpha_{d,v}^t < 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.5 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_{v,e}^t \leq b_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$\mathcal{C}2.3$ : 边缘节点  $e$  在时间  $t$  为车辆  $v$  分配的 V2I 带宽不能超过其带宽容量  $b_e$

## 指标：最大化 VCPS 质量问题

$$\mathcal{P}2.1 : \max_{\Lambda, \mathbf{P}, \mathbf{B}} \Upsilon$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}2.1 : \lambda_{d,v}^t \in [\lambda_{d,v}^{\min}, \lambda_{d,v}^{\max}], \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.2 : p_{d^*,v}^t \neq p_{d,v}^t, \forall d^* \in \mathbf{D}_v^t \setminus \{d\}, \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}$$

$$\mathcal{C}2.3 : b_{v,e}^t \in [0, b_e], \forall v \in \mathbf{V}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.4 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \alpha_{d,v}^t < 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.5 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_{v,e}^t \leq b_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$\mathcal{C}2.4$ : 保证在调度周期  $\mathbf{T}$  内队列稳定状态

## 指标：最大化 VCPS 质量问题

$$\mathcal{P}2.1 : \max_{\Lambda, \mathbf{P}, \mathbf{B}} \Upsilon$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}2.1 : \lambda_{d,v}^t \in [\lambda_{d,v}^{\min}, \lambda_{d,v}^{\max}], \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.2 : p_{d^*,v}^t \neq p_{d,v}^t, \forall d^* \in \mathbf{D}_v^t \setminus \{d\}, \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}$$

$$\mathcal{C}2.3 : b_{v,e}^t \in [0, b_e], \forall v \in \mathbf{V}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.4 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \alpha_{d,v}^t < 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}2.5 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_{v,e}^t \leq b_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$\mathcal{C}2.5$ : 边缘节点  $e$  分配的 V2I 带宽之和不能超过其容量  $b_e$

## 2 研究内容及贡献

## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

算法：流程

## □ 初始化

- 车辆行动者/评论家网络参数
- 经验回放缓存

## □ 回放经验存储

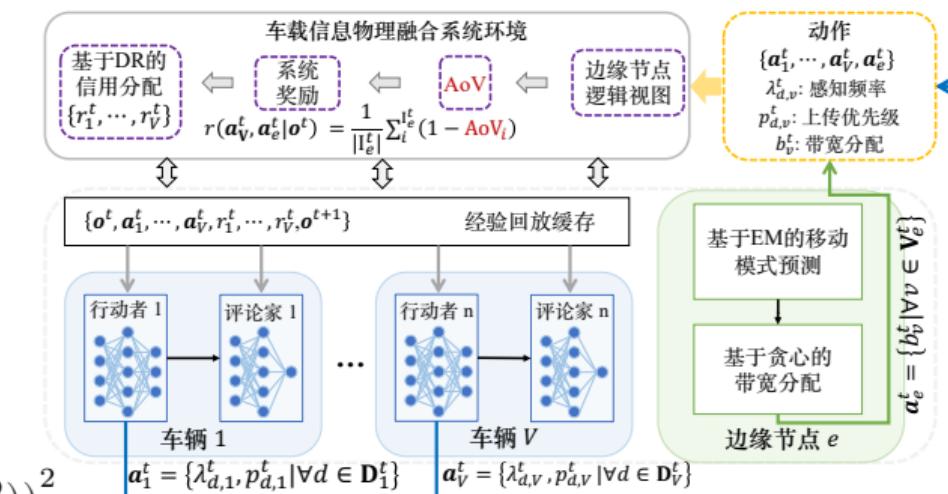
- 车辆决策  $a_v^t = \mu_v(o_v^t | \theta_v^\mu) + \mathcal{N}_t$
- 边缘节点基于 VBA 机制分配带宽
- 存储与环境交互结果

## □ 训练

- 评论家网络损失函数
- $$\mathcal{L}(\theta_v^Q) = \frac{1}{M} \sum_m (\eta_m - Q_v(o_v^m, a_V^m | \theta_v^Q))^2$$

- 行动者网络策略梯度

$$\nabla_{\theta_v^\mu} \mathcal{J} \approx \frac{1}{M} \sum_m \nabla_{a_V^m} Q_v(o_v^m, a_V^m | \theta_v^Q) \nabla_{\theta_v^\mu} \mu_v(o_v^{m+1} | \theta_v^\mu)$$



## 2 研究内容及贡献

## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

算法：MADR 模型

## □ 系统状态

- 车辆观测  $o_v^t = \{\mathbf{D}_v^t, \mathbf{D}_e^t, \mathbf{I}_e^t\}$
- $o^t = \{\mathbf{D}_1^t, \dots, \mathbf{D}_v^t, \dots, \mathbf{D}_V^t, \mathbf{D}_e^t, \mathbf{I}_e^t\}$

## □ 动作空间

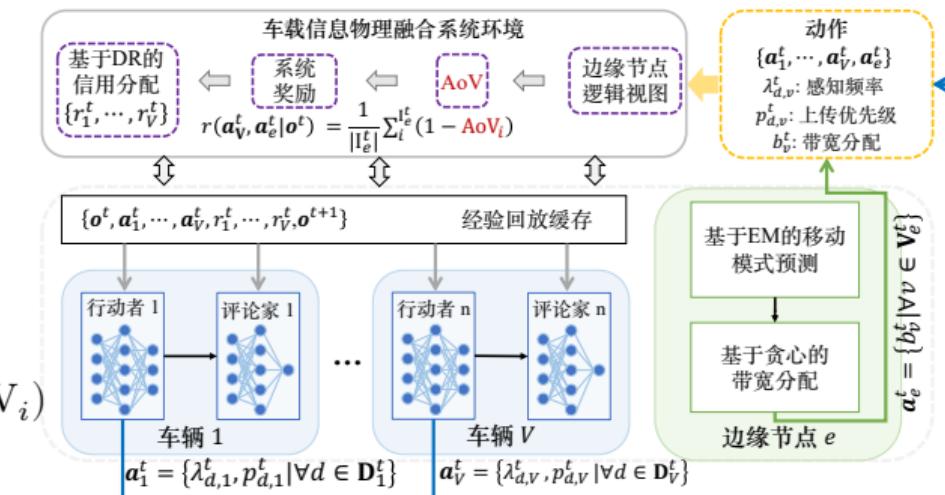
- $a_v^t = \{\lambda_{d,v}^t, p_{d,v}^t \mid \forall d \in \mathbf{D}_v^t\}$
- 车辆动作集合  $a_{\mathbf{V}}^t = \{a_v^t \mid \forall v \in \mathbf{V}\}$

## □ 系统奖励

$$\triangleright r(a_{\mathbf{V}}^t, a_e^t \mid o^t) = \frac{1}{|\mathbf{I}_e^t|} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} (1 - \text{AoV}_i)$$

➢ 车辆奖励：差分奖励分配机制

$$r_v^t = r(a_{\mathbf{V}}^t, a_e^t \mid o^t) - r(a_{\mathbf{V}-v}^t, a_e^t \mid o^t)$$



## 2 研究内容及贡献

## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

算法：V2I 带宽分配机制 (VBA)

## □ 距离估计

- 期望最大化 (EM) 预测轨迹

$$\text{Traj}_v^t = \{\hat{l}_v^{t+1}, \dots, \hat{l}_v^{t+h}, \dots, \hat{l}_v^{t+H}\}$$

- 平均距离  $\bar{d}_{v,e}^t = \frac{1}{H} \sum_{\forall h \in [1, H]} \widehat{d}_{v,e}^{t+h}$

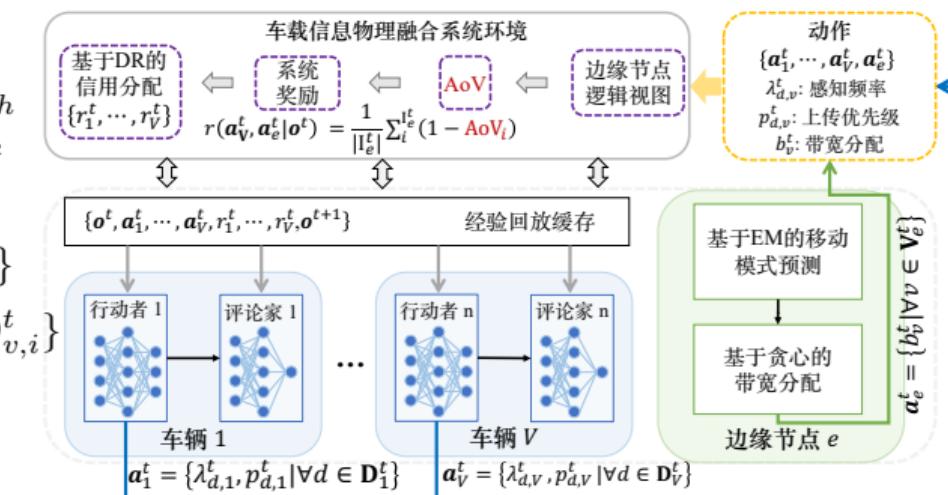
## □ 感知信息

- 视图  $i$  需要  $D_{v,i}^t = \{d \mid d \in D_v^t \cap D_i\}$
- 视图需要  $D_{v,I_e^t}^t = \{d \mid d \in \bigcup_{\forall v \in V_e^t} D_{v,i}^t\}$

## □ 带宽分配

$$b_{v,e}^t = \frac{b_e}{\omega + \text{rank}_v}$$

- 按  $|D_{v,I_e^t}^t|$  的序列降序
- 按  $\bar{d}_{v,e}^t$  的序列升序



## 2 研究内容及贡献

## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

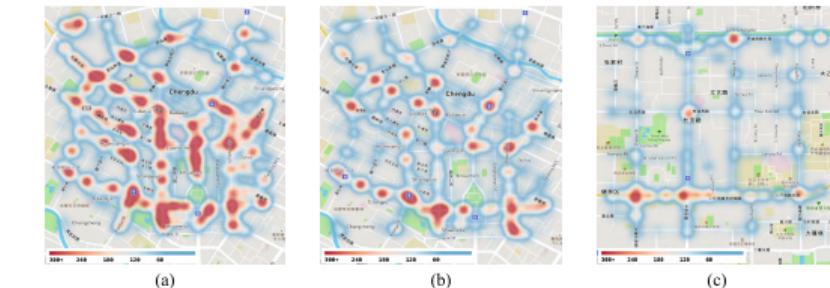
# 实验：数据与基本设置

## 实验与模型参数

参数	值
信息数据大小	[100 B, 1 MB]
传输功率	1 mW
通信噪声	-90 dBm
带宽	3 MHz
行动者	4 层全连接 (隐藏层 64-32)
评论家	4 层全连接 (隐藏层 128-64)
学习率	0.001
折扣因子	0.996
经验回放缓存大小	100000
批大小	512

## 对比算法

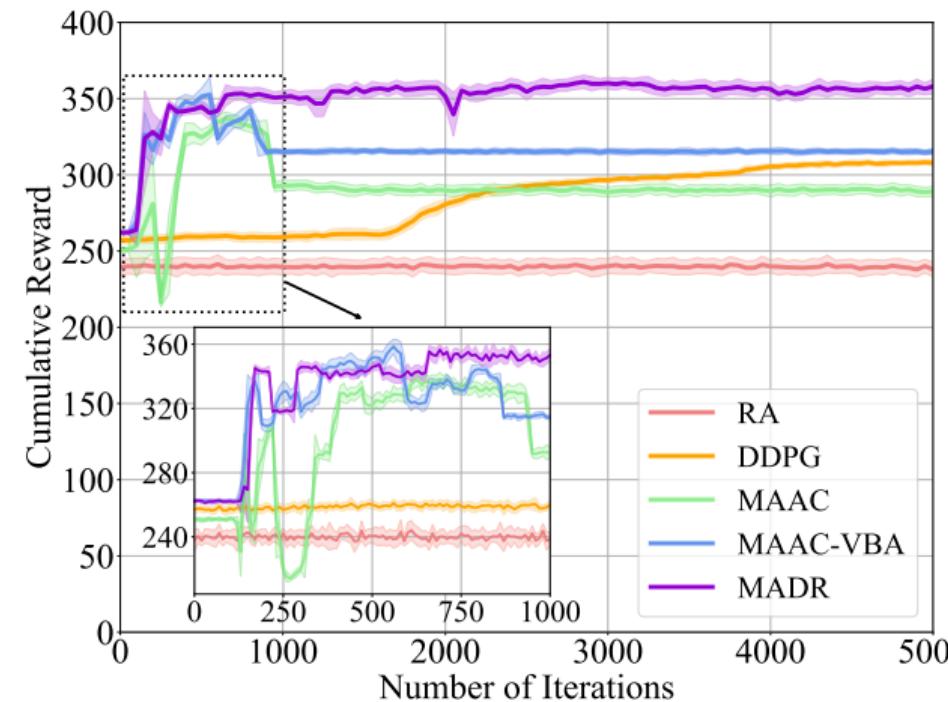
- 随机分配 (RA)、深度确定性策略梯度 (DDPG)
- 多智能体行动者-评论家 (MAAC)
- 采用 VBA 策略的 MAAC (MAAC-VBA)



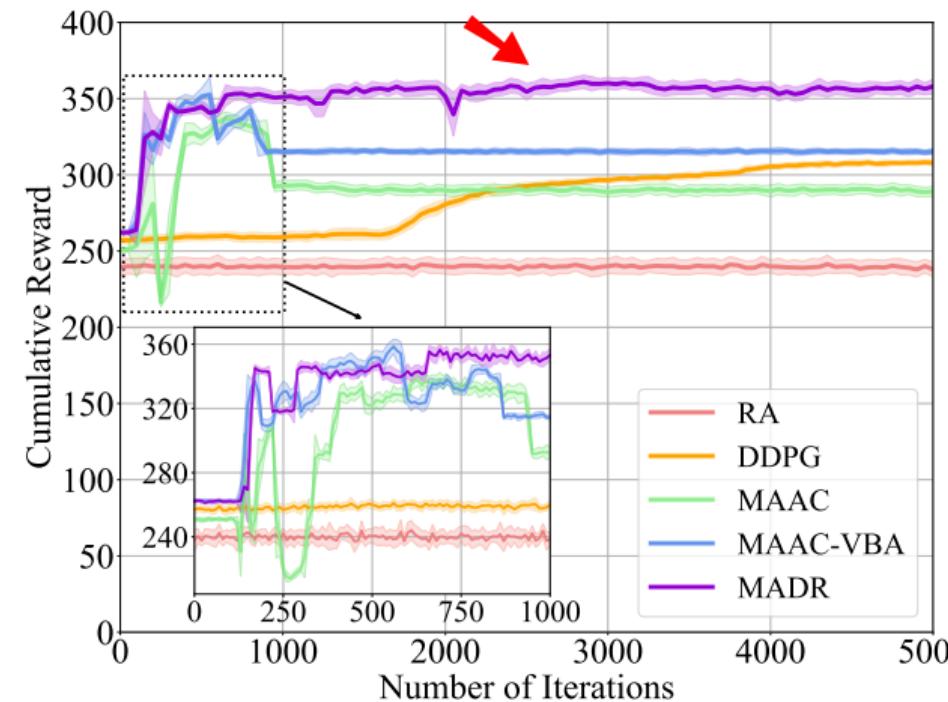
## 性能评估指标

- 累计奖励 (CR)
- 平均奖励的构成 (CAR)  
 $< \frac{3}{10}(1 - \hat{\Xi}_i), \frac{4}{10}(1 - \hat{\Phi}_i), \frac{3}{10}(1 - \hat{\Psi}_i) >$
- 平均排队时间 (AQT)
- 服务率 (SR)

## 实验：算法收敛性

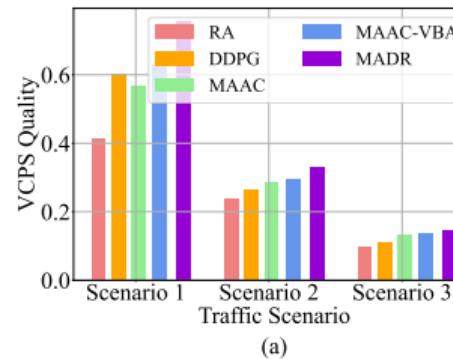


## 实验：算法收敛性

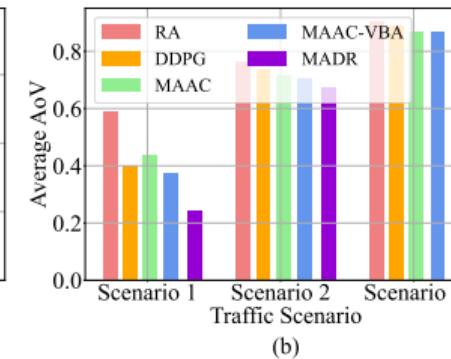


## 2 研究内容及贡献

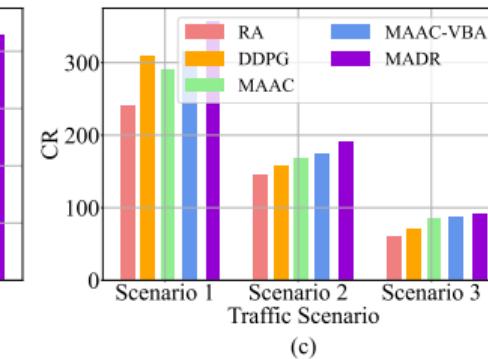
## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

实验：交通场景的影响

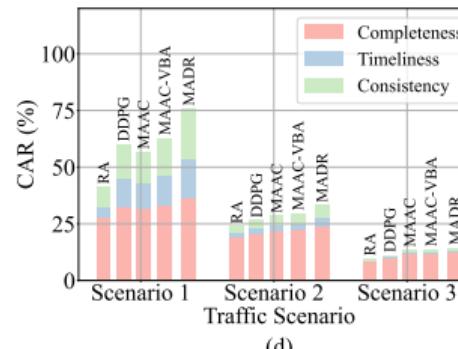
(a)



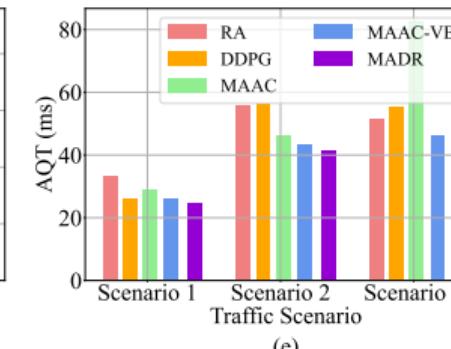
(b)



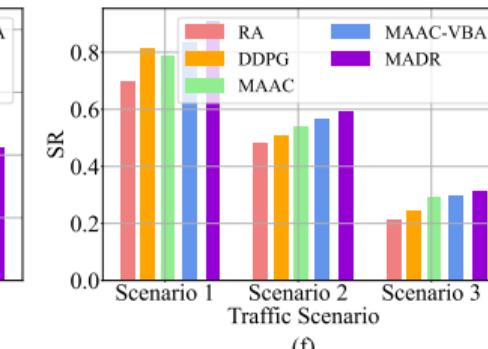
(c)



(d)



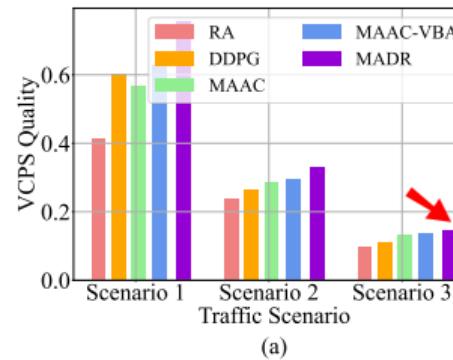
(e)



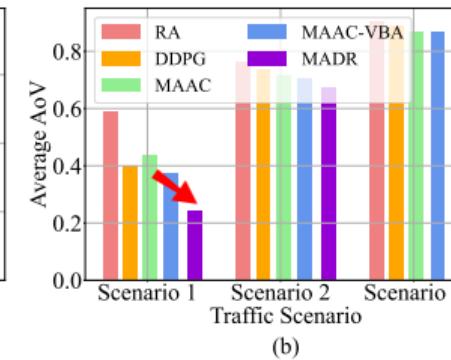
(f)

## 2 研究内容及贡献

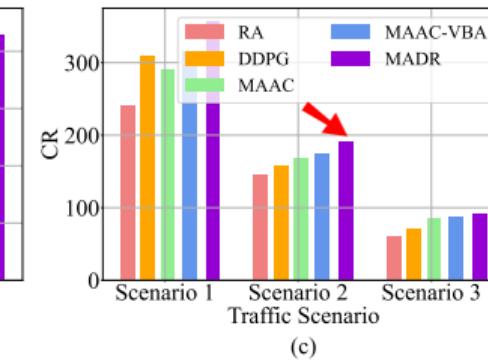
## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

实验：交通场景的影响

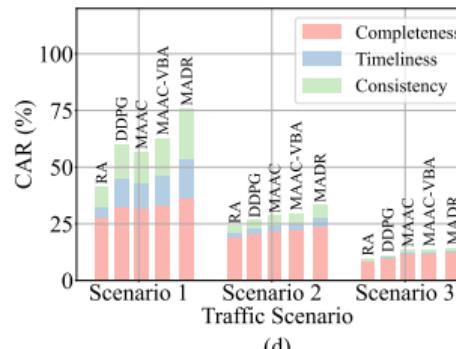
(a)



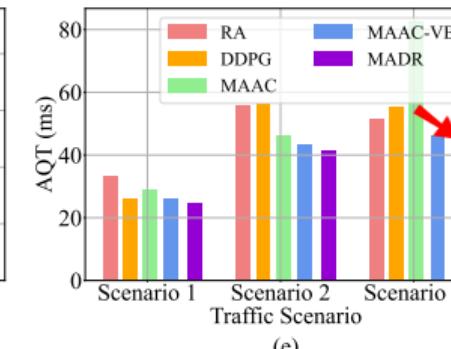
(b)



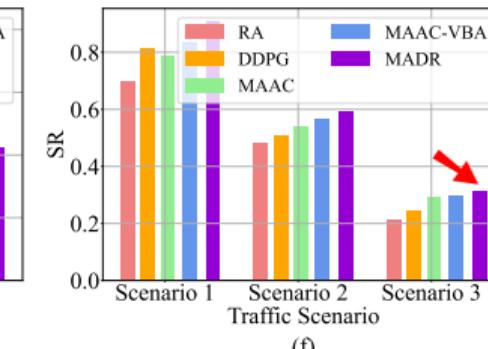
(c)



(d)



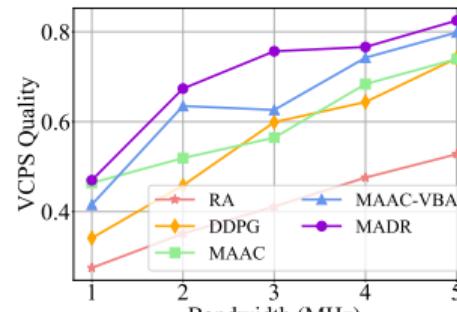
(e)



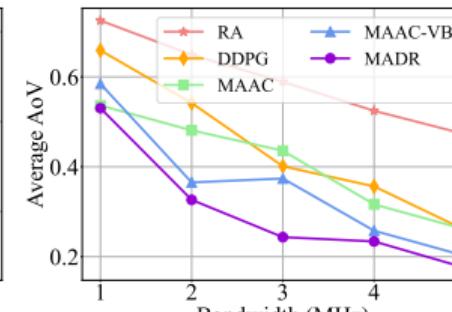
(f)

## 2 研究内容及贡献

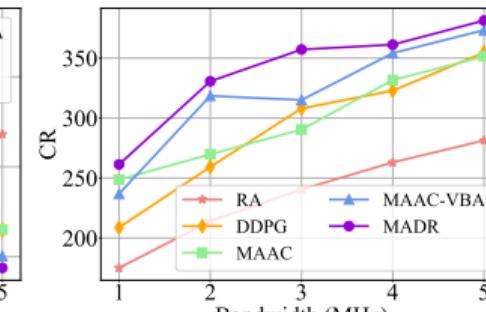
## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

实验：V2I 带宽的影响

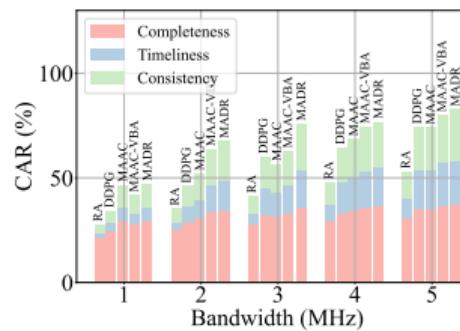
(a)



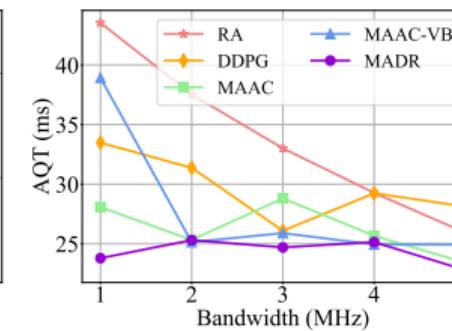
(b)



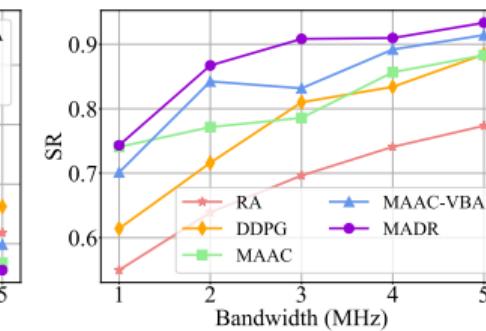
(c)



(d)



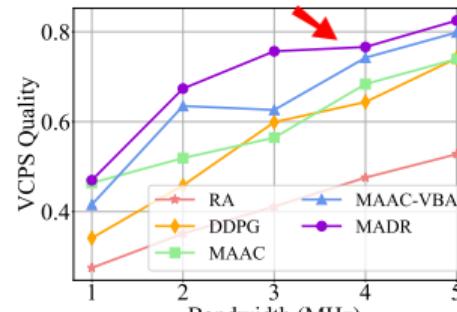
(e)



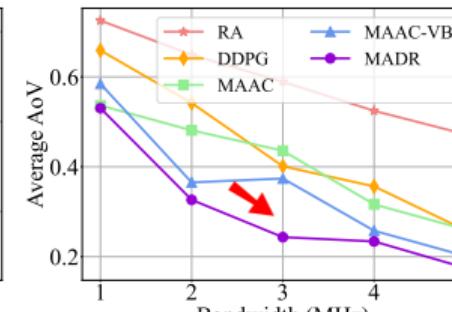
(f)

## 2 研究内容及贡献

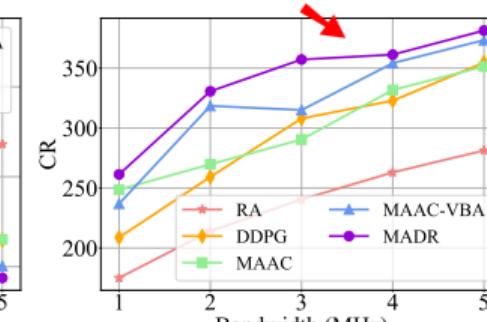
## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

实验：V2I 带宽的影响

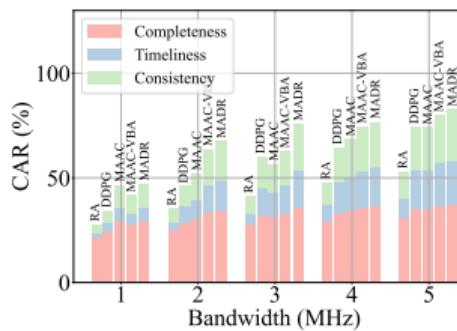
(a)



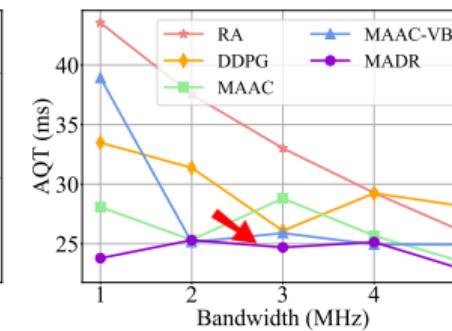
(b)



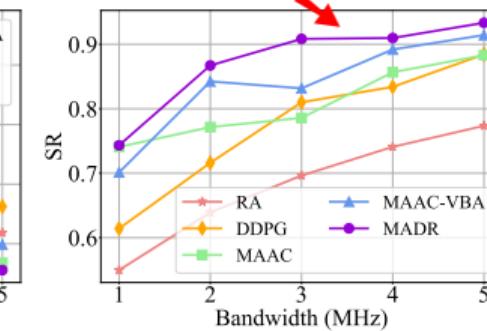
(c)



(d)



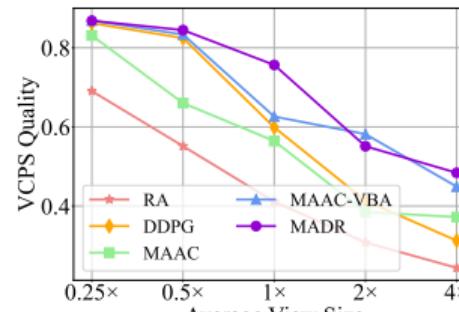
(e)



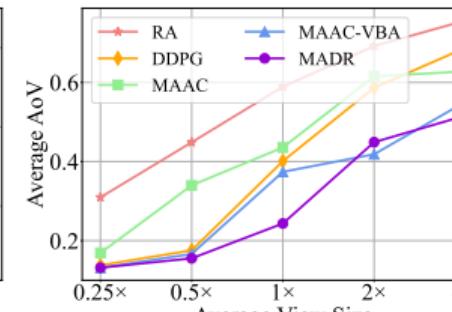
(f)

## 2 研究内容及贡献

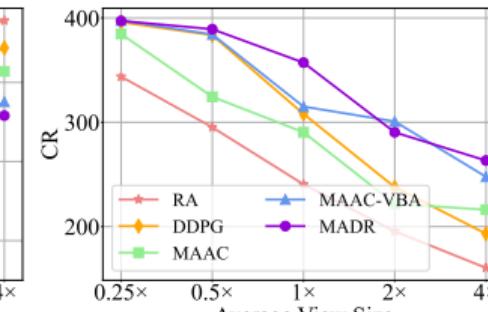
## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

实验：视图需求的影响

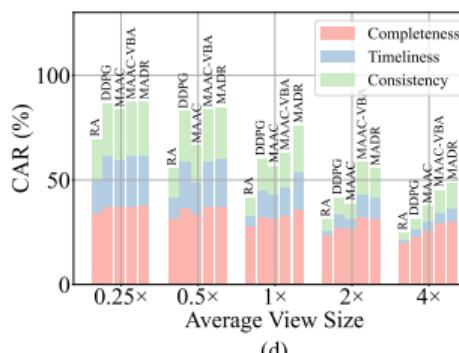
(a)



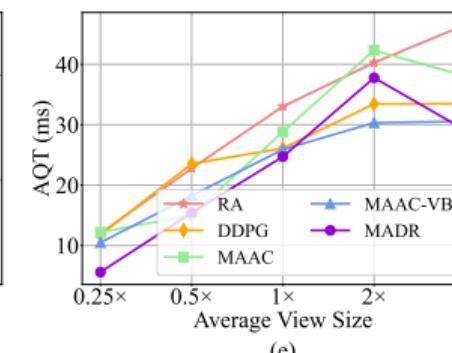
(b)



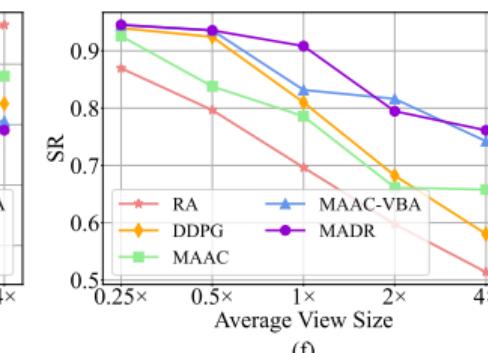
(c)



(d)



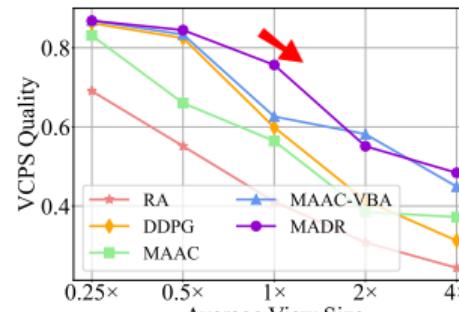
(e)



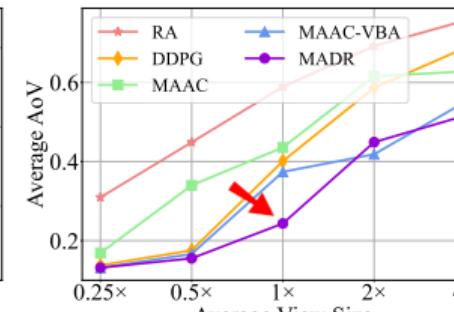
(f)

## 2 研究内容及贡献

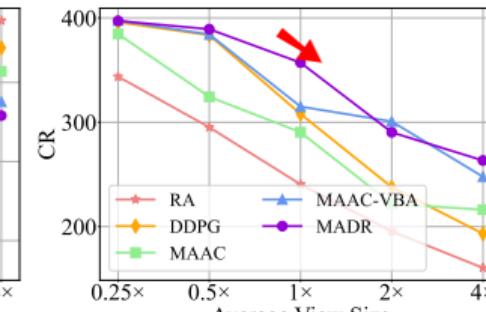
## 2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

实验：视图需求的影响

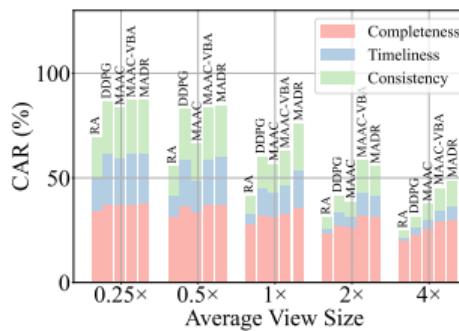
(a)



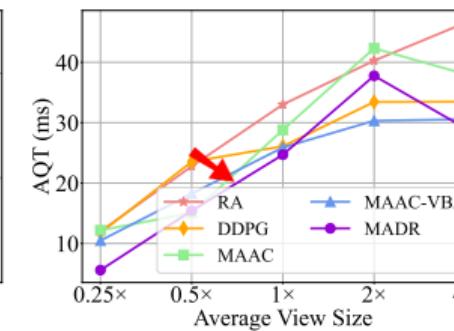
(b)



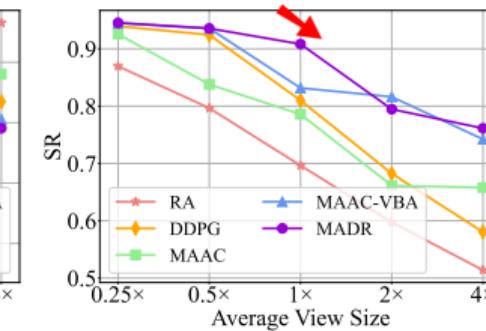
(c)



(d)



(e)



(f)

## ① 研究背景

## ② 研究内容及贡献

2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

2.2 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化

2.3 面向车载信息物理融合的质量-开销均衡优化

2.4 超视距碰撞预警原型系统设计及实现

## ③ 总结与展望

## ④ 研究成果总结



## 2 研究内容及贡献

## 2.2 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化

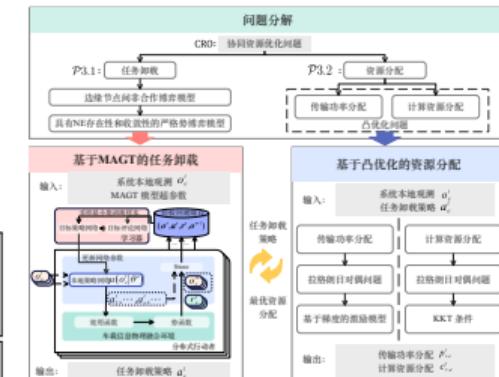
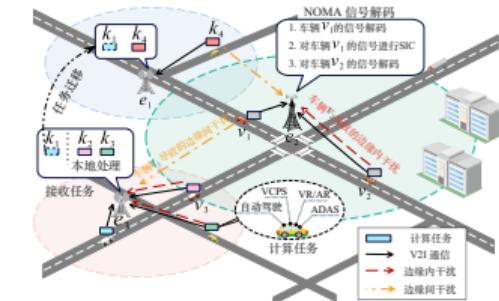
## 研究贡献

先进的任务调度与资源分配策略是进一步优化VCPS服务质量的技术支撑

- **问题:** 协同资源优化 (CRO)
- **算法:** 基于博弈理论的多智能体深度强化学习 (MAGT)
  - 问题分解
  - 边缘节点智能体决策任务调度
  - 凸优化最优资源分配
- **实验:** 有效提高任务完成率

[3] XU X, LIU K, DAI P, et al. Joint task offloading and resource optimization in NOMA-based vehicular edge computing: A game-theoretic DRL approach[J]. Journal of Systems Architecture (JSA), 2023, 134: 102780. 影响因子: 5.836(2021), 4.497(5 年)(中科院 SCI 2 区)

[4] 许新操, 刘凯, 刘春晖, 等. 基于势博弈的车载边缘计算信道分配方法[J]. 电子学报, 2021. (CCF T1 类中文期刊)



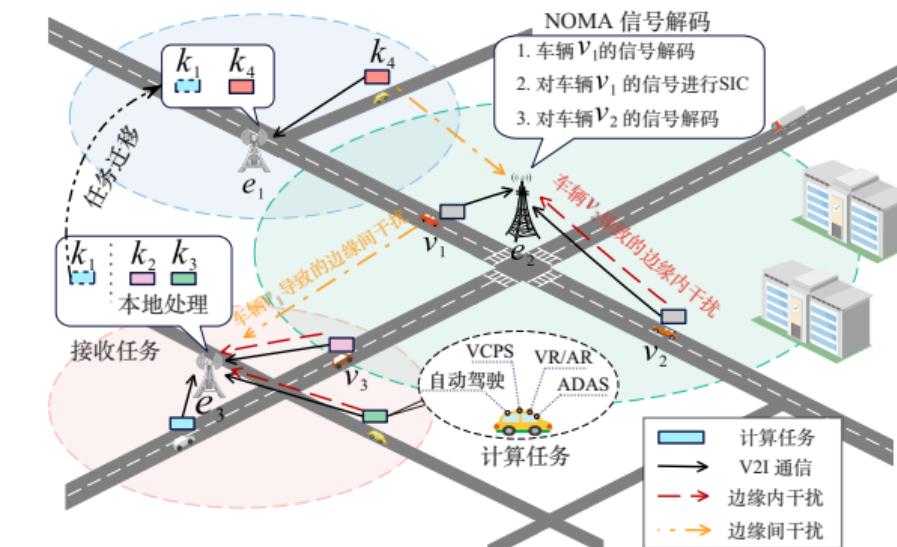
## 问题：协同通信与计算卸载场景

### □ 工作流程

- 计算任务产生: 车辆随机产生
- 任务数据上传: 传输功率分配
  - + 车端: 叠加编码
  - + 边缘端: 串行干扰消除
- 任务本地处理/迁移: 计算资源分配

### □ 例子

- 边缘内/边缘间干扰
  - + 边缘内干扰: 车辆  $v_1$
  - + 边缘间干扰: 车辆  $v_3$
- 任务负载不匀
  - + 边缘节点  $e_3$  (任务  $k_1$ 、 $k_2$  和  $k_3$ )  $e_1$  (任务  $k_4$ )



## 问题：V2I 传输与任务卸载模型

### □ 任务上传时间

$$m_{v,e}^t = \frac{d_k}{b \log_2 (1 + \text{SINR}_{v,e}^t)}$$

### □ 任务处理时间

$$n_{v,e}^t = w_{v,e}^t + \sum_{\forall e' \in E} q_{v,e'}^t x_{v,e'}^t$$

## 问题：V2I 传输与任务卸载模型

### □ 任务上传时间

$$m_{v,e}^t = \frac{d_k}{b \log_2 (1 + \text{SINR}_{v,e}^t)}$$

$\text{SINR}_{v,e}^t$ : 信干噪比  $\text{SINR}_{v,e}^t = \frac{|h_{v,e}^t|^2 p_{v,e}^t}{\underbrace{\sum_{\forall v' \in V_h^t} |h_{v',e}^t|^2 p_{v',e}^t}_{\text{边缘内干扰}} + \underbrace{\sum_{\forall e' \in E / \{e\}} \sum_{\forall v' \in V_e^t} |h_{v',e}^t|^2 p_{v',e'}^t}_{\text{边缘间干扰}} + N_0}$

### □ 任务处理时间

$$n_{v,e}^t = w_{v,e}^t + \sum_{\forall e' \in E} q_{v,e'}^t x_{v,e'}^t$$

## 问题：V2I 传输与任务卸载模型

### □ 任务上传时间

$$m_{v,e}^t = \frac{d_k}{b \log_2 (1 + \text{SINR}_{v,e}^t)}$$

### □ 任务处理时间

$$n_{v,e}^t = \color{red}w_{v,e}^t + \sum_{\forall e' \in E} q_{v,e'}^t x_{v,e'}^t \quad \color{red}w_{v,e}^t: \text{有线传输时间}$$

$$w_{v,e}^t = \begin{cases} 0, & k_v^t \in \mathbf{K}_e^t \cap \mathbf{K}_{q_e}^t \\ d_k \text{dis}_{e,e'}^t \zeta / z, & k_v^t \in \mathbf{K}_e^t \cap \mathbf{K}_{q_{e'}}^t \end{cases}$$

## 问题：V2I 传输与任务卸载模型

### □ 任务上传时间

$$m_{v,e}^t = \frac{d_k}{b \log_2 (1 + \text{SINR}_{v,e}^t)}$$

### □ 任务处理时间

$$n_{v,e}^t = w_{v,e}^t + \sum_{\forall e' \in E} q_{v,e'}^t \color{red}{x_{v,e'}^t} \quad \color{red}{x_{v,e'}^t} : \text{执行时间} \quad x_{v,e}^t = \frac{d_k c_k}{c_{v,e}^t}$$

## 问题：V2I 传输与任务卸载模型

### □ 任务上传时间

$$m_{v,e}^t = \frac{d_k}{b \log_2 (1 + \text{SINR}_{v,e}^t)}$$

### □ 任务处理时间

$$n_{v,e}^t = w_{v,e}^t + \sum_{\forall e' \in E} q_{v,e'}^t x_{v,e'}^t$$

### □ 任务服务时间

$$\psi_{v,e}^t = m_{v,e}^t + n_{v,e}^t$$

## 问题：协作资源优化 (CRO) 问题

$$\text{CRO} : \max_{\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{C}} f_1 = \sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \Psi_e^t$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}3.1 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} p_{v,e}^t \leq p_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.2 : \sum_{\forall k_v^t \in \mathbf{K}_{q_e}^t} c_{v,e}^t \leq c_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.3 : q_{v,e}^t \in \{0, 1\}, \forall v \in \mathbf{V}, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.4 : \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} q_{v,e}^t = 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

## 问题：协作资源优化 (CRO) 问题

$$\text{CRO} : \max_{\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{C}} f_1 = \sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \Psi_e^t$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}3.1 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} p_{v,e}^t \leq p_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.2 : \sum_{\forall k_v^t \in \mathbf{K}_{q_e}^t} c_{v,e}^t \leq c_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.3 : q_{v,e}^t \in \{0, 1\}, \forall v \in \mathbf{V}, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.4 : \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} q_{v,e}^t = 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\Psi_e^t : \text{服务率 } \Psi_e^t = \frac{\sum_{\forall k_v^t \in \mathbf{K}_e^t} \mathbb{I}\{\psi_{v,e}^t \leq t_k\}}{|\mathbf{K}_e^t|}$$

## 问题：协作资源优化 (CRO) 问题

$$\text{CRO} : \max_{\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{C}} f_1 = \sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \Psi_e^t$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}3.1 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} p_{v,e}^t \leq p_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.2 : \sum_{\forall k_v^t \in \mathbf{K}_{q_e}^t} c_{v,e}^t \leq c_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.3 : q_{v,e}^t \in \{0, 1\}, \forall v \in \mathbf{V}, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.4 : \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} q_{v,e}^t = 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

**P:** 传输功率分配  $\mathbf{P} = \{p_{v,e}^t \mid \forall v \in \mathbf{V}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}\}$

## 问题：协作资源优化 (CRO) 问题

$$\text{CRO} : \max_{\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{C}} f_1 = \sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \Psi_e^t$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}3.1 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} p_{v,e}^t \leq p_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.2 : \sum_{\forall k_v^t \in \mathbf{K}_{q_e}^t} c_{v,e}^t \leq c_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.3 : q_{v,e}^t \in \{0, 1\}, \forall v \in \mathbf{V}, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.4 : \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} q_{v,e}^t = 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

**Q:** 任务卸载决策  $\mathbf{Q} = \{q_{v,e}^t \mid \forall v \in \mathbf{V}, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}\}$

## 问题：协作资源优化 (CRO) 问题

$$\text{CRO} : \max_{\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{C}} f_1 = \sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \Psi_e^t$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}3.1 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} p_{v,e}^t \leq p_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.2 : \sum_{\forall k_v^t \in \mathbf{K}_{q_e}^t} c_{v,e}^t \leq c_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.3 : q_{v,e}^t \in \{0, 1\}, \forall v \in \mathbf{V}, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.4 : \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} q_{v,e}^t = 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

**C:** 计算资源分配  $\mathbf{C} = \{c_{v,e}^t \mid \forall v \in \mathbf{V}, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}\}$

## 问题：协作资源优化 (CRO) 问题

$$\text{CRO} : \max_{\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{C}} f_1 = \sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \Psi_e^t$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}3.1 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} p_{v,e}^t \leq p_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.2 : \sum_{\forall k_v^t \in \mathbf{K}_{q_e}^t} c_{v,e}^t \leq c_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.3 : q_{v,e}^t \in \{0, 1\}, \forall v \in \mathbf{V}, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.4 : \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} q_{v,e}^t = 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$\mathcal{C}3.1$ : 边缘节点分配的总传输功率不能超过 V2I 通信的最大功率

## 问题：协作资源优化 (CRO) 问题

$$\text{CRO} : \max_{\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{C}} f_1 = \sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \Psi_e^t$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}3.1 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} p_{v,e}^t \leq p_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.2 : \sum_{\forall k_v^t \in \mathbf{K}_{q_e}^t} c_{v,e}^t \leq c_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.3 : q_{v,e}^t \in \{0, 1\}, \forall v \in \mathbf{V}, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.4 : \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} q_{v,e}^t = 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$\mathcal{C}2.2$ : 分配的总体计算资源不能超过边缘节点的计算能力

## 问题：协作资源优化 (CRO) 问题

$$\text{CRO} : \max_{\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{C}} f_1 = \sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \Psi_e^t$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}3.1 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} p_{v,e}^t \leq p_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.2 : \sum_{\forall k_v^t \in \mathbf{K}_{q_e}^t} c_{v,e}^t \leq c_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.3 : q_{v,e}^t \in \{0, 1\}, \forall v \in \mathbf{V}, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.4 : \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} q_{v,e}^t = 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$\mathcal{C}3.3$ : 任务卸载决策是 0-1 变量

## 问题：协作资源优化 (CRO) 问题

$$\text{CRO} : \max_{\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{C}} f_1 = \sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \Psi_e^t$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}3.1 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} p_{v,e}^t \leq p_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.2 : \sum_{\forall k_v^t \in \mathbf{K}_{q_e}^t} c_{v,e}^t \leq c_e, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.3 : q_{v,e}^t \in \{0, 1\}, \forall v \in \mathbf{V}, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}3.4 : \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} q_{v,e}^t = 1, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$\mathcal{C}3.4$ : 每个任务只能卸载到一个边缘节点

## 2 研究内容及贡献

## 2.2 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化

算法：问题分解任务卸载问题

- 边缘节点非合作博弈  $\mathcal{G} = \{\mathbf{E}, \mathbb{S}, \{U_e\}_{e \in \mathbf{E}}\}$
- 效用函数  $U_e(\mathcal{S}) = \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \Psi_e^t$
- 势函数  $F_e(\mathcal{S}) = U_e(\mathcal{S}_e, \mathcal{S}_{-e}) - U_e(-\mathcal{S}_e, \mathcal{S}_{-e})$
- 具有 NE 存在和收敛性的严格势博弈 (EPG)

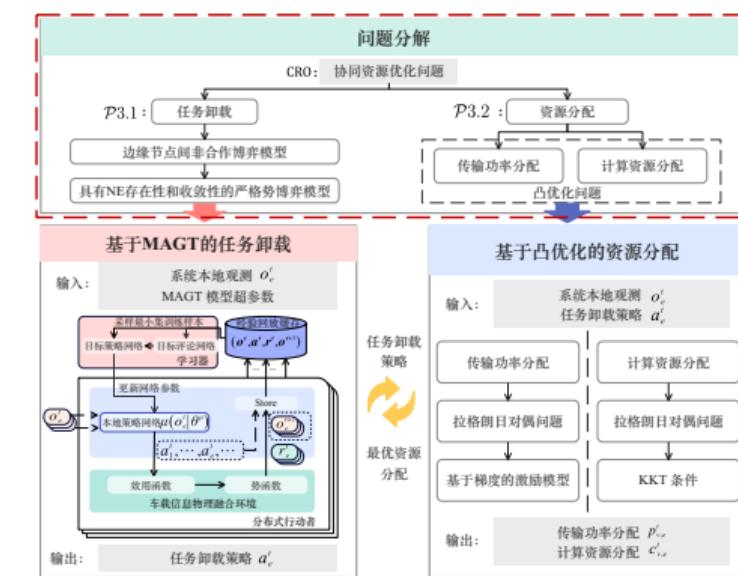
资源分配问题

- 传输功率分配

$$\min_{\mathbf{P}^t} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall k_v^t \in \mathbf{K}_e^t} \frac{d_k}{b \log_2(1 + \text{SINR}_{v,e}^t)}$$

- 计算资源分配

$$\min_{\mathbf{C}^t} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall k_v^t \in \mathbf{K}_e^t} (w_{v,e}^t + \sum_{\forall e' \in \mathbf{E}} q_{v,e'}^t x_{v,e'}^t)$$



## 2 研究内容及贡献

## 2.2 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化

算法：基于 MAGT 的任务卸载 系统状态

## 边缘节点观测

$$o_e^t = \{e, t, \text{Dis}_{V_e^t}, \mathbf{D}_{K_e^t}, \mathbf{C}_{K_e^t}, \mathbf{T}_{K_v^t}\}$$

 动作空间

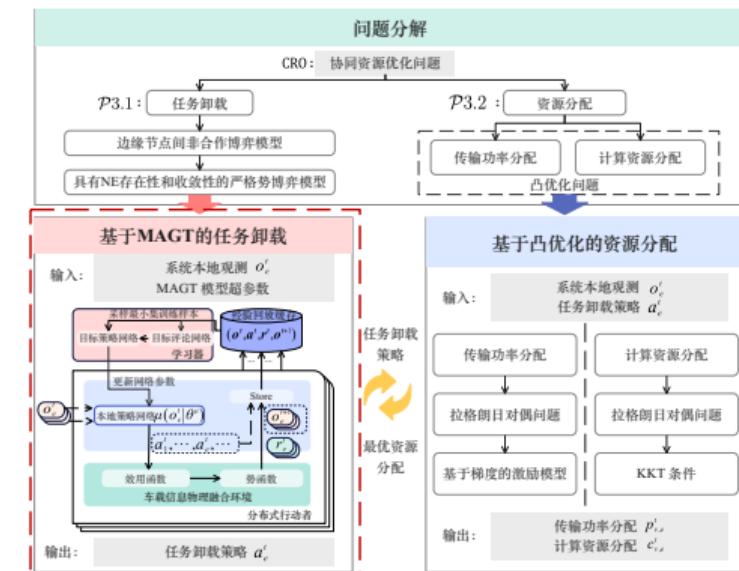
## 车辆请求任务的卸载决策

$$a_e^t = \{q_{v,e'}^t \mid \forall e' \in \mathbf{E}, \forall v \in \mathbf{V}_e^t\}$$

 奖励函数

博弈中效用函数→系统奖励函数

博弈中势函数→边缘节点奖励函数



## 2 研究内容及贡献

## 2.2 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化

算法：基于凸优化的资源分配□ 传输功率分配

- 引入拉格朗日乘子

$$\mathcal{L}(\widetilde{\mathbf{P}}_e^t, \lambda_e^t) = \widetilde{g}_3^e - \lambda_e^t (\sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} 2^{\widetilde{p}_{v,e}^t} - p_e)$$

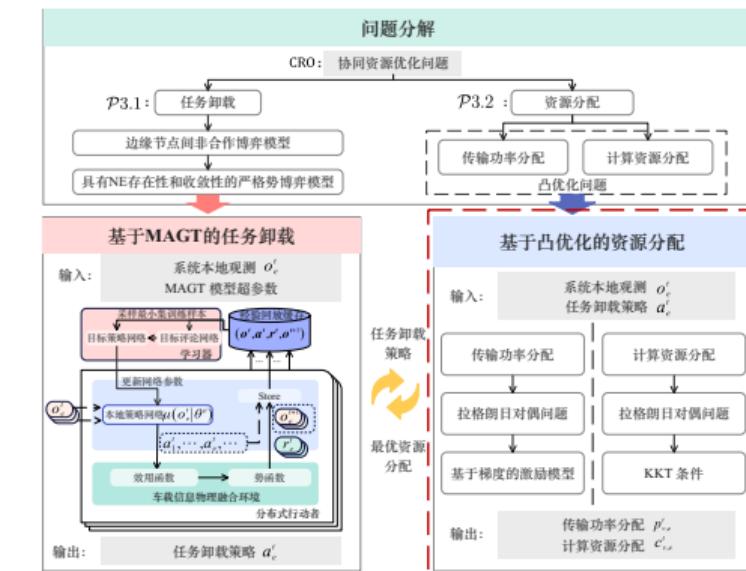
- 对偶问题分解为两层优化问题

- 外层：固定  $\widetilde{\mathbf{P}}_e^t$ ，优化  $\lambda_e^t$ ，梯度下降迭代更新
- 内层：固定  $\lambda_e^t$ ，优化  $\widetilde{\mathbf{P}}_e^t$ ，寻找拉格朗日静止点

□ 计算资源分配

- 基于 KKT 条件得到最优解

$$c_{v,e}^{t,*} = \frac{1/c_e \sqrt{d_k c_k}}{\sum_{\forall k \in \mathbf{K}_{q_e}^t} 1/c_e \sqrt{d_k c_k}}, \forall k_v^t \in \mathbf{K}_{q_e}^t$$



# 实验：数据与基本设置

## □ 实验与模型参数

参数	值
边缘节点计算能力	[3, 10] GHz
请求任务大小	[0.01, 5] MB
有线传输速率	50 Mbps
处理 1 bit 所需计算资源	500 cycles/bit
V2I 带宽	20 MHz
最大传输功率	$1 \times 10^3$ mW
策略网络	5 层全连接 (隐藏层 256-256-256)
评论家网络	5 层全连接 (隐藏层 512-512-256)
学习率	$1 \times 10^{-4}$
折扣因子	0.996
经验回放缓存大小	$1 \times 10^6$
批大小	256

## □ 对比算法

- 最优资源分配和任务全迁移 (ORM)
- 最优资源分配和任务仅本地处理 (ORL)
- 分布式深度确定性策略梯度 (D4PG)
- 多智能体深度确定性策略梯度 (MADDPG)

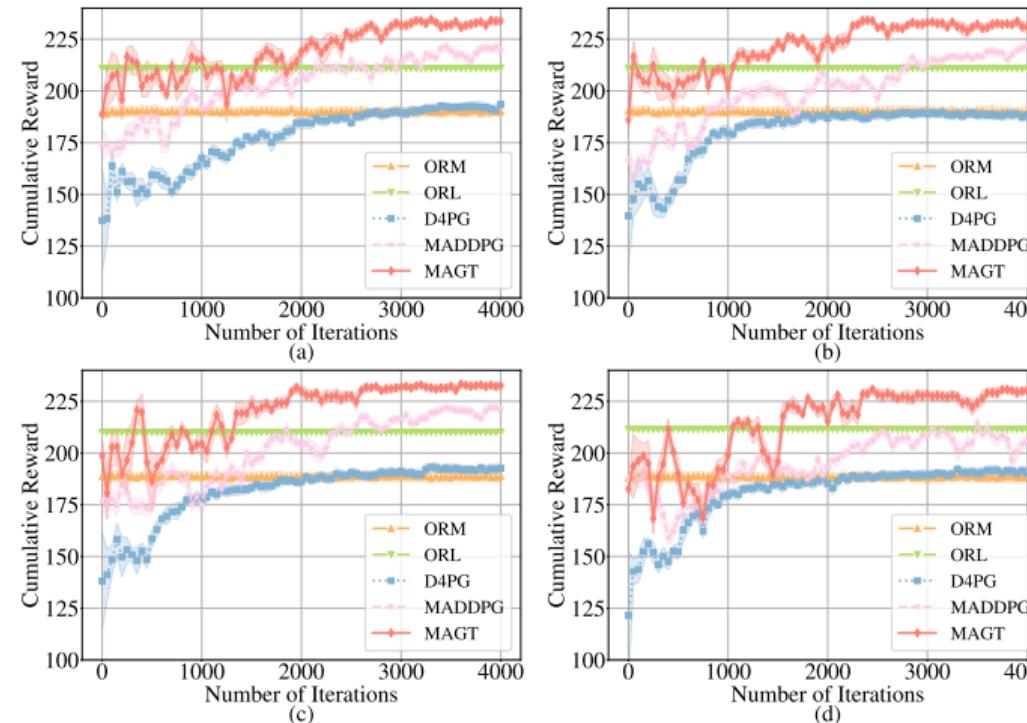
## □ 性能评估指标

- 累计奖励 (CR)
- 平均服务率 (ASR)
- 平均实现势 (AAP)
 
$$\text{AAP} = \frac{1}{E} \sum_{\forall e \in E} \sum_{\forall t \in T} r_e^t$$
- 本地处理与迁移的比例 (PLPM)
 
$$P_{\text{local}} = \frac{K_{\text{local}}}{K_{\text{total}}} \quad P_{\text{migrated}} = \frac{K_{\text{migrated}}}{K_{\text{total}}}$$

## 2 研究内容及贡献

## 2.2 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化

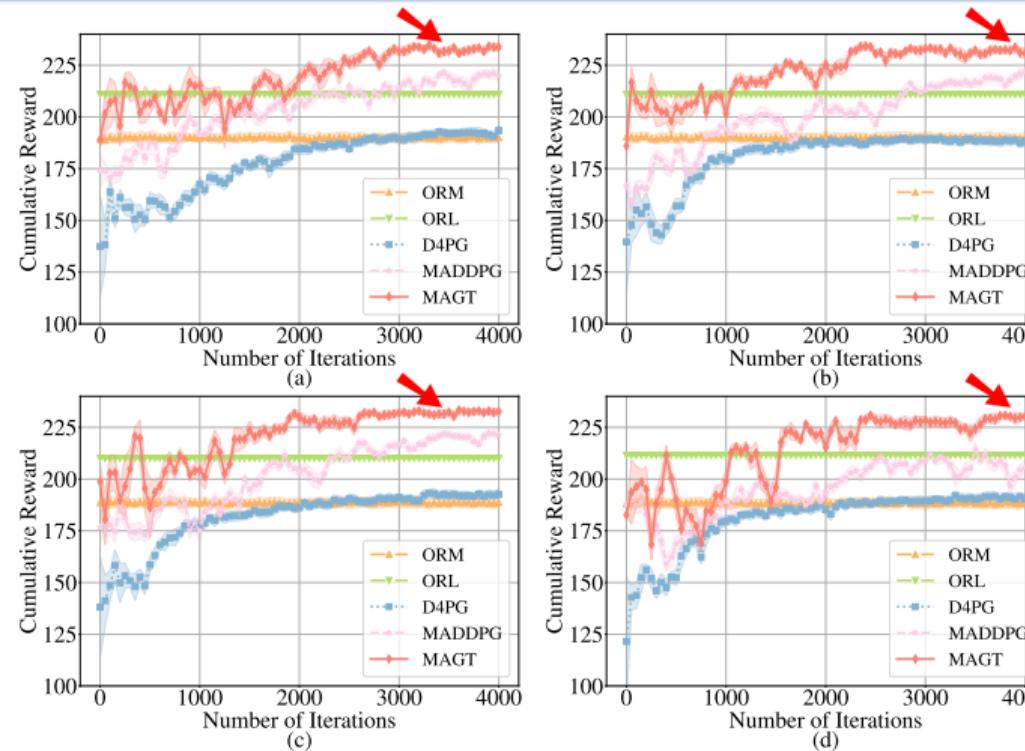
# 实验：算法收敛性



## 2 研究内容及贡献

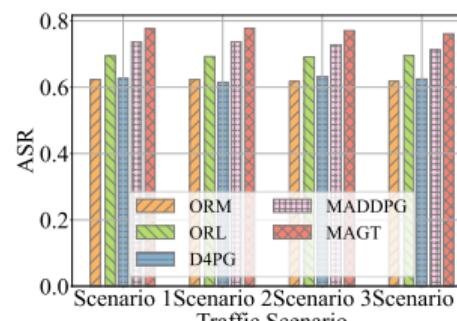
## 2.2 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化

# 实验：算法收敛性

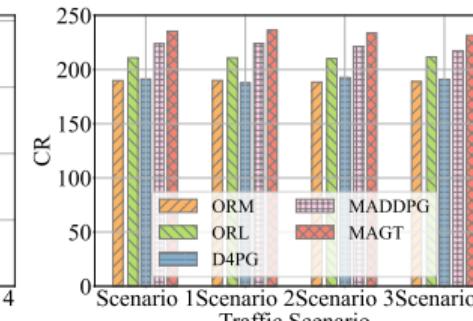


## 2 研究内容及贡献

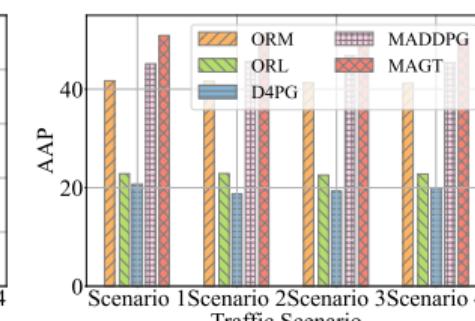
## 2.2 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化

实验：交通场景的影响

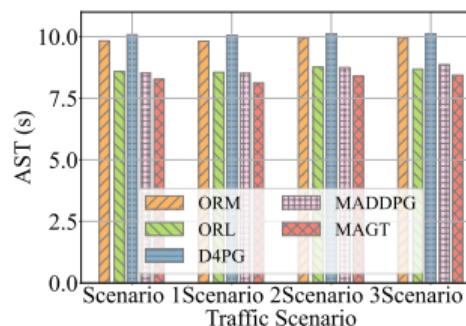
(a)



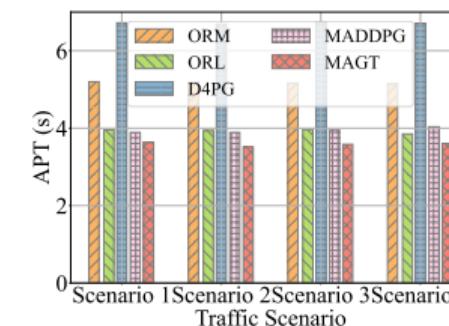
(b)



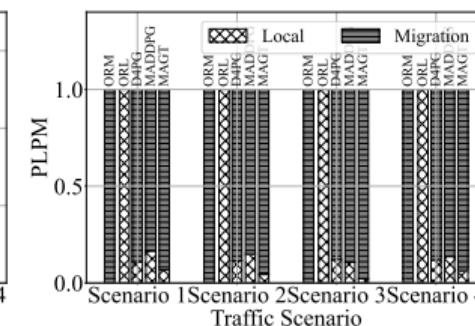
(c)



(d)



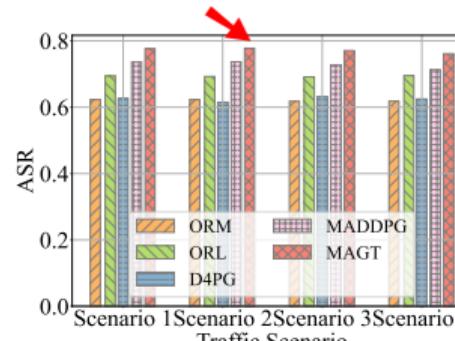
(e)



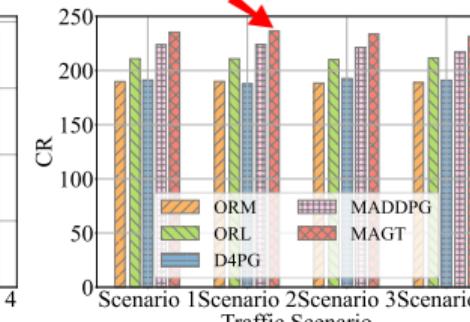
(f)

## 2 研究内容及贡献

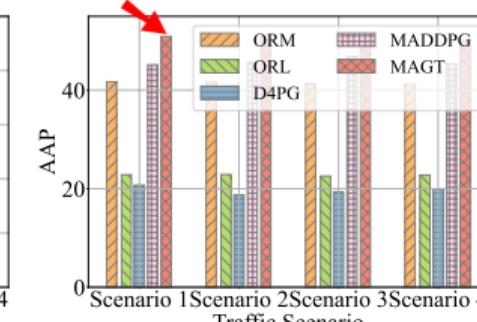
## 2.2 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化

实验：交通场景的影响

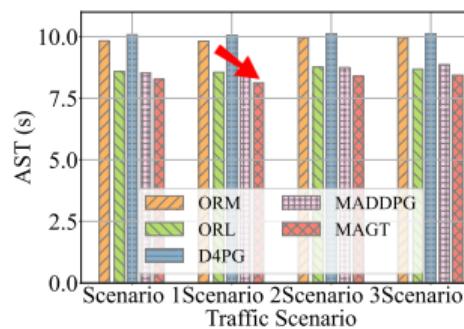
(a)



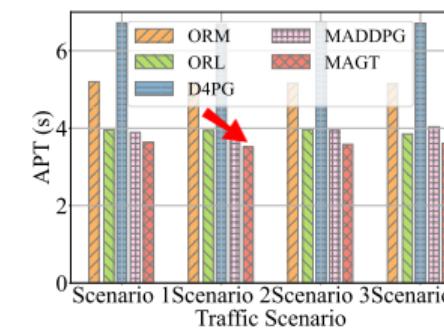
(b)



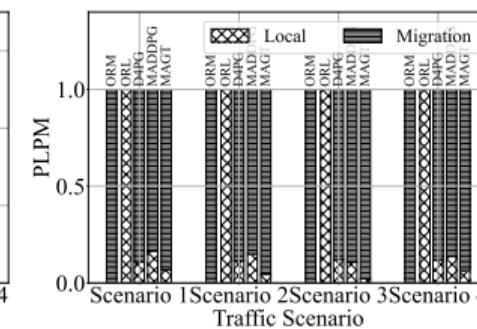
(c)



(d)



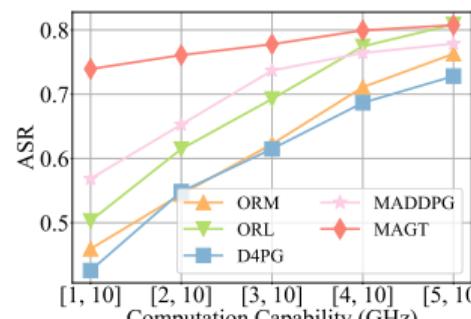
(e)



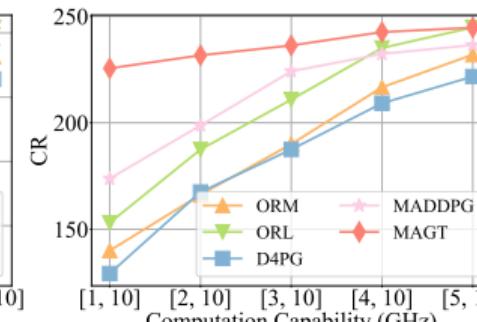
(f)

## 2 研究内容及贡献

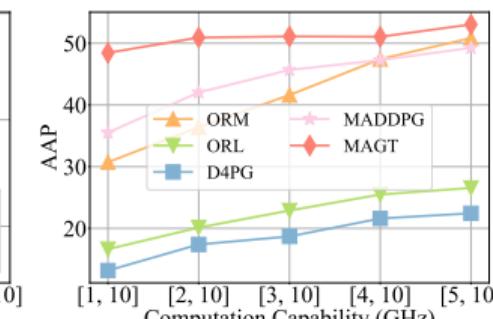
## 2.2 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化

实验：计算能力的影响

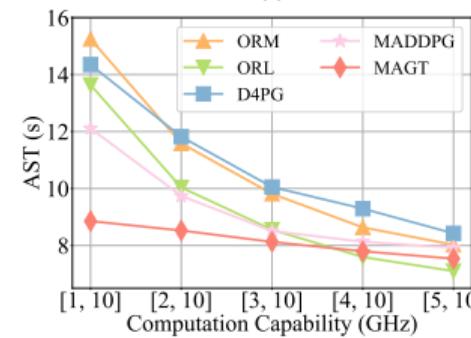
(a)



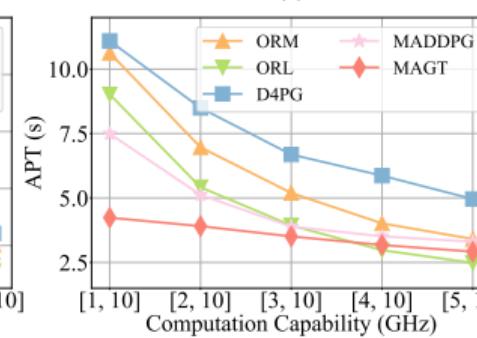
(b)



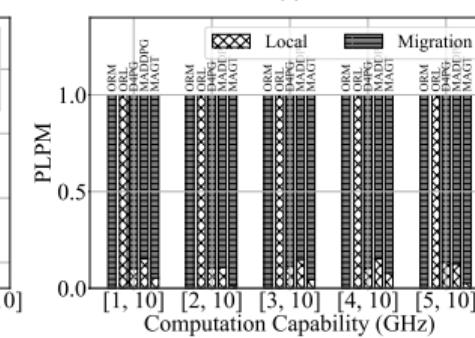
(c)



(d)



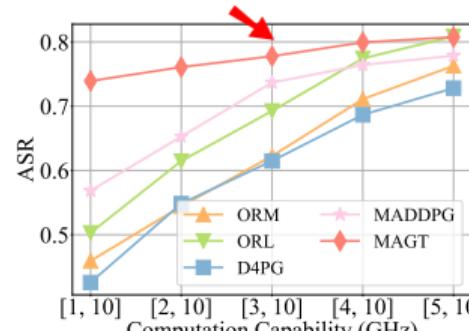
(e)



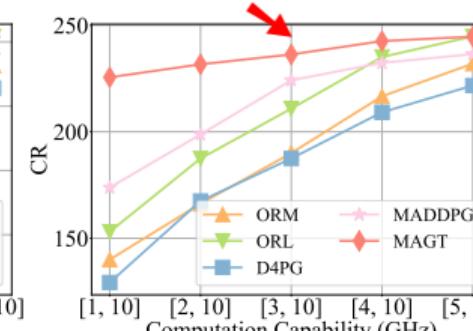
(f)

## 2 研究内容及贡献

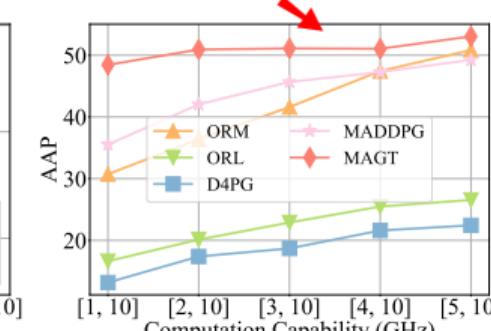
## 2.2 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化

实验：计算能力的影响

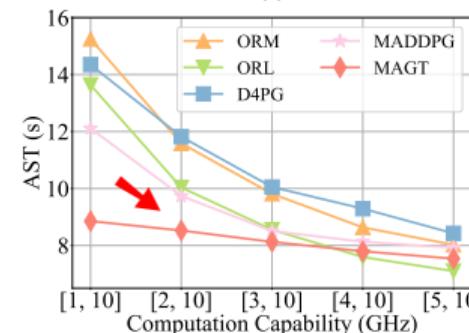
(a)



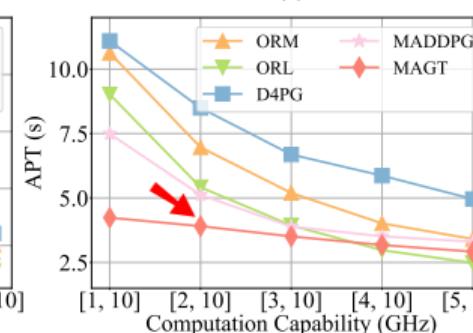
(b)



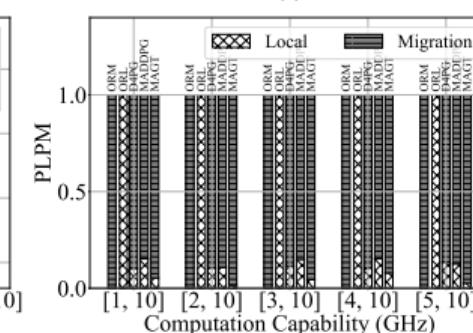
(c)



(d)



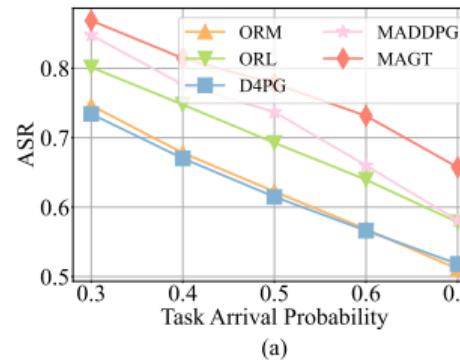
(e)



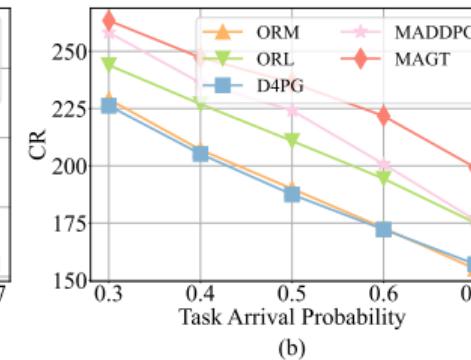
(f)

## 2 研究内容及贡献

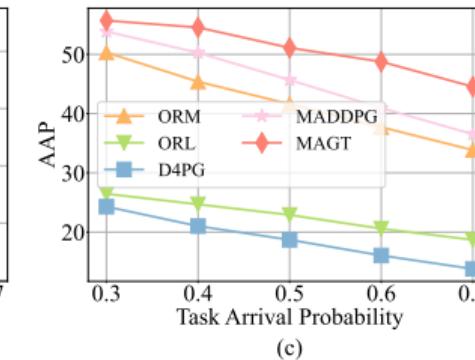
## 2.2 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化

实验：任务到达概率的影响

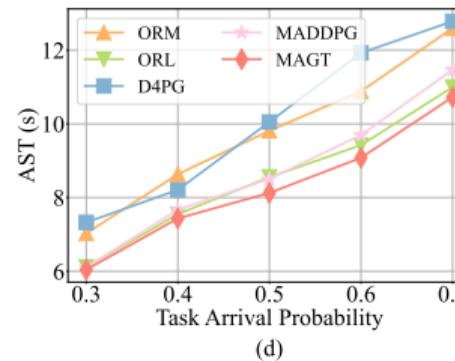
(a)



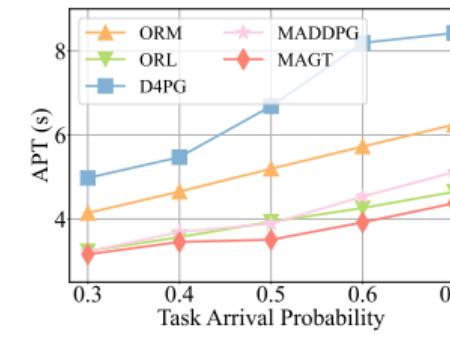
(b)



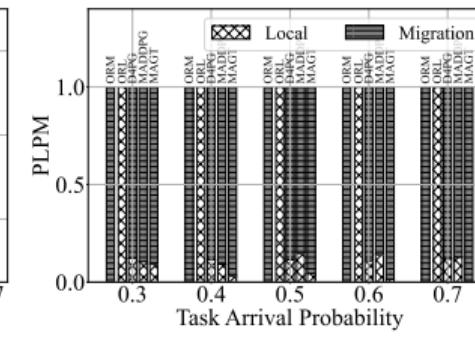
(c)



(d)



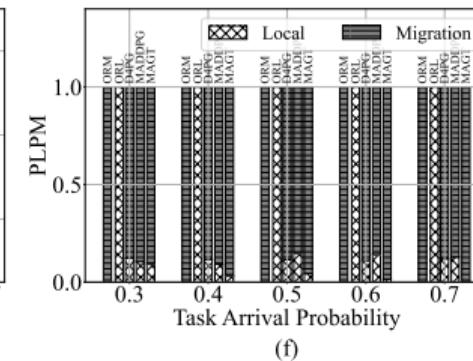
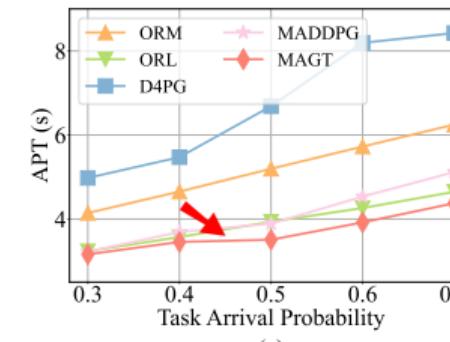
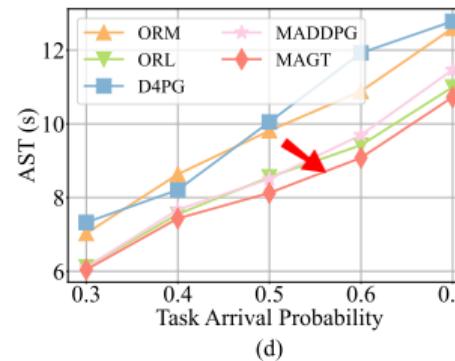
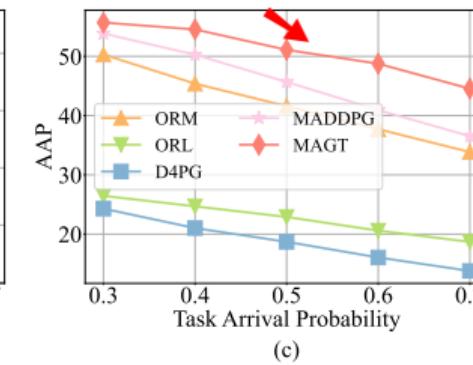
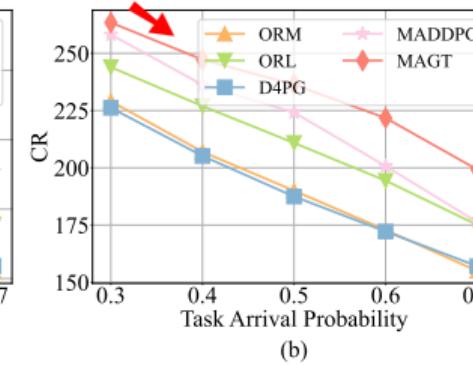
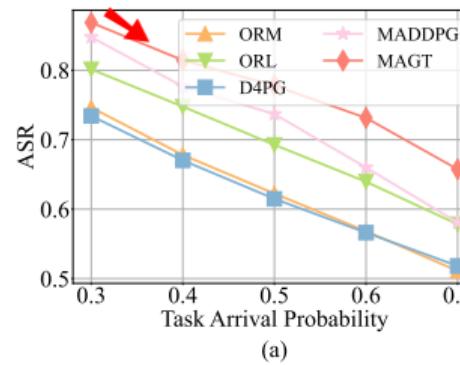
(e)



(f)

## 2 研究内容及贡献

## 2.2 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化

实验：任务到达概率的影响

## ① 研究背景

## ② 研究内容及贡献

2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

2.2 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化

2.3 面向车载信息物理融合的质量-开销均衡优化

2.4 超视距碰撞预警原型系统设计及实现

## ③ 总结与展望

## ④ 研究成果总结



## 2 研究内容及贡献

## 2.3 面向车载信息物理融合的质量-开销均衡优化

## 研究贡献

创新的服务质量与系统开销均衡策略是实现高质量、低成本和可扩展 VCPS 的理论保障

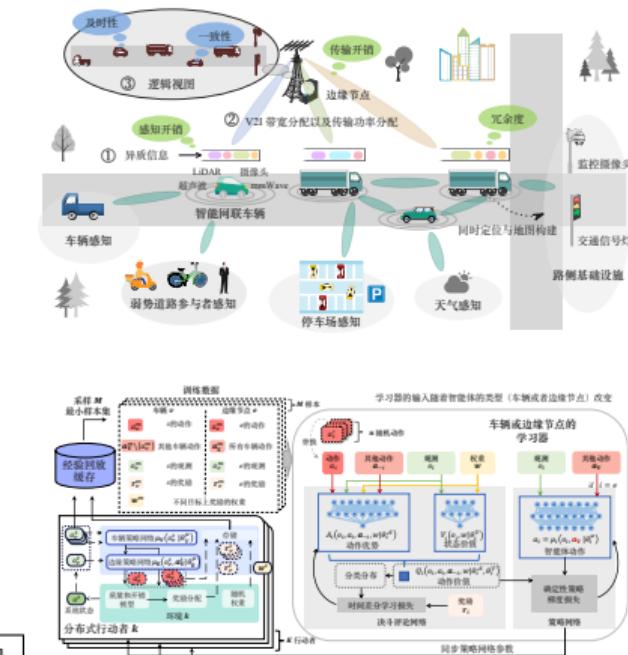
## □ 问题：双目标优化问题

- 最大化VCPS 质量：视图及时性和一致性
- 最小化VCPS 开销：信息冗余度、感知开销和传输开销

## □ 算法：基于多目标的多智能体深度强化学习算法 (MAMO)

## □ 实验：有效实现质量和开销的均衡

[5] LIU K, XUX, DAI P, et al. Cooperative sensing and uploading for quality-cost tradeoff of digital twins in VEC[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics (TCE), under minor revision. (中科院 SCI 2 区)



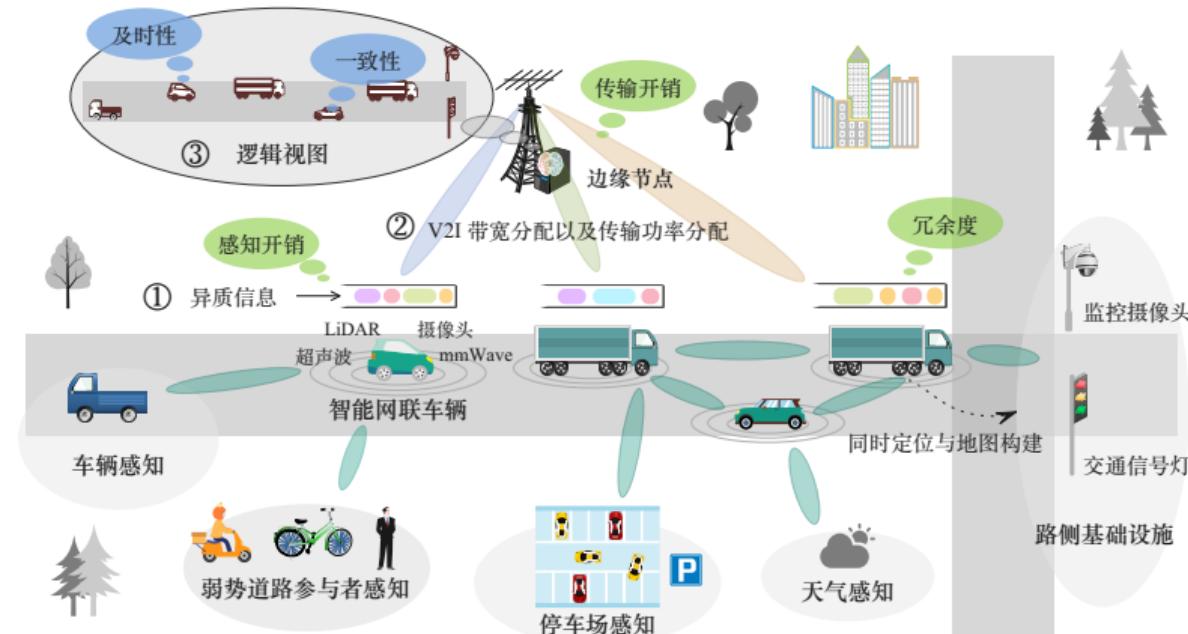
## 问题：逻辑视图构建场景

### □ 视图质量

- 及时性
- 一致性

### □ 视图开销

- 感知开销
- 传输开销
- 冗余度



## 问题：VCPS 质量/开销模型

### □ VCPS 质量模型

$$\mathcal{Q} = \frac{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} QV_i}{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} |\mathbf{I}_e^t|}$$

### □ VCPS 开销模型

$$\mathcal{C} = \frac{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} CV_i}{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} |\mathbf{I}_e^t|}$$

## 问题：VCPS 质量/开销模型

### □ VCPS 质量模型

$$\mathcal{Q} = \frac{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} \text{QV}_i}{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} |\mathbf{I}_e^t|}$$

视图质量

$$\text{QV}_i = w_1(1 - \hat{\Theta}_i) + w_2(1 - \hat{\Psi}_i), \forall i \in \mathbf{I}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}$$

### □ VCPS 开销模型

$$\mathcal{C} = \frac{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} \text{CV}_i}{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} |\mathbf{I}_e^t|}$$

## 问题：VCPS 质量/开销模型

### □ VCPS 质量模型

$$\mathcal{Q} = \frac{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} \text{QV}_i}{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} |\mathbf{I}_e^t|}$$

视图质量

$$\text{QV}_i = w_1(1 - \hat{\Theta}_i) + w_2(1 - \hat{\Psi}_i), \forall i \in \mathbf{I}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}$$

$\hat{\Theta}_i$ : 视图及时性

### □ VCPS 开销模型

$$\mathcal{C} = \frac{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} \text{CV}_i}{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} |\mathbf{I}_e^t|}$$

## 问题：VCPS 质量/开销模型

### □ VCPS 质量模型

$$\mathcal{Q} = \frac{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} QV_i}{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} |\mathbf{I}_e^t|}$$

视图质量

$$QV_i = w_1(1 - \hat{\Theta}_i) + w_2(1 - \hat{\Psi}_i), \forall i \in \mathbf{I}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}$$

$\hat{\Theta}_i$ : 视图及时性

$\hat{\Psi}_i$ : 视图一致性

### □ VCPS 开销模型

$$\mathcal{C} = \frac{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} CV_i}{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} |\mathbf{I}_e^t|}$$

## 问题：VCPS 质量/开销模型

### □ VCPS 质量模型

$$\mathcal{Q} = \frac{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} \text{QV}_i}{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} |\mathbf{I}_e^t|}$$

视图质量

$$\text{QV}_i = w_1(1 - \hat{\Theta}_i) + w_2(1 - \hat{\Psi}_i), \forall i \in \mathbf{I}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}$$

$\hat{\Theta}_i$ : 视图及时性

$\hat{\Psi}_i$ : 视图一致性

### □ VCPS 开销模型

$$\mathcal{C} = \frac{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} \text{CV}_i}{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} |\mathbf{I}_e^t|}$$

视图开销

$$\text{CV}_i = w_3 \hat{\Xi}_i + w_4 \hat{\Phi}_i + w_5 \hat{\Omega}_i, \forall i \in \mathbf{I}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}$$

## 问题：VCPS 质量/开销模型

### □ VCPS 质量模型

$$\mathcal{Q} = \frac{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} \text{QV}_i}{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} |\mathbf{I}_e^t|}$$

视图质量

$$\text{QV}_i = w_1(1 - \hat{\Theta}_i) + w_2(1 - \hat{\Psi}_i), \forall i \in \mathbf{I}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}$$

$\hat{\Theta}_i$ : 视图及时性

$\hat{\Psi}_i$ : 视图一致性

### □ VCPS 开销模型

$$\mathcal{C} = \frac{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} \text{CV}_i}{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} |\mathbf{I}_e^t|}$$

视图开销

$$\text{CV}_i = w_3 \hat{\Xi}_i + w_4 \hat{\Phi}_i + w_5 \hat{\Omega}_i, \forall i \in \mathbf{I}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}$$

$\hat{\Xi}_i$ : 视图冗余度

## 问题：VCPS 质量/开销模型

### □ VCPS 质量模型

$$\mathcal{Q} = \frac{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} \text{QV}_i}{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} |\mathbf{I}_e^t|}$$

视图质量

$$\text{QV}_i = w_1(1 - \hat{\Theta}_i) + w_2(1 - \hat{\Psi}_i), \forall i \in \mathbf{I}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}$$

$\hat{\Theta}_i$ : 视图及时性

$\hat{\Psi}_i$ : 视图一致性

### □ VCPS 开销模型

$$\mathcal{C} = \frac{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} \text{CV}_i}{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} |\mathbf{I}_e^t|}$$

视图开销

$$\text{CV}_i = w_3 \hat{\Xi}_i + w_4 \hat{\Phi}_i + w_5 \hat{\Omega}_i, \forall i \in \mathbf{I}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}$$

$\hat{\Xi}_i$ : 视图冗余度

$\hat{\Phi}_i$ : 视图感知开销

## 问题：VCPS 质量/开销模型

### □ VCPS 质量模型

$$\mathcal{Q} = \frac{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} \text{QV}_i}{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} |\mathbf{I}_e^t|}$$

视图质量

$$\text{QV}_i = w_1(1 - \hat{\Theta}_i) + w_2(1 - \hat{\Psi}_i), \forall i \in \mathbf{I}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}$$

$\hat{\Theta}_i$ : 视图及时性

$\hat{\Psi}_i$ : 视图一致性

### □ VCPS 开销模型

$$\mathcal{C} = \frac{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} \text{CV}_i}{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} |\mathbf{I}_e^t|}$$

视图开销

$$\text{CV}_i = w_3 \hat{\Xi}_i + w_4 \hat{\Phi}_i + w_5 \hat{\Omega}_i, \forall i \in \mathbf{I}_e^t, \forall e \in \mathbf{E}$$

$\hat{\Xi}_i$ : 视图冗余度

$\hat{\Phi}_i$ : 视图感知开销

$\hat{\Omega}_i$ : 视图传输开销

## 问题：双目标优化问题

$$\mathcal{P}4.1 : \max_{\mathbf{C}, \Lambda, \mathbf{P}, \Pi, \mathbf{B}} \mathcal{Q}, \min_{\mathbf{C}, \Lambda, \mathbf{P}, \Pi, \mathbf{B}} \mathcal{C}$$

s.t. (4.1) ~ (4.5)

$$\mathcal{C}4.1 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \mu_d < 1, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.2 : \inf_{\mathbb{P} \in \tilde{\mathcal{P}}} \Pr_{[\mathbb{P}]} \left( \text{SNR}_{v,e}^t \geq \text{SNR}_{v,e}^{\text{tgt}} \right) \geq \delta, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.3 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_v^t \leq b_e, \quad \forall t \in \mathbf{T}$$

## 问题：双目标优化问题

$$\mathcal{P}4.2 : \max_{\mathbf{C}, \Lambda, \mathbf{P}, \Pi, \mathbf{B}} (\mathcal{Q}, \textcolor{red}{\mathcal{P}})$$

s.t. (4.1) ~ (4.5)

$$\mathcal{C}4.1 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \mu_d < 1, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.2 : \inf_{\mathbb{P} \in \tilde{\mathcal{P}}} \Pr_{[\mathbb{P}]} \left( \text{SNR}_{v,e}^t \geq \text{SNR}_{v,e}^{\text{tgt}} \right) \geq \delta, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.3 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_v^t \leq b_e, \quad \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\textcolor{red}{\mathcal{P}}: \text{VCPS 利润 } \mathcal{P} = \frac{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} \text{PV}_j}{\sum_{\forall t \in \mathbf{T}} \sum_{\forall e \in \mathbf{E}} |\mathbf{I}_e^t|}$$

## 问题：双目标优化问题

$$\mathcal{P}4.2 : \max_{\mathbf{C}, \Lambda, \mathbf{P}, \Pi, \mathbf{B}} (\mathcal{Q}, \mathcal{P})$$

s.t. (4.1) ~ (4.5)

$$\mathcal{C}4.1 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \mu_d < 1, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.2 : \inf_{\mathbb{P} \in \tilde{\mathcal{P}}} \Pr_{[\mathbb{P}]} \left( \text{SNR}_{v,e}^t \geq \text{SNR}_{v,e}^{\text{tgt}} \right) \geq \delta, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.3 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_v^t \leq b_e, \quad \forall t \in \mathbf{T}$$

**C:** 感知信息决策  $\mathbf{C} = \left\{ c_{d,v}^t \mid \forall d \in \mathbf{D}_v, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T} \right\}$

## 问题：双目标优化问题

$$\mathcal{P}4.2 : \max_{\mathbf{C}, \textcolor{red}{\Lambda}, \mathbf{P}, \Pi, \mathbf{B}} (\mathcal{Q}, \mathcal{P})$$

s.t. (4.1) ~ (4.5)

$$\mathcal{C}4.1 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \mu_d < 1, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.2 : \inf_{\mathbb{P} \in \tilde{\mathcal{P}}} \Pr_{[\mathbb{P}]} \left( \text{SNR}_{v,e}^t \geq \text{SNR}_{v,e}^{\text{tgt}} \right) \geq \delta, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.3 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_v^t \leq b_e, \quad \forall t \in \mathbf{T}$$

$\textcolor{red}{\Lambda}$ : 感知频率  $\Lambda = \left\{ \lambda_{d,v}^t | \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T} \right\}$

## 问题：双目标优化问题

$$\mathcal{P}4.2 : \max_{\mathbf{C}, \Lambda, \mathbf{P}, \Pi, \mathbf{B}} (\mathcal{Q}, \mathcal{P})$$

s.t. (4.1) ~ (4.5)

$$\mathcal{C}4.1 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \mu_d < 1, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.2 : \inf_{\mathbb{P} \in \tilde{\mathcal{P}}} \Pr_{[\mathbb{P}]} \left( \text{SNR}_{v,e}^t \geq \text{SNR}_{v,e}^{\text{tgt}} \right) \geq \delta, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.3 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_v^t \leq b_e, \quad \forall t \in \mathbf{T}$$

**P:** 上传优先级  $\mathbf{P} = \left\{ p_{d,v}^t \mid \forall d \in \mathbf{D}_v^t, \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T} \right\}$

## 问题：双目标优化问题

$$\mathcal{P}4.2 : \max_{\mathbf{C}, \Lambda, \mathbf{P}, \Pi, \mathbf{B}} (\mathcal{Q}, \mathcal{P})$$

s.t. (4.1) ~ (4.5)

$$\mathcal{C}4.1 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \mu_d < 1, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.2 : \inf_{\mathbb{P} \in \tilde{\mathcal{P}}} \Pr_{[\mathbb{P}]} \left( \text{SNR}_{v,e}^t \geq \text{SNR}_{v,e}^{\text{tgt}} \right) \geq \delta, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.3 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_v^t \leq b_e, \quad \forall t \in \mathbf{T}$$

$\Pi$ : 传输功率  $\Pi = \{\pi_v^t | \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}\}$

## 问题：双目标优化问题

$$\mathcal{P}4.2 : \max_{\mathbf{C}, \Lambda, \mathbf{P}, \Pi, \mathbf{B}} (\mathcal{Q}, \mathcal{P})$$

s.t. (4.1) ~ (4.5)

$$\mathcal{C}4.1 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \mu_d < 1, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.2 : \inf_{\mathbb{P} \in \tilde{\mathcal{P}}} \Pr_{[\mathbb{P}]} \left( \text{SNR}_{v,e}^t \geq \text{SNR}_{v,e}^{\text{tgt}} \right) \geq \delta, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.3 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_v^t \leq b_e, \quad \forall t \in \mathbf{T}$$

**B:** V2I 带宽分配  $\mathbf{B} = \{b_v^t | \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}\}$

## 问题：双目标优化问题

$$\mathcal{P}4.2 : \max_{\mathbf{C}, \Lambda, \mathbf{P}, \Pi, \mathbf{B}} (\mathcal{Q}, \mathcal{P})$$

s.t. (4.1) ~ (4.5)

$$\mathcal{C}4.1 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \mu_d < 1, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.2 : \inf_{\mathbb{P} \in \tilde{\mathcal{P}}} \Pr_{[\mathbb{P}]} \left( \text{SNR}_{v,e}^t \geq \text{SNR}_{v,e}^{\text{tgt}} \right) \geq \delta, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.3 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_v^t \leq b_e, \quad \forall t \in \mathbf{T}$$

(4.1) ~ (4.5): 决策变量取值范围限制

## 问题：双目标优化问题

$$\mathcal{P}4.2 : \max_{\mathbf{C}, \Lambda, \mathbf{P}, \Pi, \mathbf{B}} (\mathcal{Q}, \mathcal{P})$$

s.t. (4.1) ~ (4.5)

$$\mathcal{C}4.1 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \mu_d < 1, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.2 : \inf_{\mathbb{P} \in \tilde{\mathcal{P}}} \Pr_{[\mathbb{P}]} \left( \text{SNR}_{v,e}^t \geq \text{SNR}_{v,e}^{\text{tgt}} \right) \geq \delta, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.3 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_v^t \leq b_e, \quad \forall t \in \mathbf{T}$$

$\mathcal{C}4.1$ : 保证队列稳定状态

## 问题：双目标优化问题

$$\mathcal{P}4.2 : \max_{\mathbf{C}, \Lambda, \mathbf{P}, \Pi, \mathbf{B}} (\mathcal{Q}, \mathcal{P})$$

s.t. (4.1) ~ (4.5)

$$\mathcal{C}4.1 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \mu_d < 1, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.2 : \inf_{\mathbb{P} \in \tilde{\mathcal{P}}} \Pr_{[\mathbb{P}]} \left( \text{SNR}_{v,e}^t \geq \text{SNR}_{v,e}^{\text{tgt}} \right) \geq \delta, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.3 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_v^t \leq b_e, \quad \forall t \in \mathbf{T}$$

**C4.2:** 保证传输可靠性

## 问题：双目标优化问题

$$\mathcal{P}4.2 : \max_{\mathbf{C}, \Lambda, \mathbf{P}, \Pi, \mathbf{B}} (\mathcal{Q}, \mathcal{P})$$

s.t. (4.1) ~ (4.5)

$$\mathcal{C}4.1 : \sum_{\forall d \subseteq \mathbf{D}_v^t} \lambda_{d,v}^t \mu_d < 1, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.2 : \inf_{\mathbb{P} \in \tilde{\mathcal{P}}} \Pr_{[\mathbb{P}]} \left( \text{SNR}_{v,e}^t \geq \text{SNR}_{v,e}^{\text{tgt}} \right) \geq \delta, \quad \forall v \in \mathbf{V}, \forall t \in \mathbf{T}$$

$$\mathcal{C}4.3 : \sum_{\forall v \in \mathbf{V}_e^t} b_v^t \leq b_e, \quad \forall t \in \mathbf{T}$$

$\mathcal{C}4.3$ : 边缘节点  $e$  分配的 V2I 带宽之和不能超过其容量  $b_e$

## 2 研究内容及贡献

## 2.3 面向车载信息物理融合的质量-开销均衡优化

算法：流程

## □ 初始化

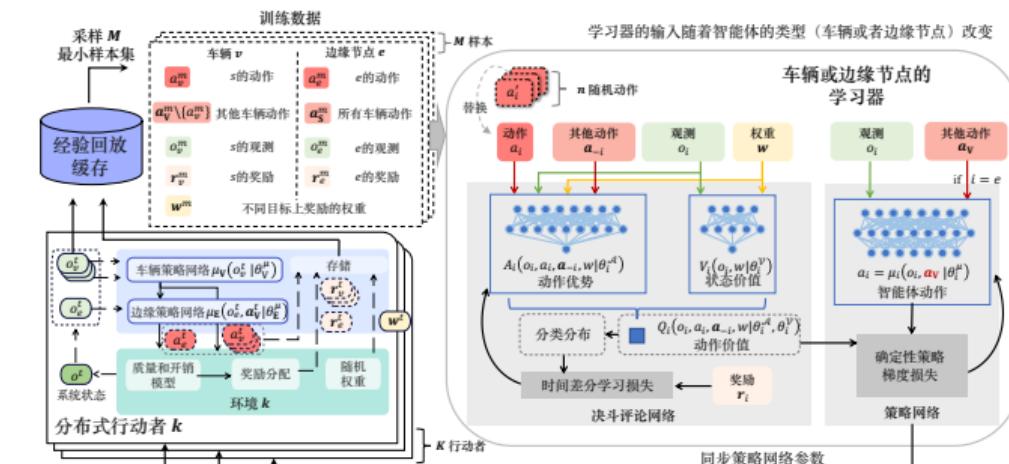
- 网络参数、经验回放缓存

## □ 分布式策略执行

- $K$  分布式行动者启动
- 独立与环境交互，并存储经验
- 交互过程将持续到学习器训练过程结束

## □ 网络学习与更新

- 抽取小批量训练样本
- 评论家网络：基于分类分布的时间差分学习
- 策略网络：策略梯度



## 2 研究内容及贡献

## 2.3 面向车载信息物理融合的质量-开销均衡优化

算法：MAMO 模型

## □ 系统状态

$$o_v^t = \{t, v, l_v^t, \mathbf{D}_v, \Phi_v, \mathbf{D}_e^t, \mathbf{D}_{\mathbf{I}_e^t}, w^t\}$$

$$o_e^t = \{t, e, \mathbf{Dis}_{V,e}^t, \mathbf{D}_1, \dots, \mathbf{D}_V, \mathbf{D}_e^t, \mathbf{D}_{\mathbf{I}_e^t}, w^t\}$$

## □ 动作空间

$$a_v^t = \{\mathbf{C}_v^t, \{\lambda_{d,v}^t, p_{d,v}^t \mid \forall d \in \mathbf{D}_v^t\}, \pi_v^t\}$$

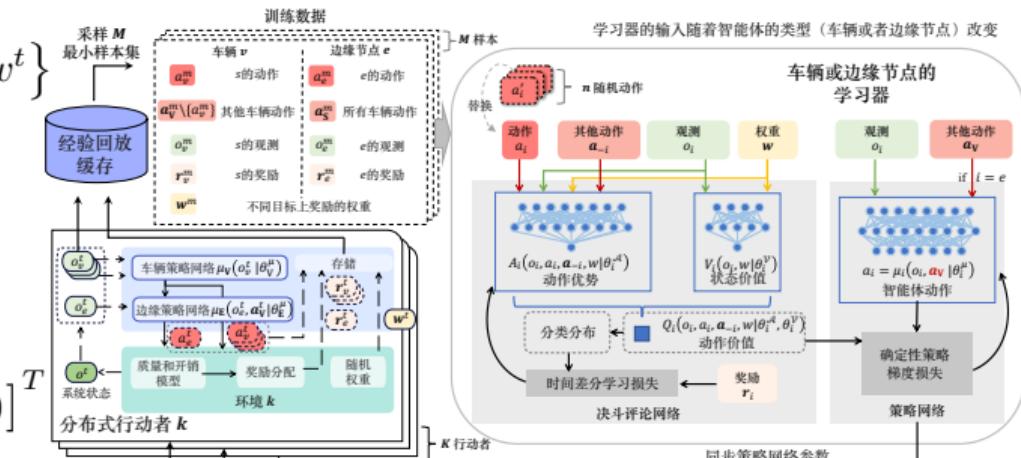
$$a_e^t = \{b_{v,e}^t \mid \forall v \in \mathbf{V}_e^t\}$$

## □ 奖励函数

$$r^t = [r^{(1)}(a_V^t, a_e^t \mid o^t) \quad r^{(2)}(a_V^t, a_e^t \mid o^t)]^T$$

$$r^{(1)}(a_V^t, a_e^t \mid o^t) = \frac{1}{|\mathbf{I}_e^t|} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} QV_i$$

$$r^{(2)}(a_V^t, a_e^t \mid o^t) = \frac{1}{|\mathbf{I}_e^t|} \sum_{\forall i \in \mathbf{I}_e^t} PV_j$$



## 2 研究内容及贡献

## 2.3 面向车载信息物理融合的质量-开销均衡优化

算法：决斗评论家网络 (DCN)

## □ 动作优势网络 (AA)

车辆  $A_V(o_v^m, a_v^m, a_{V-v}^m, w^m | \theta_V^A)$

边缘节点  $A_E(o_e^m, a_e^m, a_V^m, w^m | \theta_E^A)$

## □ 状态价值网络 (SV)

车辆  $V_V(o_v^m, w^m | \theta_V^V)$

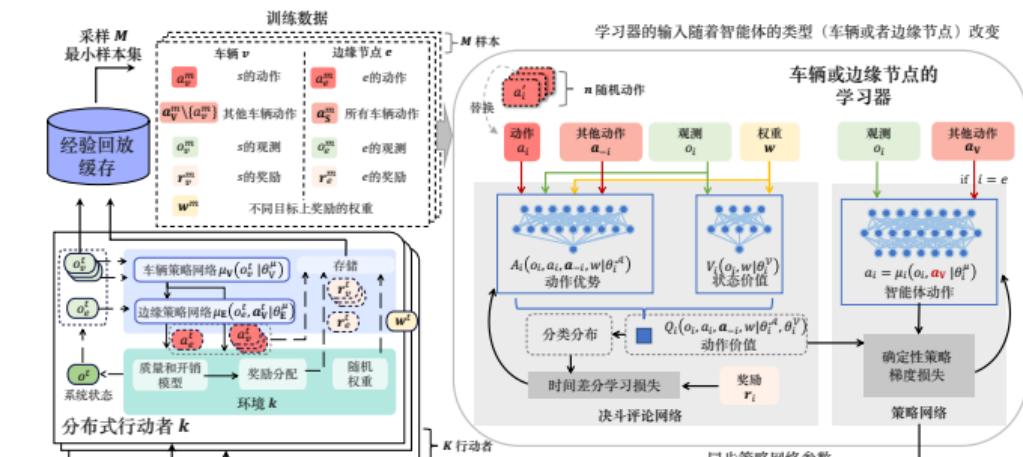
边缘节点  $V_E(o_e^m, w^m | \theta_E^V)$

## □ 动作价值

$Q_V(o_v^m, a_v^m, a_{V-v}^m, w^m | \theta_V^Q)$

$= V_V(o_v^m, w^m | \theta_V^V) + A_V(o_v^m, a_v^m, a_{V-v}^m, w^m | \theta_V^A)$

$- \frac{1}{N} \sum_{\forall n} A_V(o_v^m, a_v^{m,n}, a_{V-v}^m, w^m | \theta_V^A)$



# 实验：数据与基本设置

## □ 实验与模型参数

参数	值
最大传输功率	100 mW
传输可靠性阈值	0.9
及时性加权系数	0.6
一致性加权系数	0.4
冗余度加权系数	0.2
感知开销加权系数	0.4
传输开销加权系数	0.4
策略网络	4 层全连接 (隐藏层 256-128)
评论家网络	4 层全连接 (隐藏层 512-256)
学习率	$1 \times 10^{-4}$
折扣因子	0.996
经验回放缓存大小	$1 \times 10^6$
批大小	256

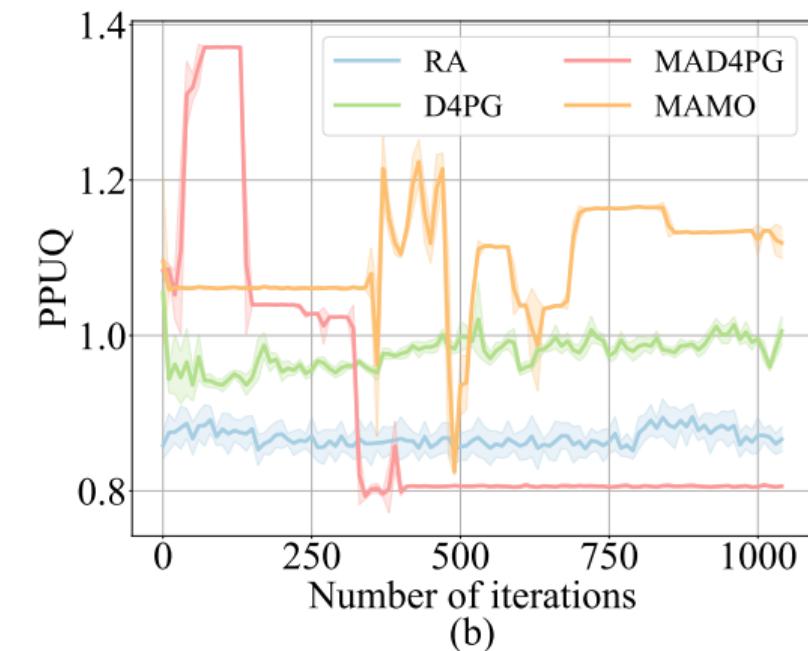
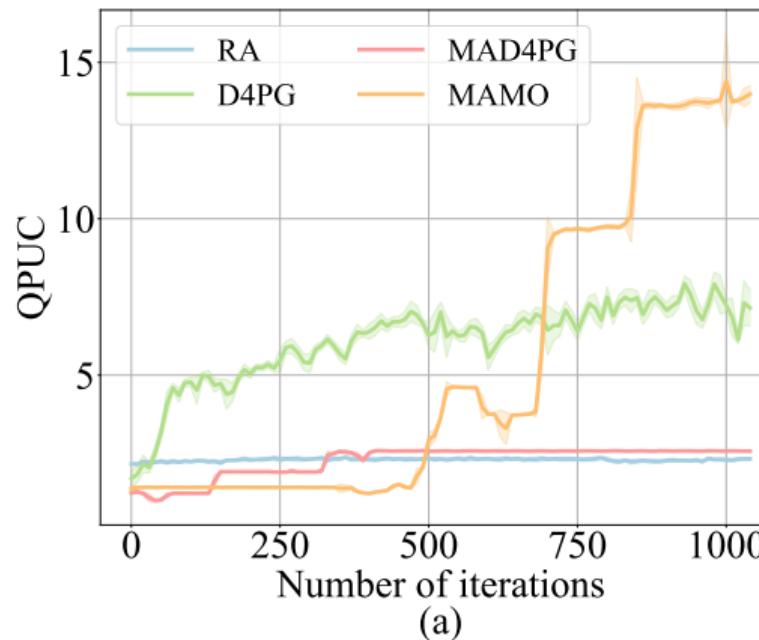
## □ 对比算法

- 随机分配 (RA)
- 分布式深度确定性策略梯度 (D4PG)
- 多智能体分布式深度确定性策略梯度 (MAD4PG)

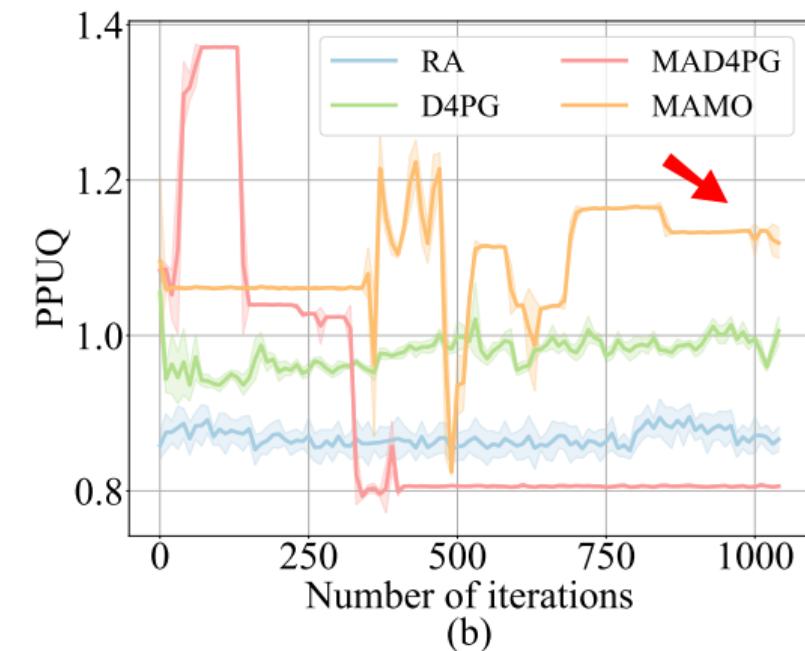
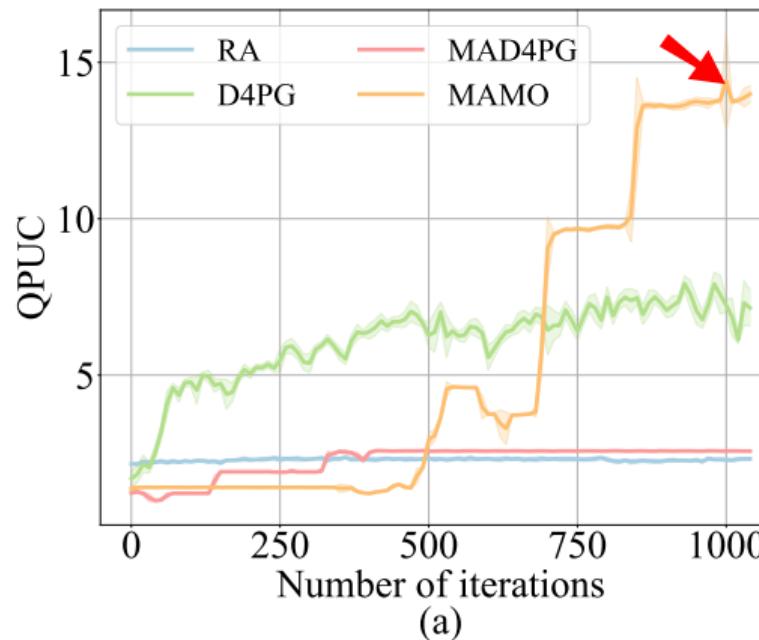
## □ 性能评估指标

- 单位开销质量 (QPUQ)
 
$$QPUQ = \frac{\sum_{\forall t \in T} \sum_{\forall e \in E} \sum_{\forall i \in I_e^t} QV_i}{\sum_{\forall t \in T} \sum_{\forall e \in E} \sum_{\forall i \in I_e^t} CV_i}$$
- 单位质量利润 (PPUQ)
 
$$PPUQ = \frac{\sum_{\forall t \in T} \sum_{\forall e \in E} \sum_{\forall i \in I_e^t} PV_i}{\sum_{\forall t \in T} \sum_{\forall e \in E} \sum_{\forall i \in I_e^t} QV_i}$$
- 平均及时性 (AT)    平均冗余度 (AR)
- 平均感知开销 (ASC)    平均传输开销 (ATC)

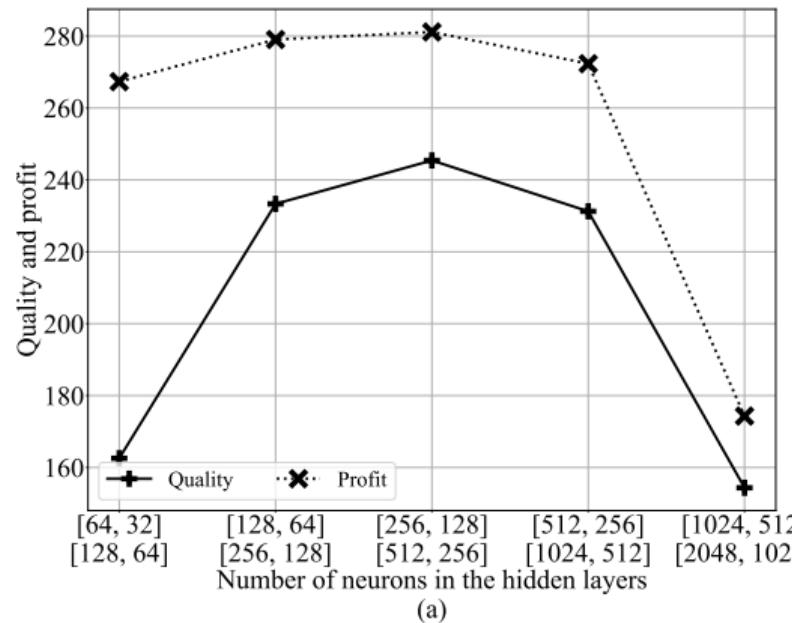
## 实验：算法收敛性



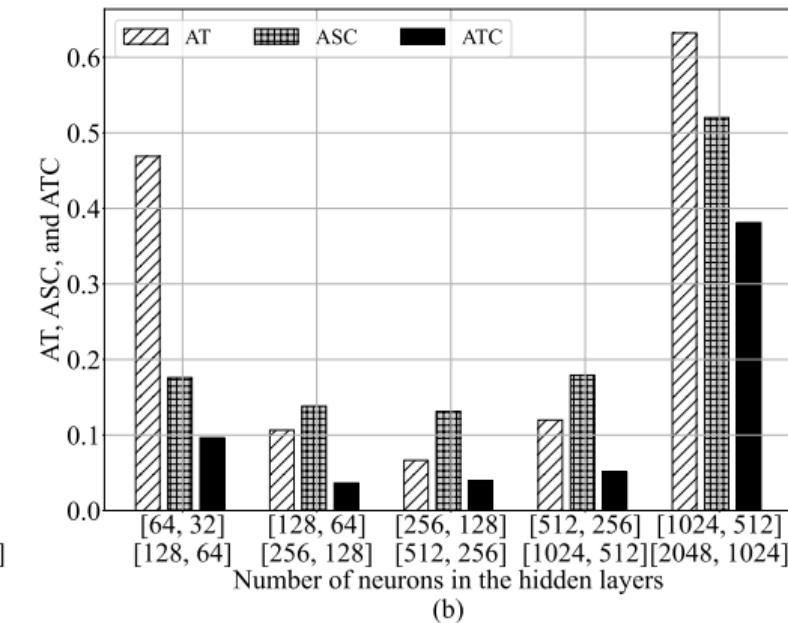
## 实验：算法收敛性



## 实验：神经元数量的影响

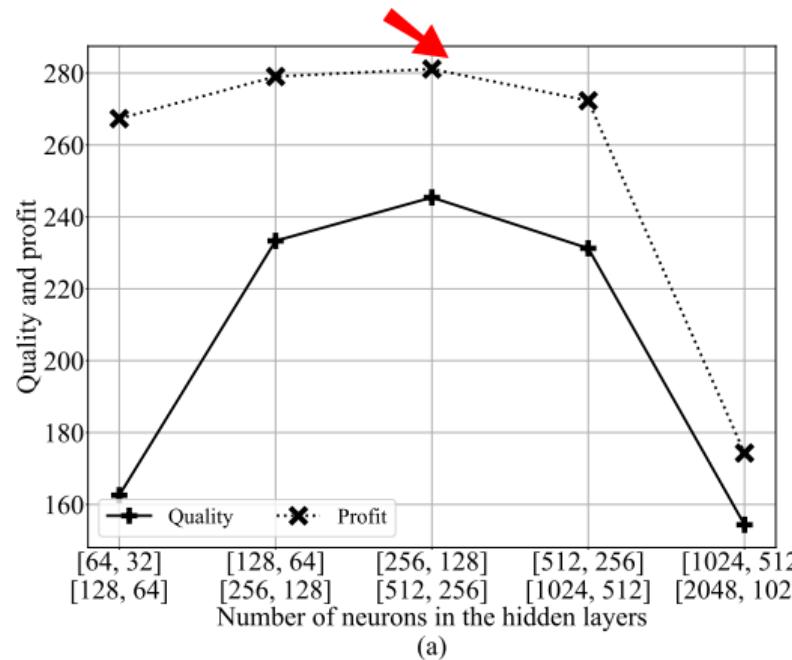


(a)

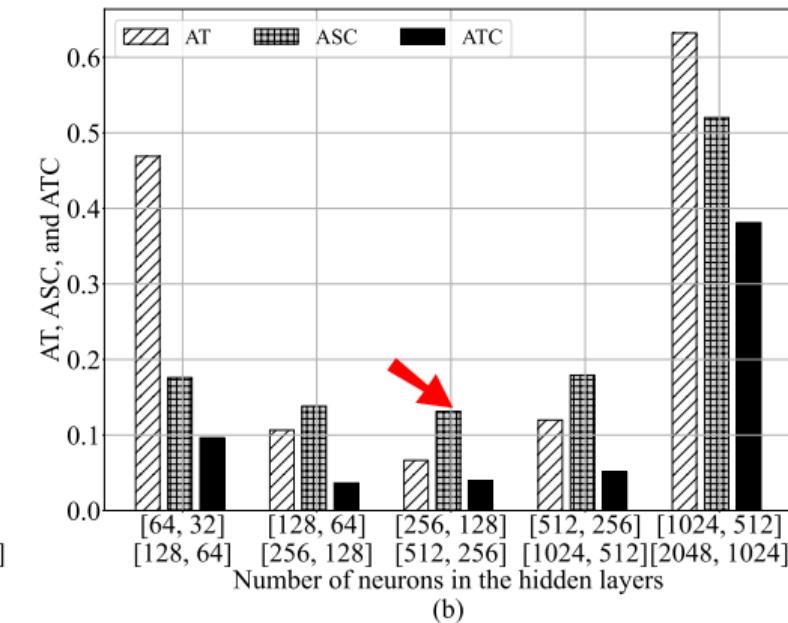


(b)

## 实验：神经元数量的影响



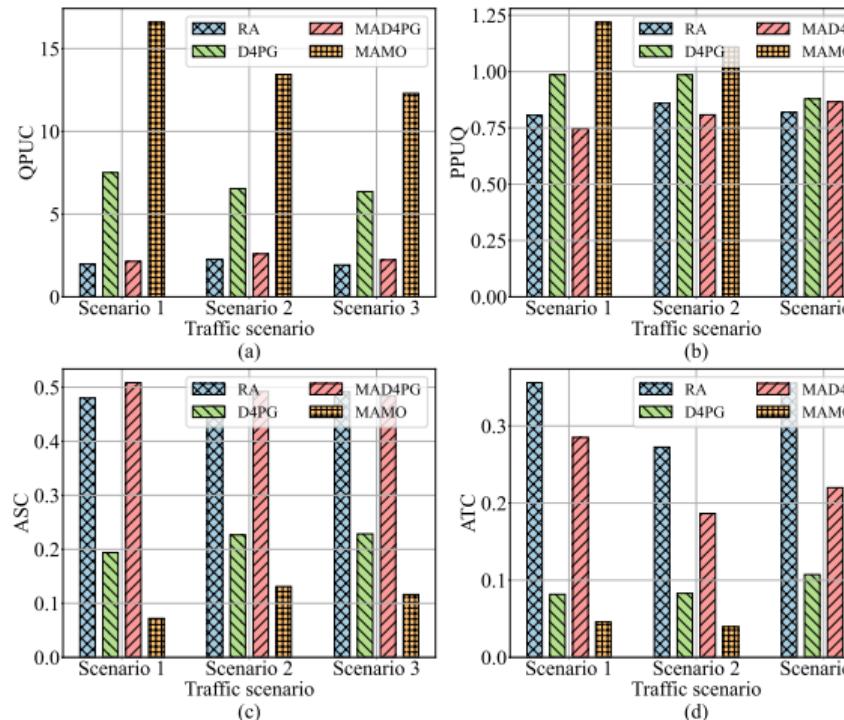
(a)



(b)

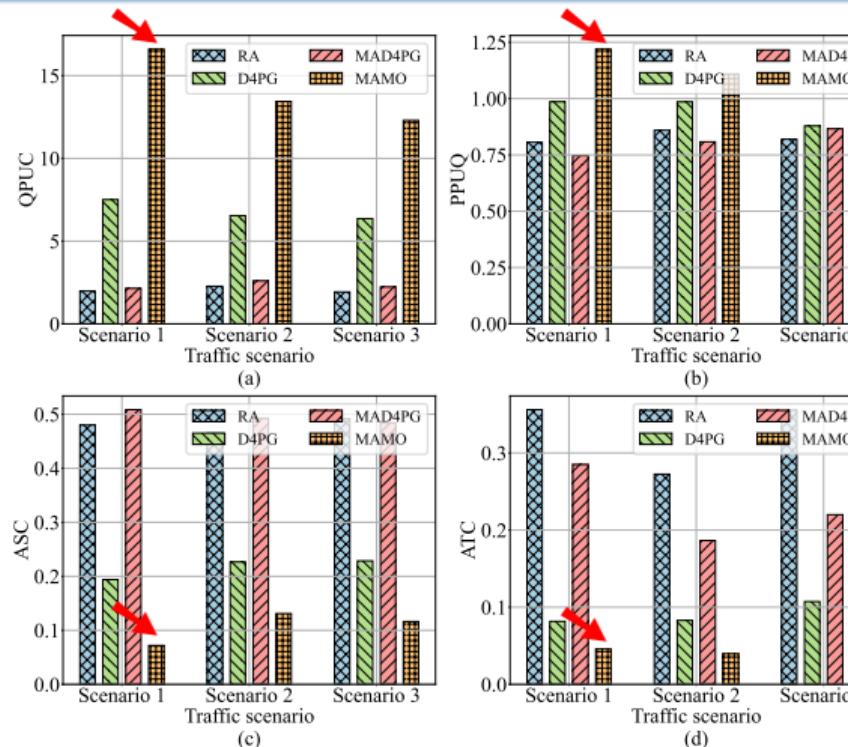
## 2 研究内容及贡献

## 2.3 面向车载信息物理融合的质量-开销均衡优化

实验：交通场景的影响

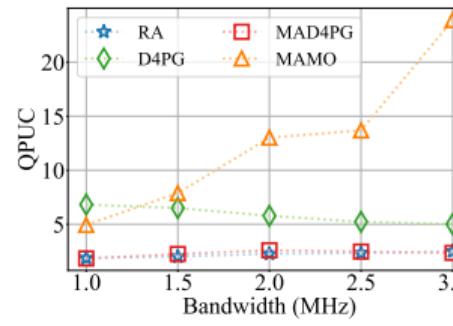
## 2 研究内容及贡献

## 2.3 面向车载信息物理融合的质量-开销均衡优化

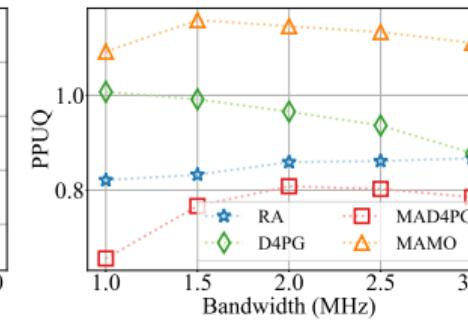
实验：交通场景的影响

## 2 研究内容及贡献

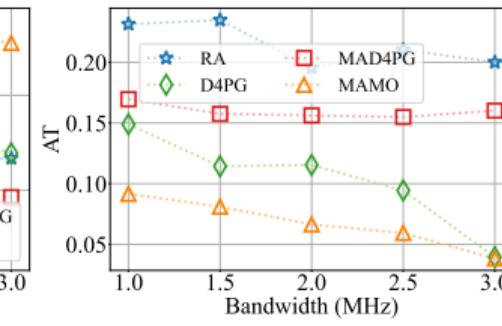
## 2.3 面向车载信息物理融合的质量-开销均衡优化

实验：V2I 带宽的影响

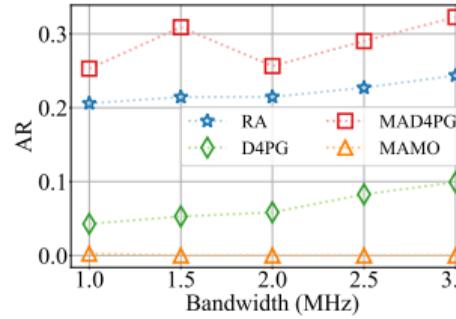
(a)



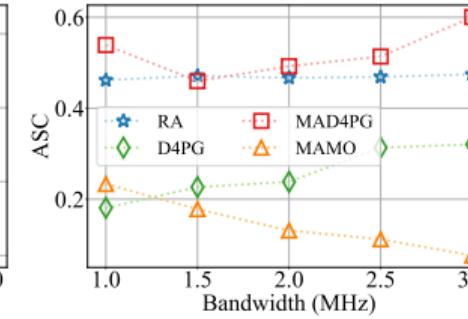
(b)



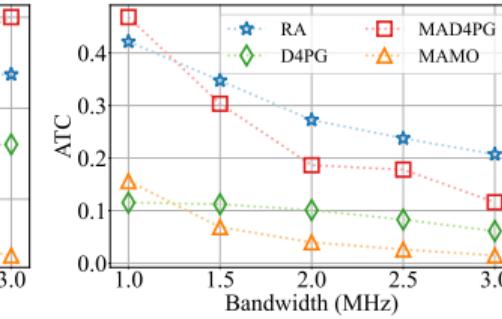
(c)



(d)



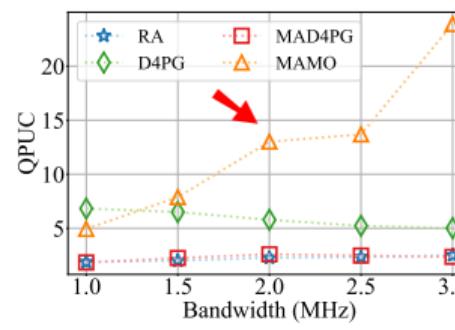
(e)



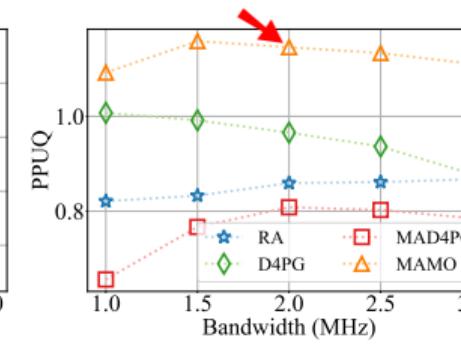
(f)

## 2 研究内容及贡献

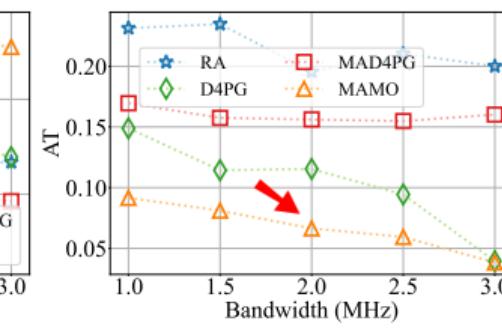
## 2.3 面向车载信息物理融合的质量-开销均衡优化

实验：V2I 带宽的影响

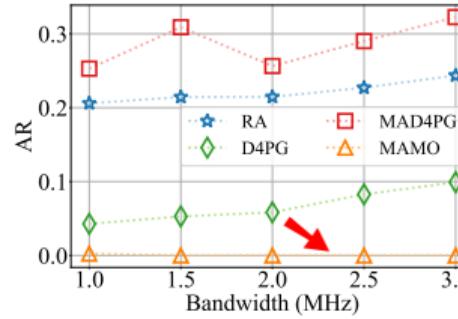
(a)



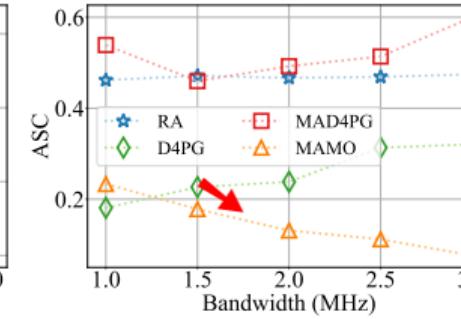
(b)



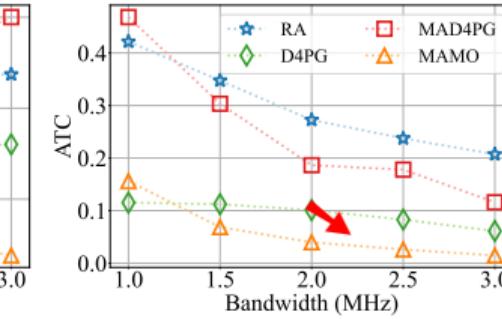
(c)



(d)



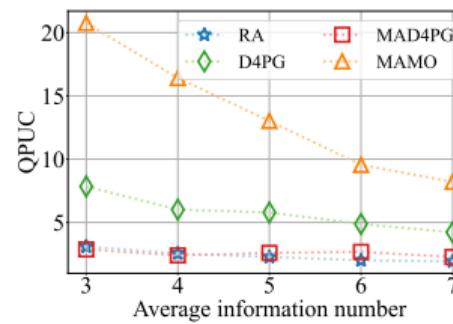
(e)



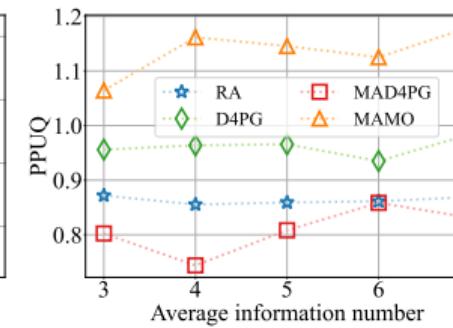
(f)

## 2 研究内容及贡献

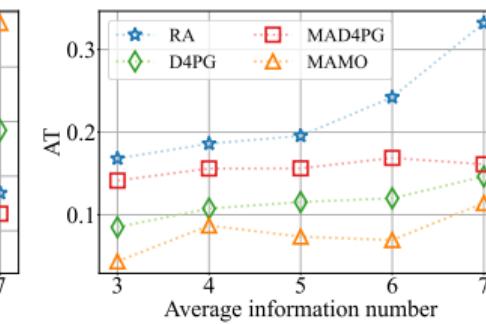
## 2.3 面向车载信息物理融合的质量-开销均衡优化

实验：视图需求的影响

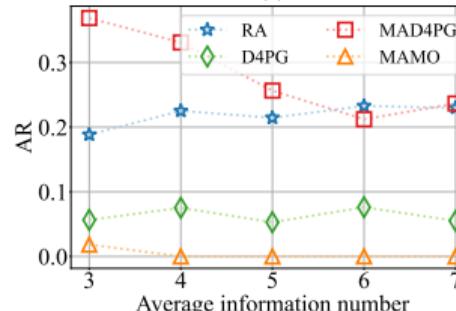
(a)



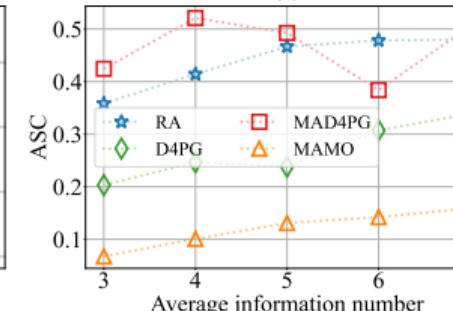
(b)



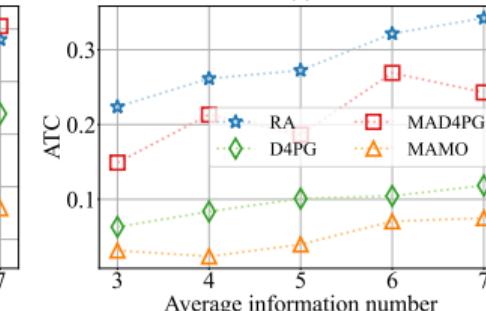
(c)



(d)



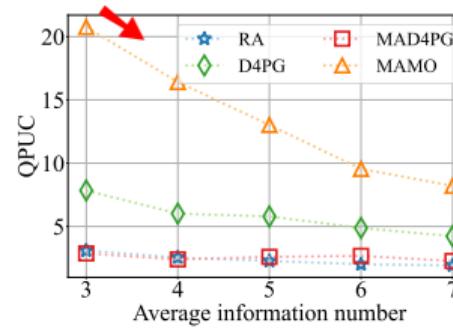
(e)



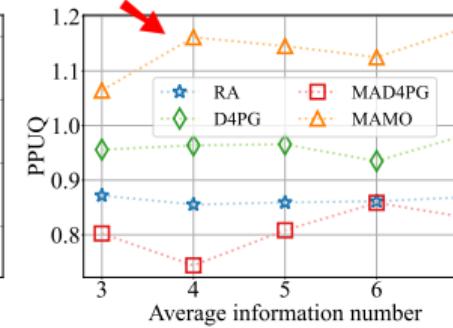
(f)

## 2 研究内容及贡献

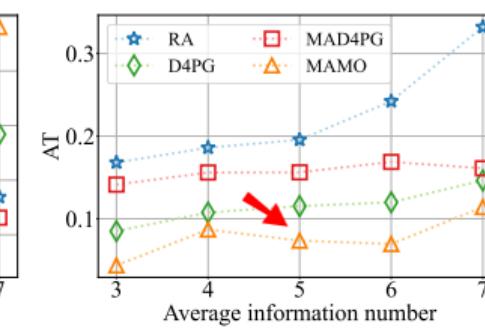
## 2.3 面向车载信息物理融合的质量-开销均衡优化

实验：视图需求的影响

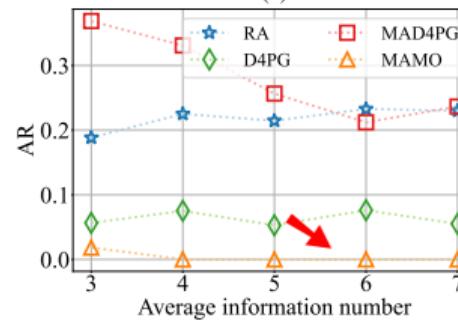
(a)



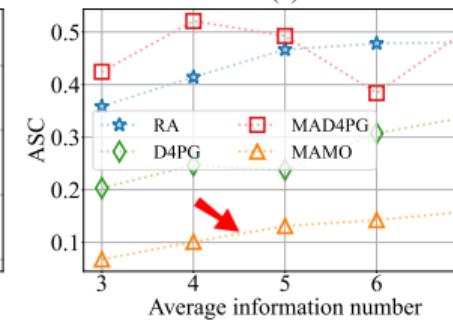
(b)



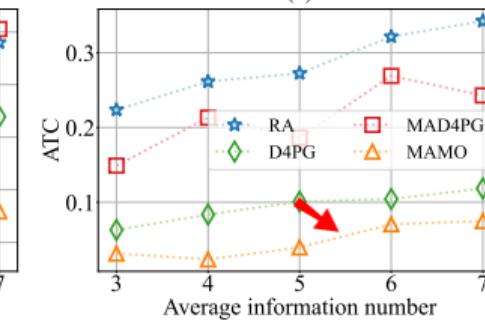
(c)



(d)



(e)



(f)

## ① 研究背景

## ② 研究内容及贡献

2.1 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化

2.2 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化

2.3 面向车载信息物理融合的质量-开销均衡优化

2.4 超视距碰撞预警原型系统设计及实现

## ③ 总结与展望

## ④ 研究成果总结



## 2 研究内容及贡献

## 2.4 超视距碰撞预警原型系统设计及实现

## 研究贡献

原型系统的设计和实现是针对 VCPS 必要的验证手段

□ 算法：基于 VCPS 优化的碰撞预警

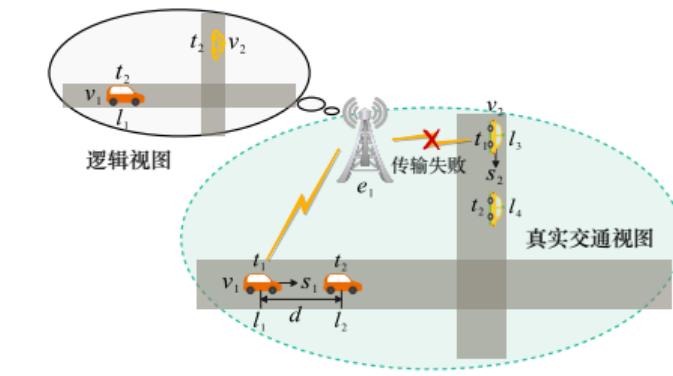
- 基于稳定分布的 V2I 应用层传输时延拟合模型
- 基于车辆轨迹和历史信息的丢包检测机制

□ 系统：超视距碰撞预警原型系统

- 基于 C-V2X 设备的硬件在环试验平台
- 原型系统实现

[6] XU X, LIU K, XIAO K, et al. Vehicular fog computing enabled real-time collision warning via trajectory calibration[J]. Mobile Networks and Applications (MONET), 2020, 25(6): 2482-2494. 影响因子: 3.077(2021), 2.92(5 年) (中科院 SCI 3 区)

[7] XU X, LIU K, XIAO K, et al. Design and implementation of a fog computing based collision warning system in VANETs[C]. IEEE ISPCE-CN, 2018. (最佳论文奖)



## 算法：流程

### □ 车辆状态更新

- 基于 V2I 传输时延拟合模型估计传输时延
- 根据车辆速度和加速度更新其实时状态

### □ 丢包检测

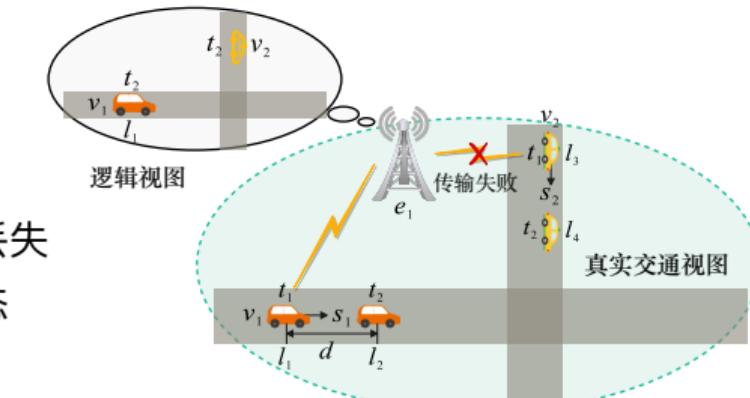
- 根据历史位置判断车辆是否在通信范围内
- 在通信范围内却未收到数据包，则认为已丢失
- 丢失的数据包使用历史记录更新它们的状态

### □ 轨迹预测

- 基于修正的视图预测所有车辆未来的轨迹

### □ 碰撞预警

- 计算每对车辆的车头时距
- 通过车头时距阈值来检测潜在碰撞



## 算法：V2I 应用层时延拟合模型

### □ 数据

- 现场测试得到传输时延数据
- 分布不服从高斯分布

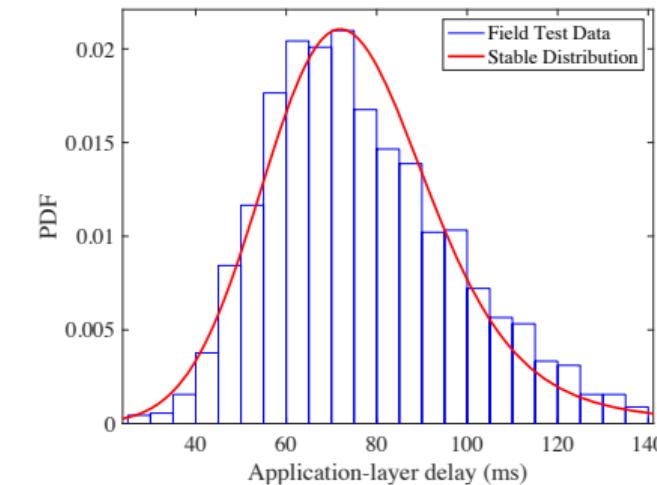
### □ 稳定分布

- 适用于对非高斯过程进行估计

$$E \exp(itX) = \begin{cases} \exp\{-\sigma^\alpha |t|^\alpha [1 - i\beta \tan(\alpha\pi/2) \operatorname{sgn}(t)] + i\mu t\}, & \alpha \neq 1 \\ \exp\{-\sigma|t[1 + i\beta(2/\pi) \operatorname{sgn}(t) \ln(|t|)] + i\mu t\}, & \alpha = 1 \end{cases}$$

### □ 拟合结果

- 几乎是对称的 ( $\alpha = 1.77395$ )
- 围绕均值 ( $\mu = 72.7343$ )
- 分布具有左偏度 ( $\beta = 1$ )
- 与均值的离散程度较大 ( $\sigma = 13.3685$ )



## 系统：硬件在环平台框架

### □ 硬件设备

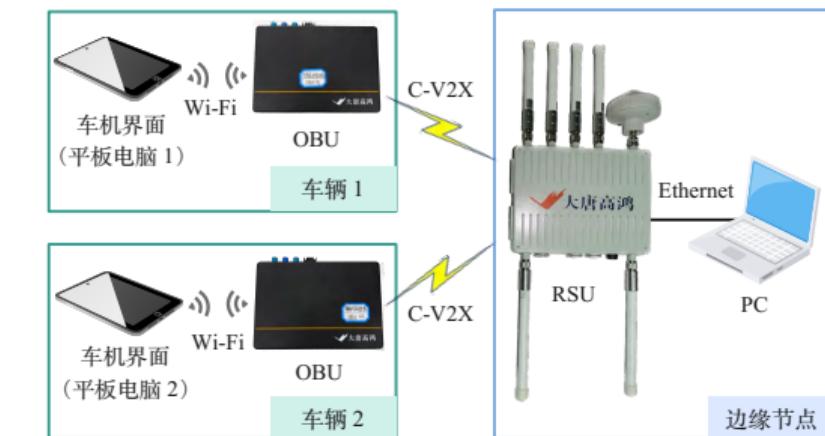
- C-V2X 车载终端 (OBU) 和路侧设备 (RSU)
- LTE-V2X PC5 和 5G UU 双模通信能力
- 具有 GNSS 天线，可接收 GPS 卫星信号

### □ 车端

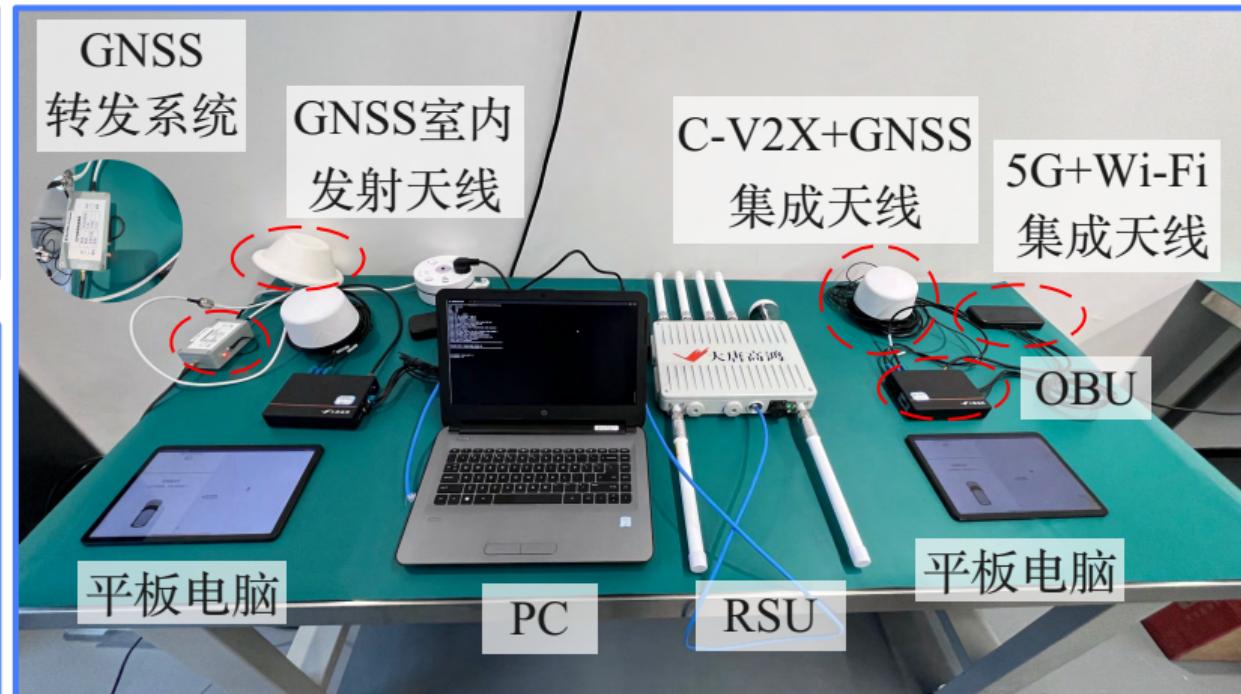
- OBU 与平板电脑通过 Wi-Fi 相互通信
- 平板电脑可作为车机界面进行碰撞预警消息的可视化

### □ 边缘端

- PC 通过以太网与 RSU 相连
- PC 作为计算单元提供服务



## 基于 C-V2X 的硬件在环试验平台



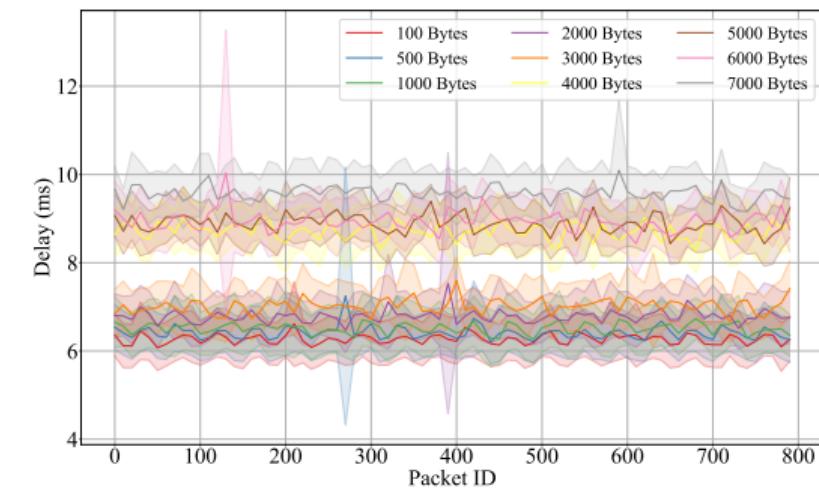
## 系统：C-V2X 端到端时延

### □ 数据包设置

- 以 10 Hz 的频率分别发送 1000 个数据包
- 大小从 100 Bytes 增加至 7000 Bytes

### □ 时延结果分析

- 最小数据包 (100 Bytes) 平均时延最短 (6.271 ms)
- 最大数据包 (7000 Bytes) 平均时延最长 (9.570 ms)



## 系统：超视距碰撞预警原型系统

① 研究背景

② 研究内容及贡献

③ 总结与展望

④ 研究成果总结



# 总结与展望

## □ 工作总结

- 架构: 车联网分层服务架构, 有机融合 SDN 与 MEC
- 指标: 车载信息物理融合质量指标, 考虑时效性、完整性和一致性
- MADR 算法: 有效提高 VCPS 质量
- CRO 问题: 协同传输与计算, 以最大化任务完成率
- MAGT 算法: 有效提高任务完成率
- 双目标优化问题: 车载信息物理融合系统质量模型和开销模型
- MAMO 算法: 有效实现质量和开销的均衡

## □ 研究展望

- 边缘节点之间的合作
- 车联网端边云架构, 车辆、边缘节点和云协同

① 研究背景

② 研究内容及贡献

③ 总结与展望

④ 研究成果总结



## 论文发表 (第一作者或二作 (导师一作) 7 篇, 另有 2 篇在投)

- 1 XU X, LIU K, DAI P, et al. Joint task offloading and resource optimization in NOMA-based vehicular edge computing: A game-theoretic DRL approach[J]. *Journal of Systems Architecture (JSA)*, 2023. (中科院 SCI 2 区)
- 2 许新操, 刘凯, 刘春晖, 等. 基于势博奕的车载边缘计算信道分配方法 [J]. *电子学报*, 2021. (CCF T1 类中文期刊)
- 3 XU X, LIU K, XIAO K, et al. Vehicular fog computing enabled real-time collision warning via trajectory calibration[J]. *Mobile Networks and Applications (MONET)*, 2020. (中科院 SCI 3 区)
- 4 LIU K, XU X, CHEN M, et al. A hierarchical architecture for the future Internet of Vehicles[J]. *IEEE Communications Magazine (ComMag)*, 2019. (中科院 SCI 1 区)
- 5 XU X, LIU K, ZHANG Q, et al. Age of view: A new metric for evaluating heterogeneous information fusion in vehicular cyber-physical systems[C]. *IEEE ITSC*, 2022. (智能交通领域重要会议)



## 论文发表 (第一作者或二作 (导师一作) 7 篇, 另有 2 篇在投)

- 6 许新操, 周易, 刘凯, 等. 车载雾计算环境中基于势博弈的分布式信道分配 [C]. CWSN, 2020. (最佳论文候选)
- 7 XU X, LIU K, XIAO K, et al. Design and implementation of a fog computing based collision warning system in VANETs[C]. IEEE ISPCE-CN, 2018. (最佳论文奖)
- 8 XU X, LIU K, DAI P, et al. Cooperative sensing and heterogeneous information fusion in VCPS: A multi-agent deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (T-ITS), under major revision. (中科院 SCI 1 区)
- 9 LIU K, XU X, DAI P, et al. Cooperative sensing and uploading for quality-cost tradeoff of digital twins in VEC[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics (TCE), under minor revision. (中科院 SCI 2 区)



## 论文发表 (合作作者 6 篇)

- 1 LIU C, LIU K, REN H, XU X, et al. RtDS: Real-time distributed strategy for multi-period task offloading in vehicular edge computing environment[J]. *Neural Computing and Applications*, to appear. (中科院 SCI 2 区)
- 2 XIAO K, LIU K, XU X, et al. Cooperative coding and caching scheduling via binary particle swarm optimization in software defined vehicular networks[J]. *Neural Computing and Applications*, 2021. (中科院 SCI 2 区)
- 3 XIAO K, LIU K, XU X, et al. Efficient fog-assisted heterogeneous data services in software defined VANETs[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2021. (中科院 SCI 3 区)
- 4 LIU C, LIU K, XU X, et al. Real-time task offloading for data and computation intensive services in vehicular fog computing environments[C]. *IEEE MSN*, 2020. (CCF C 类国际会议)
- 5 ZHOU Y, LIU K, XU X, et al. Multi-period distributed delay-sensitive tasks offloading in a two-layer vehicular fog computing architecture[C]. *NCAA*, 2020. (EI 索引)
- 6 ZHOU Y, LIU K, XU X, et al. Distributed scheduling for time-critical tasks in a two-layer vehicular fog computing architecture[C]. *IEEE CCNC*, 2020. (EI 索引)

# 代码开源 (获得 100+ GitHub Stars)

## 1 基于差分奖励的多智能体强化学习源代码

<https://github.com/neardws/Multi-Agent-Deep-Reinforcement-Learning>

## 2 基于博弈理论的多智能体强化学习源代码

<https://github.com/neardws/Game-Theoretic-Deep-Reinforcement-Learning>

## 3 基于多目标的多智能体强化学习源代码

<https://github.com/neardws/MAMO-Deep-Reinforcement-Learning>

## 4 基于视图校准的碰撞预警源代码

<https://github.com/neardws/fog-computing-based-collision-warning-system>

## 5 基于 C-V2X 通信的碰撞预警原型系统实现源代码

<https://github.com/neardws/V2X-based-Collision-Warning>

## 6 滴滴 GAIA 数据集处理源代码

<https://github.com/neardws/Vehicular-Trajectories-Processing-for-Didi-Open-Data>

### Near's GitHub Stats

☆ Total Stars:	120
⌚ Total Commits (2023):	344
🍴 Total PRs:	24
ⓘ Total Issues:	7
👤 Contributed to:	11



 [neardws / Game-Theoretic-Deep-R...](#)

53  
Stars

23  
Forks

5  
Issues & PRs

- ⓘ Code of Paper "Joint Task Offloading and Resource Optimization in NOMA-based Vehicular Edge Computing: A Game-Theoretic DRL Approach", JSA 2022.
- ⓘ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S138376212200265X>

# 科研项目与专利

## □ 参与科研项目

- **国家自然科学基金面上项目**, “面向车联网边缘智能的计算模型部署与协同跨域优化”, 项目编号: 62172064, 2022/01—2025/12. (在研)
- **国家自然科学基金面上项目**, “面向大规模数据服务的异构融合车联网架构与协议研究”, 项目编号: 61872049, 2019/01—2022/12. (结题)

## □ 申请发明专利

- 许新操, 刘凯, 李东. 一种针对软件定义车联网的控制平面视图构建方法. **已授权**. 专利号: ZL202110591822.1.
- 刘凯, 张浪, 许新操, 任华玲, 周易. 一种基于边缘计算的盲区车辆碰撞预警方法. **已授权**. 专利号: ZL201910418745.2.
- 任华玲, 刘凯, 陈梦良, 周易, 许新操. 一种基于雾计算的信息采集、计算、传输架构. **已授权**. 专利号: ZL201910146357.3.

## 盲审意见与修改情况

### □ 总体评价 ABB

### □ 评审专家 1

- ✓ 车联网分层架构详细阐述
- ✓ VCPS 质量定义增加实例

### □ 评审专家 2

- ✓ 数据平面和控制平面概念介绍
- ✓ 论文符号定义优化

### □ 评审专家 3

- ✓ 排版问题
- ✓ 碰撞预警系统图详细阐述

# 致谢

感谢刘凯教授多年的辛勤指导！

感谢各位专家的指导！

感谢所有给予我帮助的老师和同学！

敬请批评指正！