

文章编号:1007-5321(2021)02-0109-07

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-088

车联网基于信任度的 RSU 识别及资源分配算法

黄晓舸, 王永生, 赖晨彬, 陈前斌

(重庆邮电大学 移动通信重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 在车联网中,由于部分路侧单元(RSU)的位置比较偏远,无法得到网络管理员的及时维护,可能遭到攻击,变为不可信任的路侧单元,降低了车辆的通信质量和网络能效. 为了有效地识别 RSU 的可靠性,提出了一种基于信任度的路侧单元识别及资源分配算法,将路侧单元识别、传输模式的选择和功率分配联合建模为网络能效的优化问题,并分成 3 个子优化问题,分别求解. 首先,采用基于信任度的 RSU 识别算法,识别出可信任和不可信任的路侧单元;其次,优化车辆资源块配置和链路选择;最后,通过次梯度算法优化传输功率,最大化网络能效. 理论分析和仿真结果表明,所提算法具备较低的复杂度,可以达到较高的路侧单元识别准确度,并有效地提升网络总能效.

关键词: 资源分配; 信任度; 路侧单元识别; 网络能效

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

Trust Degree Based RSU Recognition and Resource Allocation in Vehicular Networks

HUANG Xiao-ge, WANG Yong-sheng, LAI Chen-bin, CHEN Qian-bin

(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In network of vehicles, due to some roadside units (RSU) are remote and cannot be maintained timely by network administrator, they may be attacked and become untrustworthy RSUs, resulting in reduction of vehicle communication quality and network energy efficiency. To effectively identify the reliability of the RSU, a trust degree-based RSU recognition and resource allocation algorithm (TRRA) is proposed. In this algorithm, roadside unit identification, transmission mode selection, and power allocation are jointly modeled as the network energy efficiency optimization problem, which is divided into three sub-optimization problems to solve respectively. Firstly, the trust degree-based RSU recognition algorithm is used to identify the trusted and untrusted roadside units; Secondly, the resource block allocation and the link selection are optimized; Finally, the sub-gradient algorithm is used to optimize the transmission power and maximize the network energy efficiency. Simulations show that the proposed algorithm has lower complexity, which can achieve higher recognition accuracy of roadside units, and effectively improve the overall network energy efficiency.

Key words: resource allocation; trust degree; road side unit identification; network energy efficiency

近年来,车联网在道路安全和车载娱乐方面的 各种潜在应用,引起了学术界和工业界的广泛关

收稿日期: 2020-07-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61831002); 重庆市科委重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAx0383)

作者简介: 黄晓舸(1982—),女,教授, E-mail: huangxg@cqupt.edu.cn.

注^[1]. 随着车联网中车辆数量的增加,将产生海量的数据信息,车辆和临近车辆以及路边单元(RSU, roadside unit)有大量的数据交互^[2],会遭到各种类型的网络攻击,成为不可信任RSU节点,导致数据泄露和损坏. 当网络中出现不可信任RSU节点时,其通过广播虚假信息扰乱车辆与RSU的匹配,诱导车辆接入,从而窃取用户信息,影响网络的能效.

目前,已有许多研究对车联网中节点安全提升的问题进行了探讨,主要包括:基于区块链的节点安全性提升方案和基于信任度的节点安全性提升方案. 在文献[3]中,作者提出了基于区块链的分布式软件定义车联网框架,考虑了区块链节点的信任特征和共识节点的数量,基于拜占庭容错算法,在复杂的车辆环境下达成共识,保证节点的安全性. 在文献[4]中,作者在车辆区块链上部署智能合约,基于工作量证明共识算法(PoW, proof of work),在RSU上实现安全高效的数据存储和车辆之间的数据共享. 为了有效识别节点的可信程度,通常采用信任管理机制,信任度越高,节点发布消息的可信度越高;反之,信任度越低,节点发布信息的可信度越低. 在文献[5]中,作者提出了基于证据联合的车联网安全性提升方案. 该方案中,车辆将本地数据与外部证据进行对比,评估车辆从其他车辆接收到多维数据的可靠性,有助于准确地计算车辆的直接信任度.

为了有效地识别RSU的可靠性,笔者提出了基于信任度的RSU识别和资源分配算法(TRRA, trust degree based RSU recognition and resource allocation algorithm),以提高车联网的安全性和网络总能效,给出了仿真和分析结果.

1 系统模型

1.1 网络模型

车联网的网络模型如图1所示. 图1中,①号链路表示蜂窝链路,②号链路表示直接传输链路(V2V, vehicle to vehicle),③号链路表示中继传输链路(V2I, vehicle to infrastructure),RSU中虚线框选的部分RSU为不可信任RSU节点. 假设网络中有 K 个蜂窝链路,蜂窝链路集合为 $K = \{1, 2, \dots, k, \dots, K\}$,将 I 个传输车辆 $V^t = \{V_1^t, V_2^t, \dots, V_i^t, \dots, V_I^t\}$ 和 J 个接收车辆 $V^r = \{V_1^r, V_2^r, \dots, V_j^r, \dots, V_J^r\}$ 一一配对,形成传输车辆到接收车辆(T-R, transmission to reception)的链路 $\phi = \{1, 2, \dots, i, \dots, I\}$,记为 V_i . V_i 通

过复用蜂窝链路的资源块进行数据传输. 假设 $I \leq K$,即蜂窝链路的数量大于车辆传输对数量,即可以保证车辆对的传输需求. 为了更好地支持车辆的移动性,RSU按照一定的间隔均匀部署在道路两旁,为车辆提供数据传输服务和相关的信令消息. 备选的中继RSU节点集合为 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n, \dots, R_N\}$,其中,不可信任的RSU节点数量为 m .

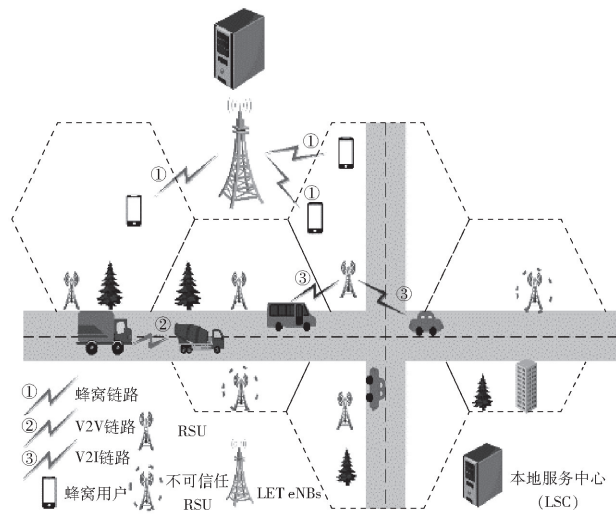


图1 车联网网络模型

传输车辆 V_i^t 到接收车辆 V_j^r 有V2V链路传输模式和V2I链路传输模式2种传输方式. 在V2V传输模式中,传输车辆直接与接收车辆通信;在V2I传输模式中,通信被分为2个传输过程:传输车辆到中继RSU(V-I)的通信;中继RSU到接收车辆(I-V)的通信.

1.2 通信模型

在车联网场景中,当 V_i 有传输任务时,首先决定传输模式,即决策向量的集合为 $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_I\}$,其中, $x_i = 1$ 表示 V_i 选择V2V传输模式; $x_i = 0$ 表示 V_i 选择V2I传输模式.

当 V_i 采用V2V传输模式,复用蜂窝链路资源块为 k 时,其信噪比可表示为

$$\gamma_{V2V}^{i,j} = \frac{P_{V_i} d_{i,j}^{-a_1}}{P_{C_k} d_{k,j}^{-a_2} + N_0} \quad (1)$$

其中: P_{V_i} 和 P_{C_k} 分别为 V_i 和蜂窝用户 k 的传输功率, $d_{i,j}$ 和 $d_{k,j}$ 分别为传输车辆 i 到接收车辆 j 和蜂窝用户 k 到接收车辆 j 的距离, a_1 和 a_2 分别表示V2V链路和蜂窝链路的路径损耗, N_0 为加性高斯白噪声. 由此,根据香农公式可以计算出 V_i 在V2V传输模式下的传输速率为

$$R_{V2V}^i = \text{lb}(1 + \gamma_{V2V}^i) \quad (2)$$

综上, V_i 在 V2V 传输模式下的能效可表示为网络传输速率与网络功率消耗的比值^[6], 即

$$E_{V2V}^i = \frac{R_{V2V}^i}{P_{V_i}} \quad (3)$$

同样, 当 V_i 采用 V2I 传输模式时, 传输车辆 V_i 与传输中继第 n 个 RSU 的信噪比可表示为

$$\gamma_{V2I}^{i,n} = \frac{P_{V_i} d_{i,n}^{-a_3}}{P_{C_k} d_{k,n}^{-a_2} + N_0} \quad (4)$$

其中: $d_{i,n}$ 和 $d_{k,n}$ 分别为传输车辆 i 到第 n 个 RSU 和蜂窝用户 k 到第 n 个 RSU 的距离, a_3 表示 V2I 链路的路径损耗。这里令中继第 n 个 RSU 的传输功率与传输车辆的功率相等, 即 $P_{V_i} = P_n$ 。因此, 中继第 n 个 RSU 到接收车辆 V_i 之间的信噪比可表示为

$$\gamma_{V2I}^{n,i} = \frac{P_{V_i} d_{n,i}^{-a_3}}{P_{C_k} d_{k,i}^{-a_2} + N_0} \quad (5)$$

由此, 在 V2I 传输模式中, V_i 以第 n 个 RSU 为中继的接收信噪比可以表示为

$$\gamma_{V2I}^i = \min(\gamma_{V2I}^{i,n}, \gamma_{V2I}^{n,i}) \quad (6)$$

V_i 在 V2I 传输模式的能效可表示为

$$E_{V2I}^i = \frac{\text{lb}(1 + \gamma_{V2I}^i)}{2P_{V_i}} \quad (7)$$

定理 1 系统能效最大化的充要条件是车辆对 V_i 的能效最大。

证明 首先, 令 E_i^* 表示车辆对 V_i 的最大能效, 当每个 V_i 的能效都达到最优值 E_i^* , 很明显, E_i^* 的求和结果在系统中也为最大, 系统能效达到了最优值 E^* 。因此, 有

$$E^* = \sum_{i=1}^I E_i^* \quad (8)$$

当系统总能效值达到最优 E^* 时, 假设此时 V_i 有另一个能效值 E' , $E_i' > E_i^*$, 分别定义为

$$E' = \sum_{i=1}^I (E_1^* + E_2^* + \cdots + E_i' + \cdots + E_I^*) \quad (9)$$

$$E^* = \sum_{i=1}^I (E_1^* + E_2^* + \cdots + E_i^* + \cdots + E_I^*) \quad (10)$$

通过假设 $E_i' > E_i^*$ 可得 $E' > E^*$, 与 E^* 为最大能效值的条件相矛盾。因此, 假设错误。当得到最优总能效 E^* 时, 车辆对 V_i 的能效值 E_i^* 也为最大。

综上所述, 车联网能效最大化等效为车辆对 V_i 能效最大化, 可表示为

$$E = \sum_k \sum_i \rho_{i,k} [x_i E_{V2V}^i + (1 - x_i) E_{V2I}^i] \quad (11)$$

其中: $\rho_{i,k} = 1$ 表示资源块 k 分配给车辆对 V_i , $\rho_{i,k} = 0$ 表示资源块 k 未分配给车辆对 V_i 。

2 相关算法

2.1 基于信任度的 RSU 识别算法

在车联网中, 为吸引车辆接入, RSU 可能会上报虚假的信噪比 (SINR, signal to interference plus noise ratio) 信息给本地服务中心 (LSC, local service center), 例如, 为了增加车辆的接入概率, 不可信任 RSU 节点会谎报接收 SINR 信息, 被篡改后的接收信噪比为

$$S_t = S_t + S_{\text{add}} \quad (12)$$

其中: S_t 为实际的接收信噪比, S_{add} 为篡改增量, S_t 为篡改后的接收信噪比。由此可以看出, 当车辆进行 RSU 匹配时, RSU 通过篡改接收信噪比 S_t , 将增大车辆的接入概率。而实际车辆接入该 RSU 节点时, 其传输速率远低于预期值, 从而导致传输链路中断, 车联网能效降低, 严重影响车联网的安全性和可靠性。为了提高车辆用户数据传输的安全性, 提出了基于信任度的 RSU 识别算法, 主要包括以下 3 个步骤。

步骤 1 建立车辆与 RSU 的 SINR 矩阵。传输车辆 i 通过 LSC 向周围的 RSU 发送请求并建立初始 RSU 集合。第 n 个 RSU 接收到 LSC 的请求后, 将其到传输车辆 i 的 SINR 发送给 LSC, LSC 建立车辆 i 与第 n 个 RSU 的 SINR 矩阵, 有

$$A = \begin{bmatrix} S_{1,1} & \cdots & S_{1,n} & \cdots & S_{1,N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S_{i,1} & \cdots & S_{i,n} & \cdots & S_{i,N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S_{I,1} & \cdots & S_{I,n} & \cdots & S_{I,N} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中 $S_{i,n}$ 表示第 n 个 RSU 向 LSC 播报的传输车辆 i 的 SINR 值。

步骤 2 对 RSU 节点进行评分。LSC 根据车辆 i 与第 n 个 RSU 的 SINR 矩阵, 通过空间相关度理论为第 n 个 RSU 评分。空间相关度理论是空间统计中的常用标准, 主要用来判断局部范围内 1 个单元与其相邻单元间特征信息的相关性^[7]。通过计算相邻区域范围内 RSU 节点间 SINR 信息的相关性, 来识别 RSU 节点是否可信。RSU 与相邻区域内其他 RSU 节点的特征信息相似度越高, 相应的空间相关

度越小. 因此, 可信任 RSU 之间的空间相关度小于不可信任 RSU 与可信任 RSU 之间的空间相关度. V_i 的备选 RSU 的空间相关度可由下式计算^[7]:

$$C_{i,n} = \frac{\sum_{m=1}^M w_{n,m} (S_{i,n} - S_{i,m})^2}{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^M (S_{i,n} - \bar{S}_i)^2} \quad (14)$$

其中: N 为 V_i 备选集合中 RSU 的总个数, $S_{i,n}$ 和 $S_{i,m}$ 分别为第 n 个 RSU 和第 m 个 RSU 上报的接收到 V_i 的 SINR 值, \bar{S}_i 为备选集合中 RSU 接收到 V_i 的 SINR 平均值. $w_{n,m} = d_{n,m}^{-1}$, $w_{n,m} \in (0, 1)$, 是第 n 个 RSU 和第 m 个 RSU 的空间相关度权重因子, $d_{n,m}$ 为第 n 个 RSU 到第 m 个 RSU 间的距离.

基于空间相关度 $C_{i,n}$, 对用户做如下处理:

$$D_{i,n} = \begin{cases} 1, & \text{若 } C_{i,n} > \varepsilon_0 \\ 0, & \text{若 } C_{i,n} \leq \varepsilon_0 \end{cases} \quad (15)$$

其中: $D_{i,n} = 1$ 表示 LSC 根据车辆 i 与第 n 个 RSU 的相关度信息对第 n 个 RSU 进行负面评分; 反之, $D_{i,n} = 0$ 表示 LSC 根据车辆 i 与第 n 个 RSU 的相关度信息对第 n 个 RSU 进行正面评分; ε_0 为 RSU 判定门限, 可通过遍历搜索算法得到. 由于同一时刻内, RSU 节点会收到多个传输车辆的接入请求, 并将接收到的不同车辆的 SINR 发送给 LSC. LSC 基于 Geary' C 理论^[7]进行判断后, 生成判决矩阵:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} D_{1,1} & \cdots & D_{1,n} & \cdots & D_{1,N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ D_{i,1} & \cdots & D_{i,n} & \cdots & D_{i,N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ D_{I,1} & \cdots & D_{I,n} & \cdots & D_{I,N} \end{bmatrix} \quad (16)$$

步骤3 RSU 节点信任度更新. LSC 根据判决矩阵信息可得第 n 个 RSU 的负面和正面评分比例. 在不同评分数量下, 对于第 n 个 RSU 的信任度变化量为

$$\theta_n = \frac{\theta_1 a^+ - \theta_2 a^-}{a^+ + a^-} \quad (17)$$

其中: $\theta_n \in [-1, 1]$, a^+ 和 a^- 分别是正面评分和负面评分数量, 其权重分别为

$$\theta_1 = \frac{F(a^+)}{F(a^+) + F(a^-)} \quad (18)$$

$$\theta_2 = \frac{F(a^-)}{F(a^+) + F(a^-)} \quad (19)$$

其中 $F(\cdot)$ 为对于少数评分的敏感度.

从式(17)可以看出, 随着负面评分所占比例的

增加, 信任度变化量 θ_n 不断减少. 同时, 不同的 $F(\cdot)$ 也会影响 θ_n 的变化趋势, 从而影响 θ_n 对少数评分的敏感程度. 采用 $F(x) = x$, $F(x) = x^2$, $F(x) = x^3$ 和 $F(x) = x^4$ 评估 $F(\cdot)$ 对 θ_n 的影响, 如图2所示, 负面评分比例小于 50% 时, $F(x) = x^4$ 所对应的曲线高于 $F(x) = x$, $F(x) = x^2$ 和 $F(x) = x^3$, 说明小比例的负面评分对于结果的影响较小, 更符合多数车辆的判断结果.

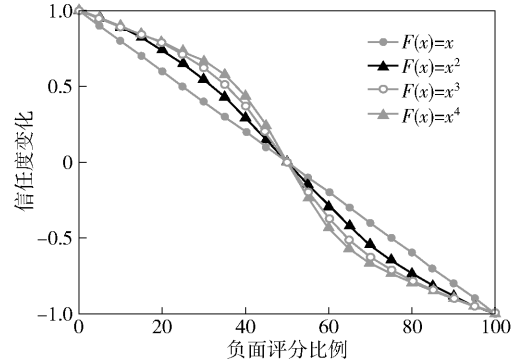


图2 不同 $F(\cdot)$ 函数下负面评分比例与信任度变化的关系

综上所述, 可选择函数 $F(x) = x^4$ 来控制信任度 θ_n 的变化. 若第 n 个 RSU 的信任度低于信任度下限 C_{th} , 则判定该 RSU 为不可信任 RSU 节点, 在下一时刻, 第 n 个 RSU 将从备选 RSU 集合中被移除; 若第 n 个 RSU 的信任度高于信任度上限 C_h , 则判定该 RSU 为可信任 RSU 节点, 在下一时刻, 第 n 个 RSU 将不再进行 RSU 识别, 直接进入 RSU 备选集合, 提高了算法效率. 基于以上分析, LSC 可建立传输车辆 i 的备选可信任 RSU 集合, 其信任度集合为 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n, \dots, C_N\}$. 此外, 不可信任 RSU 经过管理员的维护后将对该 RSU 信任度进行重置, 该 RSU 通过重新计算信任度, 可加入可信任 RSU 集合.

2.2 优化问题建模

基于信任度的 RSU 识别算法, 可建立传输车辆备选可信任 RSU 集合, 并通过优化链路选择和资源分配, 最大化车联网总能效, 该优化问题可建模为

$$\begin{aligned} & \max_{P_{V_i}, x, \rho} E(P_{V_i}, x, \rho) \\ \text{s. t. } & \text{C1: } \min(\gamma_{V2V}^i, \gamma_{V2I}^{i,n}, \gamma_{V2I}^{n,i}) \geq \gamma_V^{\min}, \forall n \in R_i \\ & \text{C2: } 0 \leq P_{V_i} \leq P_{V_i}^{\max}, \forall V_i \in V_T \\ & \text{C3: } x_i \in \{0, 1\}, \rho_{i,k} \in \{0, 1\}, \forall k \in K, \forall i \in I \end{aligned} \quad (20)$$

其中:约束条件C1为V2V和V2I链路的最低SINR要求, γ_V^{\min} 为最低SINR门限值, R_i 为可信任RSU集合;约束条件C2为传输车辆的传输功率限制;约束条件C3表明传输链路和资源块的选择参数为0,1变量。

如果能够同时求出式(20)中3个变量的最优值,即可得到全局最优解。但是该优化问题包含2个0,1变量,是一个非凸优化问题,求解计算复杂度过高。为了降低问题的求解复杂度,可将原优化问题分解成2个等价的子优化问题:①最优资源分配子问题,包括资源块分配和最优链路选择;②最优功率分配子问题。

2.3 最优资源及功率分配

基于信任度的RSU识别算法,可以得到可信RSU集合,再通过最优资源及功率分配得到最优的车联网总能效。首先,确定 V_i 与RSU的匹配关系, V_i 向LSC发送连接请求后,LSC将 V_i 的可信任RSU集合按其接收到的SINR降序排列,并求出 V_i 的匹配度 M_i ,即集合中的备选RSU个数,然后通过匹配度对 V_i 和RSU进行最优匹配,如

$$M_i = \begin{cases} 0, & \text{选择 V2V 传输} \\ \text{其他}, & \text{选择 SINR 最高的 RSU 传输} \end{cases} \quad (21)$$

其中:当 V_i 选择V2V传输时,匹配度 M_i 为0,表示不与RSU连接;反之,当 V_i 选择V2I传输时,匹配度 M_i 为集合中备选RSU个数,表示选择SINR最高的RSU传输。当 V_i 与RSU匹配后,进行资源块分配, V_i 复用对其干扰最小的蜂窝链路资源块,可得出资源块的匹配关系 $\rho_{i,k}$ 。

在对传输模式决策向量进行初始化时,假设传输车辆首选V2I传输模式,此时通过比较不同传输模式下网络的能效值,可以对车辆的传输模式决策向量的集合 \mathbf{X} 进行更新。例如,当 $E_{V2V}^i > E_{V2I}^i$ 时,选择V2V传输模式;否则,选择V2I传输模式。通过比较 E_{V2V}^i 和 E_{V2I}^i ,传输车辆可以选出更好的传输模式,从而最大化车联网总能效。

此时,原优化问题可转化为最优功率分配问题:

$$\begin{aligned} & \max_{P_{V_i}} E(P_{V_i}) \\ \text{s. t. } & \text{C1: } \min(\gamma_{V2V}^i, \gamma_{V2I}^{i,n}, \gamma_{V2I}^{n,i}) \geq \gamma_V^{\min}, \forall n \in R_i \\ & \text{C2: } 0 \leq P_{V_i} \leq P_{V_i}^{\max}, \forall V_i \in V_T \end{aligned} \quad (22)$$

该问题是功率变量 P_{V_i} 的凸优化问题,可通过拉格朗日函数解出最优的 $P_{V_i}^*$ 。考虑到限制条件C1,

最低传输功率可表示为

$$P_{V_i}^{\min} = \min \left\{ \frac{\gamma_V^{\min} H_1}{d_{i,j}^{-a_1}}, \frac{\gamma_V^{\min} H_2}{d_{i,n}^{-a_3}}, \frac{\gamma_V^{\min} H_1}{d_{n,i}^{-a_3}} \right\} \quad (23)$$

其中: $H_1 = P_{C_k} d_{k,i}^{-a_2} + N_0$, $H_2 = P_{C_k} d_{k,n}^{-a_2} + N_0$ 。 P_{V_i} 的取值范围可表示为

$$P_{V_i}^{\min} \leq P_{V_i} \leq P_{V_i}^{\max} \quad (24)$$

式(22)中的问题是含有一个变量 P_{V_i} 的优化问题,分为V2I链路和V2V链路,可以分别通过拉格朗日法进行求解。然而,目标函数为一个非线性分式规划,很难对其求解,需要将其转换为凸优化问题。首先,令 q 为蜂窝车联网下 V_i 的能效,有

$$q = \frac{\sum_{i=1}^I \ln(1 + \gamma_i)}{\sum_{i=1}^I 2P_{V_i}} \quad (25)$$

其中 γ_i 为 V_i 的信噪比。优化问题可转化为

$$\begin{aligned} & \max_{P_{V_i}} \sum_{i=1}^I \ln(1 + \gamma_i) - q \sum_{i=1}^I P_{V_i} \\ \text{s. t. } & \text{C1: } \min(\gamma_{V2V}^{i,j}, \gamma_{V2I}^{i,n}, \gamma_{V2I}^{n,i}) \geq \gamma_V^{\min}, \forall n \in R_i \\ & \text{C2: } 0 \leq P_{V_i} \leq P_{V_i}^{\max}, \forall V_i \in V_T \end{aligned} \quad (26)$$

对于给定的车联网能效值 q ,优化问题[式(26)]为凸优化问题,可以采用拉格朗日对偶法求解。构造其拉格朗日函数:

$$\begin{aligned} L(P_{V_i}, \mu_m, \lambda_n) = & \sum_{i=1}^I \ln(1 + \gamma_i) - q \sum_{i=1}^I 2P_{V_i} - \\ & \mu_m (P_{V_i} - P_{V_i}^{\max}) - \lambda_n (P_{V_i}^{\min} - P_{V_i}) \end{aligned} \quad (27)$$

其中: μ_m 和 λ_n 分别表示车辆最大传输功率和最小传输功率所对应的非负拉格朗日因子集合,对式(27)求 P_{V_i} 的偏导,并令其等于0,可以计算出最优的传输功率 $P_{V_i}^*$,有

$$\frac{\partial L(P_{V_i}, \mu_m, \lambda_n)}{\partial P_{V_i}} = 0 \quad (28)$$

可得

$$P_{V_i}^* = \left[\frac{1}{(2q + \mu_m - \lambda_n)} - \frac{H}{\min(d_{i,n}^{-a_3}, d_{n,i}^{-a_3})} \right] \quad (29)$$

其中: $H = P_{C_k} d_{c,k}^{-a_2} + N_0$, $[x]^+ = \max(0, x)$,采用次梯度迭代算法更新拉格朗日因子 μ_m 和 λ_n ,其表达式为

$$\mu_m^{(r+1)} = [\mu_m^r - \vartheta^r (P_{V_i}^{\max} - P_{V_i}^*)]^+ \quad (30)$$

$$\lambda_n^{(r+1)} = [\lambda_n^r - \nu^r (P_{V_i}^* - P_{V_i}^{\min})]^+ \quad (31)$$

其中 ϑ^r 和 ν^r 为迭代步长。

3 仿真结果

通过 Matlab 工具进行仿真验证,得到所提出的基于信任度的 RSU 识别及资源分配算法在各种参数下的网络总能效,并不同方面将 TRRA 算法与以下算法进行了对比:最大传输功率 TRRA 算法 (Max TRRA, max-power TRRA),即未进行最优功率优化的 TRRA 算法;链路选择及资源分配算法 (LSRA, link selection and resource allocation algorithm),即未识别不可信任 RSU 节点的 TRRA 算法;最大传输功率 LSRA 算法 (Max LSRA, max-power LSRA),即未进行最优功率优化的 LSRA 算法. 仿真参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数	
仿真参数	值
LTE eNBs 半径/m	500
RSU 半径/m	50
LTE eNBs 最大发射功率/dBm	46
传输车辆最大发射功率/dBm	23
蜂窝用户最大发射功率/dBm	20
噪声功率 $N_0/(dB \cdot Hz^{-1})$	-174
蜂窝链路路径损耗	3.5
V2I 链路路径损耗	3
V2V 链路路径损耗	4

图 3 所示为不同传输模式下车辆数量与网络总能效之间的关系. 可见,4 种模式下的网络总能效均随车辆数量的增加而增加,TRRA 算法的性能最优,能获得最大的网络能效. 从仿真结果可以看出,如果仅采用单一的传输模式,如 V2V 和 V2I,网络能效相对较低,而根据车辆的传输质量在 2 种传输模式中动态选择,采用能效更高的方式进行传输,从而获得更高的能效. 另一方面,由于 TRRA 算法首先将对不可信任 RSU 进行识别,与未进行 RSU 识别的模式选择算法 (MSA,mode selection alorighm) 相比,避免了由不可信任 RSU 带来的网络性能损伤,所以可获得更大的网络能效增益.

图 4 所示为不同传输模式下蜂窝用户数量与网络总能效之间的关系. 可见,4 种模式下的网络总能效均随蜂窝用户数量的增加而增加. 这是因为随着蜂窝用户的增加,车联网用户将有更大可能找到干扰更小、通信质量更好的蜂窝链路,从而提升车联网的整体能效值. 与图 3 结果相似,TRRA 算法比单

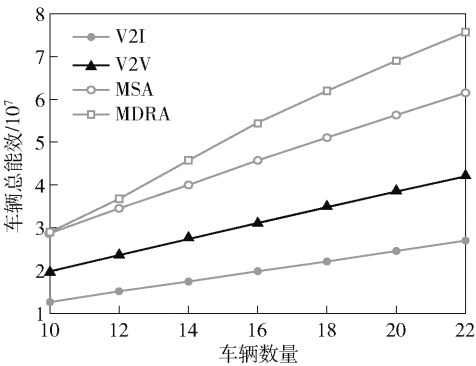


图 3 在不同传输模式下车辆数量与网络总能效的关系

一传输模式 V2V 和 V2I 能获得更高的性能增益. 同时,TRRA 算法可以识别不可信任 RSU,与未进行不可信任 RSU 识别的 MSA 算法相比,能够达到更高的网络能效.

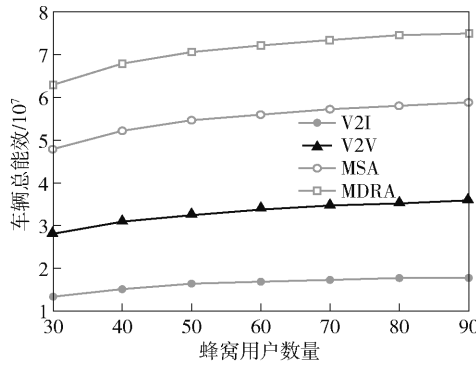


图 4 在不同传输模式下蜂窝用户数量与网络总能效的关系

图 5 所示为不同算法下车辆数量与网络总能效之间的关系. 可见,4 种算法下的网络总能效均随车辆数量的增加而增加,TRRA 算法的性能最优,能获得最大的网络能效. 此外,由仿真结果可得,采用最优功率传输的方法可以获得更高的网络总能效,TRRA 和 LSRA 算法相较 Max TRRA 和 Max

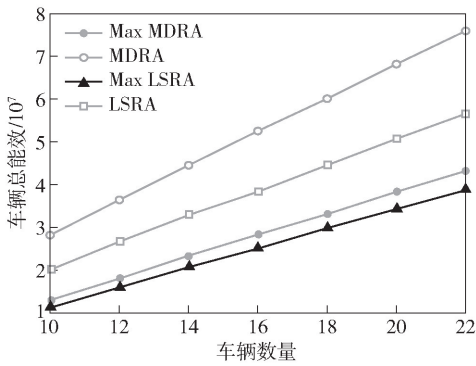


图 5 在不同算法下车辆数量与网络总能效的关系

LSRA 算法能获得更高的性能增益. 在不可信任 RSU 存在的场景下, TRRA 算法能够获得更高的网络总能效, 这是因为网络中不可信任的 RSU 虚报了接收信噪比信息, 未采用不可信任 RSU 识别的算法中, 车辆用户会受此影响, 其传输速率、通信质量以及车联网的整体能效都将降低.

图6所示为不同算法下蜂窝用户数量与网络总能效之间的关系. 可见, 4种算法下的网络总能效均随着蜂窝用户的增加而增加, TRRA 算法的性能最优, 能获得最大的网络能效. 这是因为更多的蜂窝用户将提供更多可复用的蜂窝链路, 车联网用户将有更大可能找到干扰更小、通信质量更好的蜂窝链路, 从而提升车联网的整体能效.

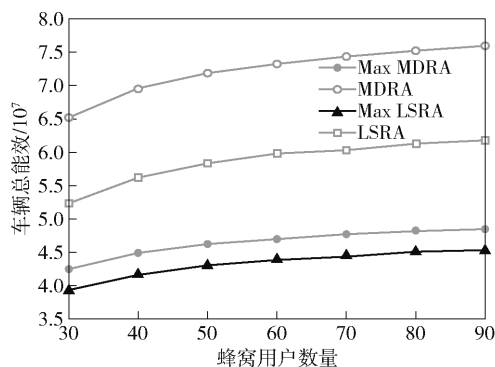


图6 在不同算法下蜂窝用户数量与网络总能效的关系

4 结束语

该算法将路侧单元识别、传输模式选择和功率分配联合建模为网络能效优化问题, 并分成3个子优化问题, 分别求解. 首先, 采用空间相关度理论对RSU节点进行评分, 并通过基于信任度的RSU识别算法, 识别出可信任及不可信任路侧单元; 其次, 优化车辆资源块配置和链路选择; 最后, 通过次梯度算

法优化传输功率, 最大化网络能效值. 理论分析和仿真结果表明, 所提算法具备较低的复杂度, 可达到较高路侧单元的识别准确度, 并有效地提升网络总能效.

参考文献:

- [1] Ashritha M, Sridhar C S. RSU based efficient vehicle authentication mechanism for VANETs [C] // IEEE 9th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO). Coimbatore: [s. n.], 2015: 1-5.
- [2] Zhang Chenxi, Lu Rongxing, Lin Xiaodong, et al. An efficient identity-based batch verification scheme for vehicular sensor networks [C] // IEEE INFOCOM 2008-the 27th Conference on Computer Communications. Phoenix: [s. n.], 2008: 246-250.
- [3] Zhang Dajun, Yu F R, Yang Ruizhe. Blockchain-based distributed software-defined vehicular networks: a dueling deep Q-learning approach [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2019, 5(4): 1086-1100.
- [4] Kang Jiawen, Yu Rong, Huang Xumin, et al. Blockchain for secure and efficient data sharing in vehicular edge computing and networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 4660-4670.
- [5] Chen Jiming, Li Tingting, Panneerselvam J. TMEC: a trust management based on evidence combination on attack-resistant and collaborative Internet of vehicles [J]. IEEE Access, 2019, 7: 148913-148922.
- [6] Zhou Zhenyu, Xiong Fei, Xu Chen, et al. Energy-efficient vehicular heterogeneous networks for green cities [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(4): 1522-1531.
- [7] Anselin L. Local indicators of spatial association - LISA [J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93-115.