

无人机辅助车联网环境下干扰感知的节点接入机制

范茜莹¹, 黄传河¹, 朱钧宇², 文少杰¹

(1. 武汉大学计算机学院, 湖北 武汉 430072;

2. 工业和信息化部计算机与微电子发展研究中心(中国软件评测中心), 北京 100081)

摘要: 在车联网中, 链路频繁切换和信道干扰会导致传输时延增加及网络吞吐量下降。引入无人机与地面车辆进行协同通信, 构建无人机辅助的空地一体化车联网, 采用发送端自主决策的分布式策略, 提出了一种干扰感知的节点接入机制。将节点接入问题形式化为一个与链路传输速率、链路切换次数和节点发射功率相关的多目标优化问题, 利用对偶分解法将该问题分解为2个凸优化子问题: 联合优化链路切换次数与链路传输速率和在保证链路可靠性的前提下优化节点发射功率。仿真实验表明了所提出节点接入机制可有效地改善数据传递率、平均端到端时延以及网络吞吐量。

关键词: 车联网; 无人机; 干扰感知; 链路切换

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019081

Interference-aware node access scheme in UAV-aided VANET

FAN Xiyang¹, HUANG Chuanhe¹, ZHU Junyu², WEN Shaojie¹

1. School of Computer Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2. Research Center for Computer and Microelectronics Industry Development, MIIT(China Software Testing Center), Beijing 100081, China

Abstract: In vehicular Ad Hoc network (VANET), frequent link handovers and channel interference can lead to increased transmission delay and decreased network throughput. To address the issues, unmanned aerial vehicle (UAV) were introduced to cooperate with vehicles and construct UAV-assisted air-ground integrated VANET. An interference-aware node access scheme was proposed. The node access problem was formulated as a multi-objective optimization problem considering link transmission rate, link handovers and transmit power. Then the optimization problem was decomposed into two convex optimization sub-problems by dual decomposition method, the sub-problem jointly optimizes handovers and link transmission rate while the sub-problem optimizes the transmit power based on link reliability. Finally, simulation results show that the proposed mechanism can effectively improve data delivery ratio, average end-to-end delay and network throughput.

Key words: VANET, UAV, interference-aware, handovers

1 引言

作为现代智能交通系统 (ITS, intelligent transportation system) 的核心基础设施, 车辆自组

织网络 (VANET, vehicular Ad Hoc network) 得到了广泛关注^[1-2]。通过车与车 (V2V, vehicle-to-vehicle) 及车与基础设施 (V2I, vehicle-to-infrastructure) 之间的通信, VANET 可以提

收稿日期: 2018-09-07; 修回日期: 2019-02-23

通信作者: 黄传河, huangch@whu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61772385, No.61373040, No.61572370); “十三五”国家重点研发计划课题基金资助项目 (No.SQ2018YFB010236-04-04)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61772385, No.61373040, No.61572370), The National Key Research and Development Plan (No.SQ2018YFB010236-04-04)

供各种类型的服务，包括道路安全（如碰撞预警和智能交通管理）、娱乐需求服务（如社交网络和在线游戏）、基于地理位置的服务（如兴趣点和路径优化）等。面向未来的 ITS 应用需要覆盖范围更大、通信方式更灵活高效、信息处理更智能且安全的车联网环境。车辆不仅需要实时获取较大范围内的交通状况和预警信息，同时也可参与信息传输。然而，在大空间尺度下，障碍物、复杂地形、难以接近的地理区域、恶劣天气等因素都可能导致链路质量降低甚至不可用。特别地，在某些极端环境中缺乏基础设施来辅助车辆通信，单纯依靠地基车联网难以满足需求。

针对该问题，利用无人机、飞艇、卫星等空间节点作为辅助的空-地互补方案逐渐受到关注，并取得了一定发展^[3]。相比于地基车联网，高空平台（HAPS, high altitude platform station）具有更大的覆盖范围，更强的态势感知能力、动态重构及容灾能力，尤其是在大范围广播、跨路网的交通态势感知、快速灵活部署与调度等方面具有地面基础设施难以比拟的优势。充分利用上述优势，在此基础上将提高与地基车联网互联互通，组成空地一体化车联网，能更好地支撑智能交通管理应用场景，具有较高的研究价值和意义。

得益于高移动性及可灵活部署的优势，无人机为各种商业应用和民用应用提供了有效的解决方案，如交通管制、远程监控、视频流传输等。在面向未来的 ITS 应用场景下，引入无人机辅助车联网通信具有地基车联网不可比拟的优势^[4]。首先，无人机通信受信道衰落影响较小，且更易于与车辆建立持续时间更长的视距链路，具有相对可靠的空-地信道。然后，无人机可在三维空间内灵活部署、自由移动，更易于将多跳转发转变为单跳中继，能降低通信时延，提高传输可靠性。最后，考虑一些缺乏足够地面基础设施的极端场景，可通过部署无人机来快速改善网络连通性，避免长时间链路中断。

引入无人机辅助通信后，链路选择需要综合考虑持续时间、信道状态、网络负载、信号强度等诸多因素的影响，而信号强度会影响链路的干扰水平，因此，需要设计有效的干扰感知节点接入机制，在保证可靠性的前提下通过减少链路切换次数来降低通信开销，同时提高网络的吞吐量。本文主要贡献包括以下 2 个方面。

1) 采用无人机与地面车辆进行协同通信，构造

无人机辅助的空地一体化车联网。综合考虑节点移动带来的切换成本、链路干扰及节点处发射功率引起的开销，将接入问题形式化为一个多约束的优化问题。

2) 针对所提出的优化问题，提出了一种分布式的节点接入机制及对应算法，利用基于对偶的优化方法，计算得到链路的最优传输速率、链路切换次数及节点发射功率，并以此为依据选择接入对象。

2 相关工作

有效的接入机制可以帮助节点选择合适的信息传输的接入对象，进而提高网络的吞吐量等性能。现有的研究工作主要根据数据传输速率、时延、吞吐量等因素来选择接入节点。

吴黎兵等^[5]提出了一种基于 VANET-cellular 网络架构的安全消息广播中继节点选择方法，根据候选车辆的蜂窝网络信号强度及其增量、链路稳定度、信道质量、地理位置等参数选出最佳的装有蜂窝网络接口的中继节点，该方法可以减少对车流密度及基础设施的依赖。Ma 等^[6]提出了一种跨层中继节点选择方案，综合考虑了端到端传输速率、中继节点剩余的电池使用时间及中继辅助的 D2D (device-to-device) 端到端传输时延，然后描述了如何根据这些标准在 D2D 通信中进行中继节点的选择。

对空地一体化网络中的低成本灵活接入机制，国际空间数据系统咨询委员会（CCSDS, Consultative Committee for Space Data System）制定的最新标准中^[7]，空间网络支持地面节点的接入，但是接入数量有限，还不能满足空地一体化车载网络多车载用户同时接入的需求。Liu 等^[8]提出了一种空间信息网络环境下的链路选择方法，该方法在时间约束条件下，实现能耗最优化。Abdulla 等^[9]利用势博弈理论，解决了在无人机辅助网络中如何使接入节点的能量效率最高的问题。Lyu 等^[10]研究了地面终端（GT, ground terminal）和无人机组成的无线系统，提出了周期性多址接入机制（CMA, cyclical multiple access），以一种基于无人机位置的周期性时间分割方式来调度无人机和 GT 之间的通信。通过对不同 GT 的时间分配进行优化，以最大化其最小吞吐量。Tuna 等^[11]提出了无人机辅助无人值守的无线传感器部署系统，作为灾后解决方案，可在任何有需要的地方使用。

为了将无人机和地面车联网结合起来，Zhang 等^[12]提出了基于软件定义的空天地一体化网络架

构来提供无间隙、高效率的车辆服务，最后总结了空地一体化网络面临的机遇和挑战。Zhou 等^[13]提出了一种空地合作的车辆网络架构，其中多个无人机形成空间子网络，来辅助地面车辆子网络进行信息的收集和分发，并指出无人机可以作为中继节点来解决地面节点的高速移动问题。Kawamoto 等^[14]通过卫星和地面无线通信网络的合作来解决上下文感知的多媒体内容传输的问题，可以在卫星/地面频率共享系统中动态分配带宽，为用户提供上下文感知的内容。Zeng 等^[15]对无人机辅助无线通信技术进行了概述，介绍了基本的网络架构和主要的信道特性，并强调了其中存在的关键问题。随后，Zeng 等^[16]又通过优化源节点/中继节点的发射功率和中继轨迹来优化吞吐量，同时考虑了实际的移动约束和中继节点处的信息随意度约束。对于固定的中继轨迹，吞吐量优化的功率分配服从阶梯式水填充结构。Cheng 等^[17]考虑使用一个或多个无人机作为 2 个远距离地面节点之间通信的中继节点，提出了 LCAD (load carry and deliver)，通过无人机从源节点获取数据并将数据携带转发到目的地，然后将信息传输到目标地面节点，实现吞吐量的最大化。

Oubati 等^[18]研究 Ad Hoc 模式下的无人机和地面 VANET 协作进行的路由过程，提出了 2 种不同方式的路由协议，分别是针对地面网络和无人机之间信息传输的 UVAR-G 协议及在无人机之间信息传输的 UVAR-S 协议。Wang 等^[19]设计了一种无基础设施的无人机辅助车联网系统，即车辆-无人机混合的车辆自组织网络 VNet。根据分布式车辆位置预测算法，利用无人机来增强车辆之间的消息传输。Lu 等^[20]和 Xiao 等^[21]使用无人机来传递车辆的消息，并改善 VANET 对智能干扰机的通信性能，他们将无人机与智能干扰机之间的交互表述为抗干扰无人机中继游戏，其中无人机决定是否将 OBU 消息转发到另一个 RSU，干扰机通过观察无人机和 VANET 策略以选择相应的干扰功率。Seliem 等^[22]提出了一个数学框架得到最小无人机密度，即 2 个相邻无人机之间的最大间隔距离，以改善车辆到无人机分组传输时延的最坏情况。Fawaz 等^[23]开发了一个数学模型来描述不合作车辆对路段之间端到端连接的影响，并提出利用无人机作为存储-携带-转发节点来减轻不合作节点对端到端路径连接的不利影响。Shilin 等^[24]考虑在孤立车辆段使用无人

机的通信网络模型。

本文研究干扰感知的节点接入机制，综合考虑链路持续通信时间、切换次数及信息传输的可靠性，在改善系统吞吐量的同时，减小通信开销。

3 系统模型和问题描述

3.1 网络模型

假设车辆和无人机均配备有 GPS 和数字地图以获取节点当前的地理位置，同时假设节点没有能源限制。无人机有一个较低且恒定的飞行高度，能够与地面上的车辆进行通信^[25-26]。另外，假设无人机的运动轨迹是预先设置好的，无人机不仅能够收集及掌握网络的全局信息（如道路上车辆节点的密度），也可以作为中继节点参与车辆之间的信息传输，在链路质量较差或者中断的情况下建立新的通信连接来协助信息传输，保证地面网络连通性的同时改善信息传输的性能。

使用图 $G(V, E)$ 表示无人机辅助车联网的网络拓扑结构，其中， V 表示无人机节点和车辆节点的集合， E 表示节点之间链路的集合。 N_i^t 表示节点 i 在 t 时刻的邻居节点集合。二元组 $(i, j) \in E$ 表示节点 i 和节点 j 之间的链路， l 表示网络中的链路， r_l 表示数据流经过链路 l 的传输速率。为了保证信息传输的可靠性，链路的最大容量表示为 c_l 。网络架构如图 1 所示。

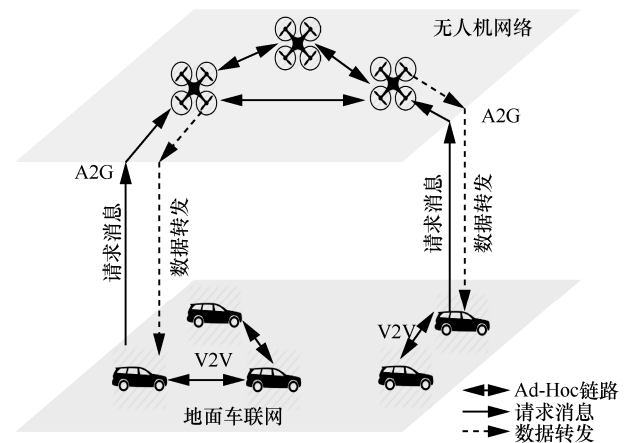


图 1 网络架构

空地一体化车联网主要包括无人机网络和地面车联网，其中包括 V2V 通信、无人机与车辆(U2V, UAV-to-vehicle)之间的通信及无人机与无人机之间的通信(U2U, UAV-to-UAV)。本文所用的参数及其含义如表 1 所示。

表1 本文所用的参数及其含义

参数	含义
R_v	车辆通信范围
R_U	无人机通信范围
r_{ij}	链路 ij 的传输速率
P_i	节点 i 发射功率
n_i	切换次数
d_{ij}	节点 i 和 j 之间的距离
c_{ij}	链路 ij 的最大容量
ε	更新操作步长
γ	更新操作步长
m	调整参数
CT_{ij}	节点 i 和 j 的连通时间
$C(P_i)$	节点处发射功率产生的成本函数
$C(n_i)$	切换产生的成本函数
β	信噪比阈值
α	与切换成本相关的系数
θ	与功率产生成本相关的系数

3.2 无人机通信模型

无人机与车辆之间传播信道的路径损失模型描述如下^[27]，单位为 dB。

$$PL = 20 \log \left(\frac{4\pi f_c d}{c} \right) + P_{\text{LoS}} \eta_{\text{LoS}} + P_{\text{NLoS}} \eta_{\text{NLoS}}$$

其中, f_c 表示载波频率, c 表示光速。视距传输 (LoS, line of sight) 概率是路径损失模型中较为重要的参数, 无人机和接收者之间的视距传输概率可表示为

$$P_{\text{LoS}} = \frac{1}{1 + e^{-b \left(\frac{180}{\pi} \arccos \frac{d}{R} - a \right)}}$$

其中, 常数 a 和 b 的值取决于所处环境。非视距传输 (NLoS, non-line of sight) 的概率则为

$$P_{\text{NLoS}} = 1 - P_{\text{LoS}}$$

假设 d 表示无人机与车辆之间的距离, 可用 $\sqrt{H^2 + R^2}$ 来计算, H 和 R 分别表示无人机的高度和无人机与车辆之间的水平距离。 η_{LoS} 和 η_{NLoS} 分别表示自由空间传播中视距传输和非视距传输的平均额外损耗, 二者的值取决于通信环境。无人机的通信范围取决于其飞行高度及传输路径损耗阈值。

在无人机辅助车联网环境下, 部署无人机能够改善网络的连通性, 与单纯的车联网环境相比, 相应的节点密度也将有所增加。根据文献[23]可知,

假设长度为 d 的道路上分布有 k 个无人机, 那么道路节点密度将增加 $\frac{k}{d}$ 。该道路上的平均节点数目可表示为 $E[N+k] = E[N] + k$, 节点密度表示为 $\rho' = \frac{E[N+k]}{d} = \rho + \frac{k}{d}$, 其中 ρ 表示没有无人机参与情况下的道路节点密度。下文中将无人机节点和车辆节点统一描述为节点, U2V 链路与 V2V 链路之间的差异由相应链路的传输速率和信干噪比来反映。

3.3 切换次数

考虑信息传输过程中, 车辆节点移动较快, 节点之间进行通信时可能发生频繁的链路切换, 此处定义成本函数 $C(n_i)$ 来表示链路切换产生的成本开销, 其中, n_i 表示节点的链路切换次数。切换次数的计算方法描述如下。

为了减少链路切换次数, 每个节点选择下一跳接入对象时, 在保证可靠性的前提下, 应尽可能选择与其连接时间较长的节点, 以增加端到端路径的生存时间。因此, 需要计算节点间链路生存时间作为选择接入对象的参考。根据节点的坐标, 计算得到节点之间的距离 d_{ij} , 结合节点移动的速度, 可以得到节点之间的通信时间。假设节点 i 和节点 j 在 t_0 时刻坐标为 (x_i, y_i, z_i) 和 (x_j, y_j, z_j) , 可计算得到二者之间的距离 $d_{ij}^{t_0}$ 。经过时间 Δt 后, 节点 i 坐标为 $(x_i + v_x^i \Delta t, y_i + v_y^i \Delta t, z_i + v_z^i \Delta t)$, 节点 j 的坐标为 $(x_j + v_x^j \Delta t, y_j + v_y^j \Delta t, z_j + v_z^j \Delta t)$, 同样可计算得到二者之间的距离 $d_{ij}^{t_0 + \Delta t}$ 。节点 i 和节点 j 单位时间内 ($\Delta t = 1$) 的分离速度为 $\bar{v}_{ij} = d_{ij}^{t_0 + 1} - d_{ij}^{t_0}$ 。如果节点之间的距离变大, 那么节点之间总距离表示为 $\Delta d_{ij} = R - d_{ij}^{t_0}$; 如果节点之间的距离缩短, 那么 $\Delta d_{ij} = R + d_{ij}^{t_0}$ 。综合考虑节点 i 和 j 的分离速度和总距离, 可以得到二者之间链路的连通时间 CT_{ij} , 如式(1)所示。

$$CT_{ij} = \frac{\Delta d_{ij}}{|\bar{v}_{ij}|} \quad (1)$$

假设节点 i 是发送节点, 节点 j 是候选接入对象, 根据节点 i 处需要发送的数据量 D 及链路 ij 的传输速率, 得到传输时间表示为

$$t = \frac{D}{r_{ij}} \quad (2)$$

结合节点 i 与 j 的连通时间 CT_{ij} , 得到切换次数

表示为

$$n_i = \frac{t}{CT_{ij}} = \frac{D}{r_{ij}CT_{ij}} \quad (3)$$

3.4 问题描述

在无线通信过程中，如果节点的发射功率较大，可能对其他链路产生干扰，导致网络吞吐量降低。在保证链路可靠性的前提下，可通过控制发射功率来减少干扰。定义节点发射功率产生的成本函数为 $C(P_i)$ ，其中， P_i 表示节点 i 的发射功率。假设 $C(P_i)$ 是发射功率 P_i 的单调递增凸函数，即发射功率越大，产生的成本越大，同时 $C(P_i)$ 也是 P_i 的一阶连续可微函数。切换成本函数 $C(n_i)$ 和函数 $C(P_i)$ 具有相同的性质。

综合考虑节点移动及链路中断等带来的切换成本、节点处发射功率产生的开销及链路干扰等因素，节点接入机制问题可形式化为一个多约束条件下的优化问题，如式(4)~式(7)所示。

$$\min \sum_{i \in V} C(n_i) + \sum_{i \in V} C(P_i) \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j \in N_i} r_{ij} \leq c_{ij}, \forall i, j \in V \quad (5)$$

$$\text{SINR}_i \geq \beta, \forall i \in V \quad (6)$$

$$P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max} \quad (7)$$

该优化问题的主要目标是减少节点之间的链路切换次数及优化节点的发射功率来最小化成本函数，同时提高网络的吞吐量。由于 2 个函数都是凸函数，二者的组合函数也是凸函数。约束条件(5)表示节点 i 和 j 的传输速率小于链路 ij 的容量，如果不能满足该条件，那么数据分组在传输过程中将被丢弃。约束条件(6)表示节点处的信干噪比 SINR (signal to interference plus noise ratio) 需要大于阈值 β ，才能保证信息传输的可靠性。约束条件(7)将中继节点的发射功率限制在一定的范围内，保证传输可靠性的同时能够减少对其他通信链路的干扰。

4 节点接入机制设计

在集中式优化方案中，节点需要频繁地与服务器通信以对网络相关参数进行更新从而得到最优解，然而频繁的网络通信会消耗大量的资源（如带宽资源），同时信息的并发传输会干扰其他链路，从而导致链路质量较差甚至不可用。此外，集中式

的优化方法需要服务器接收到所有节点的信息才能完成优化，这也会消耗大量的时间来更新并优化相关参数。考虑上述因素，集中式优化方法不适用于车联网等高速移动的实时传输场景，而分布式的优化方法仅需要节点与其邻居节点交换更新信息来执行优化操作，能够解决集中式优化方法存在的不足^[28]。因此，本文采用分布式优化方法来解决节点接入问题。

为了解决所提出的多约束优化问题，为约束条件(5)和约束条件(6)引入拉格朗日乘子向量 $\lambda = \{\lambda_i, i \in V\}$ 和 $\mu = \{\mu_i, i \in V\}$ 。于是，优化问题的拉格朗日函数表示为

$$L(\mathbf{r}, \mathbf{P}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = \sum_{i \in V} C(n_i) + \sum_{i \in V} \lambda_i \left(\sum_{j \in N_i} r_{ij} - c_{ij} \right) + \sum_{i \in V} C(P_i) + \sum_{i \in V} \mu_i (\beta - \text{SINR}_i) \quad (8)$$

优化问题的对偶问题则表示为

$$\bar{D}(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = \max_{\lambda \geq 0, \mu \geq 0} D(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \quad (9)$$

由于 r_{ij} 和 c_{ij} 有关联，而切换成本 $C(n_i)$ 和信干噪比 SINR_i 均与节点之间的通信距离相关，式(8)变换后表示为

$$D(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = \min_{\mathbf{r}, \mathbf{P}} L(\mathbf{r}, \mathbf{P}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = \min_{r_{ij}} \left\{ \sum_{i \in V} \left(C(n_i) + \lambda_i \sum_{j \in N_i} r_{ij} \right) \right\} + \min_{P_i} \left\{ \sum_{i \in V} (C(P_i) + \mu_i \beta - \mu_i \text{SINR}_i - \lambda_i c_{ij}) \right\} \quad (10)$$

根据文献[29]，可将优化问题分解为 2 个子问题 L_1 和 L_2 ，如式(11)和式(12)所示。

$$L_1 = \min \sum_{i \in V} \left(C(n_i) + \lambda_i \sum_{j \in N_i} r_{ij} \right) \quad (11)$$

$$L_2 = \min \sum_{i \in V} (C(P_i) + \mu_i \beta - \mu_i \text{SINR}_i - \lambda_i c_{ij}) \quad (12)$$

从上述子问题的结构形式可以看出，2 个子问题均为凸优化问题，并且均与 λ_i 相关。子问题 L_1 联合优化节点之间的链路切换次数及链路传输速率，子问题 L_2 则主要优化发射功率并保证链路可靠性，2 个问题均能够以分布式的方法来解决。通过找出 2 个问题中 λ_i 和 μ_i 的最优值，计算得到最优的 r_{ij} ，即可得到节点 i 需要接入的对象 j 。这里， λ_i 可以理解为链路 ij 的传输速率带来的成本， μ_i 则表示保证链路 ij 可靠性的成本。

根据对偶参数值, 式(10)的最优解 (r_{ij}^*, P_i^*) 应该满足如式(13)和式(14)所示的条件

$$r_{ij}^* = \arg \min \{C(n_i) + \lambda_i \sum_{j \in N_i} r_{ij}\} \quad (13)$$

$$P_i^* = \arg \min \{C(P_i) + \mu_i \beta - \mu_i \text{SINR}_i - \lambda_i c_{ij}\} \quad (14)$$

根据传统的基于对偶的优化方法可以得到向量 λ 和 μ 在每一次迭代的更新操作, 如式(15)和式(16)所示。

$$\lambda_i(t+1) = \left[\lambda_i(t) + \varepsilon \left(\sum_{j \in N_i} r_{ij} - c_{ij} \right) \right]^+ \quad (15)$$

$$\mu_i(t+1) = \left[\mu_i(t) + \gamma(\beta - \text{SINR}_i) \right]^+ \quad (16)$$

其中, ε 和 γ 为常数, 表示更新操作的步长。由于车辆和无人机节点移动速度较快, 动态变化的网络拓扑将导致链路连通性的动态变化, 选择常数步长可以保证优化问题的收敛性并加快收敛速率^[30]。

为了得到 r_{ij} 和 P_i 的最优值, 首先给 λ 和 μ 设置一个初始值, 分别是 $\lambda(0)$ 和 $\mu(0)$, 代入式(13)和式(14)求出 r_{ij} 和 P_i 。然后, 根据 r_{ij} 和 P_i 的值, 计算得到 λ_i 和 μ_i 的值。将求得的 λ_i 和 μ_i 代入式(15)和式(16), 计算得到更新后的 λ_i 和 μ_i 。迭代上述更新过程, 直到 r_{ij} 和 P_i 的值固定不变或者 λ_i 和 μ_i 的值为 0。

本文所提干扰感知节点接入机制如算法 1 所示。

算法 1 节点选择算法

输入 车辆节点和无人机节点

输出 一跳接入节点

1) 初始化

对 $\lambda(0)$ 和 $\mu(0)$ 进行赋值;

2) 计算无人机节点的通信范围

RD = UAV. Range (PL(dB), altitude);

3) 获取节点 i 的邻居集合

交换信息, 然后将节点 i 通信范围内的节点集合表示为 N_i^t ;

4) 计算通信切换次数

for $j \in N_i^t$

根据等式(3)计算所需要的切换次数;

End for

5) 获取链路 ij 的连通时间以及 SINR_i

6) 迭代执行 7) 和 8) 直到 r_{ij} 和 P_i 的值不再发生变化或者 λ_i 和 μ_i 的值为 0

7) 计算拉格朗日乘子 λ_i 和 μ_i 的值

$$\text{根据等式 } \lambda_i(t+1) = \left[\lambda_i(t) + \varepsilon \left(\sum_{j \in N_i} r_{ij} - c_{ij} \right) \right]^+,$$

更新 λ_i 的值;

$$\text{根据等式 } \mu_i(t+1) = \left[\mu_i(t) + \gamma(\beta - \text{SINR}_i) \right]^+,$$

更新 μ_i 的值;

8) 计算最优传输速率 r_{ij} 以及传输功率 P_i 的值

根据等式

$$r_{ij}^* = \arg \min \{C(n_i) + \lambda_i \sum_{j \in N_i} r_{ij}\}, \text{ 更新 } r_{ij} \text{ 的值;}$$

根据等式

$$P_i^* = \arg \min \{C(P_i) + \mu_i \beta - \mu_i \text{SINR}_i - \lambda_i c_{ij}\},$$

更新 P_i 的值;

9) 调度过程

获取最优的 r_{ij} 和 P_i 对应的值;

选择最优 r_{ij} 和 P_i 对应的节点作为下一跳中继节点;

10) 算法结束

算法的具体执行过程如下。

1) 网络初始化阶段, 节点 i 向邻居节点广播 hello 分组。当邻居节点 j 接收到来自 i 的 hello 分组时返回一个包含自身的识别符和坐标等信息的应答分组, 然后节点 i 从收到的应答分组中提取出 j 的信息保存到 N_i^t 中。根据节点 i 和邻居节点 j 的坐标以及节点 i 处数据量的大小, 计算得到 i 和 j 的连通时间以及数据传输所需要的切换次数, 对切换次数排序并保存。然后, 根据邻居节点反馈的链路状态信息, 计算节点 i 处的信干噪比 SINR_i 。

2) 初始化对偶向量 $\lambda(0)$ 和 $\mu(0)$, 根据式(13)和式(14)计算得到链路 ij 的传输速率和节点处的发射功率, 然后将计算到的传输速率和发射功率代入式(15)和式(16), 对对偶向量 λ 和 μ 进行更新。迭代进行上述参数的更新, 直到传输速率和发射功率不再发生变化或者对偶向量值为 0。

3) 节点 i 对邻居节点的成本函数值以递增次序进行排序, 从中选择成本值最小的邻居节点作为接入对象。如果在当前的节点通信时间内不能完成数据的传输, 则重复执行以上步骤直到节点 i 处数据完成传输。

假设如式(4)所示的原始问题的最优值为 p^* , 对偶问题式(9)的最优值为 d^* , 有 $p^* \geq d^*$ 成立。该性质称为弱对偶性, 对所有的优化问题均成立。

下面将证明算法的收敛性，通过对迭代过程进行分析，有定理 1 成立，证明过程参考相关工作^[31]。

定理 1 假设 $\|\varepsilon\|^2$ 和 $\|\gamma\|^2$ 足够小， $\lambda \geq 0$ ， $\mu \geq 0$ ，那么所提出的节点接入机制可收敛至最优解。

证明 假设 $\Phi = \{(\lambda^*, \mu^*)\}$ 表示对偶问题式(9)对应的解。引入调整参数 m ，使 $m\varepsilon' = \varepsilon$ 及 $m\gamma' = \gamma$ 。结合式(15)和式(16)，有

$$\begin{aligned}
 Y(t+1) &= \sum_{i \in V'} \frac{[\lambda_i(t+1) - \lambda_i^*]}{\varepsilon'} + \sum_{i \in V'} \frac{[\mu_i(t+1) - \mu_i^*]}{\gamma'} \leq \\
 &\sum_{i \in V'} \frac{[\lambda_i(t) + \varepsilon(\sum_{j \in N_i} r_{ij}(t) - c_{ij}(t)) - \lambda_i^*]^2}{\varepsilon'} + \\
 &\sum_{i \in V'} \frac{[\mu_i(t) + \gamma(\beta - \text{SINR}_i(t)) - \mu_i^*]^2}{\gamma'} = \\
 &\sum_{i \in V'} \frac{[\lambda_i(t) - \lambda_i^*]^2}{\varepsilon'} + \sum_{i \in V'} \frac{[\mu_i(t) - \mu_i^*]^2}{\gamma'} + \\
 &2m \sum_{i \in V'} (\lambda_i(t) - \lambda_i^*) (\sum_{j \in N_i} r_{ij}(t) - c_{ij}(t)) + \\
 &2m \sum_{i \in V'} (\mu_i(t) - \mu_i^*) (\beta - \text{SINR}_i(t)) + \\
 &m^2 \sum_{i \in V'} \varepsilon' (\sum_{j \in N_i} r_{ij}(t) - c_{ij}(t))^2 + \\
 &m^2 \sum_{i \in V'} \gamma' (\beta - \text{SINR}_i(t))^2 \quad (17)
 \end{aligned}$$

当拉格朗日乘子取最优时，对偶问题可表示为

$$\begin{aligned}
 D(\lambda^*, \mu^*) &= \min_{n_{ij}} \left\{ \sum_{i \in V'} \left(C(n_i) + \lambda_i \sum_{j \in N_i} r_{ij} \right) \right\} + \\
 &\min_{P_i} \left\{ \sum_{i \in V'} \left(C(P_i) + \mu_i \beta - \mu_i \text{SINR}_i - \lambda_i c_{ij} \right) \right\} \leq \\
 &\left\{ \sum_{i \in V'} \left(C(n_i(t)) + \lambda_i^* \sum_{j \in N_i} r_{ij}(t) \right) \right\} + \\
 &\left\{ \sum_{i \in V'} \left(C(P_i(t)) + \mu_i^* \beta - \mu_i^* \text{SINR}_i(t) - \lambda_i^* c_{ij}(t) \right) \right\} \quad (18)
 \end{aligned}$$

当拉格朗日乘子随着迭代操作变化时，对偶问题可表示为

$$\begin{aligned}
 D(\lambda(t), \mu(t)) &= \left\{ \sum_{i \in V'} \left(C(n_i(t)) + \lambda_i(t) \sum_{j \in N_i} r_{ij}(t) \right) \right\} + \\
 &\left\{ \sum_{i \in V'} \left(C(P_i(t)) + \mu_i(t) \beta - \mu_i(t) \text{SINR}_i(t) - \lambda_i(t) c_{ij}(t) \right) \right\} \quad (19)
 \end{aligned}$$

结合式(18)和式(19)可得

$$\begin{aligned}
 D(\lambda(t), \mu(t)) - D(\lambda^*, \mu^*) &\geq \\
 &\sum_{i \in V'} (\lambda_i(t) - \lambda_i^*) (\sum_{j \in N_i} r_{ij}(t) - c_{ij}(t)) + \\
 &\sum_{i \in V'} (\mu_i(t) - \mu_i^*) (\beta - \text{SINR}_i(t)) \quad (20)
 \end{aligned}$$

结合式(17)和式(20)可得

$$\begin{aligned}
 Y(t+1) &\leq Y(t) + \\
 &2m[D(\lambda(t), \mu(t)) - D(\lambda^*, \mu^*)] + \\
 &m^2 \sum_{i \in V'} \varepsilon' (\sum_{j \in N_i} r_{ij}(t) - c_{ij}(t))^2 + \\
 &m^2 \sum_{i \in V'} \gamma' (\beta - \text{SINR}_i(t))^2 \quad (21)
 \end{aligned}$$

假设 $r_{ij}(t)$ 、 $c_{ij}(t)$ 、 β 及 $\text{SINR}_i(t)$ 均有界，那么有不等式(22)成立，其中 Ψ 是常数。

$$\sum_{i \in V'} \varepsilon' (\sum_{j \in N_i} r_{ij}(t) - c_{ij}(t))^2 + \sum_{i \in V'} \gamma' (\beta - \text{SINR}_i(t))^2 \leq \Psi \quad (22)$$

结合式(21)和式(22)，有如式(23)所示的不等式成立。

$$\begin{aligned}
 Y(t+1) &\leq Y(t) + 2m[D(\lambda(t), \mu(t)) - \\
 &D(\lambda^*, \mu^*)] + m^2 \Psi \quad (23)
 \end{aligned}$$

然后定义 Φ^δ ，其中 $\delta > 0$ ， Φ^δ 表示为

$$\Phi^\delta = \{(\lambda, \mu) \mid D(\lambda, \mu) \leq D(\lambda^*, \mu^*) \leq D(\lambda, \mu) + \delta\}$$

下面分 2 种情况对 Φ^δ 进行讨论：当 $(\lambda(t), \mu(t))$ 不在 Φ^δ 定义域内， $D(\lambda^*, \mu^*) > D(\lambda, \mu) + \delta$ ，将调整参数 m 设置为 $m \leq \frac{\delta}{\Psi}$ ，由式(23)可得 $Y(t+1) \leq$

$Y(t) - \frac{\delta^2}{\Psi}$ ，可以看出经过多次迭代后算法收敛；当 $(\lambda(t), \mu(t))$ 在定义域内， $D(\lambda^*, \mu^*) - D(\lambda, \mu) \geq 0$ ，将调整参数 m 设置为 $m \leq \frac{\delta}{\sqrt{\Psi}}$ ，由式(23)可知不等式

$Y(t+1) \leq Y(t) + \delta^2$ 成立。假设 $Y(\lambda, \mu) = \sum_{i \in V'} \frac{[\lambda_i - \lambda_i^*]}{\varepsilon'} +$

$\sum_{i \in V'} \frac{[\mu_i - \mu_i^*]}{\gamma'}$ 是有界的，将其上界表示为 $\Lambda(\delta, \Phi)$ ，有 $Y(t) \leq \Lambda(\delta, \Phi) + \delta^2$ 成立。当 δ 趋近于 0 时， $Y(t)$ 趋近于 0，即当迭代次数趋近于无穷时， (λ, μ) 趋近最优值。证毕。

为了满足实际交通管理应用中用户的不同偏好和要求，设置权重参数 α 和 θ ，以及成本函数 U ， U 是占不同比例的链路切换成本和发射功率成本

的总成本函数，表示为

$$U = \alpha C(n_i) + \theta C(P_i) \quad (24)$$

其中， $\alpha + \theta = 1$ 。随着调整系数 α 和 θ 的变化，链路切换和发射功率成本的比例进行相应调整，选择节点接入对象的标准也会有所不同。

结合不同的偏好设置，原多约束优化问题可表示为

$$\min \sum_{i \in I'} \alpha C(n_i) + \sum_{i \in I'} \theta C(p_i) \quad (25)$$

约束条件如式(5)~式(7)所示。

根据式(13)和式(14)，问题(25)的最优解 (r'_{ij}, P'_i) 应该满足如式(26)和式(27)所示的条件。

$$r'_{ij} = \arg \min \{ \alpha C(n_i) + \lambda_i \sum_{j \in N_i} r_{ij} \} \quad (26)$$

$$P'_i = \arg \min \{ \theta C(P_i) + \mu_i \beta - \mu_i \text{SINR}_i - \lambda_i c_{ij} \} \quad (27)$$

利用算法1对该问题进行求解，可以得到满足不同用户要求的接入节点。根据调整系数的变化，有如下3种情况。

1) 如果 $\alpha > \theta$ ，则表明选择的接入对象倾向于降低链路切换次数。如果 $\alpha < \theta$ ，则表明选择的接入对象倾向于降低节点发射功率引起的成本开销。

2) 如果 $\alpha = 0$ 或 $\theta = 0$ ，那么网络属性的综合权重和用户偏好的综合效用值将仅由链路切换或发射功率决定。当 $\alpha = 1, \theta = 0$ 时，仅考虑网络中节点通信链路切换引起的成本。当 $\alpha = 0, \theta = 1$ 时，则仅考虑节点发射功率带来的成本。

3) 如果调整系数均为0.5，表示相关的2个部分同样重要。结合成本函数，可以根据网络中不同的服务需求，灵活地选择下一跳的接入节点。

5 仿真结果与分析

将本文提出的干扰感知的节点接入机制与其他节点接入方案进行比较，通过仿真来评估算法的性能。

5.1 仿真设置

仿真模拟真实的车联网环境，场景所选择的区域大小为3 km×3 km，街道拓扑如图2所示，地图文件来源于OpenStreetMap^[32]，在SUMO(simulation of urban mobility)^[33]中转化成道路网络。采用OMNeT 5.0++仿真平台对算法性能进行评估，节点

之间的通信协议采用IEEE 802.11p协议。

假设无人机均匀分布在目标区域内，所有节点均配备有GPS，并且无人机可以收集所有车辆节点的位置信息。当有数据分组传输时，节点根据得到的最优传输速率和发射功率进行信息传输，发射功率取值范围为0.5~1 W。另外，更新操作中2个步长因子的值均设置为0.01。为了保证仿真结果的准确性，对不同参数设置进行20次实验，将所有运行结果的平均值作为最终的实验结果。

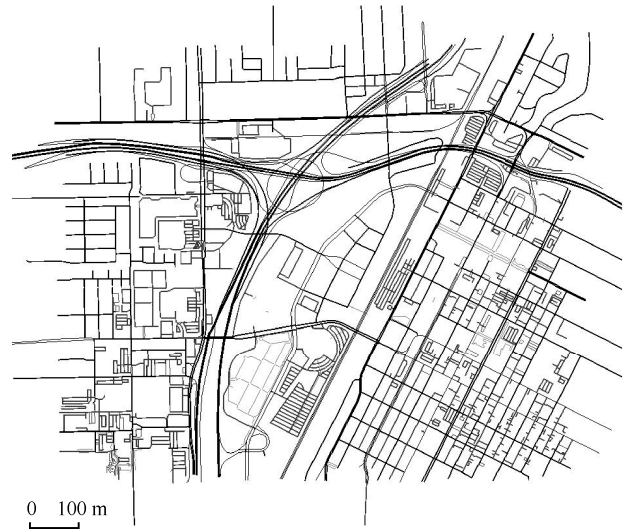


图2 实验场景拓扑结构

本节通过仿真实验对提出算法的有效性进行了验证和讨论，将所提出的干扰感知的节点接入机制与Raza等^[34]提出的imax-weight-quality方案及Dahmane等^[35]提出的WeiSTARS方案进行比较。通过比较网络节点密度（单位长度内即1 km的节点数目）和信干噪比的大小对算法的数据传递率、平均端到端时延及网络吞吐量等指标的影响，对算法性能进行评估。仿真参数设置如表2所示。

表2 仿真参数设置

仿真参数	数值
仿真区域大小	3 km×3 km
车辆移动速度/(m·s ⁻¹)	0~13
无人机移动速度/(m·s ⁻¹)	0~15
节点密度/(n·km ⁻¹)	3~10
信干噪比/dB	2~12

5.2 仿真结果

本节将讨论当网络节点密度和信干噪比变化时，各算法对应的数据传递率、平均端到端时延及

网络吞吐量的变化趋势。

5.2.1 数据传递率

图 3 描述了在不同节点密度下所比较算法的数据传递率的变化趋势。**max-weight-quality** 方案考虑下一跳节点选择过程中的缓存，将链路质量（即节点处的信噪比）视为第二选择度量，如果多个链路的权重等于最大权重，该方案选择信噪比最大的链路用于信息传输。**WeiSTARS** 方案是基于加权概率信任感知中继选择策略，主要利用协作感知消息（CAM, cooperative awareness message），将依据车辆和上下文相关信息计算得到的不同参数相结合，来选择下一跳中继节点。仿真实验中假设网络中所有节点均为合作节点，因此 **WeiSTARS** 方案中不诚实的车辆对信息传输的影响忽略不计。由图 3 可知，随着节点密度的增加，所有方案的数据传递率均有所增长。这是因为节点的增多使当前节点通信范围内的邻居节点增多，下一跳节点的可选择范围也随之增大。特别是在稀疏环境下，节点密度的增加可显著提高数据传递的成功率。得益于无人机的应用，本文提出的节点接入机制的数据传递率优于 **max-weight-quality** 方案和 **WeiSTARS** 方案。

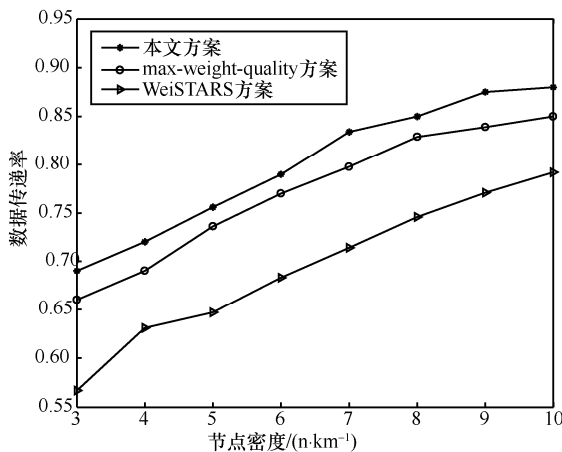


图 3 节点密度对数据传递率的影响

图 4 描述了信噪比 SINR 对各方案数据传递率的影响。由图可知，当 SINR 增大时，各算法的数据传递率均有所增长，其中 **max-weight-quality** 方案的传递率低于本文所提出的节点接入机制，优于 **WeiSTARS** 方案。原因在于，一定程度上提高 SINR 值保证了链路质量以及信息传输的可靠性，从而提高数据传递率。另一方面，与本文提出的方案相比较，**max-weight-quality** 方案未考虑网络中存

在的干扰问题，而 **WeiSTARS** 方案在链路稳定性和质量方面仅考虑了车辆的相对距离及障碍物对链路质量的影响，并未考虑节点发射功率对链路干扰的作用。

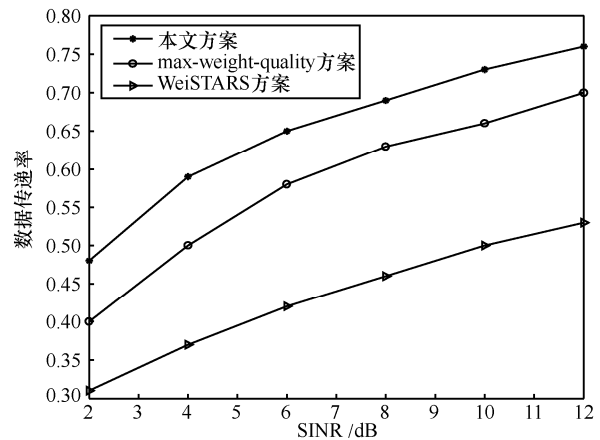


图 4 SINR 对数据传递率的影响

5.2.2 平均端到端时延

图 5 表明了网络中节点密度对平均端到端时延的影响。这里，端到端时延主要考虑排队时延和传输时延。由上文分析可知，节点密度的增加使所比较方案的数据传递率有所提高，因此平均端到端时延会降低。此外，为了减少节点之间的链路切换次数，本文所提出的接入机制在选择接入对象时优先选择链路连通时间较长的节点，使数据可以在较短时间内完全传输，因此，信息传输时的端到端时延低于其他 2 种方案。

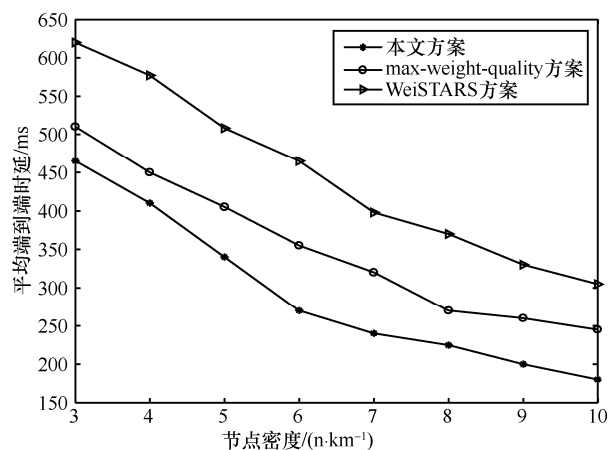


图 5 节点密度对平均端到端时延的影响

图 6 评估了信噪比 SINR 值对所比较算法的平均端到端时延的影响。对于足够大的 SINR，**max-weight-quality** 方案的时延将收敛到

一个与候选链路数目和缓存大小相关的值；在 SINR 较小的情况下，中断概率的降低和数据传递率的提高使其时延低于 WeiSTARS 方案。而 WeiSTARS 方案为了确保通信的可靠性和安全性，侧重考虑车辆之间的相对距离、链路的稳定性和质量以及接收成功的概率等因素，以避免过多的数据分组重传导致网络过载。本文所提出的节点接入机制同时考虑了传输可靠性和链路干扰的问题，在时延方面优于 imax-weight-quality 和 WeiSTARS 方案。

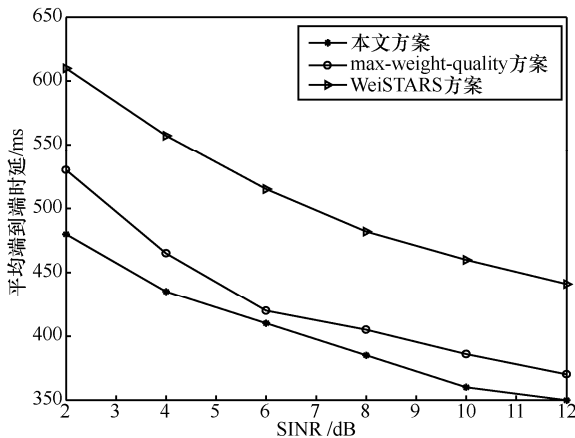


图 6 SINR 对平均端到端时延的影响

5.2.3 网络吞吐量

不同节点密度下所比较算法的网络吞吐量的变化如图 7 所示。如图 7 所示，随着节点密度的增大，所比较方案对应的网络吞吐量均有所提高。这是因为节点密度的增加可显著提高数据的传递率，网络吞吐量也随之增加。本文所提出的节点接入机制旨在降低干扰并提高通信可靠性，同时提高网络吞吐量，其获得的吞吐量也高于 imax-weight-quality 方案和 WeiSTARS 方案。

图 8 描述了由各种方案实现的网络吞吐量与信噪比 SINR 的关系。由图 8 可知，随着算法中对应的 SINR 增加，3 种方案的网络吞吐量均有所增长，而干扰感知的接入机制的网络吞吐量明显高于 max-weight-quality 和 WeiSTARS 这 2 种方案。这是因为本文所提出的机制优先选择连通时间较长的链路并且对节点发射功率进行了优化来减轻对网络中其他链路的干扰，有助于吞吐量的提高，max-weight-quality 方案则仅考虑了噪声对网络通信的影响而忽略了链路对其他节点之间通信的干

扰。与此同时，imax-weight-quality 方案假设源节点和中继节点与中继节点和目的节点之间的链路容量一致，根据链路质量来选择中继节点，与 WeiSTARS 方案相比，本文方案在吞吐量收益上有明显的改善。

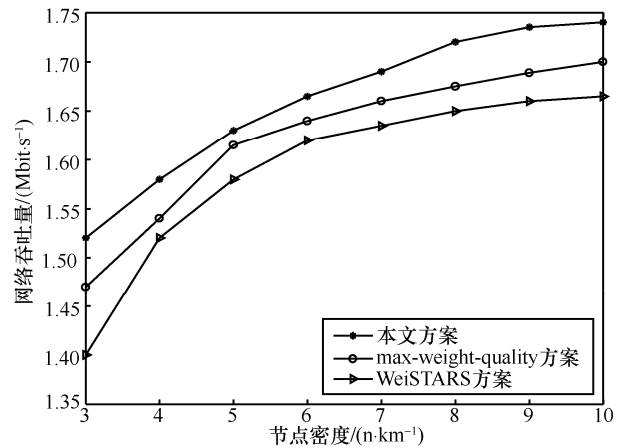


图 7 节点密度对网络吞吐量的影响

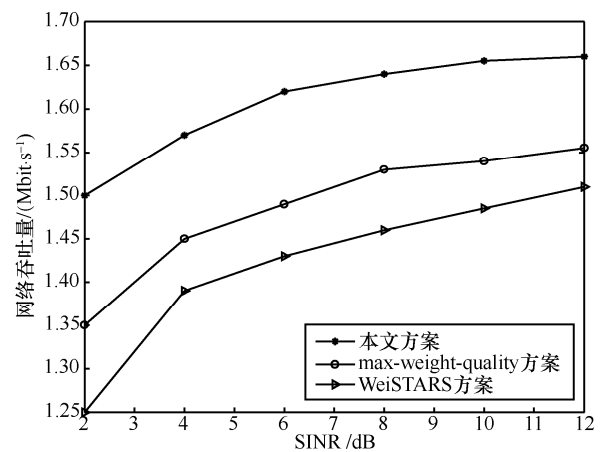


图 8 SINR 对网络吞吐量的影响

6 结束语

本文考虑在利用无人机辅助车联网通信场景下的信息传输可靠性问题。为解决由于节点移动以及链路质量低/中断导致的链路频繁切换问题，将节点接入问题形式化为一个与链路传输速率、链路切换次数和节点发射功率相关的优化问题，提出了一种干扰感知的节点接入机制。利用原始对偶方法得到链路的最优传输速率及节点的发射功率，以此作为选择接入对象的依据。该机制在保证链路可靠性的同时能够减少链路切换次数。仿真结果表明，该接入机制能在改善数据传递率和平均端到端时延

的同时, 提高网络吞吐量。

将无人机引入车联网进行辅助通信, 在提高网络吞吐量和改善服务质量的同时, 也会带来较高的成本及能耗问题, 后续工作将重点关注无人机的能源效率, 考虑无人机的部署和运行轨迹设计问题。

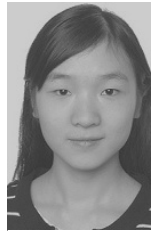
参考文献:

- [1] GHEBLEH R. A comparative classification of information dissemination approaches in vehicular Ad Hoc networks from distinctive viewpoints: a survey [J]. *Computer Networks*, 2018, 131: 15-37.
- [2] CUNHA F, VILLAS L, BOUKERCHE A, et al. Data communication in VANETs: protocols, applications and challenges [J]. *Ad Hoc Networks*, 2016, 44: 90-103.
- [3] HADIWARDYOYO A S, CALAFATE T C, CANO J, et al. Evaluating UAV-to-car communications performance: from testbed to simulation experiments [C]// *IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference*. IEEE, 2019: 1-6.
- [4] JAWHAR I, MOHAMED N, AL-JAROUDI J, et al. Communication and networking of UAV-based systems: classification and associated architectures [J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2017, 84: 93-108.
- [5] 吴黎兵, 刘冰艺, 聂雷, 等. VANET-Cellular 环境下安全消息广播中继选择方法研究 [J]. *计算机学报*, 2017, 40(4): 1004-1016.
WU L B, LIU B Y, NIE L, et al. Research on selection of safety message broadcast relay in VANET-Cellular [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2017, 40(4): 1004-1016.
- [6] MA R, CHANG Y J, CHEN H H, et al. On relay selection schemes for relay-assisted D2D communications in LTE-A systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(9): 8303-8314.
- [7] CSS-SM. CCSDS 902.1-B-1: cross support service management-simple schedule[R]. CCSDS, (2017-05)[2018-09-07].
- [8] LIU X, QIU M, WANG X, et al. Optimization for communication energy efficiency of air-based information network while satisfying timing constraints[C]// *IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications*. IEEE, 2015: 553-558.
- [9] ABDULLA A E A A, FADLULLAH Z M, NISHIYAMA H, et al. An optimal data collection technique for improved utility in UAS-aided networks [C]//*IEEE Conference on Computer Communications*. IEEE, 2014: 736-744.
- [10] LYU J, ZENG Y, ZHANG R. Cyclical multiple access in UAV-aided communications: a throughput-delay tradeoff [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(6): 600-603.
- [11] TUNA G, MUMCU T V, GULEZ K, et al. Unmanned aerial vehicle-aided wireless sensor network deployment system for post-disaster monitoring [M]//HUANG D S, GUPTA P, WANG L, et al. *Emerging Intelligent Computing Technology and Applications*. Berlin: Springer, 2012: 298-305.
- [12] ZHANG N, ZHANG S, YANG P, et al. Software defined space-air-ground integrated vehicular networks: challenges and solutions [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(7): 101-109.
- [13] ZHOU Y, CHENG N, LU N, et al. Multi-UAV-aided networks: aerial-ground cooperative vehicular networking architecture [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2015, 10(4): 36-44.
- [14] KAWAMOTO Y, FADLULLAH Z M, NISHIYAMA H, et al. Prospects and challenges of context-aware multimedia content delivery in cooperative satellite and terrestrial networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(6): 55-61.
- [15] ZENG Y, ZHANG R, TENG J L. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(5): 36-42.
- [16] ZENG Y, ZHANG R, TENG J L. Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(12): 4983-4996.
- [17] CHENG C M, HSIAO P H, KUNG H T, et al. Maximizing throughput of UAV-relaying networks with the load-carry-and-deliver paradigm[C]// *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. IEEE Computer Society, 2007: 4417-4424.
- [18] OUBBATI O S, LAKAS A, ZHOU F, et al. Intelligent UAV-assisted routing protocol for urban VANETs [J]. *Computer Communications*, 2017, 107(C): 93-111.
- [19] WANG X, FU L, ZHANG Y, et al. VDNNet: an infrastructure-less UAV-assisted sparse VANET system with vehicle location prediction [J]. *Wireless Communications & Mobile Computing*, 2016, 16(17): 2991-3003.
- [20] LU X, XU D, XIAO L, et al. Anti-Jamming communication game for UAV-aided VANETs[C]// *IEEE Global Communications Conference*. IEEE, 2017: 1-6.
- [21] XIAO L, LU X, XU D, et al. UAV relay in VANETs against smart jamming with reinforcement learning [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67 (5): 4087-4097.
- [22] SELIEM H, AHMED M, SHAHIDI R, et al. Delay analysis for drone-based vehicular ad-hoc networks [C]// *IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications*. IEEE, 2017:1-7.
- [23] FAWAZ W. Effect of non-cooperative vehicles on path connectivity in vehicular networks: a theoretical analysis and UAV-based remedy [J]. *Vehicular Communications*, 2018, 11: 12-19.
- [24] SHILIN P, KIRICHEK R, PARAMONOV A, et al. Connectivity of VANET segments using UAVs [M]//GALININA O, ANDREEV S, BALANDIN S, et al. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*. Berlin: Springer, 2016: 492-500.
- [25] GUPTA L, JAIN R, VASZKUN G. Survey of important issues in UAV

communication networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18 (2): 1123-1152.

- [26] SOUPPOURIS A. Renault concept car launches drone to check for gridlock ahead[Z]. The Verge, 2014.
- [27] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, LARDNER S. Optimal LAP altitude for maximum coverage [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 569-572.
- [28] TYCHOGIORGOS G, LEUNG K K. Optimization-based resource allocation in communication networks [J]. Computer Networks, 2014, 66: 32-45.
- [29] ALEJANDRO R, GEORGIOD B G. Separation principles in wireless networking [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(9): 4488-4505.
- [30] ANDREA S, HADI J R. Primal recovery from consensus-based dual decomposition for distributed convex optimization[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2016, 168(1): 172-197.
- [31] QIU F, BAI J, XUE Y. Optimal rate allocation in wireless networks with delay constraints [J]. Ad Hoc Networks, 2014, 13: 282-295.
- [32] HAKLAY M, WEBER P. OpenStreetMap: user-generated street maps[J]. IEEE Pervasive Computing, 2008, 7(4): 12-18.
- [33] KRAJZEWICZ D. Traffic simulation with SUMO [M]//BEHRISCH M, WEBER M. Simulation of Urban Mobility. New York: Springer, 2010: 269-293.
- [34] RAZA W, JAVAID N, NASIR H, et al. Buffer-aided relay selection with equal-weight links in cooperative wireless networks [J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(1): 133-136.
- [35] DAHMANE S, KERRACHE C A, LAGRAA N, et al. WeiSTARS: a weighted trust-aware relay selection scheme for VANET[C]// IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2017:1-6.

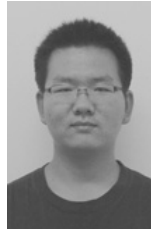
[作者简介]



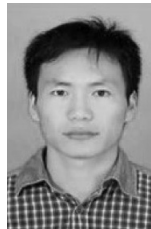
范茜莹 (1990-)，女，河南驻马店人，武汉大学博士生，主要研究方向为无线网络、算法设计与分析、车联网等。



黄传河 (1963-)，男，湖北随州人，博士，武汉大学教授、博士生导师，主要研究方向为计算机网络（移动互联网、移动 Ad Hoc 网络、无线传感器网络、未来互联网）、物联网、网络安全、高性能计算等。



朱钧宇 (1987-)，男，河南周口人，博士，工业和信息化部计算机与微电子发展研究中心（中国软件评测中心）工程师，主要研究方向为车联网、自动驾驶等。



文少杰 (1987-)，男，河南临颖人，武汉大学博士生，主要研究方向为物联网、移动 Ad Hoc 网络、无人机网络等。