

基于链路效用的3D-VANET可靠路由算法

徐 川, 胡 渝, 韩珍珍, 熊郑英, 赵国锋

(重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘 要: 针对三维车载自组织网络中, 高速移动的车辆节点和复杂多变的链路状态导致车辆间通信链路不稳定的问题, 通过引入软件定义网络技术实时获取网络状态并预测其变化过程, 构建时-空演化图模型, 并定义链路效用指标量化无线链路性能, 然后建立基于链路效用的加权时-空演化图模型, 最后将路由问题转化为多属性决策问题, 设计基于链路效用的可靠路由算法. 仿真结果表明, 相对现有四种路由算法, 本文所提路由算法在数据包传输率、端到端时延和路由负载率方面, 性能均有明显提升.

关键词: 3D-VANET; 软件定义网络; 时-空演化图; 多属性决策算法; 路由可靠性

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)05-0872-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20200678

Link Utility Based Reliable Routing Algorithm in 3D-VANET

XU Chuan, HU Yu, HAN Zhen-zhen, XIONG Zheng-ying, ZHAO Guo-feng

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

Abstract: In the three-dimensional vehicular ad-hoc networks (3D-VANET), high-speed moving vehicle nodes and changeable link states lead to unstable inter-vehicle communication links. Aiming at this problem, the time-space evolution graph model is constructed by introducing software define network technology to obtain network state in real-time and predict the process of time change and the link utility index is defined to quantify the wireless link performance. Then the weighted time-space evolution graph model based on link utility is established. Finally, the routing decision-making problem is transformed into a multi-attribute decision-making problem, and a link utility based reliable routing (LURR) algorithm is designed. Simulation results show that, compared with the existing four routing protocols, LURR algorithm has significantly improved packet transmission rate, end-to-end delay and routing load rate.

Key words: 3D-VANET; software defined network; time-space evolution graph; multi-attribute decision algorithm; routing reliability

1 引言

车载自组织网络 (Vehicular Ad-hoc Networks, VANET) 旨在车辆间建立可靠的通信链路^[1,2], 提升道路安全^[3,4]. 城市环境各种立交桥结构 (如高架桥、隧道和斜坡) 呈现三维 (Three-Dimensional, 3D) 结构, 车辆的高动态性、节点的复杂分布和严重的阴影衰落增加了链路中断的概率, 导致网络吞吐量和分组传输率骤降, 并且三维场景中跨层通信的车辆通信范围小于同层通信, 导致平面 VANET 路由方案无法直接用于 3D-VANET 场景^[5]. 因此, 设计适用于三维 VANET 场景的高效和可靠的路由方法具有重要意义.

研究者针对 3D-VANET 场景提出了改进路由策略. 文

献[6]提出一种基于空间分布的连接感知路由 (Spatial-Distribution-based Connectivity-aware Routing, SDCR) 协议, 解决三维街道的连通性问题, 根据车辆数量和位置来估计连通性以确定转发路径. 文献[7]提出一种混合改进的三维场景定向路由 (Improved Three-dimensional Scenario oriented Routing, ITSr) 协议, 针对三维场景设计层内传输优先级转发策略和路由恢复策略, 以提高数据传输率. 然而, 上述工作仅根据车辆数量和位置来确定中继, 未考虑网络动态性对信道条件及缓冲队列的影响, 不能准确描述无线链路性能. VANET 中, 网络参数的变化对链路性能有显著影响^[8-11], 文献[10]预测信干噪比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) 和分组队列长度以描述每个中继的链路质量, 并提出一种机会路由算法确定中继节点, 路由性能明

显提升.可见,链路性能的精确刻画对于提高 3D-VANET 中路由算法的效率至关重要.

3D-VANET 场景下,有大量数据需经过多跳传输,在路由超时前,数据包很难到达目的节点.此外,数据传输发生中断后,网络会频繁进行路由发现,导致网络延迟增大.为此,研究者引入软件定义网络(Software Define Network, SDN)技术获取网络全局视图,计算更加稳定的数据传输链路,以降低传输中断概率^[12-15].文献[13]提出一种新型路由框架,引入增量数据包分配方案,通过多条足够稳定的最短路径传输给定数量的数据包,从而实现高效可靠的车辆间通信.然而,现有方案控制器只根据静态网络拓扑进行路由计算,缺乏对网络拓扑连续动态变化考虑,导致所计算出来的路由策略缺乏连续性,路由震荡较大,网络拓扑频繁变化使得控制器需不断下发流表到传输节点,网络负担大.

针对以上问题,本文首先根据车辆移动模型预测网络拓扑变化完成时空演化图建模.然后,定义链路效用量化无线链路性能,通过整合 3D-VANET 网络特性数学推导 SINR、链路可用性和 BQL(Buffer Queue Length)模型,并引入自适应离差最大化算法计算权重,实现链路效用的准确评估.最后,构建加权时空演化图,设计基于链路效用的可靠路由算法(Link Utility based Reliable Routing, LURR)进行路由决策.仿真结果表明,LURR 算法相比 SDCR 和 ITSr,路由性能提升显著;而对于同样采用 SDN 技术的路由算法,在相同车辆数目环境中路由负载率有近 50% 的性能提升,数据包传输率和端到端时延性能分别有平均 15% 和 22% 的提升.

2 系统模型

如图 1 所示,本文考虑两层街道的软件定义车载网络,其中 Lane1 和 Lane2 分别表示上层和下层街道.采用泊松点过程描述车辆分布,每个节点配有 GPS 以获取车辆的位置及速度等信息.软件定义车载网络由数据和控制平面构成,数据平面由车辆车载单元(On Board Unit, OBU)、路边单元(Road Side Unit, RSU)和基站(Base Station, BS)组成,执行由控制平面下发的流程规则指定的操作,RSU 和 OBU 同时配有无线接口 LTE 和 DSRC.控制平面分为:顶层(Top tier)控制和底层(Bottom tier)控制,顶层在云,底层在 RSU 层.RSUs 通过监听车辆广播的基本安全信息(Basic Safety Messages, BSM)获取覆盖区域内的网络信息,并将此信息发送到顶层控制器,RSU 覆盖范围以外的车辆使用 LTE 定期通过 BS 向顶层控制器传送此信息.顶层控制器聚合所有底层控制器收集的信息,形成整个网络拓扑映射.

车辆间通信分为两种情况:层内和层间通信,当发送方和接收方处于同层街道为层内通信,否则为层间

通信,假设它们的传输范围分别为 R_1 和 R_2 ,且 $R_1 > R_2$ ^[8].此外 $d_{ij,t}^1$ 和 $d_{ij,t}^2$ 分别表示 t 时刻车辆 i 和层内相邻车辆 j 和层间相邻车辆 j 之间的欧氏距离.

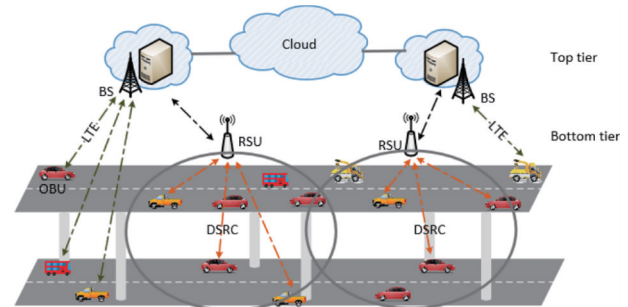


图1 实际交通场景网络模型

3 时空演化图建模

3.1 时空演化图模型

利用 VANET 的可预测性,设计包含节点时间和空间链路的时空演化图以描述拓扑随时间的演变.假设时刻 t 车辆的位置坐标为 $x(t), y(t), z(t)$,速度为 $v(t)$,移动方向为 $\partial(t)$,加速度为 $\alpha(t)$.则车辆在 Δt 期间的移动模型^[16]表示为式(1)~(3), Δx 和 Δy 分别为车辆在 Δt 期间 x 和 y 方向的距离变化.

$$\Delta x = v(t) \times \Delta t \times \cos(\partial(t)) + \frac{1}{2} \alpha(t) \times \Delta t^2 \times \cos(\partial(t)) \quad (1)$$

$$\Delta y = v(t) \times \Delta t \times \sin(\partial(t)) + \frac{1}{2} \alpha(t) \times \Delta t^2 \times \sin(\partial(t)) \quad (2)$$

$$\Delta z = 0 \quad (3)$$

将一段时间划分为 T 个离散等间隔时隙,用 $\{t_1, t_2, \dots, t_T\}$ 表示,当 T 足够大,则每个时隙间隔很短,其间的网络拓扑稳定不变.根据移动模型预测节点轨迹,形成每个时隙内的静态拓扑图,如图 2(a) 所示. $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 表示车辆集合,静态拓扑图表示为 $\{G_1, G_2, \dots, G_T\}$, $G_m = \{V_m, E_m\}$ 为 t_m 时刻的拓扑图,链路 $v_i v_j \in E_m$ 表示在 t_m 时刻节点 v_j 在 v_i 的传输范围内.图 2(b) 为图 2(a) 的时空演化图 $G = (V, E)$,包含每个时隙内静态拓扑中成对节点位置和互连随时间的变化, G 的节点集为 $V = \{v_j^t | j = 1, \dots, N; t = 0, 1, \dots, T\}$.链路 $v_j^{t-1} v_k^t$ 表示节点 v_j, v_k 在时隙间隔 $[t-1, t)$ 内 $v_j v_k \in E_m$.假设 v_1^0 与 v_5^T 进行通信,利用时空演化图 G 可获得两条候选传输路径,如图 2(b) 中红色及绿色标注.

3.2 无线链路模型

3D-VANET 场景下,有很多因素影响无线链路数据传输性能^[17]:接收车辆的 SINR 需大于接收阈值;需选择一条可用性高的链路进行数据传输以保证传输稳定性;中继车辆必须具有足够的缓冲队列来存储和处理数据.

(1) SINR: 车辆的高移动性会导致车距和干扰

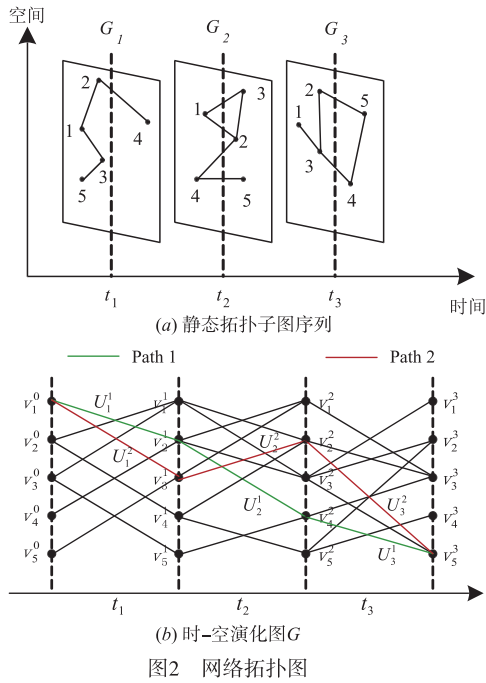


图2 网络拓扑图

频繁变化,从而影响 SINR. 由此,当车辆 i 在 t_1 时刻向车辆 j 发送数据, Δt 后车辆 j 的 SINR 函数为

$$\text{SINR}_{j,t_1+\Delta t} = \frac{P_i L_{ij,t_1+\Delta t}}{I_{j,t_1+\Delta t}} \quad (4)$$

$L_{ij,t_1+\Delta t}$ 为传播损耗, $I_{j,t_1+\Delta t}$ 为车辆 j 受到的干扰 (噪声干扰和相邻车辆产生的干扰); P_i 是车辆的传输功率.

采用带漂移参数的维纳过程模拟车辆的运动^[17], Δt 后, 车辆 i, j 之间的距离变化为 $\Delta d_{ij,\Delta t}$. 定义车辆传输范围内的邻居车辆为干扰车辆. 车辆移动性使得车辆间的干扰也在不断变化. Δt 后平均干扰车辆数目为

$$\bar{n}(\Delta t) = \sum_{k=1}^{N-1} \lambda_k P_{kj}^r(\Delta t) \quad (5)$$

$$P_{kj}^r(\Delta t) = P\{\Delta d_{kj,\Delta t} < d_{kj}^r\} \quad (6)$$

其中 N 为网络中的车辆数目, $\lambda_k \in \{0, 1\}$, 当车辆 k 在车辆 j 的传输范围时, $\lambda_k = 1$, 否则, $\lambda_k = 0$. $P_{kj}^r(\Delta t)$ 为车辆 k 经过 Δt 后在车辆 j 传输范围内的概率, 其中 d_{kj}^r 为剩余距离, 其定义分为下面两种情况.

情况 1: 当两辆车向同一方向行驶, 并且 $v_k > v_j$ (车辆 k 在 j 前面), 或者车辆背向向不同方向行驶, $d_{kj}^r = (1 - \beta_k)(R_1 - d_{ij}^1) + \beta_k(R_2 - d_{ij}^2)$.

情况 2: 当两辆车向同一方向行驶, 并且 $v_k < v_j$ (车辆 k 在 j 后面), 或者车辆面向对方行驶, $d_{kj}^r = \beta_k(R_1 + d_{ij}^1) + (1 - \beta_k)(R_2 - d_{ij}^2)$.

因此, 在时间 Δt 后, 接收方车辆 j 的 SINR 大于接收阈值 γ_0 的概率为

$$U(s) = P_{ij}^s = 1 - P\left\{\frac{P_i L_{ij,t_1+\Delta t}}{I_{j,t_1+\Delta t}} < \gamma_0\right\} \quad (7)$$

(2) 链路可用性: 链路可用性被定义为两辆车之间的链路在指定时间内保持连续可用的概率. $f(T)$ 表示持续时间 T 的链路可用性概率密度函数^[18], 如式 (8):

$$f(T) = \frac{2((1 - \beta_i)R_1 + \beta_j R_2)}{\sqrt{(\delta_i^2 + \delta_j^2)\Delta t} \sqrt{2\pi T^2}} \times \exp\left(-\frac{\left(\frac{2((1 - \beta_i)R_1 + \beta_j R_2)}{T} - (\mu_i - \mu_j)\right)^2}{2(\delta_i^2 + \delta_j^2)\Delta t}\right) \quad (8)$$

其中 μ_i 为漂移参数, 可视作车辆 i 的加速或减速, δ_i 服从高斯分布. 当两个车辆节点存在一条链路, 其持续时间取决于它们当前位置和相对速度, 可以表示为

$$T_p = \frac{d_{ij}^r}{v_{i,t_1} - v_{j,t_1} + \mu_i - \mu_j + \Delta v_{i,\Delta t} - \Delta v_{j,\Delta t}} \quad (9)$$

由此, 可给出 3D-VANET 网络中链路可用性概率:

$$U(a) = P_{ij}^l = \int_{t_1}^{t_1+T_p} f(T) dT \quad (10)$$

(3) BQL: 数据传输中接收节点必须具有足够的缓存器队列空间对来自发送方的数据进行存储与处理. 假设最大队列长度为 F , 接收节点 j 在 t_1 时刻的 BQL 为 b , 那么节点 j 的剩余可用队列长度为 $a = F - b$.

假设数据包的到达近似服从参数为 λ 的泊松分布. 在时间 Δt 内接收车辆 j 接收到 x 个数据包并且发送 y 个数据包的概率密度函数为

$$f_x(x, \lambda \Delta t) = \frac{(\lambda \Delta t)^x}{x!} \exp(-\lambda \Delta t) \quad (11)$$

$$f_y(y, b+x, 1-p_e) = C_{b+x}^y (1-p_e)^y p_e^{b+x-y} \quad (12)$$

其中 $x = \lceil \sum_{i=1}^s \xi_i p_s \rceil$, $y = \lceil \sum_{i=1}^s \xi_i \tau_0 (1-p_e) \rceil$, $\xi_i \in \{0, 1\}$ 表示第 i 个时隙的活跃指数, p_s 表示车辆在某一时刻中传输数据包的成功概率, s 表示时间段 Δt 中的时隙数量^[17], p_e 表示传输错误率, f_x 和 f_y 分别为泊松分布函数和二项分布函数.

接收车辆 j 经过时间 Δt 后的 BQL 可用概率为

$$U(b) = P_{ij}^p = P(x - y \leq a) = \sum_{i=0}^a f_x(i, \lambda \Delta t) f_y(i - a, b + i, 1 - p_e) \quad (13)$$

3.3 链路效用模型

由于 3D-VANET 场景中无线链路状态的多样性, 每条无线链路的效用各不相同. 可通过离差最大化算法自适应地计算链路效用建模过程中每个参数的权重, 确定链路效用值.

(1) 链路效用评估

多属性决策^[19]是专为解决考虑多种属性的最优备选方案选择问题而设计的. 为此, 根据无线链路模型, 选择 SINR, 链路可用性和 BQL 作为无线链路性能的决策

属性,在此基础上设计链路效用的多属性效用函数,并且具有如下限制条件以保证其有效性:

$$\lim_{u(x_i) \rightarrow 0} U(x) = 0, \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$\lim_{u(x_1), \dots, u(x_n) \rightarrow 1} U(x) = 1 \quad (15)$$

式(14)表示当任一参数的效用值趋于 0 时,链路效用函数值为 0. 式(15)表示当所有参数效用值趋于 1 时,链路效用函数值为 1. 式(14)和式(15)共同刻画了链路效用函数与所有参数间的关系,并保证链路效用函数值的取值范围为[0,1].

在满足以上条件的同时,设计如下链路效用函数:

$$U(x) = \prod_{i=1}^n (u(x_i))^{w_i} \quad (16)$$

其中, n 表示链路效用函数中参数数量; w_i 表示每个参数的权重,并且 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$; $u(x_i)$ 表示第 i 个决策属性值.

无线链路效用模型结合式(16),定义链路效用.

定义 1(链路效用) 给定链路 l_i 的决策属性 SINR、链路可用性和 BQL 的属性值 $U(s), U(a)$ 和 $U(b)$,取值范围均为[0,1],设 w_s^i, w_a^i 和 w_b^i 分别为以上属性对应的权重,且 $w_s^i + w_a^i + w_b^i = 1$,则链路 l_i 的链路效用为

$$U_i = U_i(s)^{w_s^i} \times U_i(a)^{w_a^i} \times U_i(b)^{w_b^i} \quad (17)$$

(2) 自适应权重计算

当一个参数能使所有方案的链路效用值产生偏差较小,则该参数在决策过程中的影响较小,反之,影响较大.考虑到车辆间链路状态不同,利用离差最大化算法自适应地计算每条链路三个参数对应权重.

SDN 控制器基于时-空演化图,寻找数据传输路径,其中构成路径的链路集合表示为 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$,集合 $A = \{A_1, A_2, A_3\}$ 分别表示三个决策属性 SINR、链路可用性和 BQL,且链路 l_i 的 $A_j(j=1,2,3)$ 属性值可根据式(7)、(10)、(13)计算得到并表示为 u_{ij} ,对应权重为 w_j^i ,权重满足归一化条件 $\sum_{j=1}^3 (w_j^i)^2 = 1$. 由此,根据离差最大化算法^[20]可以计算链路 l_i 参数权重 w_j^i .

4 基于加权时-空演化图的路由算法

4.1 加权时-空演化图

根据链路效用模型,可得到时-空演化图中每条无线链路的链路效用值,并构建加权时-空演化图,如图 2(b)所示.其中红色和绿色路径分别为节点 v_1 到 v_5 的候选路径,路径中的每条链路具有相应的链路效用值.

假设源节点 s 与目的节点 d 有 p 条可用路径,表示为 $M(s, d) = \{p_1, p_2, \dots, p_p\}$,且对于任意给定的路径 $p_r(r=1,2,\dots,p)$,形成该条路径的链路数量为 k : $l_1^r = (s, n_1^r), l_2^r = (n_1^r, n_2^r), \dots, l_k^r = (n_{k-1}^r, d)$. $U_i^r = U_i^r(s)^{w_s^i} \times$

$U_i^r(a)^{w_a^i} \times U_i^r(b)^{w_b^i}$ 为每条链路 $l_i^r(i=1,2,\dots,k)$ 的效用值.由于链路不同,多条链路所构成路径的效用值也不相同.因此定义路径效用量化每条候选路径性能.

定义 2(路径效用) 假设源节点 s 与目的节点 d 的传输路径为 $p(s, d)$,且链路 $l_i(i=1,2,\dots,k) \in p(s, d), U_i$ 为链路 l_i 的链路效用值,则路径 $p(s, d)$ 的路径效用为

$$U(p(s, d)) = \min_{l_i \in p(s, d)} (U_i(s)^{w_s^i} \times U_i(a)^{w_a^i} \times U_i(b)^{w_b^i}), \quad (18)$$

4.2 路径计算

根据加权时-空演化图模型,控制器可获得源到目的节点之间所有候选传输路径的效用值,选择路径效用值最大的路径为最优传输路径.本文将路由决策问题转化为多属性决策问题,并设计路径选择模型如下:

$$\max U(p_r(s, d)) \quad (19)$$

$$\text{s. t } w_s^r + w_a^r + w_b^r = 1,$$

$$\forall r = 1, 2, \dots, p, i = 1, 2, \dots, k, \quad (20)$$

$$0 < w_s^r, w_a^r, w_b^r < 1,$$

$$\forall r = 1, 2, \dots, p, i = 1, 2, \dots, k, \quad (21)$$

$$0 < U_i^r(s), U_i^r(a), U_i^r(b) < 1,$$

$$\forall r = 1, 2, \dots, p, i = 1, 2, \dots, k, \quad (22)$$

其中 $l_i^r \in p_r(s, d), p_r(s, d) \in M(s, d)$. 控制器根据时-空演化图模型和路径选择模型,在满足式(20)~(22)条件下,选择式(19)计算结果最大的候选路径为最优传输路径.

4.3 基于链路效用的可靠路由算法

基于加权时-空演化图,本文设计 LURR 算法进行路由选择,其算法过程如算法 1 所示.源车辆首先判断目的车辆是否在其传输范围内,若在,数据包直接传输到目的车辆,若不在,SDN 控制根据车辆移动模型建立时-空演化图,据此可以获得数据传输候选路径;建立无线链路效用模型,以计算链路效用评估链路传输可靠性;然后建立加权时-空演化图,计算候选传输路径的效用值;最后选择具有最大效用值的候选路径作为传输路径进行数据传输.

算法 1 基于链路效用的可靠路由算法(LURR)

输入:源节点 v_s ;目的节点 v_d ;

输出:最优传输路径;

1:初始化源节点的 BSM 信息和邻居节点信息: $N_s(v)$;

2:if $v_d \in N_s(v)$ then

3: 直接传输数据到 v_d ,最优传输路径为 v_s 到 v_d ;

4:else

5: 预测网络拓扑变化,构建时空演化图模型 $G = (V, E)$;

6: 从源节点到目的节点的候选路径: $M(s, d) = \{p_1, p_2, \dots, p_p\}$;

7: 组成候选路径的链路集合 $p_r(r=1,2,\dots,p)$:

$$p_r = \{l_1^r, l_2^r, \dots, l_k^r\};$$

8: for $i \leftarrow 1$ to p

9: 结合网络特征选择网络参数: SINR, 链路可用性, BQL;

```

10:   for  $w \leftarrow 1$  to  $k$ 
11:     计算 SINRU( $s$ ), 链路可用性  $U(a)$ , BQL 效用  $U(b)$ ;
12:     调用算法 1, 自适应的计算链路  $l_i$  的 SINR, 链路可用性,
        BQL 权重:  $w_s^i, w_a^i, w_b^i$ ;
13:   end
14:   建立加权时空演化图模型;
15:   计算候选路径集中每条路径的效用值  $U(p(s, d))$ ;
16: end
17: end
18: 最优路径为具有最大效用值的路径:  $\max U(p, (s, d))$ .

```

5 实验方法及结果分析

5.1 实验设置

本节采用 NS3 仿真平台^[21]进行仿真,并将 LURR 算法与按需距离矢量路由算法(Ad hoc On-demand Distance Vector routing, AODV)^[22]、在 VANET 中采用 SDN 技术的路由算法^[13](以下简称 SDVN 算法)以及 3D-VANET 路由算法 ITSR^[7]和 SDCR^[6]进行性能比较,以验证 LURR 算法性能。仿真区域为 $2100\text{m} \times 2100\text{m} \times 20\text{m}$ 内包含 9 个交叉路口和 4 个高架桥三维街道场景,场景中分布有 20 个 RSU 来覆盖整个网络区域。并且每辆车都可以随时向 SDN 控制器提交数据请求,RSU 和车辆的传输功率分别设置为 20dBm 和 10dBm。网络中数据流量以恒定比特速率(Constant Bit Rate, CBR)生成,并且每个 CBR 连接对由网络中随机车辆产生,每个源车辆以 2Mb/s 的速率发送数据包,其他仿真参数具体如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数	数值
车辆数量	100 ~ 300
RSU 传输范围	500m
R_1 传输范围	250m
R_2 传输范围	200m
信道数据速率	3Mbps
通信类型	CBR
CBR 连接数量	20 ~ 100
数据包大小	512B
噪声功率	-114dBm
车辆行驶速度	30km/h ~ 60km/h
最大分组队列长度	50packets
信标间隔	0.1s
SINR 阈值	20dB
MAC 层	IEEE 802.11p

5.2 路由算法性能及结果分析

(1) 不同车辆数的性能比较

图 3(a)显示随着车辆数目的增加,五种路由算法

的数据包传输率增加。车辆数的增加使网络连通性增加,数据包找到下一跳进行传输的机会增大。但随着车辆的持续增加,网络干扰和信道竞争越来越严重,制约网络性能的提高。SDVN 和 LURR 算法通过全局拓扑视图选出最优路径,性能更佳。LURR 算法在路由选择时综合考虑链路可用性、SINR 和 BQL,选择具有最大链路效用的路径进行传输,相比于 SDVN 算法有 2% ~ 30% 的性能提升。

图 3(b)表明,LURR 算法的平均端到端时延明显低于 ITSR 和 SDCR 算法,这是由于 LURR 引入 SDN 技术,在路径选择时考虑全局拓扑结构,车辆动态性,车辆分布复杂性和阴影衰落,选择具有最大可靠性的路径传输数据,减少数据的丢失和重传,进而减小时延。LURR 相比于 SDVN 算法在时延方面的性能有平均 22% 的提升,LURR 算法通过建立加权时空演化图模型刻画网络拓扑连续变化过程,SDN 控制在此基础确定最优路径,路由过程中车辆与控制器间的交互次数减少,时延降低。

图 3(c)显示随着车辆数量的增加,路由负载率增加,其中路由负载率为网络中控制数据包数量和总数据包数量之比。LURR 算法的路由负载率性能优于其他四类算法。LURR 算法在路由负载率方面相比于 SDVN 有近 50% 的性能提升,因为 LURR 算法在高动态的 3D-VANET 场景中,通过构建时空演化图获取连续的网络拓扑,选择具有最大效用的路径进行数据传输,提升了路径的可靠性,并保证了数据传输的连续性,能够显著减少车辆节点与控制器间的通信,降低大量的信令开销。

(2) 不同 CBR 连接对数量的性能比较

图 4(a)表明五种路由算法的数据包传输率都随着 CBR 连接对数量的增加而减少。随着 CBR 连接对数量的增加,网络中流量负载显著增加,车辆缓冲区溢出的概率增大,会造成高概率丢包,进而导致数据包传输率减少。LURR 算法基于加权时空演化图确定最优路径时,联合考虑链路可用性、SINR 和 BQL 来刻画路径性能,选出具有最大效用的路径为数据传输路径,相较于其他四种算法具有最优性能。

图 4(b)显示五种路由算法随着 CBR 连接对数量的增加,平均端到端时延呈现先减少后增加的趋势。当连接对数量小时,若遇到网络分区,数据包将存储在缓存区等待传输,时延较大;随着 CBR 连接对增加,缓存区溢出,数据包将进行传输,减小时延,但当 CBR 连接对数量持续增加时,缓存区信道争用和排队延迟将随之增加。ITSR 和 SDCR 算法仅基于网络中车辆的位置和数量进行路由决策,而 SDVN 和 LURR 算法中,控制器根据实时获取的网络拓扑信息选择全局最优路径,并且 LURR 算法不仅

考虑网络连通性,还将 BQL、SINR 和链路可用性作为链路效用评估属性,因此 LURR 算法的时延性能更佳,并且相比 SDVN 算法有近 30% 的性能提升。

图 4(c) 表明随着 CBR 连接对数量的增加,五种路由算法的路由负载率都会增大。AODV、ITSR 和 SDCR 算法,车辆需发送信令消息给其所有邻居节点以更新网络状态。SDVN 算法中,控制器负责路径选择,当请求

节点需进行数据传输时只需与控制器进行交互,减少大量信令开销。LURR 算法提出加权时-空演化图模型刻画网络拓扑的动态变化,据此进行路径选择,增强了传输路径的连续性和稳定性,进一步减少车辆与控制器间的交互信息,因此路由负载率性能更优,相比 SDVN 算法,仍有 50% 的性能提升。

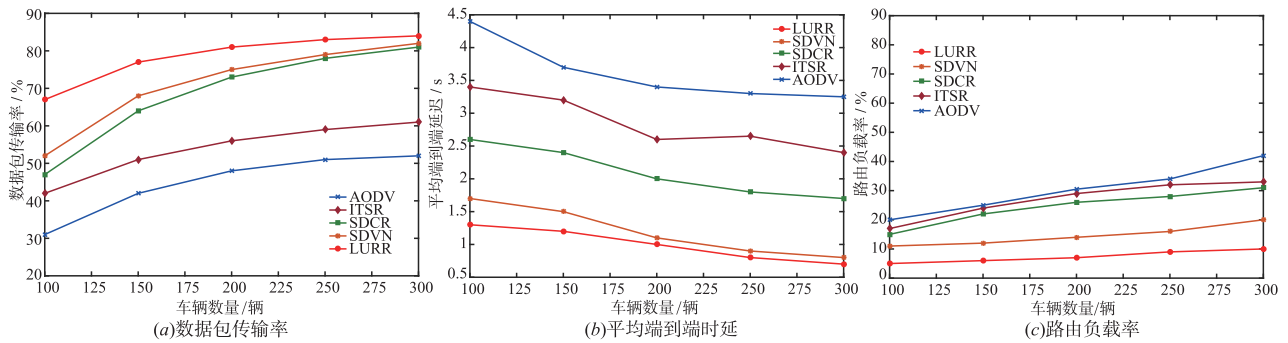


图3 不同车辆数量下的路由性能

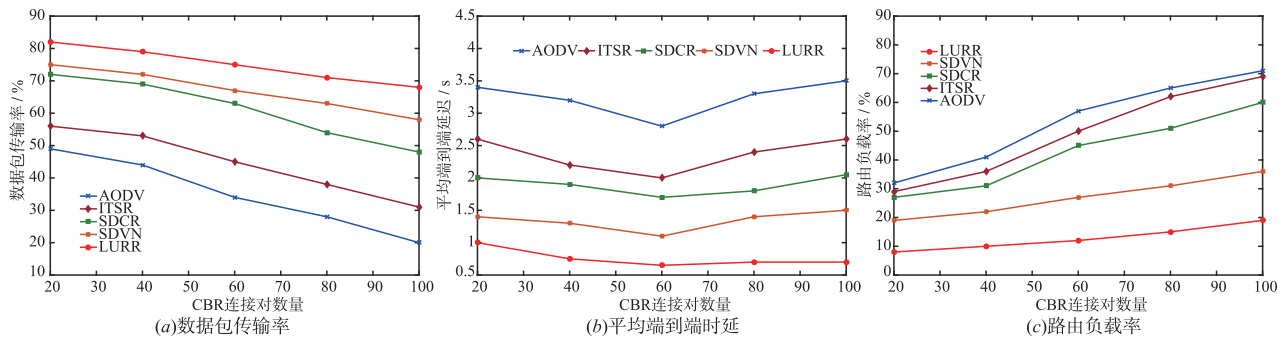


图4 不同CBR连接对数量下的路由性能

6 结论

本文针对 3D-VANET 场景下,车辆高动态性,节点分布复杂性导致网络拓扑频繁变化,数据传输路径不稳定的问题,结合时-空演化图模型以及无线链路模型构建加权时-空演化图模型,不仅描述了连续时间的拓扑变化,还对无线链路性能进行量化评估。并且设计 LURR 算法,选择具有最大效用的路径作为传输路径。该算法可以适应网络的拓扑变化并保证一段时间内数据传输的稳定性和连续性。仿真结果表明,LURR 算法相比现有的四种路由算法,能显著提高数据包传输率、平均端到端时延和路由负载率性能。

参考文献

[1] 张德干,崔玉亚,陈晨,等. 一种面向高速路车联网场景的自适应路由方法[J]. 电子学报,2020,48(1):172-179.
Zhang D G, Cui Y Y, Chen C, et al. An adaptive routing

method for high-speed-road scenario of the Internet of Vehicle[J]. Acta Electronica Sinica,2020,48(1):172-179. (in Chinese)

[2] Chang S, Lee S. A routing protocol for urban vehicular multi-hop data delivery[J]. Chinese Journal of Electronics,2016,25(2):348-356.
[3] Dressler F, Hartenstein H, Altintas O, et al. Inter-vehicle communication: quo vadis [J]. IEEE Communications Magazine,2014,52(6):170-177.
[4] Peng H H, Liang L, Shen X, et al. Vehicular communications: A network layer perspective [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2018,68(2):1064-1078.
[5] Zhu L, Li C, Wang Y, et al. On stochastic analysis of greedy routing in vehicular networks [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2015,16(6):3353-3366.
[6] Zhang X M, Wang Z H, Jiang X H. A realistic spatial-distribution based connectivity-aware routing protocol in multilevel scenarios of urban VANETs [J]. IEEE Communica-

- tions Letters, 2018, 22(9):1906 – 1909.
- [7] Zhu L, Li C, Xia B, et al. A hybrid routing protocol for 3-D vehicular ad hoc networks [J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11(3):1239 – 1248.
- [8] Liu P, Ai B, Matolak D W, et al. 5-GHz vehicle-to-vehicle channel characterization for example overpass channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(8):5862 – 5873.
- [9] Zhang X M, Yan L, Chen K H, et al. Fast, Efficient broadcast schemes based on the prediction of dynamics in vehicular ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(2):531 – 542.
- [10] Rehman U S, Khan M A, Zia T A. A multi-hop cross layer decision based routing for VANETs [J]. Wireless Networks, 2015, 21(5):1647 – 1660.
- [11] Li X Q, Li H, Yang K, et al. An optimization forwarding range routing protocol for VANET in city environments [J]. Chinese Journal of Electronics, 2014, 23(1):191 – 193.
- [12] Ji X, Yu H Q, Fan G S, et al. SDGR: An SDN-based geographic routing protocol for VANET [A]. 2016 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData) [C]. Chengdu, China: IEEE, 2016. 276 – 281.
- [13] Sudheera K L K, Ma M, Chong P H J. Link stability based optimized routing framework for software defined vehicular networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3):2934 – 2945.
- [14] Tang Y, Cheng N, Wu W, et al. Delay-minimization routing for heterogeneous VANETs with machine learning based mobility Prediction [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4):3967 – 3979.
- [15] Ankur N, Debasis D. Adaptive reinforcement routing in software defined vehicular networks [A]. 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWC-MC) [C]. Limassol, Cyprus: IEEE, 2020. 2118 – 2123.
- [16] Prieto J, Mazuelas S, Bahillo A, et al. Accurate and robust localization in harsh environments based on V2I communication [A]. Vehicular Technologies-Deployment and Applications [C]. London, UK: Intech, 2013. 143 – 170.
- [17] Xu C, Xiong Z Y, Kong X H, et al. A packet reception probability-based reliable routing protocol for 3D VANET [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(4):495 – 498.
- [18] Sun G, Zhang Y J, Li D, et al. Bus-trajectory-based street-centric routing for message delivery in urban vehicular ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(8):7550 – 7563.
- [19] Xu Z S. Uncertain Multi-Attribute Decision Making: Methods and Applications [M]. Berlin, Germany: Springer, 2015.
- [20] Xu C, Xiong Z Y, Han Z Z, et al. Link reliability-based adaptive routing for multilevel vehicular networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10):11771 – 11785.
- [21] Henderson T R, Lacage M, Riley G F, et al. Network simulations with the NS-3 simulator [J]. SIGCOMM Demonstration, 2008, 14(14):527.
- [22] Sutariya D, Pradhan S. An improved AODV routing protocol for VANETs in city scenarios [A]. IEEE-International Conference on Advances in Engineering, Science and Management [C]. Nagapattinam, India: IEEE, 2012. 575 – 581.

作者简介



徐川男, 1980年出生, 重庆人, 博士。重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信、工业互联网、软件定义网络和网络安全。

胡渝女, 1997年出生, 重庆人。重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为动态网络和车联网路由。

韩珍珍女, 1989年出生, 河南商丘人。重庆邮电大学博士生, 主要研究方向为天地一体化网络、软件定义网络、无线网络测量和无线网络路由。

熊郑英女, 1995年出生, 四川眉山人。重庆邮电大学博士生。主要研究方向为无线传感器网络和动态路由计算。

赵国锋男, 1972年出生, 重庆人。博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为天地一体化网络、工业互联网和网络安全。