doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2022.10.003

# 城市车联网中公交 VANET 的连通性估算方法<sup>①</sup>

林盈盈②\*\*\* 董红召\* 郝伟娜\*

(\*浙江工业大学机械工程学院 杭州 310014) (\*\*浙江开放大学工程教研部 杭州 310014)

摘 要 针对城市车联网中以公交车作为辅助中继节点的公交车载自组织网络(VANET)通信性能估算问题,提出了公交 VANET 网络连通概率模型来估算 VANET 的连通性、传输延时和连通延续时间。该模型根据区域车辆密度表征城市车流的间歇性中断特点,在分析天线高度和公交专用道对公交车通信能力和行驶规律的影响基础上,采用双斜率路径损耗模型和概率分析方法,按是否含有公交车节点分别建立道路上任意两车的直接连通关系,然后对公交专用道措施和公交车借助异构网络构成移动骨干网策略下公交 VANET 的通信性能进行估算分析。仿真结果显示公交 VANET 在低区域车流密度和远距离传输时的网络连通概率明显高于无公交车场景,且在车道数量较少以及公交车发车间隔较小时,改善效果更显著,此外,公交 VANET 传输延时和网络拓扑稳定性也有改善。

关键词 智能交通;连通性;双斜率路径损耗模型;间歇性车流;公交车载自组织网络 (VANET);公交专用道

# 0 引言

在车载自组织网络(vehicular ad-hoc network, VANET)中,连通性是保证交通信息实时可靠传输的重要基础。但城市交通中复杂的交通行驶工况会导致无线链路频繁发生中断,严重阻碍了城市车联网的广泛应用。

利用中继节点提高车辆间的连通性有车-路、车-车通信 2 种方式。前者需增加固定路侧设备 (roadside unit, RSU),如文献[1,2]基于道路流量、传输延时等指标设计 RSU 部署策略来提高连通性,但 RSU 的建设和维护成本高。后者则利用各种车辆作为中继,如文献[3]利用城市道路边停靠的车辆作为中继节点,但这类车辆的行为因随机性而使效果不稳定。文献[4]通过高速公路上的车队提高

连通概率,但城市道路中的交通环境无法维持车队 的行驶。因此,利用行驶路线固定、行车时间可预测 的公交车作为无线信号中继的公交 VANET 可以改 善车联网的连通性能。文献[5,6]将公交车作为普 通车、RSU 和数据中心间的移动网关。文献[7-9] 挖掘公交车历史轨迹的时空规则设计数据传递路 由,无法对连通性进行实时估算。此外,上述研究中 使用固定通信距离进行双车间连通的判断,但实验 表明通信距离不仅与收发天线高度有关,还受通信 路径上的遮挡车辆影响。阻碍视距传播(obstructed line-of-sight, OLOS)条件比视距传播(line-of-sight, LOS)条件会增加无线能量损耗,被高大车辆遮挡还 会带来 15~20 dB 的额外衰减[10],普通小汽车(简 称普通车)的有效传输距离甚至降到 100 m 左 右[11]:而公交车较高的天线则能得到 50% 以上的 通信距离提升[12]。将信道衰落特性纳入公交 VA-

① 国家自然科学基金(61773347),浙江省基础公益研究计划项目(LGF20F030001)和浙江省自然科学基金(LY19E050008)资助项目。

② 女,1979 年生,博士,讲师;研究方向:智能交通系统;联系人,E-mail: lyylyl011@163.com。(收稿日期:2021-09-15)

NET 的连通性研究,使用双斜率模型来模拟受车辆 遮挡影响时的路径损耗<sup>[12]</sup>更符合实际。文献[13] 采用双斜率路径损耗模型对高速公路车流进行通信 链路连通概率分析,但采用泊松分布或者截断高斯 分布,不符合城市交通中间歇性车流的特点。

为了给出公交 VANET 连通性的有效估算方法,本文提出一种适用于公交辅助中继场景的网络连通概率模型,使用区域车辆密度表征具有间歇性中断特点的城市车流,考虑公交车与普通车天线高度不同和运行规律差异,将直接连通关系分为无公交车参与、公交车参与通信2种模式下的连通类型,结合双斜率路径损耗模型、链路功率损耗阈值判断等方法对公交 VANET 网络的连通性建模,然后利用该模型对公交专用道措施和公交车借助异构网络构成移动骨干网策略下公交 VANET 的连通性能进行估算。

### 1 公交 VANET 双车间连通性建模

#### 1.1 区域车辆密度

城市交通中车辆一般因为道路拥堵或等待信号 灯等原因怠速工况比例较高,当怠速车辆与前方驶 离车辆相距越来越远时,两车通信中断,本质上是道 路交通流分布不均匀的间歇性特征所致,这是影响 VANET 网络中车辆间有效连通的重要因素。享有 公交专用道优先路权、受拥堵影响较小的公交车参 与无线信号中继能减少此类通信中断现象的发生。

采用区域车流密度刻画普通车道上行驶车辆的分布规律以表征间歇性交通流的特点。设 d(i,j)表示任意 2 个车辆节点 i,j 在一维道路上的直线距离,均为普通车的源与目的节点 (s,r) 间的普通车道上任意一个节点 i 满足 d(s,i)+d(i,r)=d(s,r),则所有车辆节点 i 组成的区域节点集合  $M_{s,r}$  表示为

$$M_{s,r} = \{s,r,i \mid d(s,i) + d(i,r) = d(s,r)\}$$
(1)

 $n = |M_{s,r}|$  为集合  $M_{s,r}$  中节点个数(包括 s,r),则节点 (s,r) 间的区域车辆密度表示为

$$\rho_{s,r} = \frac{n-1}{d(s,r)} \tag{2}$$

### 1.2 公交 VANET 车间连通概率模型

首先,在此建立公交 VANET 的车间连通概率模型,全网络连通状态通过车辆两两之间的连通状态概率分析获得,假定所有普通车和公交车都配置无线通信设备并参与数据转发。

定义车辆节点集合,包括公交车和普通车的所有车辆节点集合 V、所有普通车节点集合 C、所有公交车节点集合 B。在考虑公交专用道的公交 VANET中,当任意两车 i、j进行通信时,根据车辆类型不同分为无公交车参与和公交车参与通信模式,分析这2种模式的车间连通概率如下。

(1)无公交车参与通信模式的双车间连通概率 在这种通信模式下,两车均在普通车道行驶,车 间无线通信不受公交专用道行驶的公交车影响。因 所有普通车的天线高度相近,双车间通信路径上的 普通车可视为移动遮挡物,考虑此双车类型的双斜 率路径损耗模型[12]表示为

$$\begin{aligned} p_{i,j}(d(i,j)) &= \\ \begin{cases} p_{0\text{-}car} + 10n_1 \lg \left(\frac{d(i,j)}{d_0}\right) + X_{\sigma} \\ d_0 &\leq d(i,j) \leq d_{c2c} \\ \\ p_{0\text{-}car} + 10n_1 \lg \left(\frac{d_{c2c}}{d_0}\right) + 10n_2 \lg \left(\frac{d(i,j)}{d_{c2c}}\right) + X_{\sigma} \\ d(i,j) &> d_{c2c} \end{aligned}$$

式中 $p_{i,j}(d(i,j))$  是普通车节点i、j 距离为d 时接收到的信号强度; $p_{0-car}$  是自由空间路径损耗加上参考距离 $d_0$  处的累积天线增益,与发射机的发射功率、天线增益等信号发送性能有关。当链路中 $p_{0-car}$  一定时, $p_{i,j}(d(i,j))$  用来衡量路径损耗的大小; $d_{c2c}$  为普通车与普通车通信的临界距离,即两车之间无线信号传输的第一非涅尔区与地面交接的距离,与通信节点的天线高度有关[14],由式(4)确定。普通车通信时天线高度 $h_c$ , $\lambda$  为载波波长, $d_{ij}$  即为相应的通信临界距离,的路径损耗系数。文献[12] 对实测信号强度进行线性回归分析得到 $n_2 < n_1 < 0$ ,说明两车通信时,临界距离外的路径损耗要大于临界距离内的路径损

耗; $X_{\sigma}$ 表示与传输信道环境有关的独立零均值正态分布的随机变量。

$$d_{ij} = \sqrt{\left(\frac{4h_i h_j}{\lambda} - \frac{\lambda}{4}\right)^2 - (h_i - h_j)^2}$$
 (4)

用区域车辆密度表示时,两车i,j在视距传播 LOS 条件下的连通概率为

$$P_{i,j}(d(i,j))_{LOS}$$

= 
$$\Pr\{p_{i,j}(d(i,j)) \ge p_{th-car} \mid d(i,j)$$
 内无遮挡}

= 
$$\Pr\{p_{i,j}(d(i,j)) \ge p_{th-car} \mid n_{M_{i,j}} = 2\}$$
 (5)  
阻碍视距传播 OLOS 条件下的连通概率为

 $P \left( d(i, i) \right) = P_{r} \left( d(i, i) \right)$ 

*p<sub>th-car</sub>* 是无线链路保证普通车连通所要求的接收信号功率阈值,在一定路径损耗下接收信号功率高于该阈值时普通车辆才能够连通。

### (2)公交车参与通信模式的车间连通概率

此时公式(3)中临界距离  $d_{c2c}$  需修改为  $d_{B2c}$  或  $d_{B2B}$ , 分别表示公交车与普通车通信和公交车与公交车通信的临界距离,由式(4)、普通车天线高度  $h_c$  和公交车天线高度  $h_g$  确定。公交车车身可安装较高功率的发射机和接收机,不仅使参考距离  $d_o$  处的累积天线增益  $p_{0-bus}$  大于普通车,也能以更低的接收信号功率阈值  $p_{th-bus}$  检测到功率更小的接收信号,即  $p_{0-bus} > p_{0-car}$  、 $p_{th-bus}$  <  $p_{th-car}$  。考虑公交车行驶的专用道位于普通车道的外侧,公交车与普通车通信时(距离 d)的遮挡关系取决于距离 d 内的普通车道上是否存在其他普通车:公交专用道上两辆公交车

通信时,遮挡关系取决于两车间的公交专用道上是否存在其他公交车。遮挡关系规则中仍用  $n_{M_{i,j}}$  表示通信两车间的车辆数,则公交车参与通信时,只要接收信号功率  $p_{i,j}(d(i,j)) \ge p_{th-bus}$ ,就可根据式(5)和式(6)求出相应的 LOS 和 OLOS 条件下的两车间连通概率,其中 $p_{th-bus}$  为公交车参与通信时保证链路连通的接收信号功率阈值。

根据上述分析,将任意两车 i、j 间(公交车或普通车,LOS 或 OLOS 条件)的直接连通条件简记为 $p_{i,j}(d(i,j)) \ge p_{th}, p_{th}$  根据通信模式对应 $p_{th-car}$  或者 $p_{th-bus}$ ,相应的通信连接表示为双向连接 $e_{i,j} = [i,j]$ 。则交通场景中所有能直接通信(单跳传输)的连接可表示为单跳连接关系集合:

 $E = \{e_{i,j} \mid i \neq j, p_{i,j}(d(i,j)) \geq p_{th}\}$  (7) 此外,另一类公交 VANET 应用场景是道路上所有公交车可通过移动通信网等异构网络进行连接,能提升车联网的覆盖能力,方案如图 1 所示。此时 2 个节点间的连接表示为集合  $E_{b}$ 。

$$E_b = \{e_{i,j} \mid (i \neq j, p_{i,j}(d(i,j)) \geqslant p_{th}) \text{ or } i, j \in B\}$$
(8)

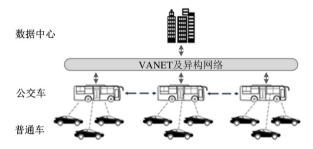


图 1 公交车互联模式示意图

上述模型的伪代码如算法1所示。

#### 算法1 公交 VANET 车间连通概率模型的伪代码

#### 1: begin

#(1)构造车辆节点集合和节点间单跳连接关系集合构成的无向连接图

- 2: 获取各时刻、车辆 ID、类型、位置数据
- 3: **for** 每一个时刻 slot
- 4: **for** 任意 s,r 节点对
- 5: 求节点对间距离并加入距离矩阵 distMatrix
- 6: if s 属于普通车 and r 属于普通车
- 7: 由式(1)计算区域车辆节点数 M\_sr,加入节点数矩阵 nMatrix, 且只计算普通车节点
- 8: 由式(2)确定节点对间区域车辆密度 rou\_sr

```
9:
                 第一菲涅尔临界距离 = d C2C
10:
                 接收信号功率阈值 p th sr = p th car
              elif s 属于公交车 and r 属于公交车
11:
                 由式(1)计算区域车辆节点数 M_sr,加入节点数矩阵 nMatrix,且只计算公交车节点
12.
                 第一菲涅尔临界距离 = d B2B
13:
14:
                 接收信号功率阈值 p th sr = p th bus
              elif s,r中一辆是普通车,另一辆是公交车
15:
                 先将公交车节点替换为区域外侧最近的普通车节点,再由式(1)
16:
                    按普通车模式计算区域车辆节点数 M sr. 加入节点数矩阵 nMatrix.
17:
                 第一菲涅尔临界距离 = d B2C
                 接收信号功率阈值 p_th_sr = p_th_bus
18:
19:
              if M \operatorname{sr} = 2
20:
                 按 LOS 条件下的式(3)计算直接通信的路径损耗 p sr
              elif M sr > 2
21:
                 按 OLOS 条件下的式(3)计算直接通信的路径损耗 p sr
22:
23:
              if p sr > p th sr
                 节点 s,r 单跳连通,cnnt sr=1
24:
25:
              else
                 节点 s,r 单跳不连通,cnnt sr = 0
26:
27:
              cnnt sr 计入直接连通矩阵 directConnectMatrix
28:
           由直接连通矩阵 directConnectMatrix 生成单跳连通关系集合 E
           车辆集合 V = \{B,C\} 和 E 构造无向连接图 G = (V,E)
39:
        # (2) 计算公交 VANET 连通概率
        遍历所有时刻 slot 下,所有"M sr = 2"的节点对,由式(5)计算视距传播 LOS 条件下的连通概率
30:
31:
       遍历所有时刻 slot 下, 所有" M sr > 2" 的节点对, 由式(6) 计算阻碍视距传播 OLOS 条件下的连通概率
```

## 2 公交 VANET 性能分析模型

#### 2.1 连通概率分析模型

VANET 中 2 个车辆节点若要连通,需要通过单跳或者多跳的方式建立一条端到端的路径  $R_{s,r}$ 。因此构造车辆节点集合和节点间单跳连接关系集合构成的无向连接图,并将公交 VANET 的连通概率转化为无向连接图的连通性问题。定义随机变量 X(s,r) 表示源与目的节点 (s,r) 间通信路径  $R_{s,r}$  是否存在,构建表示无公交车参与的常规 VANET 场景 CommVANET,其无向连接图为  $G_c = (C,E_c)$ ,构建公交 VANET 场景 busVANET,其无向连接图为 G = (V,E),并将公交车通过异构网络连接的模式称为公交车互联场景 busCnnt,其无向连接图为  $G_b = (V,E_b)$ ,对三者进行连通性对比分析。

考虑车辆区域密度 Z 对连通概率的影响,即分析网络连通概率对不同密度  $\rho_{s,r}$  的条件概率分布,

相应的条件概率及其近似值为

$$\Pr[X(s,r) = 1 \mid Z = \rho_{s,r}] \approx \frac{c(R_{s,r} \not = \epsilon, \rho_{s,r})}{c(\rho_{s,r})}$$
(9)

其中 $c(\cdot)$  为基础数据集中符合条件的数据计数值。因行驶车道不同,公交车节点不改变普通车道的车辆区域密度,即 busVANET 和 busCnnt 场景中公交车加入后车辆区域密度 $\rho_{s,r}$ 不变。

类似地,利用连通概率在不同距离值  $d_{s,r}$  时的条件概率分布分析源与目的节点车辆间距离 D 对连通 概率的影响,相应的条件概率表达式为  $\Pr[X(s,r)=1\mid D=d_{s,r}]$ 。

考虑到常见的车联网分析中采用固定车间距离  $D_{fix}$  判断连通的情况(称为固定方式),连通概率表示为  $P_{i,j}(d(i,j))_{fix} = \Pr\{d(i,j) \leq D_{fix}\}$ ,将固定方式与前述 3 种基于路径损耗模型的场景进行连通概率对比分析。

#### 2.2 传输延时和连通延续时间分析模型

利用公交 VANET 连通性分析模型,可进一步分析车辆节点连通时的传输延时和节点连通延续时间性能。设任意 2 个普通车节点对 (s,r) 进行信息传输时经历跳数为 H(s,r),则其概率分布  $\Pr[H(s,r)=h]$  可用于分析不同场景下公交 VANET 的通信延时性能。当 (s,r) 连通时 h 表示节点对在连接图中最短连通路径距离,当 (s,r) 不连通时  $h \to \infty$ 。为示意方便将  $h \to \infty$  时的概率记为 h = 0 时的概率。

对连通延续时间进行分析,构造包含时间分量的随机变量 Y(s,r,t) 表示通信路径  $R_{s,r}$  在 t 时刻是否存在,用表示连通延续时间的随机变量  $\tau_{s,r}=\Delta t$  表示 Y(s,r,t) 在时间间隔为  $[t_0,t_0+\Delta t)$  内的随机事件,则可用概率  $\Pr[\tau_{s,r}=\Delta t]$  的分布分析连通延续时间性能。

### 3 公交 VANET 连通性数值估算实验

#### 3.1 实验环境基本参数设置

设置道路长度 D=3000 m,最右侧为公交专用道,普通车道数分别设为  $L=1\sim3$ ;单车道车流量分别设为 q=100,300,500,700 veh/lane/h;设置公交车发车间隔 T=40,80,120,160 s;等间隔设置 3 处单路交通信号灯,以形成车流间歇性中断现象。其他参数设置如表 1 所示。

表 1 交通场景参数

参数	普通车	公交车
加速度/(m/s²)	2.6	2.6
减速度/ $(m/s^2)$	4.5	4.5
车长/m	5.0	12.0
最小车间距/m	2.5	5.0
最大时速/m/s	20.0	12.5

设天线高度参数  $h_c = 1.5 \text{ m}, h_B = 3.0 \text{ m};$ 无线信号频率 f = 5.9 GHz,则信号波长  $\lambda \approx 0.05 \text{ m};$ 式(3)中双斜率路径损耗模型<sup>[12]</sup>参数设置如表 2 所示。

假定公交车与普通车收发设备性能不同能带来 -5 dBm 的功率差异,为方便估算,统一在接收信号

表 2 无线电传播参数

	$n_1$	$n_2$	$p_0$	$\sigma$
LOS	-1.81	-2.85	-56.5	4.15
OLOS	-1.93	-2.74	-66.5	6.67

强度阈值上体现,设  $p_{th-bus} = -90$  dBm,  $p_{th-car} = -85$  dBm,并且有无公交车 2 种情况下式(3)中  $p_{0-car}$  均为  $p_0$ ;设置固定方式下的固定连通距离  $D_{fix} = 250$ ,800 m。

以上每个交通场景以 1 s 为时间步,各运行 10 800 s,去除首尾各 2000 s 内不稳定时段数据,用 Matlab 进行 10 次独立实验。

### 3.2 公交 VANET 的连通概率

图 2 所示为车道数 L 对连通概率的影响。L 取 1~3时,在低区域密度下,两种公交 VANET 场景的连 通概率均高于没有公交车辅助的 CommVANET 场景, 且增幅明显。其中低区域密度时,由于交通信号灯导 致的间歇性车流影响,连通概率出现波动,一定程度 上减弱了车道数量对连通概率增长幅度的影响,但车 道数量较少时,公交车辅助中继在更大的区域密度范 围内提升了连通概率,如图 2(b)所示,单车道的影响 范围(0~0.04 veh/lane/m)大于双车道和三车道。固 定方式中  $D_{\text{fix}} = 250 \text{ m}$  时,连通概率的变化趋势与 CommVANET 场景基本一致,并且是所有场景中最低 的(以 L = 2 为例),因为这一固定距离与路径损耗模 型下 OLOS 条件的连通距离接近,但既忽略了连通概 率更高的 LOS 条件,也没有考虑公交车参与通信时 对连通概率的提升作用。而  $D_{fix} = 800 \text{ m}$  则是采用了 无障碍信道中的信号传输距离,且与路段长度相当, 致使其连通性优于存在 OLOS 条件的其他 VANET 场 景,但不符合实际信道条件。

图 3 所示为公交车发车间隔 T 对连通概率的影响(以 L=2 为例)。在低区域密度下,2 种公交 VA-NET 场景连通概率的增长幅度随 T 的减小而明显增大,说明 T 越小,公交车辅助中继对连通概率的提升能力越强。图 3 (b) 中还可看出,随着 T 逐步减少,busCnnt 场景相对于 busVANET 场景的优势逐步减弱,说明道路上的公交车数量达到一定程度后,公交 VANET 对异构网络的依赖会大幅降低。

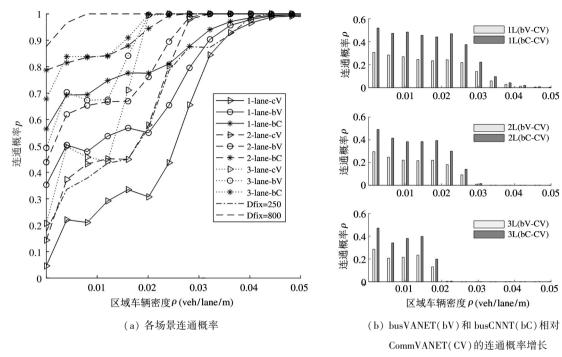


图 2 不同车道数的影响

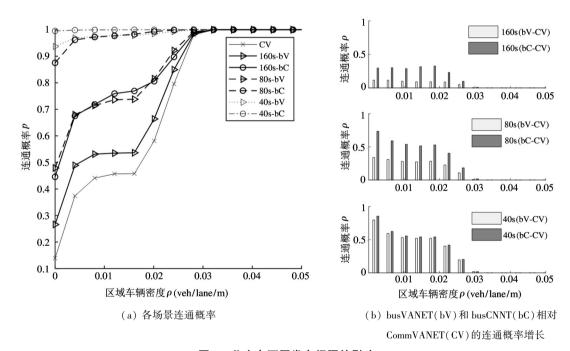


图 3 公交车不同发车间隔的影响

图 4 所示为公交车参与通信时连通概率随(s, r)间距离增大的变化趋势(L=2)。CommVANET中(s,r)间的连通概率在间隔约 300 m时即开始迅速下降;公交车参与的场景中下降趋势明显减缓,在3000 m处,CommVANET、busVANET和 busCnnt场景的连通概率分别为 20%、46%、70%,说明公交车

辅助中继在远距离信息传输中作用显著。图中①、②、③虚线处的连通概率显著下降,是3组信号灯引起的间歇性交通流对区域连通概率的影响,而bus-VANET和busCnnt场景中这种影响得到缓解。

由上述分析可知利用公交车作为中继节点时, 在不增加普通车道车辆密度的情况下提升了连通概 率,且在低区域密度和远距离范围内影响更大。

### 3.3 公交 VANET 的延时和连通延续性能

首先是通信的延时性能。图 5 为 (s,r) 间信息 传输跳数 h 的分布(归一化, L = 2)。受公交车影响,连通节点对的传输跳数分布向低跳数区域偏移, 且不连通的节点对中有 40% 和 69% 实现了连通(h = 0 处减少的频次),总体上降低了通信延时。在车路协同环境下,低延时给予车辆或驾驶员更多的安全反应时间,从而提升车辆驾驶的主动安全,也有助于缩小交通流的车头时距,提升交通效率。

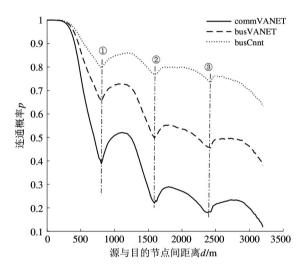


图 4 连通概率随车辆间距离的变化趋势

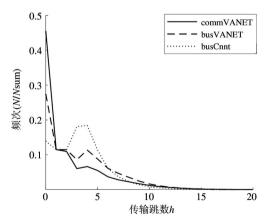


图 5 信息传输跳数分布

其次是对连通延续时间的影响。图 6 为 (s,r) 间连通延续时间的统计分布(归一化, L=2)。可见公交车加入后能减少车辆节点间的不连通情况,且延续时间分布向长延续时间区域偏移。BusVA-NET 和 BusCnnt 中的  $\Delta t=0$  s 的频次分别降低了约

32%和67%,在20 $s<\Delta t<260s$ 区域内频次明显提升,改善了网络拓扑的稳定性,从而提升了城市交通中多车辆协同的信息协作范围和可靠性。

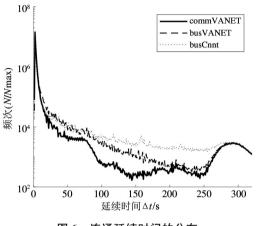


图 6 连通延续时间的分布

### 4 结论

建立考虑区域车辆密度、车辆天线高度和公交 专用道路的公交 VANET 网络连通概率分析模型, 对典型公交车辅助中继应用场景的通信性能进行分析,得到如下结论。

- (1)使用区域车辆密度表征道路车辆分布能够体现城市中车流间歇性中断现象;考虑车辆实际天线高度和公交专用道措施对信道衰落特性的影响,改进以路段均匀车辆密度和固定连通距离为前提的常规 VANET 分析模型,提出公交 VANET 的连通性估算方法。
- (2)通过建立的公交 VANET 连通性概率模型、传输延时和连通延续时间分析方法对公交 VANET 性能仿真评估显示,在区域车流密度较低和通信双方距离较远时,网络连通概率明显高于无公交车场景;在车道数量较少、公交车发车间隔较小时提升更显著,并且网络连接延时减少,连通延续时间提高,公交车作为辅助中继节点对 VANET 通信性能有明显提升,从而提高了车路协同环境下车辆驾驶的主动安全和城市交通效率。另外对公交车互联场景的性能分析可知,公交车密度增加时,VANET 对异构网络的依赖性会随之降低,减少对异构网络资源的占用。性能评估结果为部署公交车参与城市车联网

辅助中继提供了参考依据。

未来的研究工作将考虑公交车较大的有效通信 距离在覆盖较多节点时,如何设计上层网络协议解 决信道拥塞问题。

#### 参考文献

- [ 1] CHIA H O. A roadside unit-based localization scheme for vehicular ad hoc networks [ J ]. *International Journal of Communication Systems*, 2014,27(1):135-150
- [ 2] ABDRABOU A, ZHUANG W H. Probabilistic delay control and road side unit placement for vehicular ad hoc networks with disrupted connectivity [ J ]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011,29(1):129-139
- [3] 朱金奇, 马春梅, 刘明,等. 车载自组织网络中基于停车骨干网络的数据传输[J]. 软件学报, 2016, 27 (2):432-450
- [4] 邵彩幸, 冷甦鹏, 张可,等. 基于车队模型的车辆与车辆通信网络连通度研究[J]. 电子技术应用, 2015,41 (8):76-78,82
- [ 5] RASHEED H, ZEINAB R, JUNGGAB S, et al. PB-MII: replacing static RSUs with public buses-based mobile intermediary infrastructure in urban VANET-based clouds [J]. Cluster Computing, 2017,20(3):2231-2252
- [ 6] JIANG X X, DU D H C. BUS-VANET: a bus vehicular network integrated with traffic infrastructure [J]. Intelligent Transportation Systems Magazine, 2015,7(2):47-57

- [7] 张扶桑,金蓓弘,汪兆洋,等. 基于轨迹挖掘的公交车 自组织网络路由机制[J]. 计算机学报,2015,38(3): 648-662
- [8] 唐晓岚, 项尧, 陈文龙. 公交数据驱动的城市车联网转发机制[J]. 计算机研究与发展, 2020,57(4):723-735
- [ 9] HE J, CAI L, CHENG P, et al. Delay minimization for data dissemination in large-scale VANETs with buses and taxis [ J ]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016,15(8):1939-1950
- [10] HE R, MOLISCH A, TUFVESSON F, et al. Vehicle-tovehicle propagation models with large vehicle obstructions [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014,15:2237-2248
- [11] BOBAN M, MEIRELES R, BARROS J, et al. Exploiting the height of vehicles in vehicular communication [C] // 2011 IEEE Vehicular Networking Conference, Amsterdam, Netherlands, 2011;163-170
- [12] ABBAS T, SJOBERG K, KAREDAL J, et al. A measurement-based shadow fading model for vehicle-to-vehicle network simulations [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2015, 2015(3):1-12
- [13] 杨斯瑶,郁进明. 存在移动车辆遮挡的 VANETs 连通性研究[J]. 电子测量技术, 2018,41(3): 107-110
- [14] HE R, ZHONG Z, AI B, et al. Analysis of the relation between Fresnelzone and path loss exponent based on tworay model[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters , 2012, 11:208-211

# A connectivity estimation method for bus-VANET of urban connected vehicle

LIN Yingying \* \*\* , DONG Hongzhao \* , HAO Weina \* ( \* College of Mechanical Engineering , Zhejiang University of Technology , Hangzhou 310014) ( \*\* Department of Engineering , Zhejiang Open University , Hangzhou 310014)

#### **Abstract**

To estimate the communication performance including connectivity, transmission delay and communication duration of vehicular ad-hoc network (VANET) with bus as auxiliary relay node in urban connected vehicle, a connection probability model of bus-VANET is presented. The regional vehicle density is used to represent the intermittent interruption characteristics of urban traffic flow, the influence of antenna height and dedicated bus lane strategy on bus communication ability and driving law is considered, the dual-slope path loss model and probability analysis method are cited, the direct connection relationship between any two vehicles is established according to whether a bus node is included. Then, the communication performance under the strategy of dedicated bus lane and the measure that uses buses to construct the mobile backbone network with the help of heterogeneous network is analyzed. The simulation results show that the connection probability of bus-VANET under low regional traffic density and longnode-distance is significantly higher than that in no bus scenario, especially when the number of lanes is small or the bus departure interval is small, and the transmission delay and topology stability have also been improved.

**Key words:** intelligent transportation, connectivity, dual-slope path loss model, intermittent traffic flow, busvehicular ad-hoc network (VANET), dedicated bus lane