

基于预测的V-NDN多决策兴趣包转发方法

邢光林, 朱远*

(中南民族大学 计算机科学学院, 武汉 430074)

摘要 车载命名数据网络(V-NDN)是基于车载自组织网络(VANET)建立通信的一种新型网络框架. 洪泛转发策略在当前V-NDN中被广泛使用, 造成大量的网络资源被浪费. 针对上述问题, 提出基于预测的多决策兴趣包转发方法(KMNDN), 该方法实现了通过内容发现来定位内容节点, 根据车辆运动状态构造转发路径, 以减少网络中的无用流量. 为保证链路稳定性, 在链路构造过程中结合卡尔曼滤波预测、速度以及备选节点车流密度, 再通过设定权重对待选车辆进行排序, 从而选择出风险最小的节点作为下一跳. 实验结果显示: 所提方法在提高数据包交付率, 以及降低网络时延方面具有一定优势.

关键词 车辆命名数据网络; 兴趣包转发; 卡尔曼滤波; CRITIC权重法

中图分类号 TP393 **文献标志码** A **文章编号** 1672-4321(2025)03-0365-08

doi: 10.20056/j.cnki.ZNMDZK.20250310

V-NDN multi-decision interest packet forwarding strategy based on prediction

XING Guanglin, ZHU Yuan*

(College of Computer Science, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, China)

Abstract Vehicular Named Data Networking (V-NDN) is a new network framework based on Vehicular Ad-hoc Network (VANET). Flood forwarding policy is widely used in current V-NDN, leading to a large amount of network resources wasted. Aiming at the above problems, a multi-decision interest packet forwarding method based on prediction (KMNDN) is proposed, the method realizes to locate content nodes through the content discovery, and construct forwarding paths according to vehicle movement status to reduce useless traffic in the network. In order to ensure link stability, the method combines Kalman filter prediction, speed and neighbor density of alternative nodes in the link construction process, and then prioritize the vehicles that are waiting to be selected through weights, so as to select the node with the lowest risk as the next hop. The experimental results illustrate that the proposed method has certain advantages in improving packet delivery rate and reducing network delay.

Keywords Vehicle Named Data Network; interest packet forwarding; Kalman filter; CRITIC

车辆自组织网络(Vehicular Ad-hoc Networks, VANET)作为智能交通系统(Intelligent Transportation System, ITS)的重要组成部分, 一直倍受业界以及学术界关注^[1]. 通过建立车辆到车辆(Vehicle to Vehicle, V2V)和车辆到路侧单元(Vehicle to Road Side Unit, V2R)的链路, 车载网络给用户提供了交通管理以及智能驾驶等服务^[2].

在VANET的应用中存在一些挑战, 如车辆密度

稀疏, 快速拓扑变化等^[3]. 这些挑战促使研究人员将目光转向更有前景的新型网络模型——命名数据网络(Named Data Networking, NDN). NDN是通过以信息为中心的通信方式来提高通信效率的一种新型网络模型, 与基于IP(Internet Protocol)地址传统网络不同, NDN关注的是“数据是什么”, 而不是“数据在哪里”.

在NDN的驱动下, NDN与VANET结合形成一种

收稿日期 2023-02-13 * **通信作者** 朱远, 研究方向: 信息中心网络/命名数据网络技术, E-mail: zhuyuan12458@163.com

作者简介 邢光林(1972-), 男, 副教授, 博士, 研究方向: 移动计算与分布式系统、信息安全, E-mail: glxing@scuec.edu.cn

基金项目 中南民族大学研究生学术创新基金资助项目(3212022syxjj336)

新型网络模型——命名数据车辆自组织网络(Vehicle Named Data Network, V-NDN), V-NDN 中需要注意如下问题:首先,车辆基于洪泛发送数据,消耗大量网络资源;其次,当通过构造单条或多条传输路径缓解洪泛的影响时,车辆节点在分岔口会发生错误的路由选择,造成链路的选择不准确等问题.这将降低用户的体验质量(Quality of Experience, QoE)和服务质量(Quality of Service, QoS)^[4].

针对以上问题,本文提出基于预测的多决策兴趣包转发方法(KMNDN).当车辆节点需转发兴趣包时,将通过信息包收集邻居节点信息(预测坐标、实时坐标、预测速度、实时速度以及车流密度)以构造最优路径.其中对坐标的预测是先通过卡尔曼滤波对车辆转向进行初步预测,再通过计算,扩大转向对车辆坐标的影响.KMNDN 使用获取的信息,构建四个评价指标来选择最优转发节点,由于需要关注四个指标的相关性与波动性,因此采用 CRITIC 权重法加权,计算出得分最大的车辆作为下一跳.根据实验可知, KMNDN 在提高数据包交付率,以及降低网络时延方面具有一定优势.

1 国内外研究现状

V-NDN 中,可借助路侧单元(Road Side Unit, RSU)辅助数据传输,文献[5]提出选择最佳下一跳 RSU,将报文转发到目的地址.该方法使用四叉树模型在全局域分解 RSU,并使用预测节点位置的树构造方法确定目标区域与四叉树的交集.文献[6]提出基于簇路由的 Data 包回程预测方法(DBPM).DBPM 在 RSU 处使用 GPS(Global Positioning System)和凸规划定位算法来获得集群中车辆的定位信息,同时使用两个定位数据项,通过卡尔曼滤波模型,预测集群中车辆未来接入点的位置.最后, DBPM 通过集群将返回的 Data 包转发给车辆.此方法虽降低了时延和丢包率,但依赖 RSU.

当没有 RSU 参与,为了应对 V-NDN 网络的频繁中断和车辆拓扑变化,文献[7]提出一种以内容为中心的网络,将转发分为两个阶段:内容包的检索和后续 Data 包的检索, Interest 包被分为基础兴趣包和高级兴趣包,并且基于跳数转发 Interest 包,为 Data 包加上计时器来保证传输的稳定性.此方法只对 Interest 包简单地分为两类,并未有效减少网络开销.文献[8]提出一种基于树的数据兴趣结构,以合并不同车辆

之间导航路线重叠而产生的相同数据兴趣.基于树的数据兴趣管理,可减少 Interest 包的数量.文献[9]提出一种支持延迟容忍网络的地理路由策略,介绍了一种混合地理路由解决方案.在包转发中使用受限贪婪、贪婪、周界和支持延迟容忍网络的模式,改进 NDN 中兴趣分组和数据分组的传递.文献[10]提出一种基于速度的转发决策,在网络通信期间使用车辆速度和位置信息,避免 V-NDN 中的断开链路问题和网络隔离问题.文献[11]中提出将车辆的行驶方向定为一个重要参数的方法.因此,只有行驶方向与发送 Interest 包的车辆方向一致的车辆节点,才需要按照 NDN 规则进行待定转发表 PIT(Pending Interest Table)和内容存储 CS(Content Storage)查询、转发信息库 FIB(Forwarding Information Base)检索等操作转发 Interest 包.其他情况会丢弃 Interest 包,不做任何处理.文献[12]提出综合考虑距离、相对速度、链路持续时间、信号强度和节点度的 Interest 包转发策略.此方法对于分岔口的链路选择错误问题,使用的是重传机制,这会增大时延.文献[13]提出了一种基于请求/广告的内容转发方法(RACF)来提高 V-NDN 转发性能并解决节点移动性问题.在 RACF 中,当无法找到所需的内容时,广播一个请求消息.利用距离、方向等运动参数,构建动态单播转发路径,此方法对于决策参数使用的是公平分配的方式,并不符合实际情况.文献[14]提出一种基于移动预测的车辆命名数据网络转发策略(MPFS).在预测车辆当前位置后,选择距离当前转发器最远,且邻居间链路稳定的车辆作为下一跳转发器,实现更快、跳数更少的内容获取.此方法相比洪泛,虽降低了网络开销,但只是简单的将速度与时间结合起来预测,并未很好的处理车辆分岔口转向对数据传输的影响.

2 理论基础

2.1 NDN 路由方式

NDN 存在 Interest 包和 Data 包两种包.在 NDN 中消费者(Consumer)为请求数据向网络发送 Interest 包,通过网络转发到达存储着对应数据的生产者(Producer), Producer 将对应数据封装成 Data 包沿着 Interest 包的反向路径返回至 Consumer. NDN 中每个节点维持 3 个结构,分别是: PIT、CS、FIB.

当用户想要获取特定数据内容时,发出 Interest 包,节点接收到 Interest 包后,在 CS 表中根据标签的

匹配算法搜索所需要的内容,当CS中有匹配的内容,节点将直接构造对应的Data包返回.如果CS中没有匹配到内容,则查找PIT表中是否有对应的项.如果在PIT表中查询到了此对应的项,这就意味着之前此节点转发过相同的Interest包,但是还没有回传结果,此时需要将此Interest包传入的接口放入到此Interest包在PIT表中对应的接口中,然后丢弃此Interest包.如果PIT表中也没有此Interest包的表项,但是FIB表中有记录此Interest包的转发,则此Interest包通过FIB表中的记录转发.如果上述的方式都无法处理此Interest包,则说明此网络环境下该节点无法处理此Interest包,此时刻需将此Interest包丢弃.在Data包回传过程中,对PIT查询是否有该数据的请求,如果有则给所有请求列表分发,同时CS进行缓存,若没有则丢弃^[15].Interest包转发过程如图1所示.

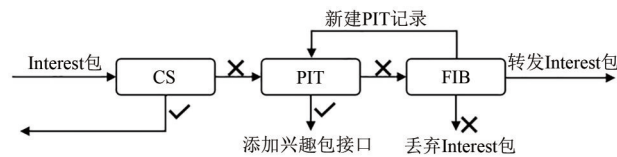
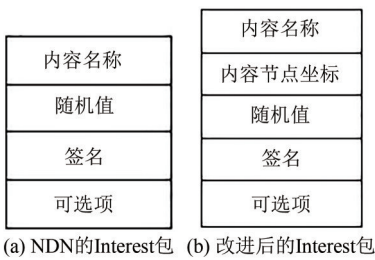


图1 Interest包转发过程

Fig. 1 Interest packet forwarding process

2.2 兴趣包格式设计

为了提高Data包回传的概率,本文在Interest包中添加了内容节点的坐标字段.利用MUPF中的内容发现(Content discovery)^[13],将内容节点坐标放入到Interest包中.图2为Interest包的格式.



(a) NDN的Interest包 (b) 改进后的Interest包

图2 Interest包格式

Fig. 2 Interest package format

2.3 卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波(Kalman filtering)是一种基于时序序列的递归滤波器,动态系统的状态可以通过一系列不确定的信息来估计,普遍应用于动态系统中的位置、速度等信息的预测^[16].动态系统是由状态方程和观测方程来描述.

状态方程为:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{M}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{u}_k \quad (1)$$

观测方程为:

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{N}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (2)$$

上述(1)(2)式中, \mathbf{M} 为系统转移矩阵, \mathbf{N} 为观测矩阵.而 $\mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k$ 均是高斯协方差噪声矩阵,协方差分别为 \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} .即 $\mathbf{u}_k \sim N(0, \mathbf{Q}), \mathbf{v}_k \sim N(0, \mathbf{R})$.卡尔曼滤波算法实现过程中分为两个部分预测和更新.

对于动态系统中的状态预测:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{M}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} \quad (3)$$

对于误差协方差矩阵的预测

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{M}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{M}^T + \mathbf{Q}_k \quad (4)$$

计算修正矩阵:

$$\mathbf{C}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{N} (\mathbf{N} \mathbf{P}_k^- \mathbf{N}^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (5)$$

系统状态更新:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{C}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{N} \hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (6)$$

对误差协方差矩阵的更新:

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{C}_k \mathbf{N}) \mathbf{P}_k^- \quad (7)$$

其中在(3)和(4)式中的初始化 $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ 和 \mathbf{P}_{k-1} ,给任意初始值皆可,但 \mathbf{P} 不可赋值为0.

3 基于预测的多决策兴趣包转发方法

3.1 系统模型

本文中,假使所有车辆节点都具备导航系统和车载通信,前者用于记录车辆节点的位置坐标,后者用于车与车之间的通信.在保证车与车之间保持通信的情况下,车辆节点在需转发Interest包时会通过信息包收集邻居节点的信息,形成一个邻居表.邻居表的格式如表1所示.

在城市交通中存在众多分岔口.车辆节点在分岔口中,寻找下一跳时需谨慎.如果不通过洪泛,而选择单条路径的方式进行下一跳选择,会因分岔口导致链路选择错误.在此情况下,为了更加准确地选择下一跳,本文使用KMNDN方法.

3.2 信息包的构造

当需要获取邻居节点信息时,车辆节点会发送一跳的信息包请求给每个邻居节点,邻居节点收到请求后会返回一个信息包.信息包的内容为(id, $x^-, y^-, x, y, v, v^-, \text{TD}, \theta$),其中分别为邻居节点的id、预测的位置坐标(x^-, y^-)、预测速度 v^- 、实时坐标(x, y)、实时速度 v 、车流密度TD以及行驶角度 θ .车辆节点在接收到信息包后生成并维护一张邻居表,邻居表结构如表1所示:

表1 邻居表
Tab. 1 Neighbor table

邻居节点	v (km/h)	v^- (km/h)	(x^-, y^-)	(x, y)	TD	θ
邻居节点 id	运动速度	预测速度	预测的位置坐标	地图中的位置	车流密度	行驶角度

3.3 预测的位置和速度

车辆节点接收到信息包请求时,需提供自身的信息包,同时该车辆节点会根据自身的轨迹数据集 T (T 存在大量在不同时刻下的位置信息和状态信息) 预测位置坐标,速度以及行驶角度.当车辆节点 t 时刻接收到信息包时,对轨迹数据 T_t 进行如下操作:

首先对 T_t 数据集进行修正,并进行坐标的转换,以完成预处理操作,根据 T_{t-k} 时刻的数据中所包含的位置与状态信息,以及(1)-(4)式,可得到 $t-k+1$ 时刻的坐标预估值和状态预估值,同时可以得到此刻的估计误差协方差;然后,根据 $t-k+1$ 时刻观测到的观测值对(5)-(7)式更新,得到最优的状态估计值,以及此刻的最优的估计误差协方差.至此完成一次滤波.通过多次迭代,得到 $t-1$ 时刻的最优状态估计值.

根据上述得到的 $t-1$ 时刻的最优状态估计值,与已知的当前时刻 t 下的观测值,预测出 $t+1$ 时刻下的位置坐标以及状态矩阵,状态矩阵包含速度以及行驶角度.

在本文中的分岔口情况下,主要关注车辆节点是否转向,考虑到预测时间短会使不同车辆节点的预测坐标与内容节点坐标的距离变化不显著,从而在选择下一跳时,无法有效的将各个邻居节点区分开,并且对于车辆节点来说,发生转向后短时间内不会发生第二次转向,所以对车辆节点的位置进行再次计算.

根据卡尔曼滤波预测出的轨迹坐标,速度以及运行角度,使用如下公式计算出预测位置坐标 (x^-, y^-) :

$$\begin{cases} x^- = x_{t+1} + v^- \Delta t \cos(\tau) \\ y^- = y_{t+1} + v^- \Delta t \sin(\tau) \end{cases} \quad (8)$$

在(8)式中 x_{t+1} 为预测后的 $t+1$ 时刻下的位置坐标, v^- 为预测后的 $t+1$ 时刻下的速度, τ 为预测后的 $t+1$ 时刻下的行驶角度.通过多次实验发现,在本文中的环境中,预测位置的时间为一分钟时,可以获得更加准确的下一跳选择.综上,将得到的第 i 车辆节点预测位置坐标 (x^-, y^-) 以及预测速度 v^- 放入到信息包中,以便信息包回传给请求方.

3.4 运动参数

3.4.1 预测位置到内容节点的距离

根据在 Interest 包中获取内容节点的位置坐标

(x_c, y_c) 和在信息包中提取邻居节点的预测位置 (x_i^-, y_i^-) , 计算出各个邻居节点预测后位置到内容节点的距离 D_{is} :

$$D_{is} = \sqrt{(x_i^- - x_c)^2 + (y_i^- - y_c)^2} \quad (9)$$

在选择下一跳的过程中,考虑到邻居节点会成为 Interest 包的携带者.且在携带过程中,可能出现车辆节点远离内容节点的情况,如图3.在图3中, v_4 为内容节点, v_2^-, v_3^- 为车辆节点 v_2, v_3 运动后的位置, v_1 为请求车辆.由图3可知,在分岔口 v_1 需选择下一跳时,车辆节点 v_2, v_3 都为 v_1 的邻居节点,但 v_2 无法送达 Interest 包.则在转发前对每一个邻居节点进行计算,得到 D_{is} . D_{is} 越小, Interest 包到达内容节点的概率越大.考虑到在挑选过程中,可能挑选到状态急剧变化的车辆或邻居车辆过少的车辆,从而无法送达 Interest 包,因此本文需要同时考虑预测速度差、相对速度和备选车辆的车流密度.

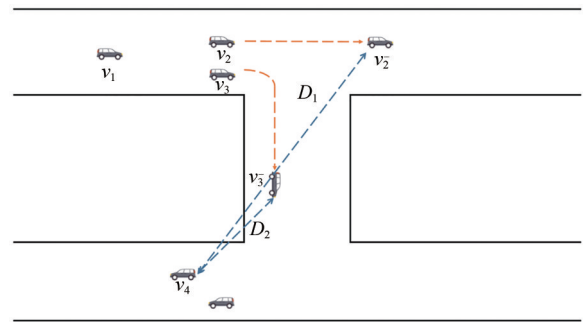


图3 预测位置后示意图

Fig. 3 Schematic diagram of predicted position

3.4.2 预测速度差

车辆节点在接收到信息包后,通过提取信息包中的实时速度 v 和预测速度 v^- , 可得出此时的邻居节点的速度是否发生突变.速度的稳定性对于链路的稳定极为重要,所以 t 时刻上的 i 节点速度变化差为 Δv_{ii} :

$$\Delta v_{ii} = |v_i^- - v_i| \quad (10)$$

3.4.3 相对速度

Δv_{ij} 表示当前车辆节点 i 与邻居节点 j 的相对速度,当相对速度过大时,两车之间的相对距离急剧变化,这将导致链路不稳定.

$$\Delta v_{ij} = \sqrt{v_i^2 + v_j^2 - 2v_i v_j \cos(\theta_i - \theta_j)} \quad (11)$$

其中, θ_i 和 θ_j 分别是第 i 辆车的行驶角度以及第 j 辆车的行驶角度.

3.4.4 备选车辆的车流密度

当车辆节点需要统计邻居节点个数时,会广播跳数为一跳的“hello包”,通过返回的“hello包”报文间的差异,得到此车辆节点的邻居节点个数 n .通过

计算可以得到车流密度.在车流密度大的情况下,车辆节点移动缓慢,使得链路更加稳定.在选择下一跳时,车流密度越大,越有机会选择到最优传输节点,TD表示车流密度:

$$TD = \frac{n}{R}. \quad (12)$$

其中R是车辆节点的传输范围.

3.5 路由选择

在车辆节点接收到信息包后将构建一张权重表,同时对权重表进行排序,删除操作.权重表结构如表2所示.

表2 权重表
Tab.2 Weight table

节点的标签	预测位置到内容节点的距离			车流密度
	D_{is}	相对速度	预测速度差	
id	D_{is}	Δv_{ij}	Δv_{it}	TD

数据传输对于链路的稳定性要求极高,所以在对权重表排序时,需要考虑车辆运行的稳定性,首先,对表中删除掉相对速度过大的车辆(通过多次实验证明,当相对速度超过14 km/h时,链路将会在传输完成前断裂)^[10].对所得到的四个指标加权,选择出下一跳.

本文选用CRITIC权重法,通过CRITIC权重法对所得指标进行分析加权,加权计算后的得分对待选车辆节点排序.排序过程如下:

Step 1:假设本文中有 m 辆待选车辆,每个待选车辆有 n 个指标($n=4$), P 表示判断矩阵:

$$P = (h_{ij})_{mn} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n). \quad (13)$$

在(13)式中 h_{ij} 代表第 i 辆车的第 j 个指标的值.

Step 2:四个指标的单位多不相同,需对判断矩阵除去量纲并归一化.

由于备选车辆的车流密度是正向指标,则只需归一化:

$$t_{ij} = \frac{h_{ij} - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}} \quad (j=4). \quad (14)$$

预测位置到目的坐标的距离、预测速度差以及相对速度是逆向指标,则需正向化并归一化为:

$$t_{ij} = \frac{h_{\max} - h_{ij}}{h_{\max} - h_{\min}} \quad (j=1,2,3). \quad (15)$$

在(14)-(15)式中 h_{\max} 指的是相同指标下的不同车辆的最大指标值; h_{\min} 指的是相同指标下的不同车辆的最小指标值.

Step 3:计算各个指标的对比强度和和相关程度.

对比强度是使用标准差进行计算的,所以在此

算法中,标准差越大,说明对比度越大,波动性越大,所含信息量越多,那么权值越大.

$$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (h_{ij} - \bar{h}_j)^2}{n-1}}. \quad (16)$$

相关程度是由相关系数决定,当两个指标的相关系数越大,则相关性越强,冲突性越小.那么权值越低.在计算相关程度时,需要使用相关系数.相关系数公式如下:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{j,k=1}^n (h_{ij} - \bar{h}_j)(h_{ik} - \bar{h}_k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (h_{ij} - \bar{h}_j)^2 \sum_{k=1}^n (h_{ik} - \bar{h}_k)^2}}. \quad (17)$$

由(17)的相关系数可得相关程度,公式如下:

$$A_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}). \quad (18)$$

Step 4: w_j 表示每一个指标的权值:

$$w_j = \frac{S_j \times A_j}{\sum_{i=1}^n S_j \times A_j}. \quad (19)$$

通过(19)式中得出的权值,进行加权运算得出 $score_i$, $score_i$ 为第 i 辆车的所得分数.得到 $score$ 的公式如下:

$$score_i = \sum_{j=1}^n w_j t_{ij} \quad (20).$$

Step 5:对待权重表排序

上述四个指标中,TD与 Δv_{it} 之间有一定联系,车流密度影响车辆节点速度,指标间相关性越高,权值越小.而对于 D_{is} 、 Δv_{ij} 和 Δv_{it} ,数据的波动性尤为重要,当波动性越大时,所含信息越多,则权值越大.根据所选的四个指标的对比强度和相关的计算,可得出每一指标的权值,同时根据(20)式,计算出每一个车辆节点的 $score$.使用所得到 $score$ 对权重表进行排序,同时选择表里 $score$ 最大的为最优下一跳.

在Interest包传输过程中,如果FIB表中无此Interest包的信息,则对邻居节点进行选择,具体步骤如下:

Step 5.1:判断Interest包中内容节点坐标信息是否为空,如果为空,则需要一个内容发现过程,将内容坐标加入到Interest包中;

Step 5.2:当Interest包中内容节点坐标信息不为空时,此车辆节点向邻居节点发送一跳的信息包请求.请求的信息内容如表1;

Step 5.3:当邻居节点接收到信息包的请求信息时,通过3.2中的方法预测出位置与速度信息,同时此车辆节点通过3.4.4的方法收集邻居节点车流密度,并将这些与其他信息放入信息包中回传给信息包请求车辆节点;

Step 5.4: 当车辆节点接收到回传的信息包时, 首先检查信息包内容是否完整, 如果完整, 则放入权重表相应位置中, 否则需重新请求. 内容如表 2. 根据每一个信息包中的信息, 结合(9)-(12)式, 并使用 3.5 中的加权方法计算, 对权重表重新排序, 选择得分最大的节点作为下一跳.

具体的路径构建算法如算法 1 所示.

算法 1 路径的构建	
输入:	请求节点 s , 内容节点 d , GPS, 数字地图
输出:	FIB, PIT
if (d 处于 s 的传播范围内)	
将兴趣分组传给 d 节点;	
将与 d 连接的节点写入 FIB;	
else	
for (每个邻居节点)	
收集 $D_{is}, \Delta v_{ij}, \Delta v_{ii}$, TD 信息;	
while(Δv_{ij} 小于 14 km/h)	
根据收集到的信息以及 CRITIC 算法计算出每个邻居节点的 score;	
end while	
end for	
Maxmum(score);	
返回 score 最大节点标识;	
将相应的连接接口写入 FIB;	
end if	
将兴趣分组的到达接口写入 PIT	

4 实验结果与分析

本文所使用的方法为基于预测的 V-NDN 多决策兴趣包转发方法. 在本节中, 通过仿真平台评估所提方法的性能, 将 KMNDN 与传统的洪泛方法 V-NDN, RACF 以及 MPFS 比较. 使用 Data 包交付率和网络时延这两个指标, 评价方法的优劣.

4.1 实验的配置及参数

实验环境为操作系统 Ubuntu 16.04 下的 ndnSIM2.1, 可视化配置的是 pybindgen:0.17.0.post45+ng4806e4f, 以及 ns-3-dev 配置的版本号是 ns-3.23-dev-ndnSIM-2.1. 以及使用 C++ 构建了一个仿真平台, 借助 sumo 产生简单的道路拓扑, 实验在 20 km/h 的车速下, 20~100 不同车辆节点数; 以及在 40 个车辆节点下, 10~30 km/h 不同车速情况下, KMVNDN 的方案与其他的三种方案在丢包率以及平均时延上的比较, 模拟实验进行的时间为 100 s, 不同方案运行 10 次取平均值, 参数设置如表 3 所示.

表 3 实验参数

Tab. 3 Experimental parameters	
参数	取值
网络范围	1000 m×1000 m
速度	10~30 km/h
车辆通信半径	150 m
模拟时间	100 s
车辆节点数	20~100
consumers 百分比	15%
producers 百分比	20%
运行次数	10 次
移动性模型	Random Direction

4.2 仿真结果分析

仿真过程中对于结果的评价指标如下.

(1) 时延: Interest 包发出后到请求者接收到 Data 包的时间间隔.

(2) 交付率: 交付率 = $\frac{\text{收到的数据包}}{\text{发出的兴趣包}}$.

仿真过程中对在不同车辆情况下的数据进行记录, 图 4-图 5 分别记录四种方案在 20~100 辆车的情况下, Data 包交付率和接收到 Data 包的平均时延. 结合图 4 可知, 在 Data 包的交付率上, 性能优到劣, 依次为 V-NDN, KMNDN, MPFS, RACF. 随着车辆节点数量的增加, 四种方法的交付率呈下降趋势, KMNDN 在交付率上优于 MPFS 和 RACF 方法, 劣于 V-NDN. V-NDN 虽在交付率上优于其他方法, 但在网络时延和网络开销上远远高于其他方法. 从图 5 中可知, 随着节点数的增多, 四种方法平均时延波动较小, KMNDN 在平均网络时延上性能好于其他三种方法, 但 RACF 与 KMNDN, MPFS 有差距, 这是由于 RACF 在构造路径时不能和 KMNDN、MPFS 一样有着较高的下一跳准确率, 重传会增大延迟. KMNDN 能够更加准确地构造请求路径和返回路径, 这提高了 Data 包返回的成功概率, 减少了数据分组的时延.

因此在此仿真环境中车辆节点数不同的情况下, KMNDN 相较于其他三种方法, 交付率虽低于 V-NDN 方法, 但综合比较优于其他两种方法, 尤其平均时延上优于其他三种方法.

图 6-图 7 分别记录了在车辆节点数是 40, 节点平均速度在 10~30 km/h 的情况下, Data 包交付率和接收到 Data 包的平均时延. 随着车辆速度增加, 车与车之间的链路更加难以维护, 这将导致链路间的断裂. 随着速度的增加, 四种方法的交付率呈下降趋势, 网络时延升高. 图 6 可知, 在较低的速度下四种方法都能有效地交付 Interest 包, 但随着速度的增

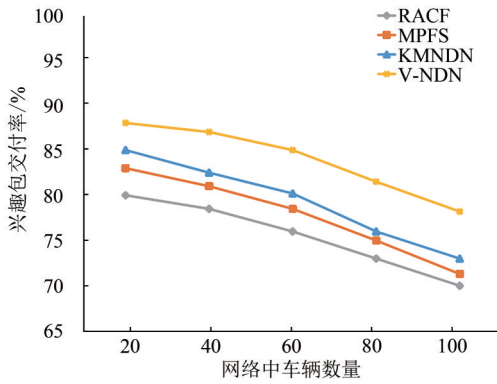


图4 网络中不同车辆节点数目下交付率变化

Fig. 4 Variation of delivery rate with different number of nodes in the network

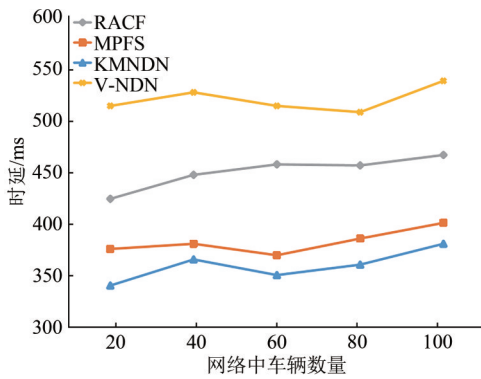


图5 网络中不同车辆节点数目下接收到的Data包平均时延变化

Fig. 5 Variation of average delay of received packets with different number of nodes in the network

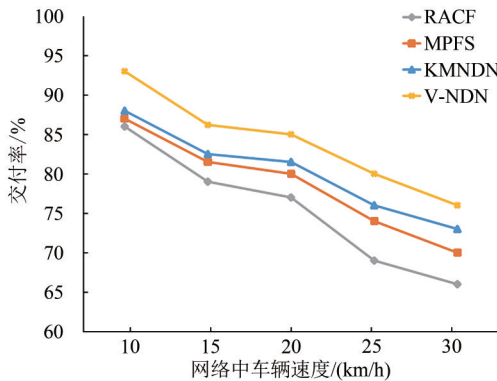


图6 网络中不同速度下交付率变化

Fig. 6 Delivery rate variation at different speeds in the network

加,Data包交付率加速下降.KMNDN在交付率上低于V-NDN方法,优于其他两种方法.这是由于RACF在对下一跳选择时,没有考虑车辆未来速度的突然变化.从图7可知,四种方法随着车辆节点速度的增加平均时延均呈上升趋势,但在相同速度下,KMNDN在接收到Data包平均时延上优于其他三种方法.

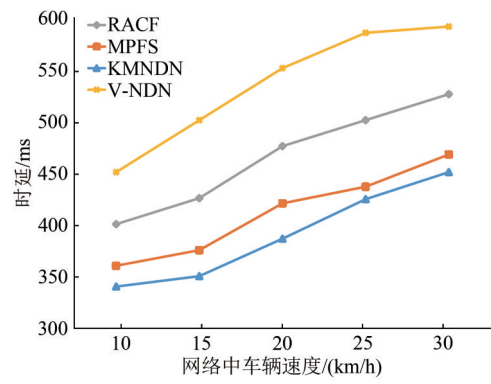


图7 网络中不同速度下接收到的Data包平均时延变化

Fig. 7 Variation of average delay of received packets at different speeds in the network

5 结语及展望

在本论文的研究中,提出了一种基于预测的多决策兴趣包转发方法,通过在每一个需要转发Interest包的车辆节点中,使用改进的转发过程代替传统的Interest包转发方式,此方法缓解了V-NDN网络中洪泛所引起的网络延迟和巨大的网络开销问题,并且在分岔口路段,有着更加准确的下一跳选择.本文采用网络时延与Data包交付率两个方面与其他三种方法比较,由仿真实验的结果显示,在不同的节点数以及不同的车辆速度情况下,KMNDN有着较高的交付率以及较低的时延.在未来的工作中,可以引用更多更准确的决策准则,并在更加复杂的不同路网下运用相应的决策方法来选择下一个传输节点.

参 考 文 献

- [1] HU S, JIA Y, SHE C, et al. Performance analysis of VANET routing protocols and implementation of a VANET terminal[C]//IEEE International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication. Dalian: IEEE, 2017: 1248-1252.
- [2] ZHENG K, ZHENG Q, CHATZIMISIO P, et al. Heterogeneous vehicular networking: A survey on architecture, challenges, and solutions [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2377-2396.
- [3] HAWBANI A, TORBOSH E, WANG X, et al. Fuzzy-based distributed protocol for Vehicle-to-Vehicle communication [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 29: 2934-2945.
- [4] ZHOU S, CUI M, HOU R, et al. Data packet forward in strategy based on vehicle tracking in Named Data Networking [C]//International Conference on Hot Information-Centric Networking (HotICN). Chongqing: IEEE, 2019: 66-71.

- [5] LI P, ZHANG T, HUANG C, et al. RSU-assisted geocast in Vehicular Ad-hoc Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(1): 53-59.
- [6] ZHOU S, HOU R, ZHENG Y, et al. Cluster routing-based data packet backhaul prediction method in Vehicular Named Data Networking [J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2021, 8(3): 2639-2650.
- [7] MARICA A, CLAUDIA C, ANTONELLA M, et al. Enhancing content-centric networking for vehicular environments [J]. Computer Networks, 2013, 57(16): 3222-3234.
- [8] LI X, WANG S, WU W, et al. Interest tree based information dissemination via Vehicular Named Data Networking [C]//2018 27th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN), Hangzhou: IEEE, 2018: 1-9.
- [9] ALDAHLAN B, FEI Z. A geographic routing strategy with DTN support for Vehicular Named Data Networking [C]//2019 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC). New York: IEEE, 2019: 1-13.
- [10] BURHAN M, REHMAN R A, KIM B S, et al. Velocity based reliable forwarding strategy towards disconnect link avoidance in NDN-VANETs [C]//2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW). Seoul: IEEE, 2020: 1054-2654.
- [11] TAHIR M U, REHMAN R A. CUIF: Control of use-less interests flooding in Vehicular Named Data Networks [C]//2018 International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT). Hangzhou: IEEE, 2018, 303-308.
- [12] LI D, SONG T, YANG Y, et al. A reliable and efficient forwarding strategy in Vehicular Named Data Networking [J]. Journal of Communications and Networks, 2020, 22(4): 1-10.
- [13] AI-QUTMANI M, WANG X, YI B, et al. MUPF: Request/advertise-based content forwarding in Vehicular Named Data Networking [J]. IEEE Access, 2021, 9: 226-236.
- [14] WANG J, LUO J, ZHOU J, et al. A mobility-predict-based forwarding strategy in Vehicular Named Data Networks [C]//GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conference. Hangzhou: IEEE, 2020: 1-6.
- [15] LI Z, XU Y, ZHANG B. Packet forwarding in Named Data Networking requirements and survey of solutions tutorials [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 21(2): 1950-1987.
- [16] LIU C, ZHANG G, GUO W, et al. Kalman prediction-based neighbor discovery and its effect on routing protocol in Vehicular Ad-hoc Networks [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(1): 159-169.

(责编&校对 姚春娜)