

VANET 中基于 ICN 架构的内容转发策略

芮兰兰, 郭辉, 史瑞昌, 黄豪球

(北京邮电大学网络与交换国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 结合 VANET 与信息中心网络 (ICN, information centric network) 架构, 提出基于车辆动态信息的路由构造及筛选策略 (SRBS, strategy for routing building and selecting)。摒弃了广泛采用的洪泛策略, 通过内容发现定位内容节点, 随后构造多个单播转发路径, 减少了网络中的无用流量; 为保证 Data 分组能够成功原路返回, 在单播路径构造中引入车辆动态参数作为构造依据并结合链路有效时间 (LET, link expiration time) 进行路径筛选, 提高了转发路径的稳定性及可靠性; 仿真表明该方案提高了路由对时间的容忍度, 充分利用了网络缓存并减少了网络时延及路由跳数。

关键词: VANET; ICN; 车辆动态参数; LET; 路由构造及筛选

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Content forwarding strategy based on ICN architecture in VANET

RUI Lan-lan, GUO Hui, SHI Rui-chang, HUANG Hao-qi

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Combining VANET with ICN, a routing building and selecting strategy-SRBS based on vehicular dynamic parameters was proposed. After locating the content nodes through content discovery process, several unicast forwarding paths would be built, which reduces useless traffic compared with a flooding way. By introducing dynamic metrics and LET to routing building and selecting process, SRBS improved the link stability and reliability, which ensured the Data's successful return. Simulation results show the scheme also improves the time tolerance of routings and makes full use of network cache and reduces delay and routing hops.

Key words: VANET, ICN, vehicular dynamic parameters, LET, routing building and selecting

1 引言

作为智能交通系统 (ITS) 的重要研究部分, VANET^[1]已成为移动网络研究领域的热门话题。随着研究的深入, 一些学者发现传统网络模式下的 VANET 存在诸多不足^[2]: 1) 为动态节点分配 IP 地址并时刻保持各个节点与 IP 地址的固定映射非常困难; 2) 高动态环境下利用 IP 地址来对车辆节点进行识别、定位的工作模式使路由节点难以管理,

同时由于路由策略缺乏灵活性, 很容易出现因节点离开导致通信中断并无法修复的情况; 3) 传输内容相对于中间节点是非透明的, 数据分组只有达到其目的节点后才会被解析, 网络中内容的缓存也是局部的, 从而出现当多个请求节点请求同一内容时, 请求次数会不断重复增加, 进而浪费大量带宽, 最终降低网络性能等。因此, 为解决以上问题, 一些学者提出将 VANET 与信息中心网络 (ICN) 架构进行结合。

收稿日期: 2016-09-27; 修回日期: 2017-02-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61302078, No.61372108); 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (No.2011AA01A102); 国家科技重大基金资助项目 (No.2011ZX03005-004-02); 北京高等教育优秀青年教师基金资助项目 (No.YETP0476)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61302078, No.61372108), The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No.2011AA01A102), The National S&T Major Project (No.2011ZX03005-004-02), Beijing Higher Education Young Elite Teacher Project (No.YETP0476)

不同于 IP 网络, ICN^[3]将关注点从主机转向了实际传输内容并忽略内容来源, 内容请求用户不再需要了解数据分组的具体传输过程, 而只是关心自身请求是否可以被满足, 并且网络中任何节点都可以进行 on-path^[4]内容缓存。ICN 特性很好地适应了 VANET 环境的特点, 弥补了 TCP/IP 对移动性管理的不足, 提高了信息分发和获取的高效性, 并在一定程度上解决了无线信道不稳定和连接间歇性的问题。CCN 及 NDN 是 2 个非常重要并获得广泛应用的 ICN 架构模型。

ICN 架构应用于移动网络的研究最先开始于移动自组织网络 (MANET)^[5], 如在文献[6]中提出的 LFBL(listen first, broadcast later)路由策略以及 CHANET^[7]路由协议等。之后随着 ICN 的发展, 将 ICN 应用于 VANET 的相关研究也开始引起更多关注。

2010 年, 一些学者提出了 VANET 结合 NDN 架构的模型 (DMND)^[8], 其尽可能利用一切可用物理信道来减轻车辆移动性对网络性能造成的影响; 同时通过缓存 Interest 分组和 Data 分组来支持网络对时延和链路破坏的容忍度; 通信安全通过保证数据安全来实现。DMND 为提高 VANET 网络性能指明了一个十分可行的方向, 但其 Interest 分组通过基站来进行广播的方式浪费了大量带宽, 对于 Data 分组的返回并没有具体描述, PIT 表项的更新设置采用一种简单的延时手段, 还存在需要优化的部分。

文献[9]提出 CCVN 方案, 其基于传统的 CCN 工作模式并利用分布式广播风暴缓和技术简化了传输路径; CCVN 将 Interest 分组根据不同的内容检索方式分为 B-Int 和 A-Int 这 2 种类型, 数据分组转发不再使用简单的洪泛形式, 而是加入了转发跳数限制, 并在其数据分组结构中增加了一些信息控制域; 同时, 为提高传输的可靠性, CCVN 对于每个未满足的 Interest 分组设定一个计时器来管理 Interest 分组重传并防止数据丢失。但 CCVN 方案只关注了 Interest 分组的广播过程, 对于结合 CCN 后相应的数据结构设计缺乏一个详细的叙述和具体细致的考虑。

Grassi 等^[10]提出了 V-NDN, 一个车辆节点在 V-NDN 中可以充当数据请求者、数据产生者、转发者及“数据骡”这 4 个角色; 同时, V-NDN 在每个节点中增加了 NDN 域、NDN 本地接口、NDN 网络接口、链路适配层 LAL 及本地服务这 5 种结构,

在 LAL 中设置一个转发计时器并通过监听链路来避免出现重复转发。V-NDN 控制了 Interest 分组在网络中的过量传播, 但忽略了 PIT、FIB 的构造与利用过程, 网络中 Data 分组的返回仍采用传统的广播模式, 造成大量无用数据的冗余。

针对 VANET 中路由分析, 一种基于跳数的内容分发策略^[11]被提出, 该策略考虑到在动态环境下 Data 分组原路返回机制不再适用, 在 PIT 结构中增加 hop、sendstamp、count 这 3 个字段来分别记录本节点到达目的节点的跳数、转发时间及转发次数, Data 分组在转发过程中不断记录跳数, 并设定一个阈值范围 T 来决定 Data 分组是否应该被继续转发。该策略只是缩小了洪泛的范围, 但并没有完全改善洪泛带来的弊端。

在上述研究成果的基础上, 本文针对 ICN 与 VANET 结合方案中 Interest 分组的路由问题进行了以下改进: 1) 充分结合 ICN 中的结构设计及车辆节点自身的动态信息来进行路由选取, 使最终构造的请求路径能够尽可能适应网络环境的动态变化, 尽量减少不必要的路由失败; 2) 解决全广播模式带来的大量带宽浪费问题, 进行路由转发之前对 FIB 表项进行基于链路有效时间 LET 值的筛选, 选择对时间容忍度最大的接口进行转发, 保证 Data 分组可以实现“原路返回”。

2 SRBS

2.1 设计原则

首先, 通过对 VANET 环境下以信息为中心的路由转发进行学习, 发现大部分转发策略都趋向于利用无线信道进行简单洪泛, 该方式虽然充分利用了信道的广播特性, 但大量的无用流量很容易引发广播风暴及数据碰撞, 在很大程度上降低了网络性能。因此本文提出的 SRBS 策略摒弃了全广播模式, 希望通过构造多个稳定的单播路径来进行 Interest 分组请求及 Data 分组返回, 尽可能减少不必要的网络流量。

其次, 对于一个 Interest 分组在节点处出现 CS、PIT、FIB 均未命中情况, SRBS 改进了简单丢弃的传统处理方式, 通过构造简单的消息广播来在全网内进行内容发现, 寻找网络中能够满足该请求的内容节点。虽然该广播过程也会造成无用流量, 但相比于 Interest 分组及 Data 分组信息, 内容发现过程中分组数据分组信息要少得多, 因此, 综合来说 SRBS 仍实现了减少网络流量的目的。

最后，为提高 Data 分组成功原路返回的概率，在研究了很多 VANET 路由方案的基础上，提出了基于车辆动态参数的路由构造算法及基于 LET 的 FIB 筛选过程，在动态环境下根据车辆运动的速度方向、距离及车辆密度来选择与本节点具有稳定链路连接的下一跳，根据 LET 来进一步筛选与本节点具有可靠链路连接的节点，从而最终构造一条或多条稳定可靠的路由路径，增大 Interest 分组成功请求及 Data 分组成功返回的机会。

SRBS 工作过程主要分以下 3 个方面：1) 当 Interest 分组在一个节点的 CS、PIT 及 FIB 中均找不到相应信息时，SRBS 将根据请求内容标识在全网络进行内容发现，寻找并定位拥有该内容的具体节点；2) 根据内容节点位置及车辆运动参数，为 Interest 分组的传播构造更加适应 VANET 环境的稳

定、可靠单播路径，并填写 PIT 及 FIB；3) 针对多个 FIB 中的路径构造结果，设计基于链路有效时间 LET 的筛选算法来尽可能地减小网络中无用流量。图 1 详细描述了 SRBS 数据请求过程。

SRBS 对于 Interest 分组结构进行了如下改进：在每个 Interest 分组中加入相应的内容节点标识(提供者 ID)，初始时该字段为空，当发现有内容节点标识返回后，填写该字段，同时下一跳进行 Interest 分组转发时也会增加对该字段的查询过程(如图 1 所示)，这样可以避免在下一个节点出现 CS、PIT 及 FIB 均未命中时，该节点再次进行内容发现的情况。关于 Interest 分组的具体信息字段如图 2 所示。

同时，SRBS 认为所有的车辆均具有 GPS、数字地图等设备；节点之间通过简单的消息交换来感知邻居车辆；通过道路旁设置的一些基础设施可以

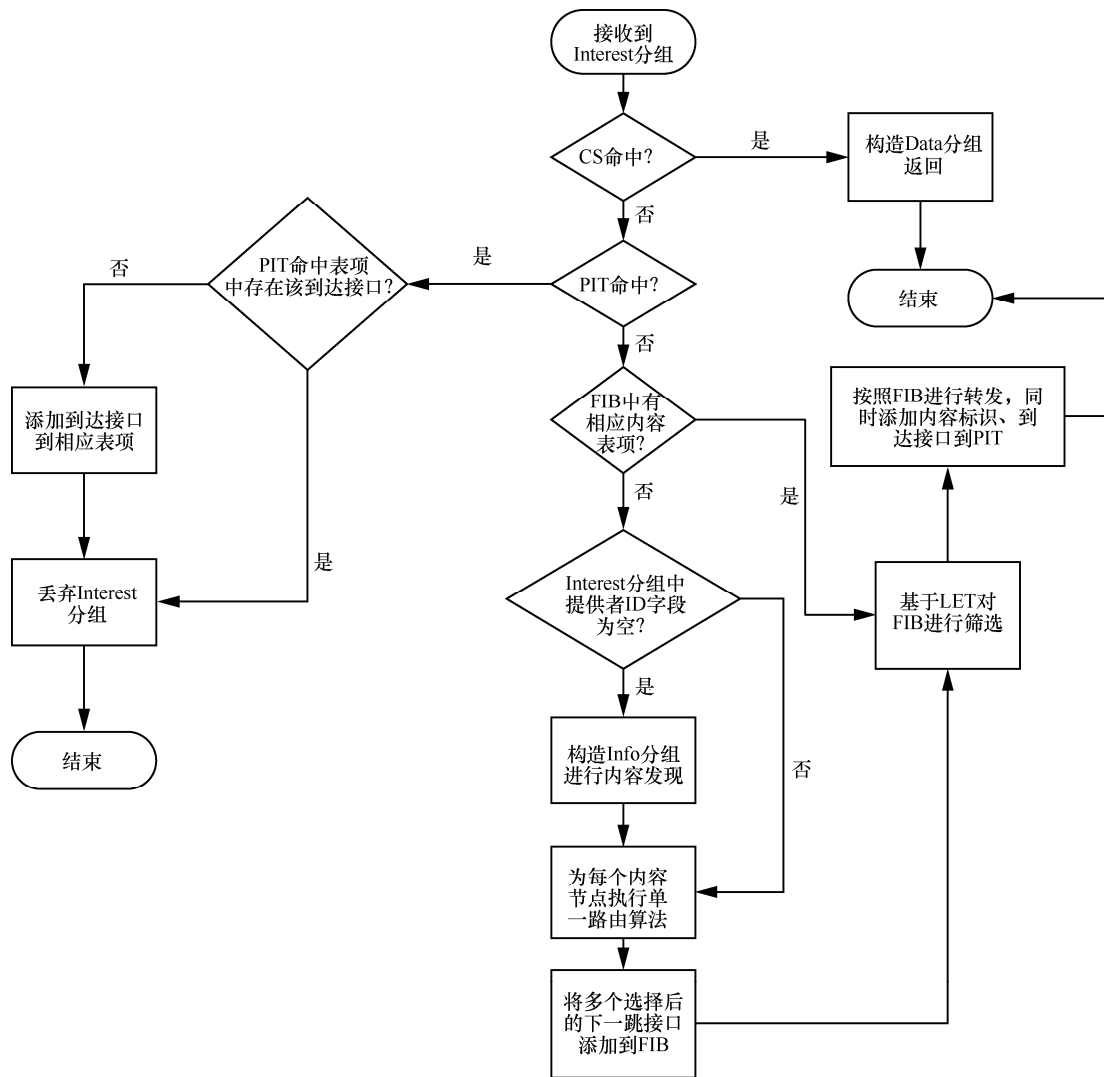
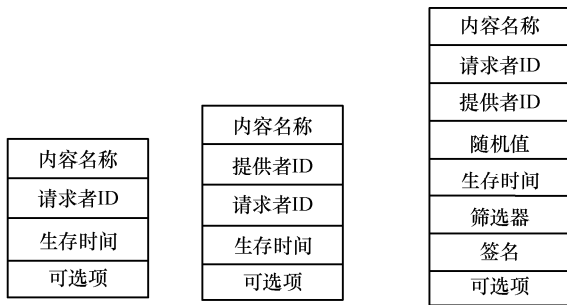


图 1 Interest 分组处理流程

实时感知交通流量；对于每个车辆节点来说，数据的最大转发范围固定。



(a) Info 消息格式 (b) ACK 消息格式 (c) 改进的Interest消息格式

图 2 Info、ACK 及改进的 Interest 消息格式

2.2 内容发现

当 Interest 分组到达一个节点并且 CS、PIT 及 FIB 均未命中时，SRBS 会进行内容发现寻找相应的内容节点，内容发现的具体过程如图 3 所示。

1) Info 消息广播。Interest 分组所在节点会暂停 Interest 分组的转发，广播一个带有请求内容标识（内容名称）及本节点信息（请求者 ID）的 Info 消息进行内容发现；当一个节点接收到 Info 消息后

首先会查询自身 CS，若存在该请求内容，则广播一个带有相应内容标识（内容名称）及本节点标识（提供者 ID）的 ACK 消息返回给原请求节点，接收到 ACK 后原节点即完成了内容发现过程；否则接收节点检查 Info 消息是否超时，超时则直接丢弃，否则继续广播该 Info 消息。

2) ACK 消息返回。当一个节点接收到一个来自于其他节点的 ACK 消息时，首先根据请求者 ID 查询是否为自身的请求，若是，则直接接收后将提供者 ID 加入 Interest 分组中；否则查询该 ACK 是否超时，超时则丢弃，不超时则继续广播。

Info、ACK 和改进的 Interest 消息格式如图 3 所示。

内容发现完成后本节点根据与每个目的节点之间的实际情况结合多个度量参数来进行路由下一跳选择，然后添加 PIT、FIB 表项；当然如果此时内容发现过程并没有结果返回，则选择直接丢弃该 Interest 分组。

2.3 路径构造

若内容节点在本节点传输范围内，则可以直接

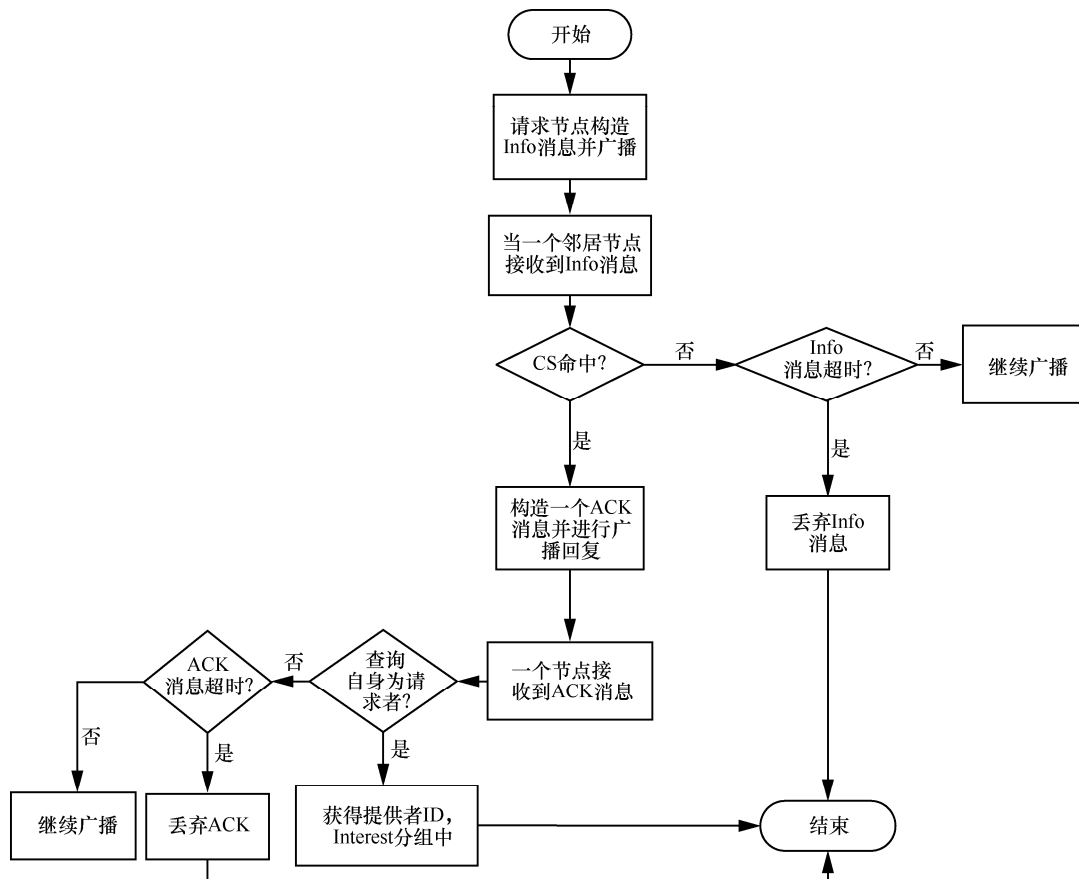


图 3 内容发现流程

进行 Interest 分组传递；当其不在本节点传输范围内时，SRBS 需要在多个节点之间选择一个下一跳，这些下一跳的选择基于以下车辆动态参数。

2.3.1 动态度量

1) 距离及中间区域

在动态环境中，短距离转发可能会产生车辆之间的多跳^[12]并造成更大的时延和更低的效率；当然，如果贪心地选择末梢节点，很有可能出现由于节点离开而导致的通信中断。因此，SRBS 通过构造一个中间区域来选择中间节点进行数据分组转发。

当内容节点处于请求节点传输范围之外时，首先利用请求节点的最大传输范围 R 及计算得到的 R' （其中， $R + R' > CD_{(s,d)}$ ）来设定一个中间区域，如图 4 所示。利用车辆中的数字地图及 GPS 功能，可以获得请求节点 s 到内容节点 d 之间的距离 $CD_{(s,d)}$ 及中间区域节点 j 到内容节点 d 的距离 $CD_{(j,d)}$ 。定义距离参数的计算式为

$$Dis = \frac{CD_{(s,d)}}{CD_{(j,d)}} \quad (1)$$

进行上述定义是考虑到若中间节点距离内容节点更近，则进行数据传输的时延可以在一定程度上减小，此时距离参数的权值就应更大。

2) 方向

行驶方向可以帮助预测车辆将来一段时间内的位置，SRBS 以内容节点到请求节点的方向向量

作为判断标准，并将车辆行驶方向向量与标准方向夹角的余弦值作为方向度量参数。

对方向进行上述定义是考虑到 Interest 分组的传播路径即为 Data 分组的返回路径，因此若一个节点行驶方向更加接近从内容节点到请求节点的方向并且其距离不是最近的，一段时间后其只能更加接近请求节点，则 Data 分组返回时请求节点离开被选择节点传输范围的可能性就比较小，Data 分组成功返回的几率就会增大。

如图 4 所示，设从内容节点到请求节点之间的方向向量为 \vec{b} ，不同车辆节点 j 的行驶方向用 \vec{a} 表示，二者之间夹角为 α ，结合余弦定理将方向参数表示为

$$Dir = \cos \alpha = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|} \quad (2)$$

3) 流量

当 SRBS 选择有效下一跳时，流量越高反而会有更多的可选节点，交通拥塞还会使动态路由转变为简单的静态路由，因此 SRBS 更加倾向于选择周围流量密度大的节点。设某一时刻一个车辆节点传输范围内道路连通度为 N_{con} ，处于该范围单位时间内的平均车辆数为 N_{avg} ，考虑该范围内至少会有自身车辆节点存在，因此定义流量密度 TD 的表达式为

$$TD = \min \left\{ \frac{N_{avg}}{N_{con}}, 1 \right\} \quad (3)$$

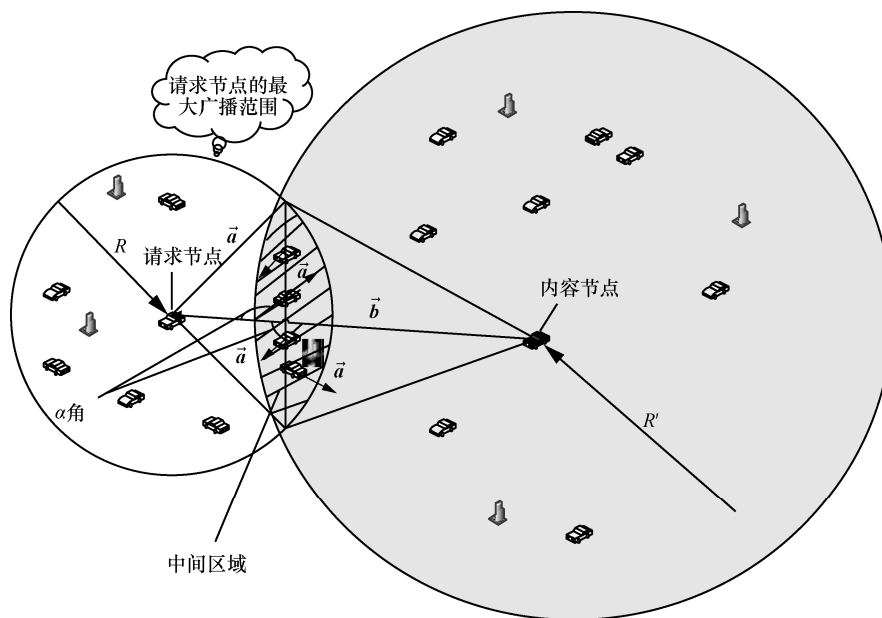


图 4 中间区域

2.3.2 决策公式

除了 ICN 特有的结构之外, SRBS 为每个节点增加一个参数度量值 WT (如表 1 所示), 用于记录各个中间区域节点信息, 并从表项中筛选出节点进行 Interest 分组转发。

表 1 参数度量值

度量参数	度量值
Dis	8
Dir	0.6
N_{avg}	12
N_{con}	3
TD	4
$Score_{label}$	2.51

设 μ 、 φ 、 ω 分别为距离、方向及流量密度的权重参数, 且 $\mu + \varphi + \omega = 1$, label 为车辆标识, 则

$$Score_{label} = \mu Dis + \varphi Dir + \omega TD \quad (4)$$

将距离、方向和流量的具体表达式代入之后得到最终得分式为

$$Score_{label} = \mu \frac{CD_{(s,d)}}{CD_{(j,d)}} + \varphi \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|} + \omega \min \left\{ \frac{N_{avg}}{N_{con}}, 1 \right\} \quad (5)$$

最终请求节点会选择 $Score$ 高的节点作为转发节点, 但如果出现中间区域为空的情况, 此时请求节点会随机选择临近转发节点, 随后会将 Interest 分组的到达接口与转发接口分别添加到 PIT 及 FIB 中。

算法 1 单一路径构造

输入 请求节点 s , 内容节点 d , R , R' , GPS, 数字地图

- 1) if (d 处于 s 的传播范围内)
- 2) 将兴趣分组传给 d 节点;
- 3) 将与 d 连接的节点写入 FIB;
- 4) else
- 5) while ($R+R' > CD_{(s,d)}$)
- 6) 以 R 为半径画圆;
- 7) 以 R' 为半径画圆;
- 8) 获得中间区域;
- 9) if (中间区域为空) 选择最近的节点进行转发;

点进行转发;

- 10) else
- 11) for (每个中间区域节点)
- 12) 收集 Dis , Dir , TD 信息并

填写 s 节点的参数度量值 WT ;

13) 计算每个节点节的权重得分;

- 14) end for
- 15) maximum(score in WT);
- 16) 返回权重最大节点标识;
- 17) end if
- 18) 将相应的连接接口写入 FIB;

19) end if

20) 将兴趣分组的到达接口写入 PIT;

算法 1 具体描述了 Interest 分组路由下一跳选择的过程。内容发现完成后, 判断内容节点是否处于本节点传输范围内, 若是, 则直接进行通信并填写相关数据结构; 否则, 构造中间区域, 筛选中间区域节点; 循环收集每个中间区域节点信息填写表 1, 并计算每个节点权重得分; 最终筛选出得分最高节点作为下一跳并填写 FIB、PIT。该算法复杂度最高的即为内层循环部分, 假设网络中共有 N 个车辆节点, 当内容节点 d 处于节点 s 的传播范围内时, 复杂度最小且为常数级; 最坏情况则是内容节点 d 未处于 s 的传播范围内, 第一次进行转发路径构造过程, 中间区域节点个数为 $N-2$, 则此时内层循环需要进行 $N-2$ 次, 然而下一次在已选的节点中继续进行中间节点筛选时有 $N-3$ 个中间节点, 则此时循环需要进行 $N-3$ 次, 依次类推, 当路径构造进行到下一跳是内容节点时, 循环需要进行 $(N-2) + (N-3) + \dots + 1 = \frac{N^2 - 3N + 2}{2}$ 次, 算法最高复杂度即为 $O(N^2)$ 。

2.4 路由筛选

一次内容发现往往会返回多个结果, SRBS 会针对每个结果分别进行路由构造并填写 FIB, 因此 FIB 的一个内容表项中会对应多个转发接口, 对 FIB 中接口进行一个筛选过程, 选择最优接口进行转发, 这样可以很好地减少网络流量及网络负荷, 优化网络性能。

考虑到需要进行筛选的接口是结合 VANET 环境动态性进行选择的结果, 因此筛选过程更关心每个接口对应的实际链路质量。最终 SRBS 选择根据各个链路的有效时间 LET^[13] 来进行筛选, 并为每个 FIB 接口添加一项记录接口 LET 值的表项。

如图 5 所示, 假设在 0 时刻车辆 p 和车辆 q 之间的相对距离为 d , 其坐标分别为 (x_p, y_p) 、 (x_q, y_q) ,

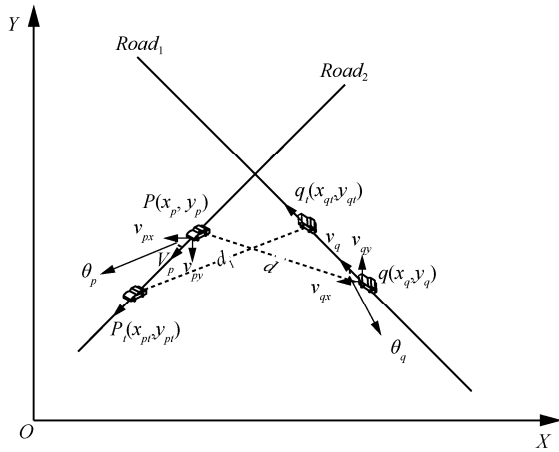


图 5 LET 计算原理

速度分别为 v_p 、 v_q ；一段时间 t 后，二者之间的距离为 d_1 ，坐标分别为 (x_{pt}, y_{pt}) 、 (x_{qt}, y_{qt}) ；将速度

$$d_1 = \sqrt{\left((x_{pt} - x_{qt})^2 + (y_{pt} - y_{qt})^2 \right)}$$

$$= \sqrt{\left((x_p + v_p(\cos \theta_p)t - (x_q + v_q(\cos \theta_q)t) \right)^2 + \left((y_p + v_p(\sin \theta_p)t - (y_q + v_q(\sin \theta_q)t) \right)^2}$$
(11)

最终整理可以获得关于 t 的一元二次方程

$$[v_p^2 + v_q^2 - 2v_p v_q \cos(\theta_p + \theta_q)]t^2 + 2t[(x_p - x_q)(v_p \cos \theta_p - v_q \cos \theta_q) + (y_p - y_q)(v_p \sin \theta_p - v_q \sin \theta_q)] + d^2 - d_1^2 = 0$$
(12)

车辆之间的最大传输范围为 R_{\max} ，因此如果出现 $d_1 > R_{\max}$ ，则说明 2 辆车之间的链路中断。基于以上理论可得，当时间 t 满足 $d_1 = R_{\max}$ 时，此时的 t 即为 2 辆车之间的链路有效时间 LET 值。其中， v_p 、 v_q 、 x_p 、 x_q 、 θ_p 、 θ_q 、 y_p 、 y_q 、 d 、 R_{\max} 均为已知参数，从而可以得到此时 t 的值。

随后，在一个 FIB 表项对应的多个接口中选择若干拥有较大 LET 的接口进行 Interest 分组的转发。一个接口拥有的 LET 越大，证明其链路存在的时间越长，这样可以最大程度地增大路由对时间的容忍度，确保 Data 分组的成功返回。

2.5 异常处理

2.5.1 重传设置

VANET 中时刻变化的网络拓扑很容易造成路由失败，即使 SRBS 尽可能选择最合适的路由进行数据传输，仍难以避免出现异常情况，因此为每个 Interest 分组进行重传功能设置是非常必要的。

节点在进行 Interest 分组转发之前会对每个请

进行分解后可以分别得到每个车辆垂直和水平方向的速度，并且实际速度与水平方向速度夹角分别为 θ_p 、 θ_q ；设车辆匀速行驶并且车辆之间的最大传输范围为 R_{\max} ，则根据勾股定理有

$$d_1 = \sqrt{\left((x_{pt} - x_{qt})^2 + (y_{pt} - y_{qt})^2 \right)}$$
(6)

将速度进行分解可得

$$x_{pt} = x_p + v_{px}t = x_p + v_p(\cos \theta_p)t$$
(7)

$$x_{qt} = x_q + v_{qx}t = x_q + v_q(\cos \theta_q)t$$
(8)

$$y_{pt} = y_p + v_{py}t = y_p + v_p(\sin \theta_p)t$$
(9)

$$y_{qt} = y_q + v_{qy}t = y_q + v_q(\sin \theta_q)t$$
(10)

从而可得

求设定一个重发定时器 T (T 稍大于最大往返时延) 及最大重发次数限制 M ，如果一个 Interest 分组发送出去 T 时间后请求节点并未收到相应的 Data 分组，则重置 T 且令 $M = M - 1$ ，重发数据分组，若一直收不到回复直到 M 值变为 0，则认为该请求不可满足，不再请求。

2.5.2 数据更新

动态环境下的信息时效性是进行正确路由选择的重要保障，因此 SRBS 对 PIT、FIB 表项更新进行了简单设计，CS 采用 LRU 替换策略。

本文在 NDN 架构设计基础上，为 PIT 中每个内容标识对应的每个接口设置一个超时计时器 T' ($T' > 2T$) 和一个最大命中次数 N ($N \leq \frac{M}{2}$)。当一个接口被添加到一个相应的表项中后， T' 随着时间不断减小； N 值则是在每次 PIT 中的该接口命中时减一，并且每次命中后 T' 值会被重置。任一时间点如果出现 T' 减小到 0 或是 N 减小到 0 这 2 种情况中的任何一种，则删除 PIT 表项中的该接口。

在上述 PIT 更新设置中， $T' > 2T$ 这一约束条件是想容许 Interest 分组进行至少一次重发操作，即使 T' 时间后接口被删除，但在 FIB 命中后会有一个回填 PIT 的操作；其次， N ($N \leq \frac{M}{2}$) 的设定是想结

合请求节点的最大重发次数来对 FIB 相应表项做一个可用性判断, 当一个 PIT 表项命中 N 次后, SRBS 默认之前所有请求都是重复请求, 该 FIB 表项失效, 此时将删除 PIT 中该接口及 FIB 中对应的整个表项。

对于 FIB 的更新, 根据重传设置及 PIT 更新设置, 为 FIB 中每个表项接口设置一个值为 $N \times T$ 的计时器, 超时则删除。

2.6 策略优劣性分析

2.6.1 优势分析

1) 相较于全广播模式, SRBS 可以大量减少网络流量。

假设一个小范围密集网络中节点个数为 m , 网络直径为 $n(n \ll m)$, Interest 分组大小为 a , Info 分组消息大小为 b , ACK 分组大小为 c , Data 分组大小为 d , 其中有 $a \approx b \approx c \ll d$, 以整个网络中的数据分组量作为衡量网络流量的标准。

在普遍应用的洪泛策略中, 全网广播时的最大网络流量为

$$f_1 = (a + b)(m - 1) \quad (13)$$

在本文中, SRBS 进行 Info 及 ACK 消息广播, 随后进行单路径请求及应答, 最大网络流量可以表示为

$$f_2 = (b + c)(m - 1) + (a + d)n \quad (14)$$

用 Δf 表示这 2 种策略的流量差, 则有

$$\begin{aligned} \Delta f &= f_1 - f_2 = (a + b)(m - 1) - \\ &(b + c)(m - 1) - (a + d)n \approx d(m - n) \gg 0 \end{aligned} \quad (15)$$

因此, SRBS 大大减少了全广播模式产生的无用网络流量。

2) 相较于传统 IP 网络, SRBS 可以减少网络时延及传播路径长度。

假设节点 s 为请求节点, d 为目的节点 (或内容节点)。

在传统 IP 网络模式下, s 到 d 的请求过程中时间为 t' , 经过的跳数为 h' , 则进行第一次请求及应答的时延和跳数分别为 $2t'$ 、 $2h'$, 第 2 次 s 到 d 的重复请求及应答完整过程中的时延和跳数仍分别是 $2t'$ 、 $2h'$;

然而在 SRBS 中, 进行第一次请求及应答的时延及跳数为分别 $2t'$ 、 $2h'$, 但在 Data 分组由 d 节点返回给 s 节点的过程中, 其会进行沿路缓存, 则当

经过一定时间进行第 2 次相同请求时 s 会从其临近缓存节点获取内容而不必到达 d 节点, 其时延及路径跳数会远远小于 $2t'$ 及 $2h'$ 。

3) SRBS 提高了 Data 分组成功原路返回的概率。

如图 4 所示, SRBS 进行路径构造时根据距离构造中间区域, 利用 \vec{b} 与 \vec{a} 之间的角度, 尽量选择中间区域内与 \vec{b} 方向一致并距离 s 较远的节点 j 作为下一跳, 这样在 Data 分组返回过程中, j 会向着 s 移动并经过最长时间才会达到 s , 即 j 、 s 之间的链路具有最大的时间容忍度, 从而最大程度保证 Data 分组到达 j 节点时, j 与 s 之间的连接仍有效, 增大了 Data 成功原路返回的机会。

2.6.2 不足之处

将 SRBS 中的路径构造及筛选公式进行整合, 并表示为

$$Result = a \cdot Score_{label} + b \cdot LET \quad (16)$$

设 m 、 n 、 p 、 q 均为常数, 则整理为

$$Result = m \frac{CD_{(s,d)}}{CD_{(j,d)}} + n \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|} + p \min \left\{ \frac{N_{avg}}{N_{con}}, 1 \right\} + q \cdot LET \quad (17)$$

从式(17)中可以看出, SRBS 最终决策取决于距离、速度、流量及链路连接时间, 然而各个参数的权重分配是一个比较关键却难以把握的问题, 在仿真中权重值为: $m = n = p = 0.33$ 、 $q = 1$, 但这只是一种公平的分配方式, 还需通过仿真实验不断对权重参数及公式适用性进行调整。

3 仿真实验与性能评估

3.1 仿真设置

选用网络模拟器 ns-3^[14,15]中 ndnSIM 模块^[16]作为仿真实验平台。libboost 使用版本 1.55, ndnSIM 使用版本 1.0, 表 2 描述了仿真过程中的具体参数信息。

仿真过程中随机指定请求节点, 并均匀分配总节点个数的 20% 作为内容节点, 内容随机分配给各个内容节点, 请求内容满足 Zipf 定律。图 6 为仿真中使用的一个简单道路拓扑模型, 其中, 黑色圆点代表车辆节点, 双横线代表道路。

表 2	参数信息
参数	值
平台	ns-3
区域	1 000 m×1 000 m
最大通信距离	50 m
仿真时间	100 s
速度	5~21 m/s
车辆数目	60~200
移动模型	Constant Velocity
Wi-Fi	WIFI_PHY_STANDARD_80211a
MAC	ad hoc Wi-Fi Mac
信道模型	wifichannel
带宽	6 Mbit/s
数据分组发送速率	6 packet/s
$R + R' > CD_{(s,d)}$	$R + R' = 1.5CD_{(s,d)}$
(μ, φ, ω)	(0.33, 0.33, 0.33)

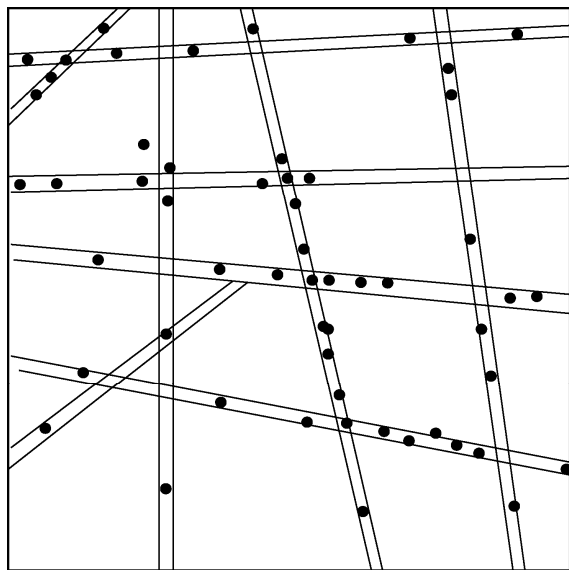


图 6 简单道路拓扑模型

3.2 仿真结果分析

进行结果分析时，首先与 TCP/IP 模式下的 VANET、V-NDN 及 CCVN 进行了传输效率的对比；然后在不同车速及节点密度环境下，根据数据分组到达率、平均路径长度及网络缓存量这 3 方面性能，对 SRBS、V-NDN^[10]及基于跳数策略^[11]进行了性能对比。

仿真结果的主要对比指标定义如下。

1) 传输效率：对应同一任务不同策略的相应完成时间。

2) 数据分组到达率 = $\frac{\text{收到的Data分组数}}{\text{发出去的Interest分组数}}$ 。

3) 路径长度：一个 Data 分组从所在节点返回给请求节点所经历的路径跳数。

4) 网络缓存量：整个网络中 Data 分组的缓存数量。

各个方案的传输效率对比数据在图 7~图 9 中已经详细地用各个代表点列出；数据分组到达率及路径长度的最终结果则是多次实验结果数据的平均值；网络缓存量可以根据前面的数据结果及网络实时情况计算得到。

3.2.1 传输效率

仿真过程中使用不同方案对于相同任务的平均完成时间代表其各自的传输效率，图 7~图 9 分别表示 SRBS 与 TCP、V-NDN 及 CCVN 的传输效率对比。图中黑色线表示相等传输效率分界线，线下侧点表示对应策略的传输效率低于 SRBS，结合图中数据总结可以得出 4 种策略的性能从优到劣依次为 SRBS、CCVN、V-NDN、TCP。SRBS 与 CCVN 结果较为相近，TCP 性能最差。通过分析认为，首先 TCP 模式下以 IP 地址为中心的固定端到端传输不仅缺乏灵活性，同时节点移动性很容易造成无法修复的链路失败，然而以信息为中心的内容转发不仅有更强的动态适应性，而且网络中的数据缓存机制大大降低了请求满足时延；其次，CCVN 中分类数据分组 A-Int 及 B-Int 分工合作的机制要比 V-NDN 的完全广播模式更加合理有效；SRBS 构造多个单播优化路径请求和返回数据的方式大大降低了网络流量，同时也提高了 Data 分组原路返回的成功概率，减少了数据分组传输时延，总体表现优于 CCVN 的部分广播形式。

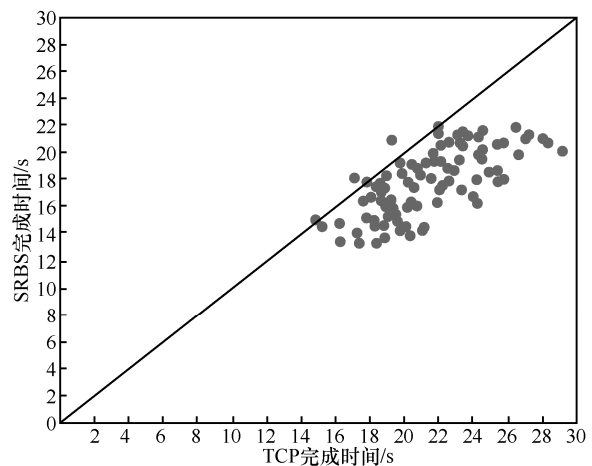


图 7 SRBS 与 TCP 传输效率对比

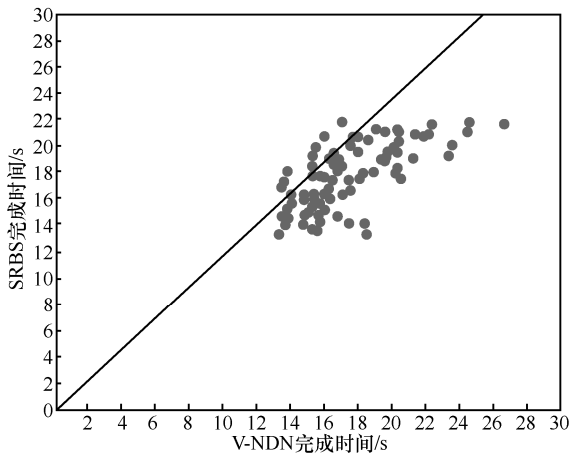


图 8 SRBS 与 V-NDN 传输效率对比

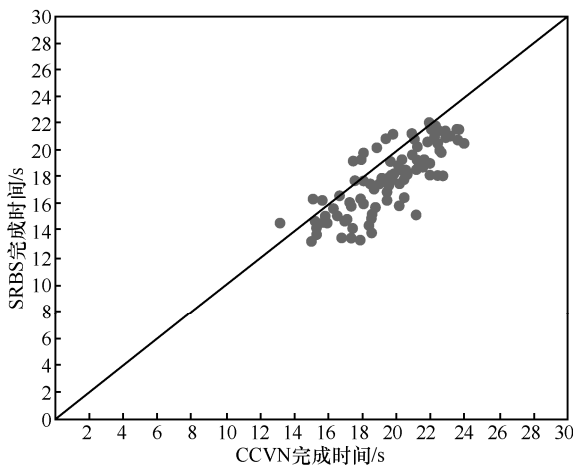


图 9 SRBS 与 CCVN 传输效率对比

3.2.2 数据分组到达率

车辆节点的增加意味着路由增多，如图 10 所示，通过 V-NDN 的完全广播模式与基于跳数的有限广播及 SRBS 非广播模式比较，可以看出洪泛形式下的数据分组到达率会更大，由于基于跳数的策略中有阈值的限制，其性能表现不如 V-NDN。

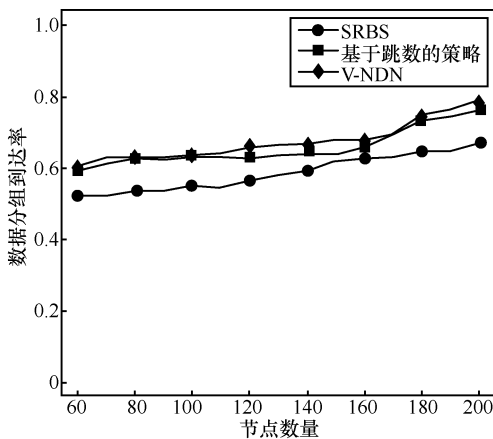


图 10 不同车辆密度下的数据分组到达率

随着车辆节点移动速度的增加，节点位置发生变化的频率会越来越快，从而导致链路失败的概率越来越大，对于 SRBS 来说，这会造成其路由性能大幅度下降，从图 11 可以看出车辆移动对于 V-NDN 和基于跳数的路由策略造成的负面影响远不及本文策略，主要是广播形式下任何车辆任何时候都可以参与路由，而本文策略中要求明确参与路由的节点。

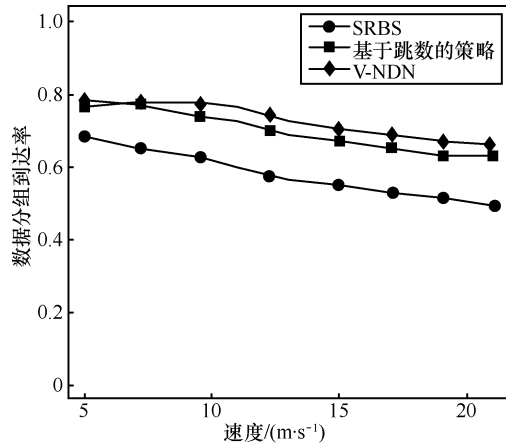


图 11 不同车速下的数据分组到达率

SRBS 的数据分组到达率指标明显不如其他 2 种路由策略，通过分析，本文认为由于广播路由中路径有多个，则针对同一请求返回的 Data 分组数量明显会比 SRBS 中单一路径返回结果多，计算数据分组到达率时并没有考虑过滤掉重复的 Data 分组，这可能是造成上述结果的一个原因。

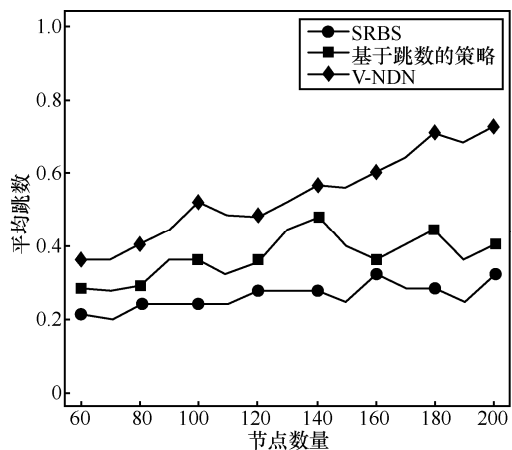


图 12 不同车辆密度下的平均路径长度

3.2.3 平均路径长度

V-NDN 中节点密度越大可能会产生的跳数越多，因此随着车辆节点个数的增加其路径长度不断

增大；基于跳数的策略由于存在阈值的限制使其路径长度的增加幅度要小于 V-NDN；作为广播方式子路径，SRBS 路径长度最小，虽然其会随着车辆节点出现一定波动，但基本稳定。

车速在一定范围内的提升会有利于加快 SRBS 中数据分组的传递，从而表现出一定的性能提高，但是一旦车速过大反而会增大链路失败的概率及范围，造成大量请求失效；但由于路由节点不固定，车速变化对于其他 2 个方案的影响要小得多，如图 13 所示。

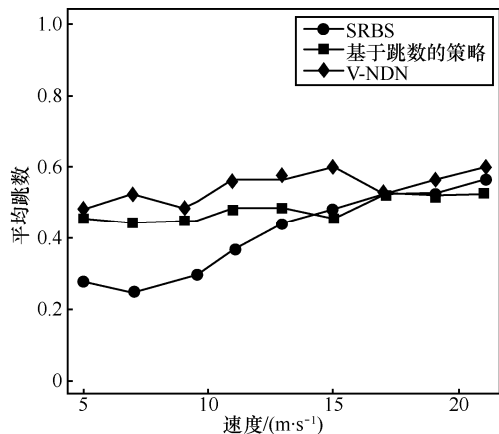


图 13 不同车速下的平均路径长度

3.2.4 网络缓存量

在相同数据分组到达率的要求下网络缓存量越低说明路由性能越好。图 14 纵轴表示的是网络缓存量，相比于广播过程中多路径随处缓存，SRBS 具体路由在相同数据分组到达率要求下网络缓存量最低，分析认为内容发现这一过程大大提高了缓存利用率，实现最少缓存最大程度满足请求的目标，降低了网络中的无用流量。

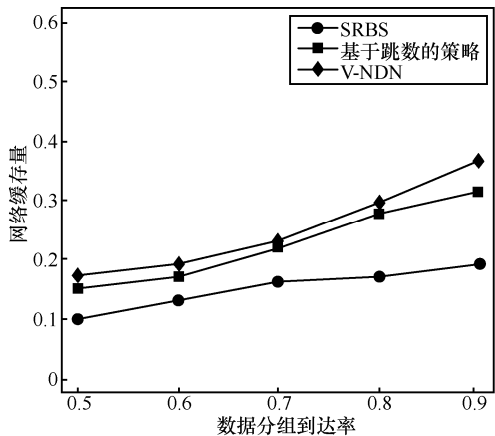


图 14 网络缓存量与数据分组到达率关系

4 结束语

SRBS 虽然在数据分组到达率这一指标上性能低于传统的洪泛策略，但其利用车辆自身动态信息为 Interest 分组选择最优下一跳并提高路由对时间的容忍度的转发方案真正解决了网络洪泛带来的大量无用流量问题，利用最小的网络数据量达到了相同的请求满足率。同时，本文策略在传输效率及路径长度方面明显优于 V-NDN 及基于跳数的路由策略，因此最终初步实现了用更短时间满足请求、减少网络流量、提高网络性能的设计目标。同时这也说明了基于车辆动态信息进行路由构造和筛选的这一想法在 VANET 中具有一定的研究价值，ICN 的特征使网络路由更加灵活化。

未来工作中为提高方案的实用性，将考虑红绿灯对车辆节点位置及行驶速度的影响及当车辆节点处于道路交汇处时车向的选择和信息更新等问题，使研究环境更加接近现实。本文只考虑到了匀速移动的车辆，未来的工作还需要考虑车辆运动状态改变的情况，并加入固定位置的道路基础设施作为网络中的路由及缓存节点，基于 LET 的路由筛选策略还需继续进行优化。

参考文献:

- [1] TAREP E A, LAYTH A K D, YAMAAN E M. Review and performance comparison of VANET protocols: AODV, DSR, OLSR, DYMO, DSDV & ZRP[C]//2016 Al-sadeq International Conference on Multi-disciplinary in IT and Communication Science and Applications. 2016:1-6.
- [2] MEISEL M, PAPPAS V, ZHANG L X. Ad hoc networking via named data[C]//The fifth ACM International Workshop on Mobility in the Evolving Internet Architecture. 2011: 3-8.
- [3] 李军, 陈震, 石希. ICN 体系结构与技术研究[J]. 信息安全, 2012, (4): 75-80.
LI J, CHEN Z, SHI X. Research on ICN architecture and technology[J]. Netinfo Security, 2012, (4): 75-80
- [4] ARIFUZZAMAN M, KEPING Y, NGUYEN Q N. Locating the content in the locality: ICN caching and routing strategy revisited[C]//The Networks and Communications. 2015: 423-428.
- [5] VARVELLO M, RIMAC I, LEE U, et al. On the design of content-centric MANETS[C]//The Eighth International Conference. 2011: 3-8.
- [6] MEISEL M, PAPPAS V, ZHANG L. Listen first, broadcast later: Topology-agnostic forwarding under high dynamics[C]//The fifth ACM international workshop on Mobility in the evolving internet architecture. 2010: 1-8.
- [7] MARICA A, ANTONELLA M. CHANET: A content-centric architec-

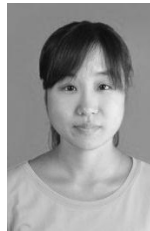
ture for IEEE 802.11 MANETs[C]//The International Conference in Network of the Future. 2011: 122-127.

- [8] WANG J Z, WAKIKAWA R, ZHANG L X. DMND: collecting data from mobiles using named data[C]//The 2010 IEEE Vehicular Networking Conference. 2010: 49-56.
- [9] MARICA A, CLAUDIA C, ANTONELLA M. Enhancing content-centric networking for vehicular environments[J]. Computer Networks, 2013, 57(16): 3222-3234.
- [10] GIULIO G, DAVIDE P, GIOVANNI P, et al. VANET via named data networking[C]//IEEE Conference on Computer Communication Workshops. 2014: 410-415.
- [11] 吴磊. VANET 中基于 ICN 的信息分发的研究与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
WU L. Research and implementation of information distribution based on ICN in VANET[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- [12] FASOLO E. Efficient data dissemination protocols in pervasive wireless networks[D]. Padova: University of Padova, 2008.
- [13] LEE S J, SU W, GERLA M. Ad hoc wireless multicast with mobility prediction[C]//The 8th International Conference on Computer Communication and Networks. 1999: 4-9.
- [14] 韩海龙. 信息中心网络的路由技术研究及仿真实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
HAN H L. Research and simulation of routing technology in information centric network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- [15] 马春光, 姚建盛. ns-3 网络模拟器基础及应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
MA C G, YAO J S. Basic and application of ns-3 network simulator[M]. Beijing: PTPRESS, 2014.
- [16] AFANASYEV A, MOISEENKO I, ZHANG L X. ndnSIM: NDN simulator for NS-3[R]. NDN Technical Report NDN-0005, Revision 2, 2012.

作者简介:



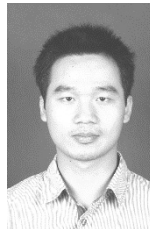
芮兰兰 (1979-), 女, 安徽安庆人, 博士, 北京邮电大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向网络及业务质量管理、大数据等。



郭辉 (1992-), 女, 河北保定人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为信息中心网络、移动自组织网络等。



史瑞昌 (1990-), 男, 河北邢台人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为网络管理等。



黄豪球 (1985-), 男, 广西贺州人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为信息中心网络、网络安全、网络架构等。