

车联网下基于网络编码的高吞吐量多径路由算法

范存群, 王尚广, 谷文哲, 孙其博, 杨放春

(北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 在车联网中, 由于车辆节点间无线链路的频繁中断易导致数据重传, 使整个车辆组网性能急剧下降。为此, 面向车联网提出了一种增强吞吐量的多径路由算法, 其核心是使车辆节点分簇算法支持网络编码, 从而达到对乱序和丢失报文恢复的目的。该算法首先采用协同编码通信模型来实现分簇后同簇车辆节点互相协同的多路径传输, 然后采用网络编码对源端车辆和中间车辆节点发送的数据进行线性编码操作, 最后在目的端节点予以解码。在基于 QualNet 仿真平台上的实验结果表明, 该算法能够有效地提升车联网中多径路由的吞吐量。

关键词: 车联网; 网络编码; 簇; 多径路由

中图分类号: TN929

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)Z1-0133-09

Enhanced-throughput multipath routing algorithm based on network coding in IoVs

FAN Cun-qun, WANG Shang-guang, GU Wen-zhe, SUN Qi-bo, YANG Fang-chun

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

Abstract: In Internet of Vehicles (IoVs), the frequent interruptions of wireless links between the vehicles cause data retransmission, which makes the whole vehicle network performance fall sharply. Hence, a multipath routing algorithm was proposed for enhancing throughput. The core of the algorithm is to make the vehicle clustering algorithm support network coding, which can achieve the purpose of recovery of disorder and lost packets. Firstly, a collaborative coding communication model was established to achieve mutual cooperative multi-path transmission between vehicle nodes in the same cluster. Secondly, network linear coding was adopted to encode the transmitted data of source vehicle nodes and intermediate vehicle nodes. Finally, destination nodes decode the received data. The performances of the scheme were evaluated by QualNet software. Simulation results show that the algorithm could effectively improve the throughput of multi-path routing in IoVs.

Key words: IoVs; network coding; cluster; multi-path routing

1 引言

众所周知, 车联网即是车辆物联网, 是物联网在城市泛在网络中的典型应用。如图 1 所示, 车联网是通过车辆与车辆、车辆与道路、车辆与人、车辆与传感设备以及车辆与其他基础设施之间的信息交互 (人、车辆、道路和环境信息), 实现车辆

与泛在通信网络的互联互通和信息共享, 并在信息网络平台上对采集的大数据信息进行处理、计算、共享和发布, 从而通过其提供的车联网服务实现未来城市交通的智能化。

为了实现车联网中车辆与车辆间的信息交互, 从源端车辆到目的端车辆的数据传输需要中间节点进行中继。传统上, 路由协议会在源端和目的端

收稿日期: 2013-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61272521, 61202435); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2011AA01A102); 教育部新世纪优秀人才支持计划基金资助项目(NCET100263); 教育部博士点基金资助项目(20110005130001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61272521, 61202435); The National High Technology Research and Development Program of China (863Program) (2011AA01A102); New Century Talent Supporting Project of Education Ministry (NCET100263); Ph. D Programs Foundation of Ministry of Education (20110005130001)

节点之间选择一条路径,然后沿着此条路径转发数据分组。然而在遍布高楼大厦的城市车联网环境中,作为网络节点的车辆通常运行在一个高误码率、高衰落和干扰严重的无线网络环境中^[1],由于车辆间无线链路的不稳定性(高大建筑物可能会阻挡无线电波的传播^[2,3]),使车辆节点间距太大时,容易发生通信链路中断。因此,为了克服传统平面路由结构中的单径路由技术,车联网普遍采用层次化路由结构中的多径路由技术来实现数据的可靠通信(大量车辆节点的存在使源端车辆节点与目的端车辆节点之间通常遍布多条路径),这使多径路由算法或协议成为当前车联网中一个研究热点^[4,5]。

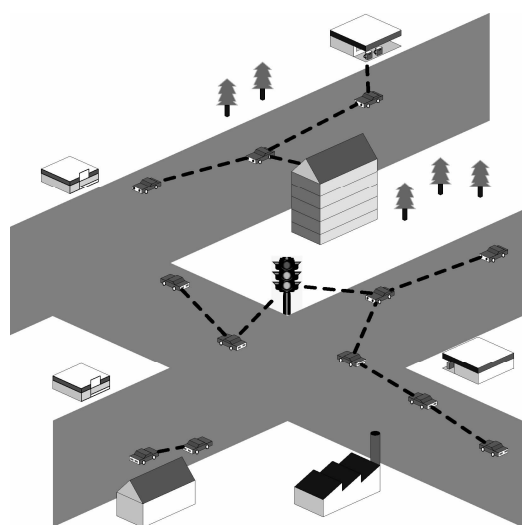


图 1 车联网应用场景

目前,针对车联网中的多径路由协议研究,文献[6]提出了一种用于车辆网络的多跳路由协议(GVGrid)。GVGrid的本质是一种按需请求的路由协议,即在目标区域中通过一个资源点(路边基站或者固定节点)与车辆之间按需建立连接路径(包括对断裂路由的修复)。GVGrid的具体实现方式包括路由发现和路由维护2个阶段。在路由发现阶段中,GVGrid根据所划分的网格(把地理区域统一划分为大小相同的方块,称之为网格(grid))中涵盖的车辆位置信息和地图信息构建一个网络路径,用来引导该网格中的车辆遵循该路径。例如,当出现一些交通信号时(如红灯),该网格中的大多数车辆都可能保持类似的速度状态,车辆之间能够保持较稳定的距离(构建网络路径),此时后续进入的车辆将按照该网络路径运行。在路由维护阶段,

主要通过缓存路径信息来寻找地图上新的连接路径,其目的是为了提高路径的稳定性从而减少搜索新路径带来的开销。文献[7]提出了一种用于车辆网络中延迟容忍的路由方案,其核心是通过综合车辆周围的局部交通信息和整个城市范围内的交通信息来设计路由方案。其中D-Greedy(delay-bounded greedy forwarding)算法用于监测及采集车辆周围的局部交通信息,并选择合适的路边单元,将该信息传送到城市交通控制中心,该算法在考虑数据分组的优先级和消息延迟程度的同时,通过将接收到的来自城市交通控制中心的全局信息与局部信息相结合,制定高效的路由方案,从而减小通信开销,优化带宽利用率。D-MinCost(delay-bounded minimum cost forwarding)算法则通过对交付到路边单元的消息设定一定的延迟阈值来设计消息的优先级(例如,一个严重事故的消息比一个道路路线错误的消息具有更高的优先级)。

当车辆保持在一个群组内(group)时,车辆之间可以进行稳定的通信。然而,当其中某一个节点改变方向或者变更到另一个群组内时,则可能出现通信链路断裂。对于重新建立的链接,如果链路质量不稳定则会导致吞吐量急剧下降。因此,为了提高车辆网络中的路径持续时间、网络吞吐量以及减小控制开销,文献[8]提出了一种高稳定性的路由方案。为了建立可靠的通信路径,避免链路中断,该方案首先对群组内每条链路持续时间(LET, link expiration time)进行计算,然后根据LET搜索同一个组内最稳定的车辆间通信链路,最后,将该链路选择为通信路径,从而避免洪泛消息影响整个通信网络。文献[9]提出了一种用于分级路由的多普勒感知成簇算法,该算法主要通过初始簇内节点间相互速度引起的多普勒频移来控制包间的交换从而对簇进行度量。此外还提出了基于连接时间估测的动态时间聚类算法,链接时间则是根据初始簇中节点位置和速度参数进行估测的。

文献[10]着重研究了路由协议中数据交付的有效性(当车辆查询接入点信息存在一定的延迟时,保证在合理的延迟下车辆能够有效地发送请求和接受应答)。基于数据存储和转发理念,通过对延迟最低、信道质量最佳的信道对数据分组进行转发,提出了一种车辆辅助数据交付协议(VADD, vehicle-assisted data delivery),其核心思想是当车辆节点携带的数据分组无法找到目的地的转发路径

时, VADD 将数据分组转发给目的地附近的接收器。与已有方法不同, 该协议利用预测网络移动性减少了交通模式和道路布局对数据转发的局限, 从而提高了数据分组交付率、降低数据分组延迟和协议开销。文献[11]提出了车辆网络中静态节点协助的自适应数据传播协议(SADV, static-node-assisted adaptive data dissemination)。与 MDDV (mobility-centric data dissemination) 和 VADD 这 2 种方法不同, SADV 方法主要针对大型数据传输和车辆节点密度较低时的动态车辆网络。这种情况下 VADD 具有很大的传输延迟, 而 MDDA 可靠性较差。该文献中通过在十字路口部署静态节点, 使数据分组存储在十字路口, 直到最优路径(该路径具有到目的地的最低预期交付延迟)可用。并且对数据分组转发在每条路径上的延迟进行估计, 使静态节点的设计能够测量分组转发延迟和传播信息的链接延迟。

上述研究取得了不错的研究成果, 但是在车联网应用中, 传统多径路由技术仍存在着一些尚未解决的难题。当使用传统的多径路由算法时, 由于传输数据的多条路径在节点缓存能力、带宽以及长度上存在差异, 因此数据分组到达目的节点的时延不同, 容易发生数据分组的次序混乱; 另外, 车联网的拓扑变化快和无线通信链路易中断特性容易导致数据分组的丢失。在无线网络中为减少数据分组丢失率、提高吞吐量而使用的链路层级别重传机制往往由于重传数据分组中错误的相关性使重传失效。而且, 低效率的重传可能会导致网络容量的浪费, 也增加端到端时延。因此, 在存在大量实时通信业务的车联网中, 链路层的重传并不是提高端到端传输可靠性的合适方法。

针对上述问题, 在引入车联网协同编码通信模型的基础上提出了一种适用于车联网的基于集成网络编码的多径路由算法。首先, 通过引入协同编码的通信模型来实现分簇下同簇节点互相协同的多路径传输, 然后通过源节点和中间节点的发送数据中融合改进的线性编码算法来完成编码、重编码和解码过程。仿真实验表明, 所提算法可以使目的端节点在接收到的数据报文出现乱序、甚至部分信息丢失的情况下仍能恢复出原始报文。通过与传统多径路由算法相比较, 集成网络编码的多径路由算法减少了源端节点所发送的冗余数据分组数目, 降低了通信开销, 提高了车

联网的容错能力。

2 基于协同编码的多径路由算法

本文提出了基于车联网协同编码通信模型的多径路由算法, 该算法采用基于分簇的方法并在此基础上集成了网络编码技术, 算法实现包括: 1) 形成单节点路径; 2) 成簇; 3) 源端编码; 4) 中继节点重编码; 5) 目的端解码。

2.1 车联网协同编码通信模型

为了改善无线链路的可靠性, 协同通信系统在近年来受到越来越多的关注^[12,13]。但在车联网中, 相应的研究才刚起步。协同通信系统发掘出了无线通信系统的广播特性, 即只需要单个的数据传输, 一系列协同工作的节点就能够实现接收和中继数据。由于空间的多样性, 接收者可以通过将多个中继信号结合起来或者在物理层选择最佳的信号来提高整体的信道质量^[14]。并且由于传输衰落的时间及空间相关性的减少, 使接收信号的整体可靠性增强。

在协同通信系统中, 分簇技术可以用来对位置相邻的节点进行分组。在城市环境中, 大量车辆节点的存在为分簇技术的应用提供了有效的场景。同一个簇中的所有车辆节点通过相互协作与其他簇协作发送或接收数据。与其他方案相比, 基于分簇的路由算法减少了簇中成员节点间互操作的资源管理的复杂性。目前, 针对组网中分簇稳定性和链路稳定性已有不少的研究^[8,9,18,19], 而本文侧重解决的是车联网中的吞吐量问题, 所以这里就不再赘述。

网络编码在提升无线网络通信容量方面具有潜能^[15-17]。在车联网中, 通过使用合适的动态分簇技术, 并在此基础上, 将协同的多路径传输和网络编码进行融合, 从而有效地减少车间通信中数据分组的丢失, 提高数据分组的传递率。

图 2 阐明了从源节点到目的节点通过多个簇进行协同传输的过程。假设簇内部节点的距离远小于簇间的距离。在传统的传输中, 每一跳是由单条链路所构成, 而在协同编码传输通信系统中, 每一跳却被多点到多条链路所代替。从上一个簇侦听到数据分组的节点将会把这些数据分组转发给通往目的节点的下一个簇。因此, 相邻簇之间存在多条链路, 其数目由簇中节点的数量决定。这种基于簇的协同传输增加了数据分组到

达目的端节点的可能性。除此之外，为了减少源节点和中间节点所传输的数据分组的冗余数量以及数据分组的分组丢失率，网络编码技术可以将接收到的数据分组随机结合起来，并通过同簇内不同节点的协同工作再将编码后的数据分组转发出去。这样，就可以得到一个更加可靠的通信传输系统。

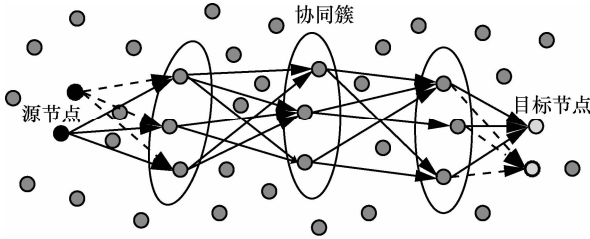


图 2 车联网协同编码通信模型

2.2 集成网络编码的多径路由算法

基于以上分析，本节提出了一种基于簇的集成网络编码多径路由算法（CR_NC, cluster-based routing with network coding），该算法通过在基于簇的多径路由技术中融合网络编码技术，从而可以有效地提高车联网中数据传输的可靠性，算法流程如图 3 所示。

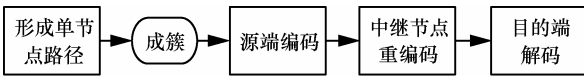


图 3 集成网络编码路由算法的流程

下面给出了详细的算法步骤。

1) 使用传统的路由协议在源端节点和目的端节点之间发现一条端到端的完整路径。如图 3 所示，在所提出的集成网络编码的路由协议中，首先使用传统的路由协议（DSR）在源节点与目标节点之间发现单节点宽的初始路径，每个链路的联合尺度被用作链路代价，以发现最小代价路径；

2) 初始路径上的节点成为簇头，同时吸收附近的节点以成簇。

当初始簇形成后，基于簇的协同网络编码路由算法可用于从一个簇到另一个簇以成组编码数据分组的方式传输数据。一旦该组中所有的被编码的数据分组被前面的簇所接收到，下一个簇中节点的形成过程就会开始。然后，该组中最新产生的编码数据分组被转发，其中发送和接收簇中的节点在发送和接收数据中协同操作。

3) 发送端节点首先对原始数据报文进行编组，每组有 m 个报文，然后利用网络编码规则，将每个编组转换成 n ($n \geq m$) 个大小相等的新数据报文，最后以并行的方式发送出去；

4) 中继节点接收到源端节点所发送的编码报文后，会将属于同组的编码报文按照网络编码规则进行重编码，然后继续向下转发；

5) 当目的端节点从中间节点接收到足够多的编码报文后，就可以利用解码算法，从这些编码报文中恢复出原始的数据报文。

2.2.1 发送节点编码

根据实际需要，本文在随机线性码^[16]的基础上对其进行了改进，使改进后的编码方法能适用于车联网。在编码过程中，源节点首先按照数据报文产生的先后顺序，将数据进行分组，每组 m 个数据分组。同一组中的 m 个未编码的数据分组被称作“原始数据分组”。每个原始数据分组可以表示为 x_i , $x_i \in \{1, 2, \dots, m\}$ 。当源端要发送该组报文时，从有限域 F_q 中选取 m 个随机数作为编码系数 $(g_{11}, g_{12}, \dots, g_{1m})$ ，并按照式(1)所示的方法进行线性编码生成同等大小的编码报文，同时将编码系数和组标识添加到报文头部。然后，源节点将编码后的数据分组转发给下一个簇中的节点。

$$y_j = \sum_{i=1}^m g_{ij} x_i \tag{1}$$

其中， g_{ij} 系列是随机选择的参数，其“加”“乘”操作于 Galois 域 $GF(2^q)$ 上。将一个代码向量 $\vec{g}_j = (g_{j1}, g_{j2}, \dots, g_{jm})$ 和组 ID 标识嵌入到 x_i 数据分组的头部中。源节点维持一些初值为 m' 的计数器，其中 $m' > m$ 。每次，源节点传输一个编码数据分组，计算器就减 1。源节点持续传输随机编码的数据分组，直到计算器变为 0。图 4 给出了网络编码的具体报文格式，其中，参数 n 的大小根据网络状态而定。如果在网络编码的过程中，需要产生 n 个编码报文 Y_i ，则总共需进行 n 次相同的编码操作。

2.2.2 中继节点成簇、重编码与转发

为了进一步降低编码报文间的线性相关性，提高目的端节点的解码成功率，车辆中继节点接收到来自于发送簇的相同组的编码报文后，会先进行缓存，然后发起下一个簇的创建，并对具有相同组标识的编码报文进行重编码。从前一跳簇中接收数据分组的相同节点所形成的接收簇，现在就变为当前

的发送簇。假设中继节点 R 收到 k 个来自编码报文 Y_1, Y_2, \dots, Y_k ，每个报文对应的编码系数为 $(g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{im})$ ，其中 $x_i = 1, 2, \dots, k$ 。然后，根据式(2)和式(3)所表示的编码规则，车辆节点 R 会产生 k 个新的编码报文，并将它们继续向下转发。其中编码系统 $h_{il}^r (h_{i1}^r, h_{i2}^r, \dots, h_{ik}^r)$ 是新的编码向量 \vec{k}_{il}^r 与原始向量 \vec{g}_{ij} 的内积。

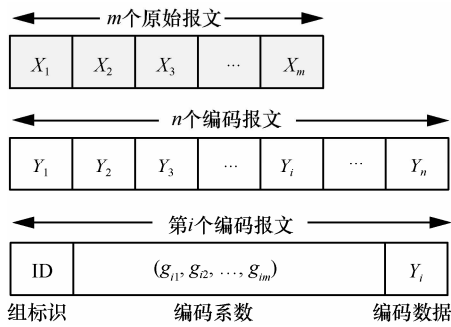


图4 网络编码的报文格式

$$Y_l^r = \sum_{i=1}^k \vec{k}_{il}^r Y_i, \quad l = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

$$h_{jl}^r = \sum_{i=1}^k \vec{k}_{il}^r \vec{g}_{ij} \quad (3)$$

通过这种方式， Y_l^r 也是原生数据分组的随机线性组合，因为

$$\begin{aligned} Y_l^r &= \sum_{i=1}^k \vec{k}_{il}^r Y_i \\ &= \sum_{j=1}^m \vec{k}_{il}^r \left(\sum_{i=1}^k \vec{g}_{ij} X_j \right) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^k (\vec{k}_{il}^r \vec{g}_{ij}) X_j = \sum_{j=1}^m h_{jl}^r X_j \end{aligned}$$

与源节点相同，当转发编码数据分组时，节点会将新的编码向量 $\vec{h}_j = (g_1, g_2, \dots, g_l)$ 嵌入到 Y_l^r 的数据分组头中。

2.2.3 目的节点解码

当目的端接收到一个数据分组后，它会先检测这个数据分组是否与先前接收到的来自于同一个组的数据分组之间相互线性独立。如果这个数据分组不是独立的，它将会被抛弃。每个编码数据分组代表原始 m 个数的数据分组的线性方程，并且，利用内嵌的代码向量，编码系数对目的端是可知的。因此，只要目的端能接收到 m （或大于 m ）个数据分组，目的端就可以采用矩阵转换的方式恢复出原始的 m 个数据分组。目的端解码的过程一般利用高斯消元

法解下列的方程组。当矩阵的阶达到 m （例如，此时 m 个编码数据分组之间没有线性相关性），方程组具有唯一解。假设接收节点接收到的 m 份数据分别是 Y_1, Y_2, \dots, Y_m ，则接收节点进一步判断这 m 份数据的编码系数 $(g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{im})$ ， $(i = 1, 2, \dots, m)$ 的线性相关性。若这 m 组编码系数组成的 $m \times m$ 维矩阵满秩，则可通过公式（4）恢复出初始的 m 个报文。

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m1} & \cdots & g_{mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

若目的端节点所接收的编码数据个数小于 m ，则无法组成 $m \times m$ 维满秩矩阵。在这种情况下，可以通过消息反馈机制通知前一跳中间节点对缓存的同组编码数据进行重编码操作并转发，以此类推，直到目的端节点能够恢复出 m 个原始数据分组报文。

3 性能评估

为了验证所提基于簇的集成网络编码的多径路由算法 (CR_NC) 的性能，本节给出了具体的性能评估。实验主要通过多径路由算法^[7](MPR, multi-path routing)和基于簇的路由算法^[8](CR, cluster-based routing) 2 种路由算法进行对比。其中：1) MPR 算法是一种适用于车辆组网的源路由算法，算法基于平面路由结构，属于被动的源路由算法；2) CR 算法是文献[8]中所提出的一种动态分簇技术的路由算法。

3.1 关键参数分析

为了更好地阐明网络编码方案问题及评估算法的性能，本节给出了车联网网络编码的关键参数分析。图 5 演示了源节点传输数据分组到目的节点的系统模型。源节点之间有 k 个簇，第 i 个簇包含有 n_i 个相互靠近的协同节点。

假定在该通信系统中，相同簇内的节点在相互的传输范围内，并且第 i 个簇内的第 j 个节点被表示为节点 (i, j) ，其中 $i \in \{1, 2, \dots, k\}$ ， $j \in \{1, 2, \dots, n_i\}$ ，则可以定义如下参数，如表 1 所示。

其中，影响基于簇的协同通信系统性能（包括整个方案的解码性能和传输代价）主要有以下几个参数。

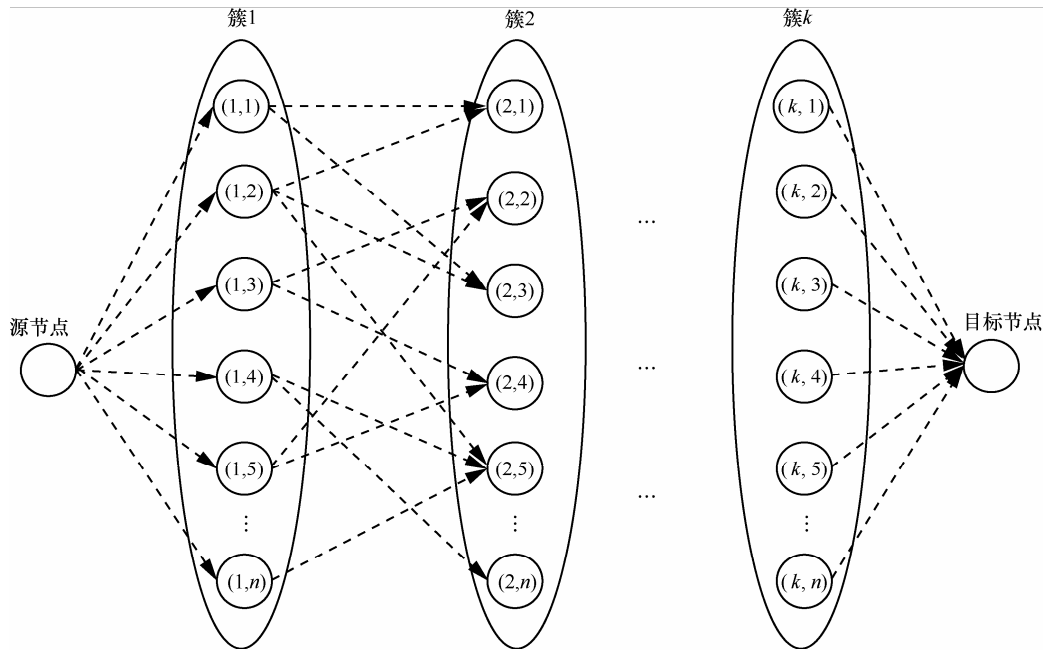


图 5 基于簇的多跳传输模型

表 1 关键参数

关键参数	参数意义
n_i	第 i 个簇中的节点数
k	源节点与目标节点之间的簇个数
r_{ij}	第 $(i+1)$ 个簇中与节点 (i,j) 相连的数目
P_{xy}	节点 x 与 y 之间的分组丢失率

1) 有限域 $GF(2^q)$ 的范围

在实际应用中，目的端所接收到的编码数据报文的线性无关性由有限域 $GF(2^q)$ 的取值范围所决定。一方面，如果系数 q 的取值过大，编码系数所占用的存储空间过多，而有效数据在存储空间中的比例较小，这会对车辆终端有限的存储空间产生压力。另一方面，如果指数 q 的取值过小，则由于目的端所接收到的数据编码报文的线性相关性较高，就会无法正确地恢复出原始报文。当系数 q 取不同值时，编码系数的线性无关概率大小如表 2 所示。

表 2 不同有限域范围下的系数向量线性无关概率

2^q	线性无关概率	2^q	线性无关概率
2^1	0.288 8	2^5	0.967 8
2^2	0.688 5	2^6	0.984 1
2^3	0.859 4	2^7	0.992 1
2^4	0.933 6	2^8	0.999 6

从表 2 可以看出，当 q 取 8 时，2 个编码系数向量的线性无关概率高达 99.96%。此时，编码系

数所占的存储空间只有 1 个字节，并且可以以很高的概率恢复出原始数据分组报文。基于以上考虑，本文在仿真中将有限域 $GF(2^q)$ 中 q 的取值定为 8。

2) 簇内节点数(n)和链路间分组丢失率(p)

目的端是否能通过接收最少数量的数据分组以获得 m 个线性无关的编码数据分组，依赖于 2 个参数， n 和 p 。总体上， n 越大、同时 p 越小，目的端可以从开始的 m 个编码数据分组中恢复 m 个原始数据分组的概率就越高。这是因为，更多的数据分组被成功转发到下一个簇中，因此，它们可以用于产生线性无关的数据分组。在仿真中，将讨论这些参数如何影响线性相关性。

3.2 仿真场景设置

为了验证所提出的集成网络编码的路由算法的性能，设计了相应的仿真实验。首先使用 QualNet 仿真软件建立了无线网络的动态仿真环境，并为每个车辆节点建立了详细的节点仿真模型。在物理层考虑了城市环境的实际通信因素，例如自由空间传播模型、传输功率以及接收器灵敏度。链路层使用 802.11 DCF 媒体接入控制协议。应用层使用 CBR 仿真通信呼叫。假设呼叫业务为均匀分布，所有的车辆终端均以相同概率产生新呼叫，并且呼叫的持续时间服从负指数分布，数据分组长度满足泊松分布。所有的车辆节点按照文献[20]所提供的移动性模型进行随机运动。车辆节点的速度为 40~80 km/h 之间的随机值。表 3 给出了仿真中使用的具体参数。

表 3 仿真参数

仿真参数	值
GF(2 ^q)	2 ⁸
网络规模	10 km×10 km
信道带宽	1 Mbit/s
数据分组平均大小	512 Kbyte
天线覆盖半径	0.5 km
传输发射功率	21 dBm
接受机灵敏度	-24.67 dBm
仿真时间	1 000 s

在仿真中，GF 域的尺寸设定为 2⁸。所有的仿真数据经过 20 次运行而平均获得。在每次的运行中，每组中的 100 个原始数据分组从源节点路由传输到目的节点。

3.3 仿真实验结果

仿真实验主要从下面 2 个方面进行考虑：1) 簇内节点数的影响；2) 跳数的影响。针对这 2 个方面的性能评价分析，主要通过 2 个指标：1) 吞吐量：它表示源节点最初所发送的 100 个原始数据分组在目的端被成功恢复的个数；2) 节点所发送的传输个数：它表示为达到相同的吞吐量，源节点和中间节点所需要发送的传输数量。节点所发送的传输个数越小，说明该路由算法的效率越高。

3.3.1 簇内节点数(n)影响

下面分析在保持相同的链路分组丢失率 ($p=0.1$) 情况下，当簇内节点的数目发生变化时，不同的路由算法对整个网络吞吐量的影响。

从图 6 可以看出，随着簇内节点的个数增加，这 3 种算法的吞吐量都随之增加。这是因为，当簇中具有更多的节点后，每个数据分组被传输到目的端的可能性更大。但是，当簇内节点的数量小于 10 时，CR_NC 的性能比 CR 差。这是由于在 CR_NC 中，需要一定数量的编码数据分组被用于解码中。因此，当目的端收到的数据分组不足解码要求时，无法恢复出数据分组，所以性能反而更差。当簇内节点数量超过 10 时（即 $n \geq m$ ）时，目的端可以收到足够多的数据分组来恢复出原始数据分组，因此 CR_NC 的吞吐量比 CR 大，并且会快速接近于 100。同时，由于对原始数据分组进行编码，因此 CR_NC 以非常高的概率恢复丢失的数据分组。当簇内节点数量超过 12 时，CR_NC 的吞吐量就达到了 90 以上。没有使用网络编码技术的 CR 的吞吐量则较低，即使当簇内节点数量

达到 16 时，CR 的吞吐量也没达到 90。这些结果表明，所提出的基于簇的网络路由协议 CR_NC 比较适用于对错误敏感的车载通信应用。与基于簇的路由算法相比，没有使用分簇技术和网络编码技术的 MPR 获得了最低的吞吐量。

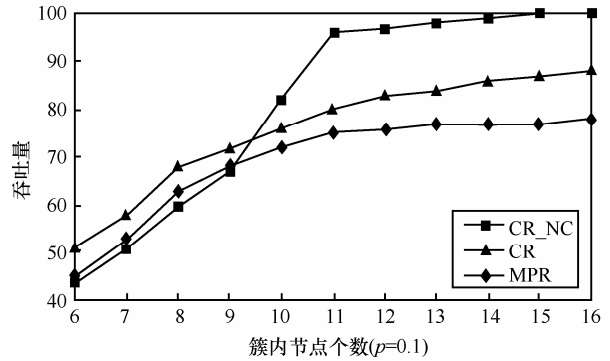


图 6 簇内节点数量对吞吐量的影响

接下来分析在保持相同的链路分组丢失率 ($p=0.1$) 情况下，使用不同路由算法时，为达到相同的吞吐量，整个网络总共所需要发送的传输个数。

图 7 描述了当簇内节点的个数发生变化时，为达到相同的吞吐量，3 种不同的路由算法所需要发送的传输个数，并以此说明簇内节点数量对目的端解码率的影响。从图 7 可以看出，当簇内节点的个数分别是 10、12 和 14 时，为达到 80 个数据分组的吞吐量，CR_NC 所需发送传输的数量最少。这是因为有效的编码提高了传输的可靠性，减少了重传的个数。表明在达到相同的吞吐量时，CR_NC 使用了最少的带宽。相比之下，由于 CR 没有集成网络编码，针对数据分组丢失的情况，会发起更多的重传，因而占用了更多的带宽。由于 MPR 既没有使用分簇技术，也没有集成网络编码，当局部链路发生中断时，需要重新建立路由，因而会产生过多的控制开销，占用更多的带宽资源。

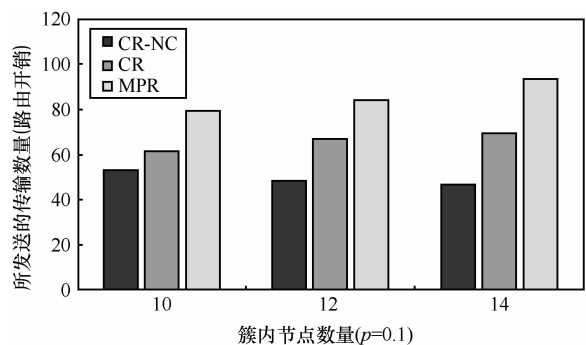


图 7 簇内节点个数对传输数量的影响

3.3.2 跳数(k)影响

本节讨论当簇内节点数为 10 时,在不同的路径长度(跳数)下(即源节点与目的节点间具有不同数量的簇个数),3种路由算法的性能对比。图 8 演示了吞吐量如何随跳数的增加而发生变化。

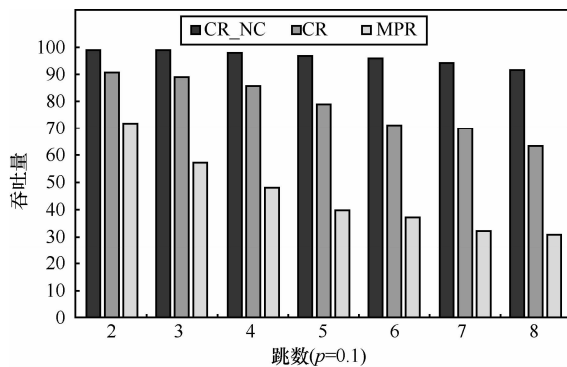


图 8 跳数对吞吐量的影响

从图 8 中可以看出,由于集成了网络编码,CR_NC 的性能表现得比 CR 更加出色。随着跳数的增加,CR_NC 的吞吐量相对比较稳定。原因是相同簇中的节点通过相互协作来中继数据分组,使从簇到簇的传输更加可靠。因此,尽管簇的数目增多,源节点发送的数据分组需要经历更长的路径和更多的跳数才能到达目的端,但是这些数据信息仍然可以在簇间进行可靠地转发。相比之下,由于缺乏网络编码对丢失数据分组的恢复,随着跳数的增加,CR 的性能下降较快。路径越长,CR 在整个端到端数据传输的分组丢失率上就越明显。当跳数超过 5 时,CR 的吞吐量已经低于 80,并开始较为明显地下降。相比之下,由于没有使用分簇技术,MPR 在传输数据时,节点之间缺乏合作,因此在每一跳中更易发生分组丢失。当路径长度超过 4 跳时,MPR 的吞吐量已经下降到 50 以下。

4 结束语

为了提高车联网中数据分组传递的可靠性,本文引入了基于簇的集成网络编码的路由解决方案。该路由算法的基本思路是利用簇内节点的协作提升车载通信的可靠性,同时,利用网络编码减少数据分组传输的数量。本文将所提出的基于簇的网络编码路由算法与传统的多径路由算法和基于簇的路由算法进行对比。仿真实验结果表明,本文所提的路由算法在吞吐量和数据分组的传送量等重要性能方面有明显的改善。这说明,基于簇的集成网

络编码的路由算法能够通过簇内节点之间的协同和网络编码的整合来解决车联网的低可靠性问题。同时,该路由算法可以通过标准的车载智能终端实现,因此在应用上具有较易的可操作性。但是,车联网下车辆节点处于移动当中,路由变化较快,吞吐量的提高势必引起时间花费增多,这将是下一阶段需要解决的问题。

参考文献:

- [1] CHEN Y S, LIN Y W, PAN C Y. DIR: diagonal-intersection-based routing protocol for vehicular ad hoc networks[J]. *Telecommunication Systems*, 2011(46):299-316.
- [2] NAUMOV V, GROSS T. Connectivity-aware routing (CAR) in vehicular ad hoc networks[A]. *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications, IEEE Infocom*[C]. Anchorage, Alaska, USA, 2007, 1919-1927.
- [3] YANG Q, LIM A, LI S, *et al.* ACAR: adaptive connectivity aware routing for vehicular ad hoc networks in city scenarios[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2010(15):36-60.
- [4] HUANG X X, FANG Y G. Yuguang. Performance study of node-disjoint multipath routing in vehicular Ad Hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009(58):1942-1950.
- [5] 宋飞, 苏伟, 张宏科等. 多路径并行传输中吞吐量的建模与分析[J]. *电子学报*, 2010,38(4):887-893.
- [6] SONG F, SU W, ZHANG H K, *et al.* Modeling and analysis of throughput in CMT[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(4):887-893.
- [7] SUN W, YAMAGUCHI H, YUKIMASA K, *et al.* GVGrid: a QoS routing protocol for vehicular ad hoc networks[A]. *Proceedings of IEEE International Workshop on Quality of Service*[C]. New Haven, CT, USA, 2006.130-139.
- [8] SKORDYLIS A, TRIGONI N. Delay-bounded routing in vehicular ad-hoc networks[A]. *9th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing 2008, MobiHoc'08*[C]. Hong Kong SAR, China, 2008.341-350.
- [9] TALEB T, SAKHAE E, JAMALIPOUR A, *et al.* A stable routing protocol to support ITS services in VANET networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007(56):3337-3347.
- [10] SAKHAE E, JAMALIPOUR A. Stable clustering and communications in pseudolinear highly mobile Ad Hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008(57):3769-3777.
- [11] ZHAO J, CAO G. VADD: vehicle-assisted data delivery in vehicular Ad Hoc networks[J]. *IEEE Computer Communications*, 2006, 57(3):1-12.
- [12] YONG D, LI X. SADV: static-node-assisted adaptive data dissemination in vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010(59):2445-2455.
- [13] CUI S, GOLDSMITH A J, BAHAI A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(6):1089-1098.
- [14] PILLUTLA L S, KRISHNAMURTHY V. Joint rate and cluster optimization in cooperative MIMO sensor networks[A]. *IEEE 6th Work-*

shop on Signal Processing Advances in Wireless Communications[C]. Philadelphia, PA, USA, 2005.265-269.

- [14] 李钊, 李建东, 肖丽媛. 认知 MIMO 系统基于授权通信模式信息的空频域机会接入[J]. 通信学报, 2012,33(1):38-44.
LI Z, LI J D, XIAO L Y. Spatio-frequency domain opportunistic access in CR-MIMO system based on primary transmission mode information[J]. Journal on Communications, 2012,33(1):38-44.
- [15] SENGUPTA S, RAYANCHU S, BANERJEE S. An analysis of wireless network coding for unicast sessions: the case for coding-aware routing[A]. Proc of IEEE Infocom[C]. Anchorage, AL, USA, 2007.1028-1036.
- [16] HO T, KARGER D R, MEDARD M, *et al.* The benefits of coding over routing in a randomized setting[A]. The 2003 IEEE International Symposium on Information Theory[C]. Yokohama, 2003.442-447.
- [17] BING D, JUN Z. Parity check network coding for wireless cooperative communications[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 19(2): 339-344.
- [18] SAKHAE E, JAMALIPOUR A. Stable clustering and communications in pseudolinear highly mobile Ad Hoc networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(6):3769-3777.
- [19] 肖百龙, 郭伟, 刘军等. 移动自组织网络基于链路稳定性的伪流言路由算法[J]. 通信学报, 2008,29(6):26-33.
XIAO B L, GUO W, LIU J, *et al.* Pseudo Gossip routing algorithm Based link stability in mobile ad hoc networks[J]. Journal on Communications, 2008,29(6):26-33.
- [20] SAHA A K, JOHNSON D B. Modeling mobility for vehicular ad hoc networks[A]. Proceedings of ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks[C]. Philadelphia, USA, 2004.91-92.

作者简介:



范存群 (1986-), 男, 江苏南通人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为物联网安全和车联网技术。



王尚广 (1982-), 男, 河南周口人, 博士, 北京邮电大学讲师, 主要研究方向为服务计算、车联网技术及网络安全。

谷文哲 (1979-), 男, 河南南阳人, 博士, 主要研究方向为无线自组织网技术。

孙其博 (1975-), 男, 河南郑州人, 博士, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为服务计算、物联网和网络安全。

杨放春 (1957-), 男, 北京人, 博士, 北京邮电大学教授, 主要研究方向为智能网络、服务计算和交换技术。