

VANETs 路由综述*

徐会彬^{1,2}, 夏超²

(1. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 200092; 2. 上海师范大学天华学院, 上海 201815)

摘要: 针对车载自组织网络拓扑结构高动态性, 阐述了路由协议研究的重要性; 分析并比较了在车载自组织网络中各种路由协议的优缺点, 并将现有的路由协议分为基于连通的、基于移动的、基于基础设施的、基于概率的以及基于地理位置的路由五类; 根据每一类路由分析其研究现状及特性; 最后展望了车载自组织网络路由技术的未来研究方向。

关键词: 车载自组织网络; 路由协议; 概率; 地理位置; 移动预测; 泛洪

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)01-0001-06

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.001

Survey on routing in vehicular Ad hoc networks

XU Hui-bin^{1,2}, XIA Chao²

(1. School of Electronics & Information, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tianhua College of Shanghai Normal University, Shanghai 201815, China)

Abstract: This paper addressed the importance of the present research in VANETs routing since the network topology was constantly changing. It discussed and compared the lots of routing protocols merits and faults. It classified existing VANET routing protocols into five categories: connectivity-based, mobility-based, infrastructure-based, probability-model-based and geographic-location-based. For each category, it presented state of the art and character. Finally, this paper discussed the directions for further for researchers of VANETs routing protocols.

Key words: vehicular Ad hoc networks(VANETs); routing protocol; probability; geographic location; mobility; flooding

车辆自组织网络(VANETs)作为智能交通的重要组成部分,通过车间通信以及车辆与路边设施间通信,高效地实现了事故预警、辅助驾驶、道路交通信息查询以及 Internet 接入服务等多种应用^[1]。人们预期在不久的将来,随着 VANET 的大量部署, VANET 在事故预警、保障交通安全、交通管理、乘客娱乐以及为用户提供舒适、安全的驾驶环境等方面将会起着至关重要的作用,有望成为物联网的典型应用之一^[2]。

近年来,大量的国内外学者和研究人员,针对 VANETs 进行了深入的、卓有成效的工作,主要的研究方向包括可靠路由协议机制、MAC 层协议及机制、隐私和安全保护机制及位置验证等。各国政府和大型汽车制造商设立了很多科研项目研究 VANETs,以期将研究成果应用于 VANETs。

在可靠路由协议机制中, VANET 中的可靠路由机制大多基于移动自组织网络(mobility Ad hoc networks, MANETs)中的路由机制,研究人员提出了很多 VANETs 的路由方案,包括基于位置的、基于概率的、基于广播的等。尽管如此,现有的路由机制仍然面临诸多挑战。与 MANET 相比,基于 MANET 的 VANETs 可靠路由机制需要面临以下方面的挑战:a) VANETs 动态性更强,由于车辆的快速移动,由车辆组成的网络,拓扑结构随时间变化,难以采用传统的方法建立路由;b) VANETs 通信的机会性更多,车辆密集区域车辆间的连通性相对较好,很可能存在端到端的连接,便于实现车辆间安全消息的可靠传递,但在车辆稀少的区域可能不存在点到点的连接,因此,

VANETs 中的路由连通存在机会性;c) VANETs 有效通信时间短,更为频繁,研究表明车辆通信的窗口平均时长为 15 s;d) VANETs 要求安全消息具有后向传递性,与 Ad hoc 网络不同,安全消息的传播具有后向传递性,但采用无线通信传播方式,尤其是采用广播方式,会导致所有邻居车辆均接收到前方车辆故障消息而造成不必要的次生事故。

综上所述, VANETs 的路由机制必须进行整体考虑,在保证 VANETs 系统功能的同时,提高系统的健壮性和安全性。

1 相关工作

可靠路由是车载自组织网络领域关键技术之一,尤其是当发送方和试图接收安全消息的接收方不在彼此的速率传输范围内时^[3]。可靠路由被定义为在特定时限和在可接受的开销内,百分之百地将信息包传送到目标接收者,即所有有意接收方都能接收到该信息,这对 VANETs 中的安全消息传送尤为重要。最简单的路由协议就是将收到的消息以广播式向邻居车辆传送,这种路由机制被称为基于泛洪路由。但是,基于泛洪路由占用了网络的整个资源,在车辆密集环境中很容易导致网络拥塞甚至瘫痪^[4]。因此,研究者把研究的焦点转向非泛洪路由方案。借助于路边的固定设施,即使在车辆稀疏情况下,路边设施采取存储—转发的模式,信息也可被可靠地传输;基于地理位置的路由协议被大多数学者应用于 VANETs,当车辆

收稿日期: 2012-06-03; **修回日期:** 2012-07-16 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60972036);上海市民办高校骨干教师科研资助项目

项目

作者简介: 徐会彬(1982-),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为 VANET 安全技术/路由技术(xuhuibin188@163.com);夏超(1985-),男,助教,硕士研究生,主要研究方向为网络通信。

能获得周边车辆的位置时,采用贪婪路径搜索法去传输数据包。基于路边的固定设施和基于地理位置路由协议都需额外设备或信息,这增加了系统开销。基于车辆预测移动路由是通过分析车辆的移动性去预测车辆之间的链接在一段时间内是否存在;基于概率的路由就避免了使用额外的设备或信息,其无线路由只需涉及到路由的两个节点。可充分利用 VANETs 特性去设置路由协议,如车辆移动性、连通性、固定的基础设施、地理位置以及动态的机会性。依据这些特性,可将现存的路由协议分为基于移动预测的、基于连通的、基于基础设施的、基于地理位置的以及基于概率的路由,如图1所示。

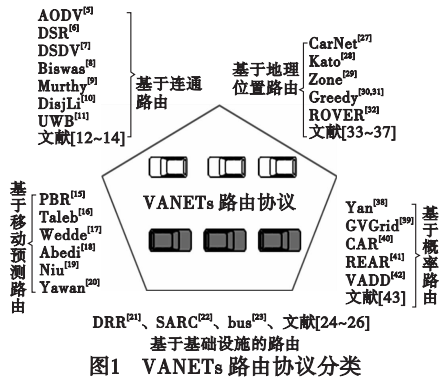


图1 VANETs 路由协议分类

通过部署收发器形成车辆之间通信网络的连通性。通信网络是传递消息的平台。泛洪是最简单的路由方案,它是将消息以广播的形式传递给网络中的每个节点。经典的泛洪路由有 AODV^[5] (Ad hoc on-demand distance vector)、DSR^[6] (dynamic source routing) 以及 DSDV^[7] (destination-sequenced distance vector), 这些方案都是将 MANET 的路由技术扩展到 VANETs。Biswas、Murthy 和 Li 等人^[8~10] 均采用泛洪。

与 ATM 和 Ethernet 不同,移动性是 VANETs 独有的特性,用相对距离、相对速度和相对加速度表述节点的移动信息。与 MANETs 相比,VANETs 中的车辆具有更大的移动空间(车辆高速移动)和移动空间受限特性(交通规则)。车辆必须依据现有的道路地图移动,这些移动特性可用于预测路由的生命周期。PBR^[15]、Taleb^[16]、Wedde、Abedi、Niu 等人^[17~19] 利用车辆的移动参数建立路由。在现有的 VANETs 方案中都存在一些固定设施,如路边设施单元(roadside units, RSU)、建筑物、蜂窝基站和日用的公交巴士,这些设施的部署有利于提高 VANETs 通信的鲁棒性和安全性。即使在车辆稀疏区域,通过利用路边固有设施可实现数据包的传递。DRR^[21]、SARC^[22] 和 bus^[23] 等均采用路边固有设施实现消息的传播。

随着 GPS 设备的功耗越来越低、价格越来越便宜、携带越来越方便,基于地理位置路由协议逐渐成为了研究热点。与基于泛洪路由协议不同,基于地理位置路由协议利用车辆的地理位置信息而不是拓扑的连通信息,如 CarNet^[27]、Kato^[28]、Zone^[29]、Greedy^[30,31]。

在动态系统中,常采用概率理论去描述随机事件发生的可能性。在 VANETs 中,节点的移动具有一定的随机性,导致无线链路的存在也呈现出机会性,为此,研究人员提出基于概率统计理论的路由策略。Yan^[38]、GVGrid^[39]、CAR^[40]、REAR^[41] 均运用概率理论构建路由。

2 各类 VANETs 路由特性分析

2.1 基于连通路由

基于连通式路由协议将源节点的数据包转发给网络中其

他节点。最简单的连通式路由就是泛洪。某一节点第一次收到数据包,将继续向邻居车辆广播,直到目的车辆收到消息数据包或每个节点已收到数据包的副本(第二次收到数据包),节点才停止广播。显然,这种协议很容易实施,对于交通告知消息且节点数量较小时,泛洪是一个不错的选择,但是对于单播消息,消息的目的节点只有一个,泛洪就不再适用,且对于节点数量较大时,大量的节点同时广播数据包,导致频繁信道竞争、数据包的碰撞,引起广播风暴。对于单播消息,可通过将消息分为控制包和数据包两类以提高泛洪的效率。路由请求(route request, RREQ)、路由错误(route error, RERR)、路由应答(route reply, RREP)都属于控制包。源节点向所有节点发送 RREQ 包;接收 RREQ 包的节点检测此包的目的地址,如果自己不是目的节点,就选择一条路径发送 RREQ 包。路由确定之后,数据包就可以沿着这条路径进行传递。在路由建立阶段中,如果发生了错误,就发送 RERR 包。如 Li 等人^[10] 均用 RREQ、RREP 和 RERR 数据包去实现数据的交互。

如果所有节点均在收发器的通信范围内,泛洪路由是一个不错的选择;然而在多跳通信中,网络的性能随着节点数据增加而快速下降。泛洪通常产生大量复制包甚至广播风暴,但是泛洪在网络拓扑结构动态变化缓慢以及交通密度不高的环境下,性能较好。由于泛洪占用过多的网络资源,直接采用泛洪较少,采用改进的泛洪机制可以有效提高消息传播的成功率、降低开销和延迟、避免数据包的碰撞。例如文献^[10] 提出 NDMR (node-disjoint multipath routing) 方案,此协议将网络视为定向图,通过广播控制消息建立路由,其克服了类似 AODV、DSR 的单路径按需路由协议的一些不足,降低了路由开销,同时实现了多节点独立路由协议。

文献^[11] 中提出城市多跳广播路由机制,其根据车辆通信范围和密度迭代等将道路分段,而后交替地采用定向广播和交叉口广播转发数据包。定向广播模式利用链路层的 RTB/CTB 握手机制选择路段中最远的邻居节点转发数据包。交叉口广播模式则通过在交叉口处安装转发器,向不同路段上的邻居节点进行定向广播,但存在一个问题就是,如何根据车辆密度将道路分段,同时由于车辆密度具有的动态性,车辆密度的统计值一定滞后于其变化,因此,快速实时统计车辆密度成为制约文献^[11] 路由性能的一个重要参数。

文献^[12,13] 中均采用通过信标消息获取邻居节点信息,当节点收到广播数据包后,节点判断与其邻居节点相比自身是否是最优的转发节点,如果是最优的转发节点,节点继续广播数据包。文献^[12,13] 下一跳选择的标准不一样,文献^[12] 是以节点和数据包的发送节点之间的距离为择优标准,而文献^[13] 则以节点和邻居节点的数据作为择优标准。

文献^[14] 提出 CAID (context-adaptive information diffusion) 路由方案,其基本思想是节点先计算邻居节点与其持有的数据包之间的相关性,然后向邻居节点转发相关性大的数据包。相关性蕴涵了数据包、车辆等信息,通过相关性,计算数据包的传输效率,节点据此为数据包分配通信资源。文献^[12~14] 所提出的方案均是基于邻居的泛洪协议,此类协议的原理就是根据邻居表的数据,决定向哪些邻居发送数据包,但是汇集邻居数据以及信标消息占用较多带宽和存储资源。

杨奎武等人^[42] 提出基于网络编码的广播传输机制,以降低延迟容忍网络的时延。基站先将数据包分批进行传输,每一批数据的数量一定,基站将数据包以单播方式传输给不同传感器节点时采用的编码向量互不相关,传感器之间通过泛洪机制

传递彼此缺少的编码数据包。尽管基于网络编码的广播传输机制通过编码的机制减少节点间的数据相关度,有效降低了广播时延,但是其较大的广播开销问题不容忽视。

2.2 基于移动预测路由

节点的移动是VANETs有别于其他网络的显著特点,如在Ethernet和ATM网络中,节点是固定于某一位置的;在蜂窝网络中,节点具有高速移动性,但是节点之间的通信是以基站为基础的。传统的MANET常应用于类似飞机场的小型区域,节点的移动较慢,而在VANETs的节点移动较快。节点的高速移动导致网络拓扑结构持续变化、链路稳定性差。因此,传统的路由算法不适用于VANETs。

节点移动性是影响网络稳定性能的重要因素。通过获取潜在链路的信息,可有效地避开不稳定以及即将失效的链路。融合节点移动速度、移动方向等数据,计算链路的生命周期进而维持路由。基于移动预测路由,就是通过这些参数去建立路由。在交通正常稳定情况下(如无交通堵塞),采用移动预测路由协议可行,并且路由性能良好,但是,由于节点需周期性地向邻居节点发送hello消息去获取邻居节点的信息,移动预测路由方案不适宜于交通堵塞情况。移动预测路由存在的另一个缺陷是其额外的通信开销大。链路的生命周期以及节点移动方向是目前研究节点移动信息的两个重要参数。

通过预测每个通信链路的生命周期,就能及时替换即将失效的链路以维护路由。通过融合时间、速度、加速度以及距离参数,可计算链路的生命周期并预测路由路径的有效期。假定*i*为发送节点,*j*为接收节点,其速度分别为 v_i, v_j ;加速度分别为 a_i, a_j ;节点*i*和*j*之间的距离为 D_{ij} ,限速为 v_m 。节点在 $[0, t]$ 运行的路程为

$$s(t) = \int_0^t v(x) dx \quad (1)$$

其中: $v(x)$ 为节点在时间 x 的运行速度。

由式(1)可得,在时间 $[0, t]$ 内,节点*i*、*j*各自运行的路程分别为 $s_i(t) = \int_0^t v_i(x) dx, s_j(t) = \int_0^t v_j(x) dx$ 。假设在0时刻,两节点的初始距离为 D_0 ,在时刻*t*两节点之间的距离为

$$D_t = s_i(t) - s_j(t) + D_0 \quad (2)$$

$$\text{设} \quad \text{Isign}_{ij}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } D_t > 0 \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

如果 $\text{Isign}_{ij}(t) = 1$,表明在时刻*t*节点*i*在节点*j*前面;反之,表明节点*i*在节点*j*后面。 R 为节点通信半径,当链路断开时,应满足下列关系:

$$D_t = R \times \text{Isign}_{ij}(t) \quad (4)$$

v_i, v_j, a_i 和 a_j 值的变化直接影响链路的生命周期,可通过融合这些参数计算链路的有效期。一旦获取了链路有效期的值,就可通过选择一系列的链路构建路由路径。路由路径有效期的值是所有路由链路中有效期的最小值。

判别两个节点的移动方向最基本的理论如图2所示。假定两节点*a*、*b*正在运行的速度各自为 v_a, v_b ,设计以*a*、*b*节点连线为水平线,以此水平线的垂线为垂直线; v_{ah}, v_{bh} 为 v_a, v_b 水平线方向的分量; v_{av}, v_{bv} 为 v_a, v_b 垂直线方向的分量;如果 $v_{ah} \times v_{bh} > 0$ 且 $v_{av} \times v_{bv} > 0$,节点*a*、*b*同方向。

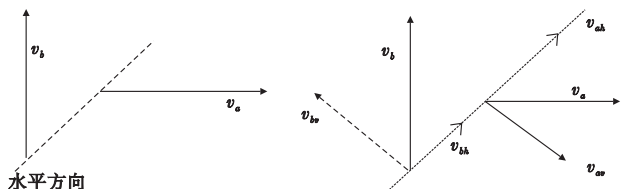


图2 速度分解方向图

Namboodiri等人^[15]提出面向高速公路车辆的预测移动模型,并通过预测链路的失效期去建立路由。Abedi等人^[18]提出基于AODV改进方案,其通过节点的位置、方向和速度参数去选择最佳路由,以适应节点高速移动环境。在Abedi等人所提的方案中将节点方向作为选择下一跳节点的最重要参数,因为处于同方向的移动节点比反方向更稳定。Wedde等人^[17]提出基于权值系数的路由算法,通过对道路条件、车辆的平均速度、交通拥塞情况估计权值。如果链路的权值满足某一要求(如门限值),将就此链路加入到路由路径。Niu等人^[19]提出新的可靠链路数学模型,不仅考虑链路的生命周期对路由的影响,而且也将交通密度纳入考虑范畴。Yawan等人^[20]提出ADOV-CAVM算法,其采用两个机制实现路由搜寻。首先采用跨层技术计算链路层的信道利用率;然后对邻居信息进行预测估计,获取邻居节点的移动参数数据。夏梓峻等人^[43]提出基于链路预测的路由算法,它是基于AODV的改进算法。通过融合车辆的位置、运动速度等信息计算链路失效时间,此方案具有较好的端到端延迟。

基于移动预测的路由能比较可靠地传输数据包,时延较低,但是预测车辆的信息开销大;同时,当车辆在高速移动时,车辆的信息呈瞬时性,其要求车辆具有快速计算能力才能实时统计预测信息,因此,基于移动预测路由的普适性较差。

2.3 基于基础设施路由

VANETs是一种拥有高度动态拓扑结构的移动自组网络,其频繁的网络分割问题导致VANETs连通的不稳定,极大限制了网络中数据发布的速度与准确性,这成为VANETs投入实际应用中的最大障碍。借助于路边基础设施RSU并结合节点(车辆)上的车载单元OBU(on board unit)提供可靠的数据传输路线,以解决VANETs连通性问题。其基本思想是:RSU用做固定可靠的节点,并由RSU组成为具有高带宽、低时延以及低误码率主干链路,如图3所示。当两节点之间的链路断裂,RSU将采用存储转发策略处理数据包。这种方案运用于实际中最为可靠,但存在两点不足:RSU的部署问题,即如何合理地部署RSU以及其经济问题;一旦发生自然灾害(如地震),必然会导致RSU损坏,如果完全依靠RSU传输数据,信息将无法正常传输,网络面临瘫痪。

在文献[21]中,提出一个DRR(differentiated reliable routing)路由方案,其定义了虚拟设备节点(virtual equivalent node, VEN)、差异化可靠路径(differentiated reliable path, DRP)两个概念。如果链路断裂了,RSU(一个或多个)将作为虚拟设备与节点进行链接,如果车辆与RSU连接成功,节点的位置信息与所有相关RSU同步。文献[22]中,提出基于街道路径算法的SARC(street-based anonymous routing protocol for city environment)路由发现机制,并通过路由发现和转发两个阶段以保护用户隐私。Kitani等人^[23]提出基于消息摆渡(message ferry)技术,采用消息收集、存储再传播消息的策略。在message ferry模型中,网络设备可以划分为两个种类:

a)普通节点,在网络中采用移动模型移动。普通节点不能接收其他普通节点发送给它们的数据。假设所有的数据都是单播的,普通节点的移动都是为了满足非通信需求。

b)特殊节点ferry,用来在普通节点之间传递数据,ferry节点通过周而复始地遍历预先设定的路由路径来实现数据传递。在文献[23]中,将公交巴士bus作为ferry节点。

SADV(static-node assisted adaptive routing)^[25]利用道路十

字路口所设置的静态节点引导数据包的转发,并建立路由。SADV 含有 LDU(link delay update)、SNAR(static node assisted routing)和 MPDD(multi path data dissemination)三个模块。LDU 负责实时更新静态节点间的传输延迟;SNAR 负责计算延迟最小路径;当道路上车辆稀少时,MPDD 通知静态节点同时向延迟最小和次小的两个路段转发数据包。SADV 采用路段模式和交叉口模式交替的方式转发数据包。当处于路段模式时,数据包向下一个静态节点进行贪婪转发;到达静态节点后变为交叉口模式,静态节点将数据包转发到延迟最小的路段。RAR^[26]是一个混合式的路由,用 RSU 将道路划分为几个部分,由 RSU 和车辆联合共同维护路由。

尽管这类算法数据传输可靠,但其均存在一定的局限性,很难准确地建立空间模型,而且没有将车辆网络社会行为的规律性特征综合考虑;同时,基础设施的部署耗资较大,难以应用于大规模环境中。

2.4 基于地理位置路由

随着 GPS 的日益普及,基于地理位置路由协议已成为研究的热点。通过目标节点以及邻居节点的位置信息建立路由,避免了额外的路由发现阶段,同时,基于地理位置路由协议使用贪婪算法由源节点向目的节点发送信息包。

基于地理位置路由协议 GPSR(greedy perimeter stateless routing)^[34]于 2000 年由 Karp 等人提出,随后相关的路由协议也被提出。GPSR 由两种模式组成,即贪婪转发模式和周边转发模式。贪婪转发模式节点选择距离目的节点最近的节点为下一跳,当贪婪模式失效后,周边转发模式采用右手法则转发数据包,直到目的节点接收到该数据包。但是 GPSR 并不适用于城市环境下,因为节点的分布受限于街道地形,如图 4 所示,源节点 S 使用 GPSR 向目的节点 D 发送信息包,当节点 B 遭遇局部最优化(路由空洞)时,使用周边模式转发,但节点 b 与节点 D 之间并无其他节点,即使使用右手法则也无法将数据包传到目的节点 D。为此,文献[35]提出存储—转发(carry and forward),节点 B 将数据包存储起来直到有下一跳节点时才将其转发。

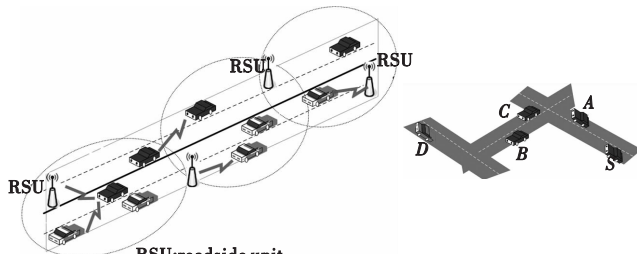


图3 路边设施RSU

图4 节点B遭遇局部最优化

STAR(spatial and traffic-aware routing)^[36]要求节点维护一个邻居表和一个交通流量表用于构造一个加权有向图。STAR 一段一段地动态获取最短路径,数据包沿图中计算出的含有固定数量锚点的最短路径进行贪婪转发,当数据包到达最后一个锚点时,重新计算最短路径继续转发。在性能上,STAR 优于 GPSR;但是,STAR 比 GPSR 浪费了更多的网络带宽。高速运动的节点可能延迟或丢失信标信息,使得车辆密度信息不准确,导致路由失效。另外在 STAR 中,车辆密度只有稠密或稀疏两种状态,精确度较低。

2007 年,Jerbi 等人^[37]提出路由协议 GyTAR(improved greedy traffic aware routing),根据各个路段实时的车辆密度一步步地动态获取数据包转发的下一个锚点,锚点之间采用改进

的贪婪算法转发数据包,考虑了邻居节点的速度向量,根据计算出的下一时刻邻居节点的位置进行贪婪转发。当数据包转发陷入局部最优时,采取缓存转发机制。GyTAR 需要额外的硬件设备和服务实时地提取路段车辆密度信息,这限制了协议的应用场景。宋利民等人^[44]提出基于位置信息的改进 AODV 路由协议,其利用中间节点重新计算转发角度,使在转发角度内邻居节点数不小于预设门限值,同时采用基于位置信息的计数器,使得离目标节点近的中间节点能优先转发路由。李景民^[39]提出了可信路由协议,将经验信任值作为一种度量标准,修改了 GPSR 协议的转发规则,即将数据包转发给其最信任的邻居节点,而不是选择距离目的节点最近的邻居节点作为下一跳,它有较强的抵抗自私节点能力。

尽管基于地理位置的路由协议算法较为简单,但往往是局部最优,未从全局考虑,同时距离的门限值不易获取。

2.5 基于概率路由

由于网络拓扑结构不断变化,传统的路由协议难以适应于 VANETs 高动态性,研究人员开始利用概率统计理论提出基于概率路由方案。通过分析两节点之间的无线链接在一定时间内存在的可能性,或已存在的链接在一段时间后仍然未断裂的可能性,并用概率描述其可能性。基于概率的路由通常需作一些有关网络特性的假设,建立相应的模型使用这些模型,才能统计相关变量的分布信息。

在无线通信中,常采用无线信号强度衰减模型。一般假定接收信号为正态分布或对数正态分布,并统计已有链路的情况。另一个常用的模式就是移动模式,在此模式中,假定速度和加速度服从正态分布,两节点之间的距离服从对数正态分布。通过这些假设可计算链路的生命周期。

基本概率的路由适用于特定条件的交通,如果此条件不满足,路由协议性能下降甚至数据包大量丢失。另一个缺陷就是对于特定的两个节点,基于概率的路由所选择的路由不是最优解,主要因为此方案的判断依据是基于某一事件发生概率而不是准确的真实值。

Jiang 等人^[41]提出一个基于接收警告信息的概率的路由算法,被命名为 REAR(reliable and efficient alarm message routing)。此算法思想是:采用移动模型并结合无线信号损耗,计算无线信道所收到的警告信息的概率,并将这个概率作为选择下一跳节点的依据。无线信号损耗可分为路径损耗和衍射损耗两个部分。基于丢包率和接收信号强度之间的关系统计接收信号的概率,所有节点接收信号的概率的计算是基于对接收信号强度的估计。Yang 等人^[40]提出一个连通警报路由协议(connectivity aware routing protocol, CARP)。其方案为对道路进行网格划分,每个网格大小约为车辆的平均长度;两节点(车辆)连通的概率就是两节点之间的距离在某一个范围内(通信范围),概率越大,被选中的机会越大。Sun 等人^[39]提出以满足一定延时要求的可靠路径方案,该方案假定节点的移动速度服从正态分布,计算链路的连通概率,并将此作为判断链路是否可靠的依据。

在现实环境中,VANETs 属于非均衡的延迟容忍网络。针对此类网络,一般采用机会转发、缓存转发、设定转发优秀等级机制实现路由。此类路由的策略就是在一定的延迟允许范围内尽可能将数据包可靠地传输到目的节点。VADD(vehicle-assisted data delivery)^[42]就属典型的延迟容忍路由协议,VADD 基于数据包传递到目的节点的概率,并结合附件移动车辆的位

置和方向。VADD采用 intersection、straightway、destination 三种数据包转发模式。当数据包到达道路交叉口附件时,被设置为 intersection 模式,选择传输延迟最小的路段转发数据包,并将次小的路段作为备选;当数据包离开道路交叉口时,进入 straightway 模式,数据包沿路段转发;当数据包靠近目的节点时,进入 destination 模式。然而,VADD 需要计算每个十字路口数据包转发的概率,计算能力要比较大。对于 VADD 来说,VADD 的输入信息都是静态的:数据包从一个十字路口成功地传递到另一个十字路口成功传递概率是静态的。Fukugama^[46]提出新的方案,通过预先计算源节点与目的节点可能路由的概率,并基于一定的数学模型,通过计算这些概率建立一拟用的路由表。

DTSG(dynamic time-stable geocast)^[47]也是基于地理位置的路由协议,Geocast 称为地域性的多播,其目的区域定义为 ZOR(zone of relevance),位于 ZOR 的节点是数据包的目的节点,数据包的转发区域定义为 ZOF(zone of forwarding),位于 ZOF 的节点转发数据包。DTSG 由两个阶段组成,第一阶段完成数据包在 ZOR 中的扩散,第二阶段保证数据包在预设时长内持久地存在于 ZOR 中。DTSG 的预设时长可以动态变化,不需要任何额外的开销。DTSG 通过设置数据包广播周期时长降低数据的冗余度,减少网络负载。

宋超等人^[48]提出基于分布式实时信息的车载网络路由协议,采用分布式实时延时估计机制获取各路段网络状态的实时信息,以解决现有协议缺乏实时性的问题,保证了数据在最低限度消耗资源的前提下有效地传递到目标区域。

3 结束语

表1列出了各类路由协议的特点,设计 VANETs 路由协议可结合各类协议提高性能。

表1 各类路由协议的优缺点

路由协议	优点	缺点
基于连通路由协议	系统简单	开销大、广播风暴
基于移动预测路由协议	可靠、准确	开销大、普适性差
基于概率路由协议	有效	局部最优、普适性差、易丢失数据包
基于固定设施路由协议	可靠、准确	耗费大、不适用于大规模的网络环境
基于地理位置路由协议	简单	开销大、局部最优

理想的 VANETs 应自适应能力强、控制开销少、数据冗余度低、普适性高、数据传输时延小。通过对当前的各类路由协议进行分析与总结,在设计高性能的路由协议时应考虑以下几点:

a)路由协议的可靠性。数据包成功地传递,尤其是在在交通安全应用领域中显得尤为关键。基于连通的路由无法提供数据包的可靠传输和端到端的质量服务,基于概率的路由更加需要新的机制和技术保证数据的可靠性。

b)路由协议的自适应性。由于交通流量和网络规模不断变化,路由协议应能适应各种环境,在高密度、大规模的网络环境下拥有优良的性能,能根据现实环境进行自我调整。同时,网络中还存在一些不确定的因素^[49],如数据包的碰撞、信号误码等,这些误差和不确定因素对路由协议性能造成影响。因此,协议的自适性是必须予以关注的问题。

c)路由协议的普适性。现有的路由协议一般是针对特定网络环境中的具体的交通应用而提出,这些协议普适性较差。VANETs 的非均衡性和应用的多样性要求路由协议具有较强的普适性以及与互联网网络协议的兼容^[49],如何增强路由协

议的普适性需要进一步深入研究。

d)路由协议的安全性。在设计路由协议时,应考虑用户和数据的授权、隐私保护、安全通信等问题。目前,多数路由协议没有考虑协议的安全问题,因此,如何在路由协议中引入安全保障机制是需要解决的问题。

目前,国内外的学者针对各类场景问题提出了大量的 VAENTs 路由协议,但是,在 VAENTs 路由协议研究领域中,仍有许多问题有待解决,许多新的研究课题有待发现。

参考文献:

- [1] WILLKE T L, TIEN TRAKOOL P, MAXEMCHUK N F. A survey of inter-vehicle communication protocols and their applications [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2009, 11(2): 3-20.
- [2] LEE J H, ERNST T, CHILMAKURTI N. Performance analysis of PMIPv6-based network mobility for intelligent transportation systems [J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2012, 61(1): 74-85.
- [3] PARNO B, PERRIG A. Challenges in securing vehicular networks [C]//Proc of the 4th Workshop on Hot Topics in Networks. 2005.
- [4] NI S Y, TSENG Y C, CHEN Y S, et al. The broadcast storm problem in a mobile Ad hoc network [C]//Proc of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 1999: 151-162.
- [5] PERKINS C E, BELDING-ROYER E, DAS S. RFC 3561, Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing [S/OL]. [2003-07]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>.
- [6] JOHNSON D B, MALTZ D A, HU Y C. The dynamic source routing protocol for mobile Ad hoc networks [R]. [S. l.]: IETF MANET Working Group, 2007.
- [7] PERKINS C E, BHAGWAT P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers [J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 1994, 24(4): 234-244.
- [8] BISWAS S, TATCHIKOU R, DION F. Vehicle-to-vehicle wireless communication protocols for enhancing highway traffic safety [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2006, 44(1): 74-82.
- [9] MURTHY S, GARCIA-LUNA-ACEVES J J. An efficient routing protocol for wireless networks [J]. *Mobile Network and Applications*, 1996, 1(2): 183-197.
- [10] LI Xue-fei, CUTHBERT L. On-demand node-disjoint multipath routing in wireless Ad hoc network [C]//Proc of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks. Washington DC: IEEE Computer Society, 2004: 419-420.
- [11] KORKMAZ G, EKICI E, OZGUNER F, et al. Urban multi-hop broadcast protocol for inter-vehicular communication systems [C]//Proc of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad hoc Network. New York: ACM Press, 2004: 76-85.
- [12] SURIYAPAIBO N, WATTANA K, POMAVALAI C. An effective safety alert broadcast algorithm for VANET [C]//Proc of International Symposium on Communications and Information Technologies. 2008: 247-250.
- [13] JIANG Hao, GUO Hao, CHEN Li-jia. Reliable and efficient alarm message routing in VANET [C]//Proc of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems. 2008: 186-191.
- [14] ADLER C, EICHLER S, KOSCH T, et al. Self-organized and context-adaptive information diffusion in vehicular Ad hoc networks [C]//Proc of the 3rd International Symposium on Wireless Communication Systems. 2006: 307-311.
- [15] NAMBOODIRI V, GAO Li-xin. Prediction-based routing for vehicular

- Ad hoc networks [J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2007, 56(4): 2332-2345.
- [16] LIU Kai, LEE V C. RSU-based real-time data access in dynamic vehicular systems[J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2010, 59(6): 3337-3347.
- [17] WEDDE H F, LEHNHOFF S, Van BONN B. Highly dynamic and scalable VANET routing for avoiding traffic congestions[C]//Proc of the 4th ACM International Workshop on Vehicular Ad hoc Networks. New York: ACM Press, 2007: 81-82.
- [18] ABEDI O, FATHY M, TAGHILOO J. Enhancing AODV routing protocol using mobility parameters in VANET[C]//Proc of IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 229-235.
- [19] NIU Ze-yun, YAO Wen-bing, NI Qiang, *et al.* DeReQ: a QoS routing algorithm for multimedia communications in vehicular Ad hoc networks [C]//Proc of International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing. New York: ACM Press, 2007: 393-398.
- [20] YAWAN N, KEERATIWINTAKORN P. AODV improvement for vehicular networks with cross layer technique and mobility prediction [C]//Proc of International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. 2011: 1-6.
- [21] HE Rong-xi, RUTAGEMWA H, SHEN Xue-min. Differentiated reliable routing in hybrid vehicular Ad hoc networks[C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. 2008: 2353-2358.
- [22] KIM H, PAIK J, LEE B, *et al.* SARC: a street-based anonymous vehicular Ad hoc routing protocol for city environment[C]//Proc of IEEE/IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 324-329.
- [23] KITANI T, SHINKAWA T, SHIBATA N, *et al.* Efficient VANET-based traffic information sharing using buses on regular routes [C]//Proc of IEEE Vehicular Technology Conference. 2008: 3031-3036.
- [24] ALI G G M N, CHAN E, LI Wen-zhong. Two-step joint scheduling scheme for road side units (RSUs)-based vehicular Ad hoc networks (VANETs) [C]//Proc of the 16th International Conference on Database System for Advanced Applications. Berlin: Springer-Verlag, 2011: 569-574.
- [25] DING Yong, WANG Chen, XIAO Li. A static-node assisted adaptive routing protocol in vehicular networks[C]//Proc of the 4th ACM International Workshop on Vehicular Ad hoc Networks. New York: ACM Press, 2007: 59-68.
- [26] PENG Yan-lin, ABICAR Z, CHANG J M. Roadside-aided routing in vehicular networks [C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. 2006: 3602-3607.
- [27] MORRIS R, JANNOTTI J, KAASHOEK F, *et al.* CarNet: a scalable Ad hoc wireless network system [C]//Proc of the 9th ACM SIGOPS European Workshop on Beyond the PC: New Challenges for the Operating System. New York: ACM Press, 2000: 61-65.
- [28] KATO T, KADOWAKI K, KOITA T, *et al.* Routing and address assignment using lane/position information in a vehicular Ad hoc network [C]//Proc of IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 1600-1605.
- [29] BRONSTED J, KRISTENSEN L M. Specification and performance evaluation of two zone dissemination protocols for vehicular Ad hoc networks [C]//Proc of the 39th Annual Symposium on Simulation. 2006: 68-79.
- [30] GONG Jia-yu, XU Cheng-zhong, HOLLE J. Predictive directional greedy routing in vehicular Ad hoc networks [C]//Proc of the 27th International Conference on Distributed Computing Systems. 2007: 2.
- [31] LOCHERT C, HARTENSTEIN H, TIAN J, *et al.* A routing strategy for vehicular Ad hoc networks in city environments [C]//Proc of Intelligent Vehicles Symposium. 2003: 156-161.
- [32] KIHIL M, SICHITIU M, EKEROTH T, *et al.* Reliable geographical multicast routing in vehicular Ad hoc networks [C]//Proc of the 5th International Conference on Wired/Wireless Internet Communication. Berlin: Springer, 2007: 315-325.
- [33] 任伟, 董育宁, 赵海涛. 一种改进的基于地理位置的无线 Mesh 网络路由协议 [J]. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 2012, 32(1): 75-82.
- [34] KARP B, KUNG H T. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks [C]//Proc of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2000: 243-254.
- [35] NAUMOV V, GROSS T R. Connectivity-aware routing (CAR) in vehicular Ad hoc Networks [C]//Proc of the 6th IEEE International Conference on Computer Communications. 2007: 1919-1927.
- [36] GIUDICI F, PAGANI E. Spatial and traffic-aware routing (STAR) for vehicular systems [C]//Proc of the 1st International Conference on High Performance Computing and Communications. Berlin: Springer, 2005: 77-86.
- [37] JERBI M, MERAIHI R, SENOUCI S M, *et al.* GyTAR: improved greedy traffic aware routing protocol for vehicular Ad hoc networks in city environments [C]//Proc of the 3rd International Workshop on Vehicular Ad hoc Networks. 2006: 88-89.
- [38] YAN Gong-jun, OLARIU S, SALLEH S. A probabilistic routing protocol in VANET [C]//Proc of the 7th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia. 2009: 14-16.
- [39] SUN Wei-hua, YAMAGUCHI H, KUSUMOTO S. GVGid: a QoS routing protocol for vehicular Ad hoc networks [C]//Proc of the 14th IEEE International Workshop on Quality of Service. 2006: 130-139.
- [40] YANG Qing, LIM A, AGRAWAL P. Connectivity aware routing in vehicular networks [C]//Proc of Wireless Communications and Networking Conference. 2008: 2218-2223.
- [41] JIANG Hao, GUO Hao, CHEN Li-Jia. Reliable and efficient alarm message routing in VANET [C]//Proc of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 186-191.
- [42] 杨奎武, 郭渊博, 马骏, 等. 基于网络编码的延迟容忍移动传感器网络低时延广播传输机制 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(5): 1239-1246.
- [43] 夏梓峻, 刘春风, 赵增华, 等. 基于链路预测的 VANET 路由算法 [J]. 计算机工程, 2012, 38(4): 110-114.
- [44] 宋利民, 董贤伟, 何荣希. 基于位置信息的改进 AODV 路由算法 [J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(2): 455-461.
- [45] 李景民. 一种新的车辆自组网可信路由协议 [J]. 吉林大学学报, 2011, 41(1): 198-204.
- [46] FUKUYAMA J. A probabilistic protocol for multi-hop routing in VANETs [J]. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2010, 2010(1): 42.
- [47] RAHBAR H, NAIK K, NAYAK A. DTSG: dynamic time-stable geocast routing in vehicular Ad hoc networks [C]//Proc of the 9th IFIP Annual Mediterranean Ad hoc Networking Workshop. 2010: 1-7.
- [48] 宋超, 刘明, 龚海刚, 等. 基于分布式实时信息的车载网络路由协议 [J]. 软件学报, 2011, 22(3): 466-480.
- [49] LI Xin, LI Zhe. Overhead reducing method for MANET accessing Internet based on gateway pheromone update [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(4): 870-874.