

面向车路协同的地理空间标识网络模态设计与场景应用

潘仲夏 沈丛麒 骆汉光 朱俊* 邹涛 隆克平

(之江实验室高效能计算设施研究中心 杭州 311121)

摘要: 车路协同网络的拓扑结构变化频繁、业务需求呈现多样性等特征,给数据高效可靠传输带来了挑战。基于地理位置信息的网络协议标准,结合多模态网络的柔性可扩展架构,该文提出并设计了一种地理空间标识网络模态,在网络层协议上将IP替换为地理空间标识网络协议,并在可编程多模态网元设备上实现了基于地理空间信息的寻址和路由。为了验证地理空间标识网络模态的可用性,面向智慧交通场景研制了支持地理空间标识寻址机制的车路协同智慧交通系统,有效实现车路协同系统中包括道路安全和交通信息的传输。实验表明该系统具备良好的稳定性和高效性,可应用于泛连接、弹性业务流量等典型车路协同交通场景。

关键词: 多模态网络; 协议报文处理; 网络可编程; 地理空间标识网络模态; 网络模态应用

中图分类号: TN91; TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2026)02-0583-14

DOI: 10.11999/JEIT250807

CSTR: 32379.14.JEIT250807

1 引言

交通运输是国民经济的基础命脉和经济发展的先行官。国家提出“建设现代化高质量综合立体交通网络”,为新时代交通基础设施建设指明了方向^[1]。多个省份面对新时代交通强国战略实施要求,正努力加快构建安全、便捷、高效、绿色和经济的现代化综合立体交通体系^[2],对网络的柔性适配、持续演进等提出新的挑战。以车路协同场景为例,车路协同网具有环境开放、节点数量大、节点移动速度快等特点,以及网络拓扑结构变化频繁、无线信道不稳定、业务需求呈现多样性等技术特征,给数据高效传输带来更加严峻的挑战。因此,根据不同业务实现快速的网络重构显得尤为重要,构建一个柔性实时网络是车路协同网技术应用于智能交通系统的必要条件。

路由优化、网络拓扑自适应动态构建是柔性实时网络中的一个重要技术方向,能够实现车路协同中网络动态变化,支撑多种业务。文献[3]提出基于流量预测的动态路由算法,通过星间链路负载均衡优化网络容量利用率,实验显示时延降低23%,但未考虑车辆移动性引起的拓扑抖动,导致地面端丢包率升高。文献[4]结合道路拓扑与车辆轨迹预测,

设计内容中心网络(Content Centric Networking, CCN)路由机制,降低冗余数据广播,但该技术依赖高精度地图数据,在施工路段性能显著下降。文献[5]基于时空图神经网络实现路侧单元动态调度,拥堵路段路由切换延迟降至50 ms。但该方法的训练过程需要大量样本,边缘设备部署成本高。文献[6]开发多约束路径枚举算法,支持实时交通流、能耗和安全等级的联合优化,但计算开销较大,复杂度随节点数呈指数增长,无法应用于实际网络。文献[7]提出分布式强化学习框架,车辆通过V2X (Vehicle-to-Everything)通信自主协商路由,有效规避拥堵,但未解决车辆自私路由导致的局部资源竞争问题。综上,现有研究在动态拓扑响应速度与计算复杂度间存在矛盾,且缺乏跨层优化机制。

为解决上述矛盾,部分研究者从网络层的角度,研究地理寻址协议,以实现高效寻址。文献[8]提出一种经典地理路由算法,通过邻居位置贪婪转发与周界模式恢复链路,但应用于异常环境(如峡谷地带等)则表现不佳。文献[9]提出了一种基于位置服务的路由协议,通过将路由过程与位置服务相结合,利用车辆区域而非精确位置来延长位置信息的有效时间,并减少控制消息的开销,但该协议不支持精确的地理位置,难以满足依据地理位置寻址的需求。文献[10]结合车辆导航路径预测进行存储-携带-转发决策,但该方法受路径预测误差影响较大,一旦路径预测误差增大15%,则网络吞吐量下降58%。文献[11]利用道路拓扑约束减少冗余转发,能耗降低33%,但是该组网依赖静态路网数据库,无法适应动态变化的交通场景。文献[12]融合用户出行规律与社交关系优化转发策略,但是社交网络的应用可能带来隐私泄露的风险。综上,上述

收稿日期: 2025-08-27; 改回日期: 2025-11-06; 网络出版: 2025-11-18

*通信作者: 朱俊 zhu_j@aliyun.com

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB2903900), 国家自然科学基金(U22A2005), 浙江省重点研发计划(2024SSYS0001)

Foundation Items: The National Key Research and Development Project of China (2023YFB2903900), The National Natural Science Foundation of China (U22A2005), The Key R&D Program of Zhejiang (2024SSYS0001)

方法把地理位置信息放在报文载荷部分,地理寻址的效率提升往往引入较大的计算开销。

近年来,随着可编程网络^[13,14]的兴起,可编程数据平面技术推动网络从“刚性架构”向“柔性可塑”转型,进一步增强智慧交通网络的灵活性。文献[15]提出控制面与数据面分离的多模态网络架构,支持IP与地理寻址协议并行运行。这些工作提出了智慧交通网络的一种新方向,但尚没有在真实网络中实现应用。为此,基于一种地理空间位置信息的网络协议标准,并在此基础上结合多模态网络架构,设计实现了地理空间标识网络模态,使得在本系统中3层协议不再是传统的IP报文,而是携带了地理位置标识的报文,可直接根据地理位置信息转发报文。基于地理位置信息的寻址路由方式,比基于IP的寻址路由会更加高效和便捷。同时,面向智慧交通场景设计了一种基于地理空间标识寻址的车路协同交通系统,本系统支持直接根据地理位置信息转发报文,能够灵活地支撑车路协同系统中包括道路安全和交通信息的传播,以保证车辆的行驶安全,提高车辆的出行道路规划效率。

2 GeoNetworking协议

GeoNetworking协议(简称GEO)是欧洲标准委员会基于电气电子工程师学会IEEE 802.11p协议的智能交通系统(Intelligent Transport System, ITS)发布的欧洲智能交通系统标准协议族。作为ITS-G5协议栈网络层的基石,该协议定义了以地理位置为标识的路由机制,为车辆自组织网络中的分组转发提供了核心支持。协议通过地理寻址与地理路由,实现了4种关键的数据转发模式:GeoUnicast(地理单播)、GeoAnycast(地理任播)、GeoBroadcast(地理广播)以及TopoBroadcast(拓扑广播)。GEO协议展现出高度的灵活性与异构性:在协议栈层面,既能独立运行,也可与IP协议结合;在接入层面,能够兼容IEEE 802.11p、Wi-Fi、红外等多种无线接入技术;在业务支持层面,其架构被划分为多媒体无关和多媒体相关两部分,服务于智能交通系统中多样化的通信需求^[16]。

GEO协议打破了传统IP的寻址方式,适用于节点高速移动导致拓扑频繁改变网络系统。按照节点地理位置进行路由,支持车载自组网(Vehicular Ad-hoc Network, VANET)中车到车(Vehicle-to-Vehicle, V2V)、车到基础设施(Vehicle-to-Infrastructure, V2I)、车到一切V2X等通信业务场景。

3 地理空间标识网络模态设计

本节将从总体设计思路、报文格式及协议栈设

计、端到端协议处理流程、路由计算机制4个方面描述地理空间标识网络模态(简称GEO网络模态)的设计。

3.1 总体设计思路

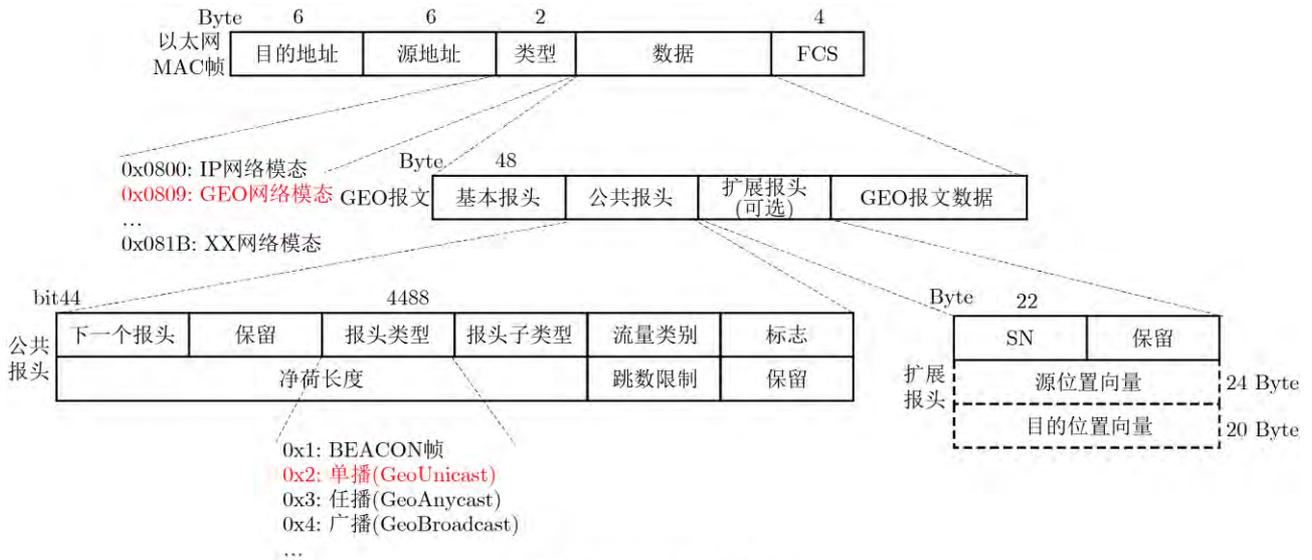
作为多模态网络中的一种典型网络模态,地理空间标识网络模态借鉴了GEO协议的报文设计主体思想,同时结合多模态网络体系架构^[14],形成相对独特的GEO网络模态设计方案。总体来说,相较于GEO协议,地理空间标识网络模态主要有两个技术特点和创新:(1)将GEO协议“数据面与控制面紧耦合”的形式替换为GEO网络模态“数据面与控制面相分离”的设计思路,实现GEO网络模态与其他网络模态在同一个多模态网络环境基础设施上共存;(2)将原有GEO协议的分布式网络寻址路由方案替换为集中式的基于多模态网络控制器的网络寻址路由方案,构建精确的地理位置-终端映射机制,可基于全局网络视图进行协同优化,减少网络拥塞问题。集中式方案也利于GEO网络模态的迭代、优化和长期演进。

3.2 网络模态报文格式及协议栈设计

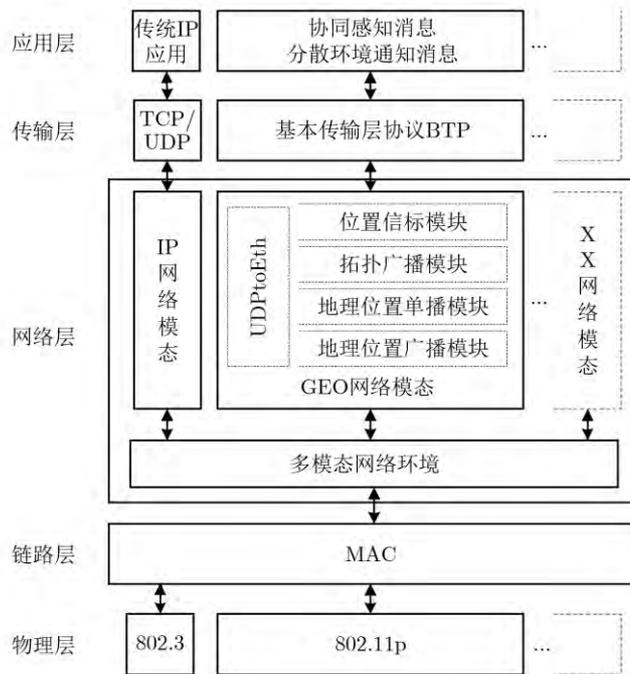
地理空间标识网络模态的设计主要遵循GeoNetworking协议标准,但为了在多模态网络环境中对地理空间标识网络模态进行承载,采用如下独特的设计,如图1(a)所示:多模态网络通过MAC层实现统一承载,在MAC层利用以太网帧类型字段的0x0809-0x081B表示各类网络模态。GEO地理空间标识网络模态的以太网帧类型字段采用0x0809来区分和识别。GEO网络模态报文被封装在MAC帧的数据字段中。

GEO网络模态报文格式由基本报头、公共报头、扩展报头(可选)和GEO净荷数据所组成。其中,公共报头包含下一个报头、报头类型、报头子类型、流量类别、标志、净荷长度、跳数限制和若干保留字段。GEO网络模态的报头类型主要有Beacon帧、地理单播、任播、广播等。而扩展报头主要包含各类地理空间位置信息。因报头类型的差异,扩展报头采用不同的格式。以基于地理位置的点对点通信报文(单播)为例,GEO网络模态报头类型为0x2H。扩展报头包含序列号SN、保留字段、源位置向量和目的位置向量。序列号(2 Byte)代表报文序列号,用于检测报文是否重复发送;源位置信息(24 Byte)以详细位置向量的方式给出源地理位置信息;目的位置信息(20 Byte)以精简位置向量的方式给出目的地理位置。

GEO网络模态协议栈的总体设计如图1(b)所示。该协议栈的设计和实现基于可支持多种网络模



(a) GEO网络模式报文格式



(b) 地理空间标识网络模式的协议栈

图1 地理空间标识网络模式的报文格式和协议栈设计

态统一承载的多模态网络环境。物理层一般采用IEEE 802.11p无线传输标准。数据链路层采用以太网数据帧协议标准。而在网络层中，3层协议已不再是传统的IP报文，而是携带了地理空间标识的GEO网络模式报文。在网络层上，GEO网络模式通过UDPtoEth模块实现UDP报文与数据链路层以太网数据帧间的相互转换，包含位置信标模块、地理位置单播模块、地理位置广播模块和拓扑广播模块等。其中，位置信标模块负责收集和发送信标报文，信标报文是车联网系统终端节点周期性发送的

单跳广播帧用以获取邻居终端节点信息，由地理空间标识协议生成；地理位置单播模块负责将报文投递到指定位置的目标节点；地理位置广播模块负责将报文投递到指定地理范围内全部或任意节点；拓扑广播模块将报文投递到一定跳数范围内的全部节点。传输层采用基本传输协议(Basic Transport Protocol, BTP)实现，通过调用GEO网络模式提供的接口向网络层发出数据报文的封装和发送请求。应用层封装了标准化的车联网信息，包括协同感知消息和分散环境通知消息。其中，应用层协同感知

消息是在车联网中智能交通系统ITS之间互相交互的、帮助车辆发现彼此信息的一种消息。分散环境通知消息通常被用于支持上层的道路危险警告应用,是车辆向外告知路上的突发事件的媒介,包含有关于道路风险或者是其他非正常交通安全状况的信息,比如车祸的发生、道路状况通告。

3.3 端到端协议处理流程

当移动终端生成携带目标区域地理信息(如目标区域中心点经纬度、覆盖半径和目标区域形状等)的报文后,与其直连的路边基站将报文传递给多模态网元设备。多模态网元设备首先解析识别报文类型为地理空间标识模态。接着,进一步解析报文头部的地理空间标识字段,获取报文对应的地理空间标识信息。对于消息广播报文,多模态网元设备在本地流表中执行多级匹配查询。若流表内存在完全匹配目标区域位置、大小和形状的条目,则直接按照预设的转发端口执行数据包转发;若未找到有效匹配项,则立即通过控制通道向所属域的多模态网络控制器发送Packet-In消息,携带报文元数据请求路径决策。

多模态网络控制器接收到查询请求后,启动地理路由计算引擎。基于目标区域的中心点经纬度和网络拓扑地图,控制器首先判定目标区域归属:若目标完全处于本自治域地理边界内,则根据实时链路状态生成最优转发路径,并向域内所有相关交换机批量下发流表修改消息,安装指向目标基站群的组播转发规则;若目标区域跨越多个自治域,控制器则向核心网控制层发起协同请求。核心网通过全局拓扑数据库计算跨区域路径,基于全局网络信息重新计算新的转发路径,并将各自自治域的覆盖情况同步至其他自治域的多模态网元,以确保报文能够正确转发到目标区域。

流表更新后,各层级多模态网元依据新规则逐跳转发报文。当报文抵达目标区域最后一跳交换机时,该设备执行无线信号覆盖范围内的广播操作,确保区域内所有基站同步发送数据。位于该地理范围内的移动终端接收报文,并根据业务逻辑进行响应反馈。在此过程中,控制器持续验证流表生效状态,若检测到交换机离线或链路中断,则立即启动路径重计算与流表修复机制,确保转发过程的可靠性与实时性。

整个流程中,多模态网元用于实现高速数据面转发与本地流表匹配,控制器承担全局路径决策、跨区域协同与异常处理职能,实现控制逻辑与数据转发的解耦,形成适应车路协同动态需求的柔性网络架构。

3.4 GEO网络模态路由寻址机制

针对GEO网络模态的业务需求和传输特点,设计了一种基于地理空间标识的动态路由寻址机制。该机制运行于多模态网络控制器,依据路侧基站信号覆盖区域相对固定的特点,通过构建“地理区域-基站/地理坐标-终端”的两级映射机制,完成GEO网络模态报文的端到端转发路径匹配,实现灵活、集中可控的地理寻址与转发。GEO网络模态路由寻址机制基于多模态网络架构,将地理空间决策逻辑上收至多模态网络控制器,而多模态网元仅作为流表驱动的转发单元。该机制涉及多模态网络控制器、位置代理组件(Location Broker, LB)、多模态网元、终端等部分。控制器全局掌握网络拓扑、链路状态及所有终端的实时地理位置(通过终端注册或位置代理LB上报),并维护全局地理-位置映射表(Geo-to-Location Map, GLM)和地理区域-出端口映射表(Geo-to-Port Forwarding Table, GPFT)。位置代理组件LB,是控制器的扩展组件,负责接收终端的位置注册、移动更新,实现移动终端移动性管理,并通知控制器刷新映射表。多模态网元设备不再运行分布式路由协议,而是根据控制器下发的流表项进行数据包转发。流表匹配字段扩展为包含“目标地理坐标”或“目标GeoHash^[17]前缀”,动作为“转发至指定端口”。

如算法1所示,路由由表项计算的核心思想是将地理寻址需求转化为基于网络拓扑的最优路径决策,其计算过程为:(1)未匹配GEO报文上送控制器:当多模态网元收到一个以目标地理坐标封装的GEO网络模态报文且无匹配流表时,上送至(Packet-In)网络控制器;(2)地理编码与区域映射:控制器首先将目标地理坐标(lat, lon)编码为指定精度(如前6位)的GeoHash字符串 G 。该字符串代表目标地理区域;(3)拓扑映射与候选出口确定:网络控制器维护GPFT表,该表记录每个地理区域 G 对应的网络接入点(如位于网络边缘多模态网元或基站)集合 $\{S_1, S_2, \dots\}$ 。上述接入点是通往该地理区域的“门户”,类似于网关角色;(4)路径计算与度量评估:对于当前GEO网络模态报文的源多模态网元 S_{src} 和目标区域 G ,控制器在全局网络拓扑图上运行最短路径算法(如Dijkstra或A*)。路径权重 W 不仅包含链路延迟、带宽,还可引入地理距离因子(即 S_{src} 物理位置到 G 中心的距离),以优先选择地理上更近的路径。计算得到最优路径 $P = S_{src} \rightarrow S_1 \rightarrow \dots \rightarrow S_{dst}$,其中 S_{dst} 是通往 G 的最优出口多模态网元/基站;(5)流表生成与下发:控制器沿路径 P 的每一跳生成并通过Flow-Mod消息下发流表项:

算法1 路由表项计算过程的类Python伪代码表示

```

1 def compute_geo_routing_entry(self, src_switch,
  dest_coords):
2 # 步骤1: 地理编码, 将地理坐标转化为GeoHash编码
3 target_geohash = geohash_encode(dest_coords,
  precision=6)
4 # 步骤2: 查找目标区域对应的边缘交换机(网络出口)
5 edge_switches = self.geo_area_to_switches.get(target_
  geohash[:4]) # 使用较粗前缀匹配区域
6 # 步骤3: 计算最优路径(综合网络与地理因素)
7 初始化 best_path, min_metric
8 for edge_sw in edge_switches:
9 path = self.find_shortest_path(src_switch, edge_sw)
  # 基于拓扑查找最短路径
10 network_cost = self.calculate_path_cost(path) # 计算
  网络代价
11 geo_distance = haversine_distance(src_switch,
  target_geohash) # 计算地理距离惩罚
12 total_metric = network_cost + 0.1 * geo_distance #
  计算综合度量
13 if total_metric < min_metric:
14 min_metric = total_metric
15 best_path = path
16 # 步骤4: 生成流表项
17 next_hop = best_path[1] # 第1跳的下一跳
18 out_port = self.topology.get_port(src_switch, next_hop)
  # 转发端口
19 flow_entry = { 'priority': 100, 'match': { 'dest_prefix':
  target_geo }, 'actions': [ { 'type': 'OUTPUT', 'port':
  out_port } ] } # 产生流表项
20 return flow_entry

```

匹配字段为 $dest_prefix=G$, 动作为“转发至下一跳端口”, 从而建立快速转发通道。后续同类流量直接匹配流表转发, 实现“1次决策, 多次高效执行”。对于 S_{dst} , 若目标终端在本地覆盖范围内, 则可进一步通过2层查询(如广播ARP-like请求)获取其MAC地址, 并生成精确转发规则; (6)动态更新机制: 当终端移动/基站覆盖区域变化等导致其GeoHash变化, 或网络链路状态(延迟、拥塞)发生显著变化时, 控制器触发重计算, 更新相关流表, 确保路由始终最优。该过程实现了地理语义与网络拓扑的深度融合, 支持策略化、动态化的路径选择。

4 基于地理空间标识网络模态的车路协同智慧交通系统

面向智慧交通车路协同场景, 我们将地理空间标识网络模态应用于承载智慧交通系统业务。本节分别从业务功能需求、业务流程设计、总体系统设计等多个方面展开说明。

4.1 业务功能需求

地理空间标识网络模态可以灵活地支撑车联网中包括道路安全和交通信息的传播, 提高传输的实时性、大幅度适配节点的可移动性。智慧交通系统将基于所承载的地理空间标识网络模态的技术能力特性, 通过多模态网络环境基于地理位置信息推送道路安全相关信息, 用于事故应急响应、交通路况分析、拥堵监测和位置服务等, 并提供位置感知通信等新型增强网络能力。车联网环境中网络终端节点的移动性较大, 不断变化的拓扑结构可能导致基于拓扑的路由协议无法实现端到端的路由, 而地理空间标识网络适用这种节点高速移动, 拓扑频繁更改的场景, 能够快速灵活选区, 处理迅速, 且无须频繁注册建立通信信道, 能够对突发偶发随机交通事件实现快速响应。

智慧交通系统包括以下功能: (1)区域整体及目标车辆状态展示: 智慧交通系统实时获取所有车辆地理位置信息, 并根据车辆位置信息在智慧交通控制中心前端展示界面上显示车辆位置的变化, 并在展示界面显示交通流量的实时状态。(2)道路安全或交通信息的上报: 当目标行驶车辆路过存在交通事故、突发自然灾害、意外情况的道路, 可以通过上报地理空间标识网络报文向智慧交通控制中心发送相关道路安全和交通信息的相关信息。智慧交通控制中心收到上报信息后解析报文中的地理位置标识信息, 获取到出现故障的地理位置信息, 并在确定故障等级、范围等后, 将相关的道路安全或交通信息实时更新到路网数据库中, 并在智慧交通控制中心前端展示界面上显示故障区域。(3)道路安全或交通信息的下发: 智慧交通控制中心根据路网数据库中的道路安全或交通信息, 利用地理空间标识网络报文向目标区域发送告警信息。途经相应区域的车辆将会在车载信息系统界面中收到告警信息, 根据告警信息做出相应动作, 如停车、切换行进路线等。控制中心还可以根据地图内道路情况划分安全预警区域范围, 例如十字路口、中小学路口等, 控制中心对途径指定区域范围内的所有车辆以地理空间标识网络报文发送安全预警信息, 如前方路口减速慢行、前方途径学校路段减速慢行等, 在目标区域内的车辆会持续收到安全预警信息, 待车辆驶离目标范围瞬间安全预警消失。上述业务功能可充分展现地理空间标识网络模态通信以地理位置寻址、不需要明确通信目标身份才能通信等技术优势。

4.2 业务流程设计

以车辆告警控制流程为例, 系统业务流程包括

以下主要步骤，如图2所示：(1)车端通信模块通过车端无线网卡周期性地向路侧基站通信模块更新自身位置和检测到的道路安全信息；(2)路侧基站将从车端通信模块接收到车辆信息上报给本自治域内的多模态网元；(3)多模态网元将车辆更新信息上报本域的车辆控制服务系统，车辆控制服务系统根据该信息实时更新路网数据库，查看该车辆信息显示的终端车辆行驶是否进入预警区域；(4)如车辆控制服务系统根据车端通信模块上报的车辆信息判断车辆在道路预警区域，通过路侧基站下发道路预警区域信息给终端车辆，并通过改变其控制策略的方式优化该车辆行驶路线，提示车辆执行规避道路安全风险的操作，改变终端车辆的行驶路线使其驶离危险区域；(5)如车辆控制服务系统判断车辆信息不在道路预警区域，则继续监听车辆上报信息，期间保持控制策略不改变；(6)车端通信模块接收路侧基站转发的控制信息，如有道路预警区域信息，则继续读取其中控制策略更新标志，判断控制策略是否被改变，如改变则根据指示按照新规划的

路线；(7)车辆控制服务系统重复上述操作直到终端车辆驶离预警区域。

4.3 智慧交通系统总体设计

智慧交通系统基于多模态地理空间标识网络模态实现道路安全和交通信息的收发通信。一方面，该系统涉及对交通数据的收集、处理和分析，车辆信息需要准确、及时地向智慧交通控制中心上报，通过控制中心的处理和分析后存储到路网数据库中。另一方面，道路安全和交通信息的数据也需要及时分发给其他车辆。智慧交通系统的总体结构组成设计如图3所示。

智慧交通系统由智慧交通控制中心、路侧GEO基站、车辆终端车载单元(On Board Unit, OBU)等组成。智慧交通控制中心是智慧交通系统的核心组成部分，通过集成和分析各种交通数据，负责对道路信息的分析和处理，实现对区域交通的全面监控和管理。车辆安装车载终端OBU系统。OBU系统分别连接GPS模块和GEO路侧基站系统。OBU能够通过GPS模块获取本车的诸多信息，如地理位置、速度和转速等，同时OBU可通过802.11p与其他OBU或GEO基站通信。OBU将本车和周围车辆的数据转发给智慧交通控制中心，OBU上的终端应用可以显示车辆道路数据，为驾驶员或乘客提供报警信息等。

4.4 基于多模态网络环境的车路协同组网方案设计

智慧交通系统是一个基于多模态网络的车路协同控制系统。如图4所示，该系统采用多模态网络数据面和控制面分离的架构，由多模态网络控制器、多模态网络交换网元、智慧交通控制中心系统、路侧基站、车载通信模块等构成。其中，智慧交通控制中心系统和路侧基站通过多模态网络交换网元连接。路面车辆通过车端通信模块和基站通过无线802.11p通信。多模态网络控制器与所有的多模态交换网元建立控制通道，用于收集整体网络拓扑信息生成全局网络视图，并根据全局网络视图控制不同多模态网络交换网元之间的地理位置标识报

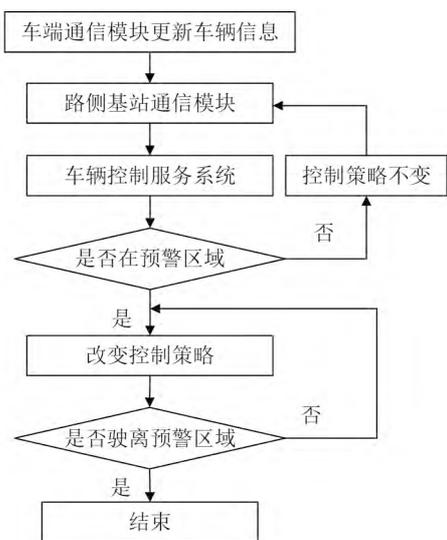


图2 车辆告警控制流程图



图3 智慧交通系统组成图

文寻址与转发，保证网元之间的正常通信，以用于进行交通安全的管控以及交通状态信息的通知。在数据平面上，多模态网络交换网元负责识别道路安全信息数据包，并按照多模态网络控制器的指令转发控制中心系统发出的相关信息，根据多模态网络控制器下发的流表转发地理位置标识报文到对应的下一跳网元节点。例如，多模态网络交换网元根据终端发送的地理位置标识模态报文中的目标地理位置信息和多模态网络域内控制器下发的路由表项做匹配，如果经度、纬度覆盖范围均属于路由表项中的匹配规则中的经度、纬度范围，则认为该报文命中路由表匹配规则，按照该多模态网络交换网元的交换转发表中的转发规则进行转发；所述地理位置标识模态一旦命中某条匹配规则后，就不再与其他匹配规则进行比较；若无匹配转发流表，则上报多模态网络控制器。

5 系统模块设计与实现

本节对系统中重要模块和系统的设计与实现进行展开论述。

5.1 GEO网络模态数据面逻辑实现

地理空间标识网络模态基于多模态网络环境进行设计和开发。图5给出了GEO网络模态数据面逻辑实现代码。图中代码实现均采用P4₁₆编程语言，可在多模态网元设备上实现编译部署。其中，图5(a)为GEO模态报文头部字段定义部分的代码，包含以太网帧(ethernet_t)和GEO网络模态(geo_t)的头部字段定义。以太网帧(ethernet_t)的头部字段由目的MAC地址(detAddr)、源MAC地址(srcAddr)和类型(ether_type)组成。图5(b)为GEO模态解析逻辑代码，parse_ethernet用于解析以太网帧，parse_geo用于解析GEO网络模态报文。parse_ethernet通过判断hdr.ethernet.ether_type的类型值来确定MAC帧净荷部分封装的是否是GEO模态报文。进一步地，parse_geo解析得到hdr.geo.ht，从而确定当前GEO模态报文类型。图5(c)为GEO模态报文转发逻辑代码，函数IngressImpl()提供了两类报文Action操作，即设置egress出口端口号(geo_set_egress_port)和报文丢弃(geo_drop)；同时，设置GEO网络模态报文匹配表geo_exact，

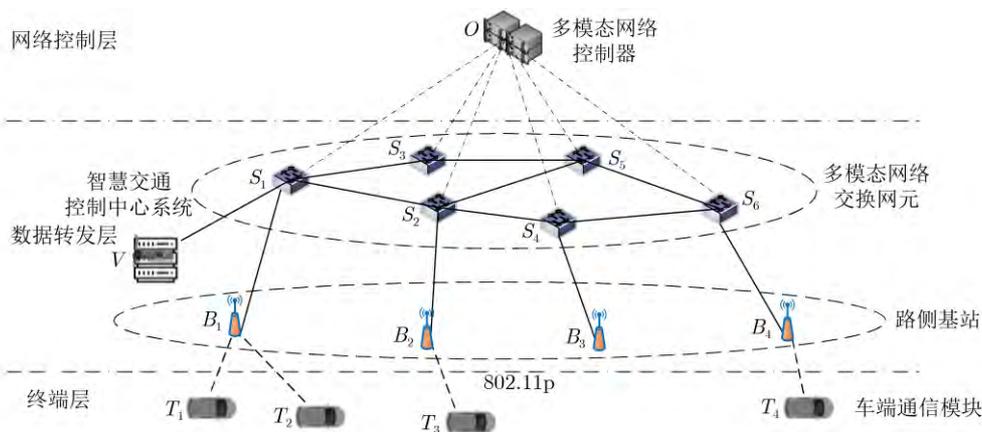


图4 基于地理空间标识网络模态的车路协同组网方案

```

1  /***** HEADERS *****/
2  header ethernet_t {
3    bit<48> dstAddr;
4    bit<48> srcAddr;
5    bit<16> ether_type;
6  }
7  header geo_t {
8    bit<4> version;
9    bit<4> nh_basic;
10   bit<8> reserved_basic;
11   bit<8> lt;
12   bit<8> rhl;
13   bit<4> nh_common;
14   bit<4> reserved_common_a;
15   bit<4> ht;
16   bit<4> hst;
17   bit<8> tc;
18   bit<8> flag;
19   bit<16> pl;
20   bit<8> mhl;
21   bit<8> reserved_common_b;
22 }

1  /***** PARSER *****/
2  parser ParserImpl(packet_in packet,
3    out headers hdr,
4    inout metadata meta,
5    inout standard_metadata_t standard_metadata) {
6    state start {
7      transition parse_ethernet;
8    }
9    state parse_ethernet {
10     packet.extract(hdr.ethernet);
11     transition select(hdr.ethernet.ether_type) {
12       TYPE_GEO: parse_geo;
13       default: accept;
14     }
15   }
16   state parse_geo {
17     packet.extract(hdr.geo);
18     transition select(hdr.geo.ht) {
19       TYPE_geo_beacon: parse_beacon;
20       TYPE_geo_gbc: parse_gbc;
21       TYPE_geo_tsb: parse_tsb;
22       default: accept;
23     }
24   }
25 }

1  /***** INGRESS PROCESSING *****/
2  control IngressImpl(inout headers hdr,
3    inout metadata meta,
4    inout standard_metadata_t standard_metadata) {
5     action geo_set_egress_port(port_num_t port_num) {
6       standard_metadata.egress_spec = port_num;
7     }
8     action geo_drop() {
9       mark_to_drop(standard_metadata);
10    }
11    table geo_exact {
12     key = {
13       hdr.gbc.geoAreaPosLat: exact;
14       hdr.gbc.geoAreaPosLon: exact;
15       hdr.gbc.disa: exact;
16       hdr.gbc.disb: exact;
17     }
18     actions = {
19       geo_set_egress_port;
20       geo_drop;
21     }
22   }
23 }
24 }
25 }

```

(a) 报文头部字段定义 (b) 网络模态报文解析逻辑 (c) 网络模态报文转发逻辑

图5 GEO网络模态数据面核心逻辑实现

其中, 匹配关键词设定为geoAreaPosLat, geoAreaPosLon, disa和disb, 上述参数决定了转发报文的地理区域范围。如果目的处于该地理区域范围, 则执行设置egress出口端口号的Action操作; 如果在目的区域之外, 则对报文执行drop的丢弃Action操作。

5.2 智慧交通控制中心

如图6(a)所示, 智慧交通控制中心包括前端展示模块、后端服务模块、GEO协议栈驱动模块、路网数据库模块和UDPtoETH模块。其中, 控制中心前端展示模块用于展示系统UI界面, 支持全局视角和第1人称视角, 实现道路、车辆、路况、告警和视频监控等信息的实时展示。后端模块实现了道路安全信息的相关通信。后端模块支持通过智慧交通控制中心的前端地图下发告警信息, 同时后端模块支持接收车辆OBU上报信息(包括车辆位置信息和告警信息)。后端模块通过获取车辆终端OBU系统上报的信息, 从报文中提取有效的地理位置相关信息, 分析数据内容, 识别出交通拥堵、道路施工、车辆故障的道路安全信息以及数据来源的地理位置信息, 然后查询路网数据库, 最终决策出需要将该安全信息发送给对应的地理位置区域中的终端车辆, 使得车辆提前预知交通状况, 做出对应的安全策略。路网数据库模块保存并更新道路的安全和交通相关信息、控制中心地图中的车辆等相关信息。UDPtoETH模块在数据链路层通过将UDP报文转换为以太网数据帧。车辆控制服务系统发送的信息经过多模态网元进行寻址路由后, 发送给GEO路侧基站。

5.3 路侧GEO基站系统

路侧GEO基站系统分别对接车辆终端OBU系统和智慧交通控制中心, 实现GEO网络模态报文的互通流转。如图6(b)所示, 路侧GEO基站系统通过路侧基站网卡与多模态网元的有线连接, 实现与车辆控制服务系统的通信, 同时, 使用IEEE 802.11p无线传输标准与车端OBU通信模块进行无线通

信。数据链路层通过UDPtoETH模块将GEO网络模态报文和IEEE 802.11p的UDP报文进行转化。车端OBU通信模块首先将车辆道路信息发送到路侧GEO基站系统。该信息通过UDPtoETH模块把UDP报文转化为GEO报文。接着, 该地理空间标识网络模态报文通过路侧基站网卡转发至本自治域网络的多模态网元, 最后通过多模态网络转发到智慧交通系统车辆控制服务。

5.4 车辆终端OBU系统

车辆终端OBU系统由车端通信模块、前端地图模块、GEO协议栈驱动模块、GPS模块和OBU后端QT系统模块组成, 如图6(c)。车端通信模块基于Ubuntu系统, 并安装Java JDK11和Python, 搭载Ublox M8N型号的GPS定位子模块, 采用支持IEEE 802.11p的网卡设备, 使用无线网卡子模块与路侧GEO基站进行无线连接, 快速应对频繁变化的物理信道和短时间的信息交互环境, 保证行驶中的车车之间、车与路之间的数据交互。车端通信模块接收路侧基站的安全信息, 发送自身位置信息和检测到的道路安全相关信息, 其位置信息更新频率为10 Hz, 车辆可通过串口解析获取自身的位置信息, 为其提供厘米级别精度水平的定位服务, 同时通过车辆控制服务获取预警区域的位置信息。前端模块为驾驶员行驶的车辆视角, 用于展示车辆行驶状况, 并且能够支持驾驶员通过车辆OBU前端系统上报路况等相关信息。后端系统模块实现上报道路交通安全信息给智慧交通控制中心, 同时支持接收道路交通安全信息在车辆OBU前端界面中显示。作为地理空间定位系统, GPS模块将车辆位置信息实时上报给OBU系统。

6 系统评估

系统评估工作主要从系统与评估环境部署、系统运行效果、理论分析和性能评估4个方面展开。本文搭建部署了一个智慧交通系统, 验证本系统能够按照地理空间标识模态进行消息传输, 并通过改

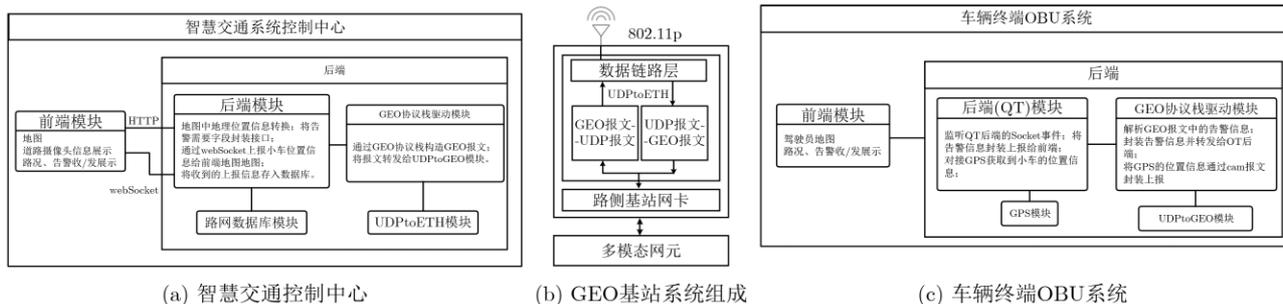


图6 车路协同智慧交通系统模块设计

变终端数量、背景流量、传输带宽测试传输性能的变化系统性评估智慧交通系统的网络模态传输性能。

6.1 系统部署与评估环境

智慧交通系统部署情况与试验评估环境如图7所示。车载OBU系统(图7(a))和车端通信模块(图7(b))支持车辆告警显示,可基于智慧交通控制中心发出的道路安全信息提示告警指示,支持周围车辆安全信息指示,可在其无线网卡覆盖范围内交互周围车辆的告警指示,支持与智慧交通控制中心交互道路安全预警信息、交通事故上报,自然灾害等场景信息,如图7(c)所示。GEO基站系统硬件平台(图7(d))由支持地理位置标识的网卡、基站天线、基站硬件板卡设备和基站外壳组成,并在灯杆等路侧基础设施上实现部署,如图7(e)所示。车路协同智慧交通控制中心基于X86服务器搭建。智慧交通控制中心基于GEO模态获取终端车辆位置、收发告警信息,支持所在园区地图、终端车辆地理位置、告警区域信息展示。智慧交通控制中心配置高可靠数据库系统,用于存取道路及车辆相关数据。GEO基站与智慧交通控制中心通过多模态网元实现网络连接通信,传输多模态网络报文,组网环境如图7(f)所示。

6.2 系统运行效果

启动智慧交通系统后,在智慧交通控制中心前端界面显示所管理区域的地图,实时显示区域内的移动智能小车位置,如图8(a)所示。同时,系统管理员可以通过智慧交通控制中心配置界面(图8(b)),设定告警区域范围。车辆在行驶过程中,其OBU显示界面上同样可以展现当前所在区域的地图以及车辆所处的位置信息(图8(c))。当智慧交通中心前端界面向指定区域发送告警消息后,处于该区域的小车显示屏上显示收到的消息内容为“注意避让”,如图8(d)所示。

6.3 理论分析

相较于传统IP协议方式,GEO网络模态在转发效率等方面存在显著的技术优势。为此,以最为普遍的V2V通信过程为例(如图4中车载终端 T_3 向 T_2 发送道路状况通告信息 M),采用时序分析理论方法对比分析GEO网络模态和传统IP协议方案的转发效率差异,如图9所示。

在GEO网络模态下,道路状况通告信息 M 被封装到GEO网络模态报文当中,报文目的地址为 T_2 所在地理位置标识,在多模态交换网元上依据地理位置标识的目的地址信息以及路由表项以最短路径



图7 智慧交通系统软硬件与系统部署情况

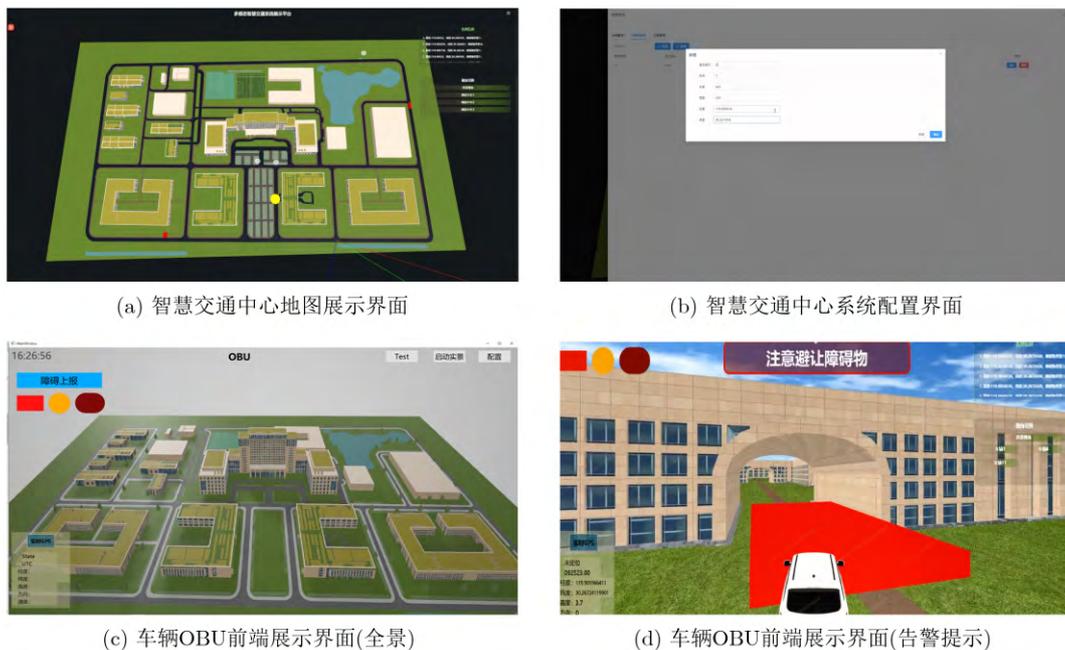


图8 智慧交通中心与车辆OBU的前端展示界面

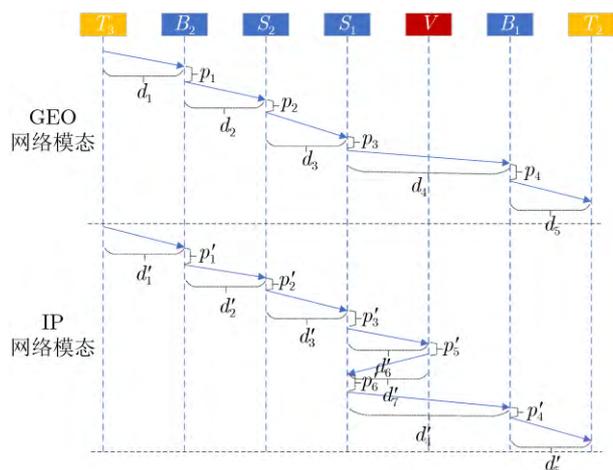


图9 IP模式与GEO模式性能对比理论分析

径优先为原则实现实时转发。依据3.4节的路由寻址机制，该消息 M 经过的网络路径 $L_{GEO模式}$ 为 $T_3 \rightarrow B_2 \rightarrow S_2 \rightarrow S_1 \rightarrow B_1 \rightarrow T_2$ ，端到端传输节点跳数 $Hops(L_{GEO模式})=4$ ，端到端数据传输延迟时间 $Delay(L_{GEO模式})=d_1+p_1+d_2+p_2+d_3+p_3+d_4+p_4+d_5$ ，其中 d 代表链路传播延迟时间， p 代表节点处理延迟时间(含队列排队、报文解析转发等时间)。

在IP协议下，为实现向某个特定地理位置区域终端发送数据，该系统必须包含位置服务、数据分发服务、消息推送服务等核心模块。车联网终端设备(T_2, T_3 等)需周期性上报实时经纬度信息至位置服务(部署于服务器 V 上)，终端位置数据存储于支持地理空间索引的数据库(如PostGIS或MongoDB)，以实现高效空间查询。当终端 T_3 需定向推送道路状

况通告信息 M 到位于某个区域位置的终端设备 T_2 时，终端 T_3 首先将道路状况通告信息 M 封装成IP协议报文，发送给数据分发服务(部署于服务器 V 上)。接着，数据分发服务根据目标地理范围在地理空间索引数据库中检索匹配的在线终端。最后，消息推送服务，将检索到的终端 T_2 的IP地址作为目的地址，通过WebSocket或MQTT等实时通信协议，将数据推送给车载终端 T_2 。这种情况下，消息 M 经过的网络路径 $L_{IP模式}$ 为 $T_3 \rightarrow B_2 \rightarrow S_2 \rightarrow S_1 \rightarrow V \rightarrow S_1 \rightarrow B_1 \rightarrow T_2$ ，端到端传输节点跳数 $Hops(L_{IP模式})=6$ ，端到端数据传输延迟时间 $Delay(L_{IP模式})=d'_1+p'_1+d'_2+p'_2+d'_3+p'_3+d'_6+p'_5+d'_7+p'_6+d'_4+p'_4+d'_5$ 。

当服务器 V 接入的交换机不在两个终端间最短路径(在该案例中服务器接入到除 S_1 和 S_2 之外的交换机设备)上时，IP协议方案中消息 M 经过的网络路径将会更大。以服务器 V 接入到交换机 S_5 为例，其传播路径为 $T_3 \rightarrow B_2 \rightarrow S_2 \rightarrow S_5 \rightarrow V \rightarrow S_5 \rightarrow S_3/S_2 \rightarrow S_1 \rightarrow B_1 \rightarrow T_2$ 。由此可见，在这种情况下消息 M 的传输效率将为更低，理论分析过程可重点考虑服务器 V 接入的交换机在两个终端间最短路径上的情况。

综上，端到端传输节点跳数 $Hops(L_{GEO模式}) < Hops(L_{IP模式})$ ，GEO网络模式报文传输经历更少跳数。同时，假设不同模式情况下相同两个节点间的传播时延以及相同节点上的报文处理时延大致相同，即 $d_1 \approx d'_1, p_1 \approx p'_1$ 等，则认为端到端数据传输延迟时间 $Delay(L_{GEO模式}) < Delay(L_{IP模式})$ 。通过以上理论分析可知，GEO网络模式在转发效率上比IP模式具有更为显著的优势。

6.4 性能评估

系统性能评估主要从不同终端接入量、不同背景流量以及不同业务流量3种条件下展开。

(1)不同终端接入量条件下网络模态性能：本文通过改变终端接入数量，测试GEO网络模态报文端到端传输时延，从而分析得到不同终端接入量条件下的网络模态性能结果。实验中，每个业务终端占据1 Mbit/s带宽，则当接入终端增加至128时，总占用带宽为128 Mbit/s。图10记录了接入终端数量不同情况下的平均端到端时延以及平均端到端传输时延随终端数量大小变化趋势。当终端数量从2个增加至128个时，平均端到端时延呈现出上升趋势。具体而言，当终端数量为2个时，平均端到端时延为61 169 ns；随着终端数量的逐步增加，时延也逐渐增大，直至终端数量达到128个时，平均端到端时延升至70 694 ns。这一结果表明，随着接入网络的终端数量增多，数据传输过程中的延迟增加，这可能是网络资源的竞争加剧以及处理能力等方面的原因。进一步分析图10中的曲线变化，可以发现平均端到端时延随终端数量的增加呈现出非线性的增长趋势。在终端数量较少的情况下(如2个、4个和8个)，平均端到端时延相对较低且变化不大，这表明此时网络资源较为充裕，能够有效满足各终端的数据传输需求。随着终端数量的进一步增加，尤其是在超过一定值后(如从32个终端增加至128个终端)，平均端到端时延的增长速度有一定程度加快，这反映了网络资源的使用状态以及数据处理能力的限制。值得注意的是，在终端数量为96个和112个时，平均端到端时延出现了短暂的波动，分别为65 856 ns和69 487 ns。这种波动可能是网络负载的动态变化或特定时间段内的资源竞争所导致的。尽管如此，总体趋势仍然显示虽然随着终端数量的增加GEO网络模态报文转发性能受到一定影响，但整体上仍反映地理空间标识模态对终端接入量变化有较为稳定的处理能力。

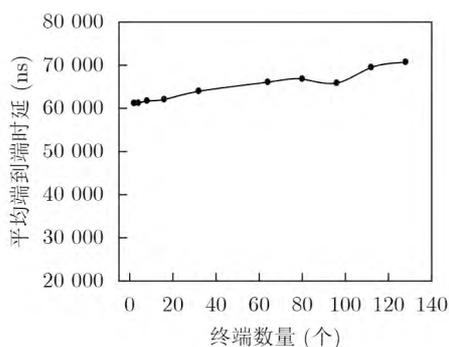


图10 平均端到端时延随终端数量的变化情况

(2)不同背景流量条件下的GEO网络模态性能：通过改变背景流量大小，测试GEO网络模态报文端到端的传输时延，从而分析得到背景流量对网络模态性能的影响。实验中，基于地理空间标识模态的流量保持为50 Mbit/s，而背景流量速率从50 Mbit/s增加至750 Mbit/s。图11给出了不同背景流量情况下的平均端到端时延测试数据以及平均端到端传输时延随背景流量不断增加的变化趋势。当背景流量速率从50 Mbit/s增加至750 Mbit/s时，平均端到端时延呈现出一定的波动趋势，但总体变化幅度相对较小。具体而言，在较低的背景流量速率下(如50 Mbit/s和100 Mbit/s)，平均端到端时延分别为65 279 ns和65 241 ns；随着背景流量速率的逐步增加，时延在一定范围内波动，最低值出现在650 Mbit/s时，为65 041 ns；最高值则出现在750 Mbit/s时，为65 685 ns。这一结果表明，在不同的背景流量条件下，GEO网络模态的平均端到端时延并未出现显著的线性增长，而是表现出较为稳定的性能特征。进一步分析图11中的曲线变化，可以发现平均端到端时延随背景流量速率的增加呈现出非单调的变化趋势。在背景流量速率较低的区间内(如0~300 Mbit/s)，平均端到端时延基本保持稳定，波动范围较小；而在背景流量速率较高的区间内(如300~750 Mbit/s)，时延出现了轻微的波动，但整体变化幅度有限。测试结果反映GEO网络模态具有较强的稳定性，在面对不同背景流量条件时能够有效维持数据传输的高效性。

(3)不同传输业务流量条件下网络模态性能：通过改变智慧交通控制中心的传输业务流量大小，测试GEO网络模态的端到端传输时延，得出业务流量对网络模态性能的影响。图12给出了智慧交通控制中心发起不同大小业务流量情况下的时延数据以及不同大小业务情况下的平均端到端时延变化情况。当智慧交通控制中心的流量速率从10 Mbit/s增加至300 Mbit/s时，平均端到端时延呈现出上升趋势

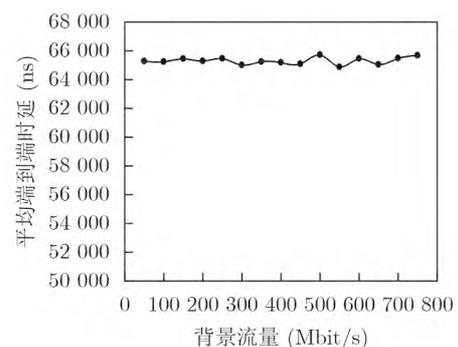


图11 平均端到端时延随背景流量的变化情况

势。具体而言,在较低流量速率下(如10 Mbit/s),平均端到端时延为62 360 ns;随着流量速率的逐步增加,时延也逐渐增大,直至流量速率达到300 Mbit/s时,平均端到端时延升至83 162 ns。这一结果表明,随着传输业务流量的增加,数据传输过程中的延迟也增加,这可能归因于网络资源的使用消耗以及处理能力的限制。进一步分析图12中的曲线变化,可以发现平均端到端时延随智慧交通控制中心流量速率的增加呈现出明显的线性增长趋势。在流量速率较低的区间内(如10~50 Mbit/s),平均端到端时延相对较低且变化不大;然而,随着流量速率的进一步增加,尤其是在超过一定值后(如从100 Mbit/s增加至300 Mbit/s),时延的增长速度有所增加。总体来说,随着业务传输带宽的不断增加,地理空间标识模态报文传输时延基本稳定,并维持有一定增加趋势;在整个业务传输期间无丢包出现。因此,地理空间标识模态能够在业务流量变化的环境下保持相对稳定地运行。

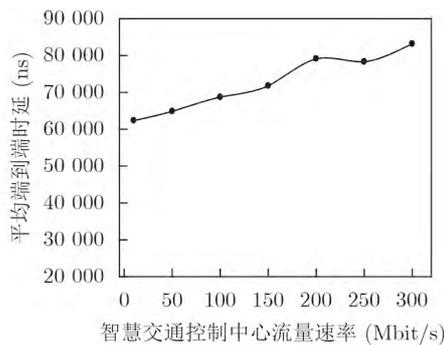


图12 平均端到端时延随交通控制中心业务流量的变化情况

7 结束语

本文结合多模态网络的柔性可扩展架构,在地理空间位置信息的网络协议标准基础上,进一步提出了地理空间标识网络模态,实现了直接根据地理位置信息转发报文。同时,面向智慧交通场景,设计了基于地理空间标识寻址的车路协同智慧交通系统原型,能够支持车路协同场景中的各类应用,如道路安全预警、交通信息广播等。智慧交通系统不仅保障了车辆的行驶安全,还提升了车辆的出行道路规划效率。实验表明本系统具备良好的稳定性和高效性,可有效支撑泛连接、网络背景流量波动、业务流量弹性等典型交通场景。未来,随着车联网技术的不断发展,本系统有望在更广泛的智能交通领域发挥重要作用,为构建更加安全、高效的智慧交通体系提供有力支持。

参考文献

[1] 中共中央,国务院. 交通强国建设纲要[R]. 北京: 中华人民共

和国中央人民政府, 2019.

State Council. Outline for building a powerful transportation country[R]. Beijing: The Central People's Government of the People's Republic of China, 2019.

[2] 交通运输部, 国家铁路局, 中国民用航空局, 等. 加快建设交通强国五年行动计划(2023—2027年)[R]. 北京: 交通运输部办公厅, 2023.

Ministry of Transport, National Railway Administration, Civil Aviation Administration of China, *et al.* Five-year action plan for accelerating the construction of a strong transportation country (2023–2027)[R]. Beijing: Office of the Ministry of Transport, 2023.

[3] 齐晓鑫. 低轨卫星网络路由算法与拓扑控制策略研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2022. doi: 10.27389/d.cnki.gxadu.2022.000103.

QI Xiaoxin. Research on routing algorithm and topology control strategy of LEO satellite networks[D]. [Ph. D. dissertation], Xidian University, 2022. doi: 10.27389/d.cnki.gxadu.2022.000103.

[4] AL-OMAISSI H, SUNDARARAJAN E A, ALSAQOUR R, *et al.* GeoISA: A new road-topology-assisted geo-based content discovery scheme for vehicular named data networking[J]. *Vehicular Communications*, 2023, 40: 100573. doi: 10.1016/j.vehcom.2023.100573.

[5] HAO Haiyan, WANG Yan, DU Lili, *et al.* Enabling smart curb management with spatiotemporal deep learning[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2023, 99: 101914. doi: 10.1016/j.compenurbysys.2022.101914.

[6] LI Dongshuang, YU Zhaoyuan, LUO Wen, *et al.* Optimal route searching with multiple dynamical constraints—a geometric algebra approach[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(5): 172. doi: 10.3390/ijgi7050172.

[7] LIU Baoju, LONG Jun, DENG Min, *et al.* An adaptive route planning method of connected vehicles for improving the transport efficiency[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2022, 11(1): 39. doi: 10.3390/ijgi11010039.

[8] KARP B and KUNG H T. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks[C]. The 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Boston, USA, 2000: 243–254. doi: 10.1145/345910.345953.

[9] MAZOUZI M, MERSHAD K, CHEIKHROUHOU O, *et al.* Agent-based reactive geographic routing protocol for internet of vehicles[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 79954–79973. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3299230.

[10] ETEMAD M, SOARES JÚNIOR A, and MATWIN S. Predicting transportation modes of GPS trajectories using feature engineering and noise removal[C]. The 31st

- Canadian Conference on Artificial Intelligence, Toronto, Canada, 2018: 259–264. doi: 10.1007/978-3-319-89656-4_24.
- [11] NISHIYAMA H, TADA Y, KATO N, *et al.* Toward optimized traffic distribution for efficient network capacity utilization in two-layered satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(3): 1303–1313. doi: 10.1109/TVT.2012.2227861.
- [12] ZHENG Yu, XIE Xing, and MA Weiying. GeoLife: A collaborative social networking service among user, location and trajectory[J]. *IEEE Data Engineering Bulletin*, 2010, 33(1): 32–39.
- [13] HU Yuxiang, LI Dan, SUN Penghao, *et al.* Polymorphic smart network: An open, flexible and universal architecture for future heterogeneous networks[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2020, 7(4): 2515–2525. doi: 10.1109/TNSE.2020.3006249.
- [14] 胡宇翔, 伊鹏, 孙鹏浩, 等. 全维可定义的多模态智慧网络体系研究[J]. *通信学报*, 2019, 40(8): 1–12. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019192.
- HU Yuxiang, YI Peng, SUN Penghao, *et al.* Research on the full-dimensional defined polymorphic smart network[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(8): 1–12. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019192.
- [15] DUAN Xiaoyu, LIU Yanan, and WANG Xianbin. SDN enabled 5G-VANET: Adaptive vehicle clustering and beamformed transmission for aggregated traffic[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(7): 120–127. doi: 10.1109/MCOM.2017.1601160.
- [16] CAMPOLO C, MOLINARO A, and SCOPIGNO R. Vehicular Ad Hoc Networks: Standards, Solutions, and Research[M]. Cham: Springer, 2015: 221–247. doi: 10.1007/978-3-319-15497-8.
- [17] VUKOVIC T. Hilbert-geohash-hashing geographical point data using the Hilbert space-filling curve[D]. [Master dissertation], NTNU, 2016.
- 潘仲夏: 男, 硕士, 研究方向为多模态网络体系架构及相关网络应用.
- 沈丛麒: 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向为软件定义网络和多模态网络.
- 骆汉光: 男, 博士, 副研究员, 研究方向为软件定义网络和多模态网络.
- 朱俊: 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新型网络体系结构和软件定义网络.
- 邹涛: 男, 博士, 研究员, 研究方向为多模态网络和新型网络体系架构.
- 隆克平: 男, 博士, 教授, 研究方向为新一代网络理论与技术、互联网络及交换技术、无线移动通信等.

责任编辑: 余蓉

Geospatial Identifier Network Modal Design and Scenario Applications for Vehicle-infrastructure Cooperative Networks

PAN Zhongxia SHEN Congqi LUO Hanguang ZHU Jun
ZOU Tao LONG Keping

(Research Center for High Efficiency Computing Facilities, Zhejiang Lab, Hangzhou 311121, China)

Abstract:

Objective Vehicle-infrastructure cooperative Networks (V2X) are open and contain large numbers of nodes with high mobility, frequent topology changes, unstable wireless channels, and varied service requirements. These characteristics create challenges to efficient data transmission. A flexible network that supports rapid reconfiguration to meet different service requirements is considered essential in Intelligent Transportation Systems (ITS). With the development of programmable network technologies, programmable data-plane techniques are shifting the architecture from rigid designs to adaptive and flexible systems. In this work, a protocol standard based on geospatial information is proposed and combined with a polymorphic network architecture to design a geospatial identifier network modal. In this modal, the traditional three-layer protocol structure is replaced by packet forwarding based on geospatial identifiers. Packets carry geographic location information, and forwarding is executed directly according to this information. Addressing and routing based on geospatial information are more efficient and convenient than traditional IP-based approaches. A vehicle-

infrastructure cooperative traffic system based on geospatial identifiers is further designed for intelligent transportation scenarios. This system supports direct geographic forwarding for road safety message dissemination and traffic information exchange. It enhances safety and improves route-planning efficiency within V2X.

Methods The geospatial identifier network modal is built on a protocol standard that uses geographic location information and a flexible polymorphic network architecture. In this design, the traditional IP addressing mechanism in the three-layer network is replaced by a geospatial identifier protocol, and addressing and routing are executed on programmable polymorphic network elements. To support end-to-end transmission, a protocol stack for the geospatial identifier network modal is constructed, enabling unified transmission across different network modals. A dynamic geographic routing mechanism is further developed to meet the transmission requirements of the GEO modal. This mechanism functions in a multimodal network controller and uses the relatively stable coverage of roadside base stations to form a two-level mapping: “geographic region-base station/geographic coordinates-terminal.” This mapping supports precise path matching for GEO modal packets and enables flexible, centrally controlled geographic forwarding. To verify the feasibility of the geospatial identifier network modal, a vehicle-infrastructure cooperative intelligent transportation system supporting geospatial identifier addressing is developed. The system is designed to facilitate efficient dissemination of road safety and traffic information. The functional requirements of the system are analyzed, and the business processing flow and overall architecture are designed. Key hardware and software modules are also developed, including the geospatial representation data-plane code, traffic control center services, roadside base stations, and in-vehicle terminals, and their implementation logic is presented.

Results and Discussions System evaluation is carried out from four aspects: evaluation environment, operational effectiveness, theoretical analysis, and performance testing. A prototype intelligent transportation system is deployed, as shown in Figure 7 and Figure 8. The prototype demonstrates correct message transmission based on the geospatial identifier modal. A typical vehicle-to-vehicle communication case is used to assess forwarding efficiency, where an onboard terminal (T_3) sends a road-condition alert (M) to another terminal (T_2). Sequence-based analysis is applied to compare forwarding performance between the GEO modal and a traditional IP protocol. Theoretical analysis indicates that the GEO modal provides higher forwarding efficiency, as shown in Fig. 9. Additional performance tests are conducted by adjusting the number of terminals (Fig. 10), background traffic (Fig. 11), and the traffic of the control center (Fig. 12) to observe the transmission behavior of geospatial identifier packets. The results show that the intelligent transportation system maintains stable and efficient transmission performance under varying network conditions. System evaluation confirms its suitability for typical vehicle-infrastructure cooperative communication scenarios, supporting massive connectivity and elastic traffic loads.

Conclusions By integrating a flexible polymorphic network architecture with a protocol standard based on geographic information, a geospatial identifier network modal is developed and implemented. The modal enables direct packet forwarding based on geospatial location. A prototype vehicle-infrastructure cooperative intelligent transportation system using geospatial identifier addressing is also designed for intelligent transportation scenarios. The system supports applications such as road-safety alerts and traffic information broadcasting, improves vehicle safety, and enhances route-planning efficiency. Experimental evaluation shows that the system maintains stable and efficient performance under typical traffic conditions, including massive connectivity, fluctuating background traffic, and elastic service loads. With the continued development of vehicular networking technologies, the proposed system is expected to support broader intelligent transportation applications and contribute to safer and more efficient mobility systems.

Key words: Polymorphic network; Protocol packet processing; Network programmability; Geospatial identifier network modal; Network modal application