



车载光通信趋势分析及发展车载 无源光网络（V-PON）的建议

陈山枝¹, 罗文勇²

- (1. 中国信息通信科技集团有限公司, 移动通信与车联网国家工程研究中心, 北京 100191;
2. 烽火通信科技股份有限公司, 光通信技术和网络全国重点实验室, 湖北 武汉 460072)

摘要: 首先, 分析了汽车智能化、网联化趋势, 以及汽车电子电气架构 (electrical electronic architecture, EEA) 演进给车内通信带来的新需求与新挑战, 指出车载光通信也会经历类似电信运营商固定接入网的“光进铜退”的发展历程, 实现从“窄带通信+铜缆线束”向“宽带通信+光纤线束”的变革。其次, 提出车载无源光网络 (vehicular passive optical network, V-PON) 的技术路线与标准建议: 针对车内通信需求及特殊工作环境带来的挑战, 在已有 PON 技术的基础上进行适应性改进, 攻克相关核心技术, 形成 V-PON 标准规范。该方案可充分发挥中国在光通信及 PON 领域的技术优势和规模产业优势, 助力中国在车载通信领域形成核心知识产权, 为智能网联汽车转型升级提供支撑, 进而提升中国相关产业的国际竞争力。

关键词: 智能网联汽车; 车内网; EEA; V-PON; 铜缆线束; 光纤线束

中图分类号: TP929.11

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025168

Analysis on in-vehicle optical communication trends and suggestions for developing V-PON

CHEN Shanzhi¹, LUO Wenyong²

1. National Engineering Research Center of Mobile Communications and Vehicular Networks,
China Information and Communication Technology Group Co., Ltd. (CICT), Beijing 100191, China
2. State Key Laboratory of Optical Communication Technology and Networks,
FiberHome Communications Technologies Co., Ltd., Wuhan 460072, China

Abstract: Firstly, the trends of vehicle intelligence and connectivity were analyzed, along with the new requirements and challenges imposed on in-vehicle communication by the evolution of automotive electrical electronic architecture (EEA). It was pointed out that vehicular optical communication would undergo a development process similar to the “fiber replacing copper” transition in telecom fixed access networks, shifting from “narrowband communication + copper wiring harnesses” to “broadband communication + optical fiber harnesses”. And then, a technical roadmap and standardization proposal for vehicular passive optical network (V-PON) were presented. To address the demands of in-vehicle communication and the challenges posed by its unique operating environment, adaptive improvements



were made for existing PON technologies, and key technical hurdles were overcome to establish the V-PON standard framework. This approach fully leverages China's technological and industrial advantages in optical communication and PON systems, facilitating the development of core intellectual property in vehicular communication. It supports the transformation and upgrading of intelligent connected vehicles (ICV) and enhances the global competitiveness of China's automotive and telecommunications industries.

Key words: intelligent connected vehicle, in-vehicle network, EEA, V-PON, copper wire harness, optical fiber harness

0 引言

近年来,汽车工业出现了电动化、智能化、网联化、共享化的“新四化”发展趋势。车联网支持汽车智能化与网联化的融合发展,即智能网联汽车(intelligent connected vehicle, ICV)。车联网包括车内网、车际网、车云网等,其中车内网是指汽车内部的通信网络^[1]。随着智能网联汽车的发展,当前连接车载感知、传输、控制、计算、显示等功能系统的汽车电子电气架构(electrical electronic architecture, EEA),正从智能座舱域、智能驾驶域、动力控制域、线控底盘域等功能域集中向中央计算+区域控制的跨域融合演进,并逐步向车路云一体化方向发展。这对车内网通信(即车载通信)在信息流量、通信带宽、安全可靠、质量与成本等方面提出了更高的要求。

目前,传统以铜缆线束为基础的车载通信存在下列局限:(1)难以满足数量增长的摄像头、雷达等传感器高带宽数据传输需求;(2)电磁干扰带来的瞬态错误率已难以满足L2及其以上的自动驾驶需求;(3)基于铜缆线束的车载总线难以进行线束的大幅简化;(4)铜材料成本高,质量大。

随着汽车EEA平台化、车载算力平台化、基础软件平台化的提出,车载通信平台化也将成为汽车行业高质量发展的共性诉求。光通信技术具有大带宽、低损耗、抗电磁干扰、光纤线束质量小及低成本等优势,已成为车载通信技术的发展路径,俗称“光纤上车”。然而,车载光通信技术仍需解决通信协议适应性、低时延、振动与温度等

可靠性、空间限制、汽车功能安全等挑战,才能满足智能网联汽车的发展要求。本文对车载光通信发展趋势进行了分析和思考,提出了车载无源光网络(vehicle-passive optical network, V-PON)的发展建议。

1 汽车智能化及车内网通信需求与挑战

1.1 智能网联汽车EEA发展趋势

自控制器区域网络(controller area network, CAN)总线标准自1992年发布以来,车内总线已发展出LIN(local interconnect network)、MOST(media oriented systems transport)、FlexRay等多种总线。2004年,宝马公司在车内引入了网关电子控制单元(electrical control unit, ECU),从架构上初步解决了这些总线间的互通问题。在此基础上,IEEE 802.3系列车载通信标准逐步形成,支撑车载带宽从传统CAN的1 Mbit/s向10 Gbit/s级跃升^[2],成为区域架构向中央计算过渡的关键支撑。汽车内部的通信也由总线型演进为车内通信网络架构。

汽车EEA的形态演进可分为分布式EEA、功能域EEA和中央域控与区域集中的EEA 3个阶段。汽车EEA演进趋势^[3]如图1所示。

传统分布式EEA具有ECU多、线束复杂、软硬件紧密耦合等特点,如图1(a)所示。分布式EEA结构较为简单,在汽车发展初期,可以满足车内各类ECU的互连互通。然而,随着汽车电子功能的增加,例如,车窗由机械手摇式到依靠按钮进行控制,再到添加了防夹等多功能的控制,ECU的数量从几十个快速增加到100多个,线束

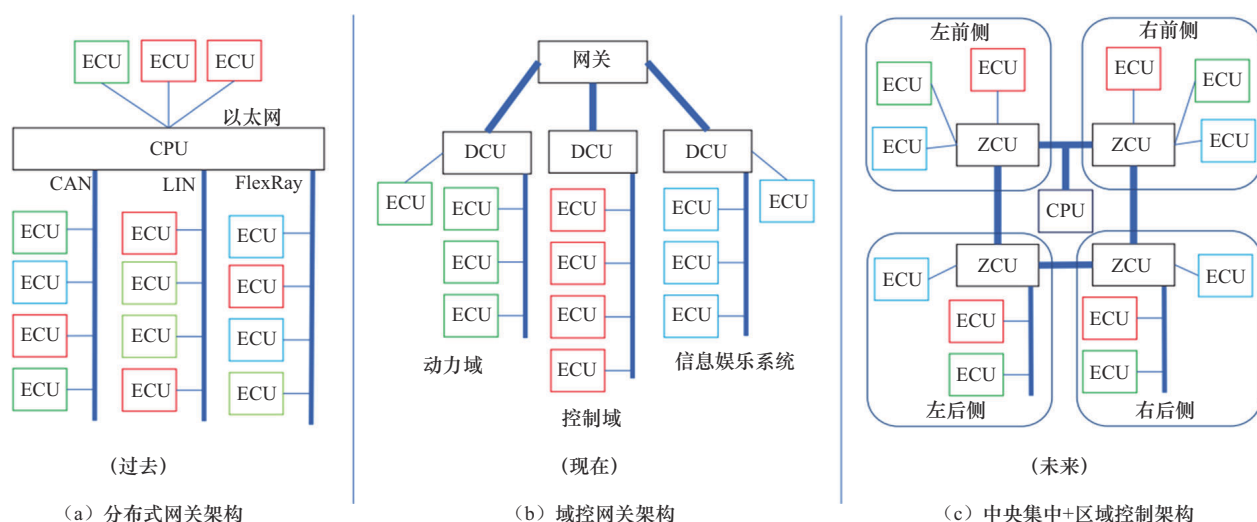


图1 汽车EEA演进趋势

数量和长度也随之增加,由此带来线束质量增加和铺设复杂度问题,导致整车成本增加、汽车组装的自动化水平低。该架构还导致以下问题:车内“信息孤岛”、算力浪费、软硬件耦合深、主机厂严重依赖供应商(每新增一个新功能都需要增加一套ECU和通信系统)、耗时长、流程烦琐。

针对以上不足,功能域EEA得到了发展,如图1(b)所示。一方面将功能类似的ECU进行合并,减少整车ECU的数量,降低线束的复杂度;另一方面,将各功能的处理、决策、交换等复杂逻辑进行剥离,将复杂的算法集中到域控制器(domain control unit, DCU),从而减少各个ECU的开发成本及维护复杂度。然而,线束简化与带宽提升等问题依然无法得到有效解决,例如,由于同轴电缆接口因素,DCU单位面积承载的带宽面临挑战;车身控制域需要对车灯、车门等进行管理,线束将穿过整个车身,其复杂度依然较高。

为解决这个问题,中央域控与区域集中的EEA开始发展,如图1(c)所示。该架构按照就近原则将各终端ECU接入相邻的区域控制器(zone control unit, ZCU)网关,然后汇入主控网络,通过CPU/GPU等高算力芯片/芯片组来集中控制。此架构可以有效减少线束的长度和铺设复

杂度,有利于自动化组装,降低成本。同时,算力集中共享及更通用的网关设计使汽车更有利于适配高等级智能化(如跨域融合感知),以及通过空中下载(over the air, OTA)支持整车软件和服务升级,系统迭代效率高,适应软件定义汽车趋势。不过,此架构需要革新现有车网通信技术,以适应由架构演进带来的车内通信的大容量、大带宽、低时延以及高可靠要求。

1.2 车内网通信需求与挑战

随着汽车智能化发展,消费者对智能座舱的需求不断攀升。智能座舱涉及多模态人机交互、信息娱乐、高清影像、抬头显示、360°环视系统等功能,而这些功能的实现也意味着更大的通信带宽需求。智能座舱的通信带宽需求见表1。

根据麦肯锡预测,到2030年,L2等级及以上的自动驾驶车辆将会至少达到52%的市场份额^[4]。自动驾驶的实现主要依靠更多的高精度传感器及更高的算力芯片,特斯拉的自动驾驶依靠基于摄像头的纯视觉传感技术,而国产汽车的智能驾驶主要以摄像头结合毫米波雷达、激光雷达等传感融合技术为主。随着自动驾驶等级的升级,现有低于10 Gbit/s级的通信带宽无法满足这些高精度的传感器需求。智能驾驶的通信带宽需求见表2。



表1 智能座舱的通信带宽需求

功能	传感器类型	单设备带宽	数量估算	总带宽估算	典型应用场景
多屏显示	显示接口	1~4 Gbit/s	4~6 屏	4~18 Gbit/s	导航、中控、娱乐
驾乘系统	红外摄像头	0.5~1 Gbit/s	1~2 颗	0.5~2 Gbit/s	驾、乘员状态监测
360°环视	摄像头	0.5~1 Gbit/s	4 颗	2~4 Gbit/s	环境感知、泊车辅助
车身信息	控制器通信	≤10 Mbit/s	多路	≤50 Mbit/s	车门、胎压等状态展示
音频系统	麦克风阵列	≤5 Mbit/s	4~6 通道	≤30 Mbit/s	语音交互、声源定位
手势识别	ToF 摄像头	100~500 Mbit/s	2~3 颗	0.2~1.5 Gbit/s	手势控制、非接触操作

表2 智能驾驶的通信带宽需求

功能	传感器类型	单设备带宽	数量估算	总带宽估算	典型应用场景
感知系统	前视/环视摄像头	1~4 Gbit/s	7~15 颗	12~30 Gbit/s	目标识别、SLAM 建图
	激光雷达	0.2~0.5 Gbit/s	2~3 颗	0.4~1.5 Gbit/s	高精度地图、障碍物识别
	毫米波雷达	10~100 Mbit/s	10~12 颗	1~1.2 Gbit/s	自适应巡航、盲区监测
	超声波雷达	≤1 Mbit/s	12~16 颗	≤16 Mbit/s	自动泊车、低速避障
决策控制	控制指令通信	≤10 Mbit/s	多路	≤50 Mbit/s	ADAS 控制、路径规划
数据闭环	行车记录/录制	全量数据录制		10~40 Gbit/s	数据录制、事件存储
车云通信	车联网通信	10~100 Mbit/s	1~2 模块	≤200 Mbit/s	空中下载、远程诊断等

此外，智能网联汽车的各个功能模块还提出了各自的时延要求。根据 IEEE 802.3cz 等系列车载通信标准^[5]，对于可靠性要求较高的动力和制动功能，信号的延时需要控制在 μs 级。智能网联汽车的时延需求见表 3。

表3 智能网联汽车的时延需求

汽车区域	端到端时延要求	通信带宽要求
动力总成与底盘系统	<10 μs	低
车身与舒适系统	<10 ms	低
辅助驾驶及安全	<100 μs 或 <1 ms， 取决于系统	高
座舱与人机交互	<10 ms	高

从第 1.1 节 EEA 的演进过程可以发现，汽车行业正在面临前所未有的变革，由原来的以重机

械/总线结构为主的制造型产业，转变为以电子化/网络化结构为主的、具有计算特性的电子产业。传统各应用领域驱动的车载通信技术对应不同的传输介质、通信带宽和拓扑结构，见表 4，不论从结构还是通信带宽上，都已无法满足未来 10 Gbit/s 以上的车载通信需求。因此，车载光通信应运而生，但需要标准化及支持长期演进。

2 发展车载光通信的优势与挑战

光纤通信的物理层速率已朝超 100 Gbit/s 发展，远超车内网通信带宽需求，为传统汽车向智能网联汽车演进提供了有效途径和新手段。“光纤上车”不仅仅是车载线束的变革，也是由传输介质的变革引入的车载通信协议与架构的重构和

表4 传统车载通信技术

车载通信技术	通信带宽	传输介质	拓扑结构	车载应用
CAN	1 Mbit/s	双绞线	线型总线	汽车动力系统等
LIN	20 kbit/s	单线缆	线型总线	灯光、防盗、门锁等
FlexRay	10 Mbit/s	双绞线/塑料光纤	星型总线	引擎、悬挂控制等
MOST	150 Mbit/s	双绞线/塑料光纤	环型总线	导航、影音
LVDS（低压差分信号）	3 Gbit/s	屏蔽双绞线	点对点，一点对多点	影音、视频

产业链的升级。

此外, 光纤还具有温度、应力、振动敏感的传感特性。基于光纤的车载测温系统可对车载电池、车身、座椅等部位进行高精度、高灵敏度的实时温度监测与应变监测, 从而为车辆的舒适性和安全性提供多方位的数据支撑。这为车载光通信的技术与产业发展奠定了基础。

中国企业在光通信领域全球领先, 从技术研究、标准制定, 到涵盖光纤预制棒、光纤光缆等基础介质, 到光芯片、光器件、光模组等关键器件, 再到光传送网 (optical transport network, OTN)、波分复用 (wavelength division multiplexing, WDM) 和无源光网络 (passive optical network, PON) 等系统设备的完整生态链, 在全球市场份额占比第一。

2.1 PON与我国固定接入网的“光进铜退”案例

PON 技术主要应用于光纤接入网, 其在从运营商局端到用户端之间的光纤传输路径中, 只使用无源光器件, 利用光纤和分光器等技术实现点对多点传输, 为多个终端用户提供高带宽接入。

2004 年以来, 以太网无源光网络 (Ethernet passive optical network, EPON) 和吉比特无源光网络 (gigabit-capable passive optical network, GPON) 等标准陆续完成制定, 成为全球广泛使用的 PON 技术, 可为单一用户提供超过 100 Mbit/s 的高带

宽接入。2016 年, ITU-T 定义了对称 10 Gbit/s 带宽的 XGS-PON, 上行、下行带宽均为 10 Gbit/s。随着用户业务需求的持续增长及 4K/8K 高清视频业务的普及, 近年来 50 Gbit/s PON 技术也已完成标准制定^[6], 如图 2 所示。

中国固定接入网的“光进铜退”始于 2013 年, 由工业和信息化部主导推动以光纤替代传统非对称数字用户线 (asymmetric digital subscriber line, ADSL) 等铜缆接入网络改造。ADSL 在铜线上的理论带宽为 100 Mbit/s, 但由于其衰减系数在 1 MHz 频率下高达 0.3 dB/m, 其理论带宽的传输距离在 300 m 以内。而 PON 技术通过单模光纤可实现超 20 km 传输, 单用户带宽可达 2.5 Gbit/s 以上。因此, 随着超 10 Gbit/s 带宽接入需求的出现, 基于 PON 的光纤技术 FTTx (fiber to the x, “x” 代表光纤接入网络的不同部署位置, 用于泛指各种光纤到用户端的宽带接入技术) 的发展进入快车道, PON 应用场景如图 3 所示。

到 2019 年, 经过 15 年发展, 中国宽带用户数量已超过 4 亿, 其中采用 GPON、EPON 技术的光纤到户用户占比超过 90%, 用户数位居全球第一。2025 年, 中国开始推进万兆光网启航, 50 Gbit/s PON 开始进入商用。

目前, 中国企业已向 ITU-T 提交 PON 标准提案 1 200 余项, 主导制定了 G.9807.1 (10 Gbit/s EPON)、

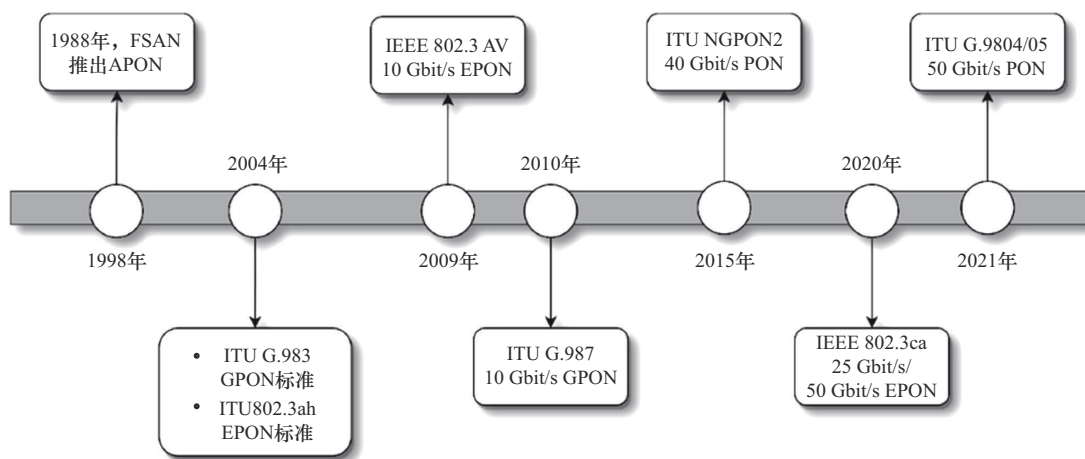


图2 PON技术标准演进示意图

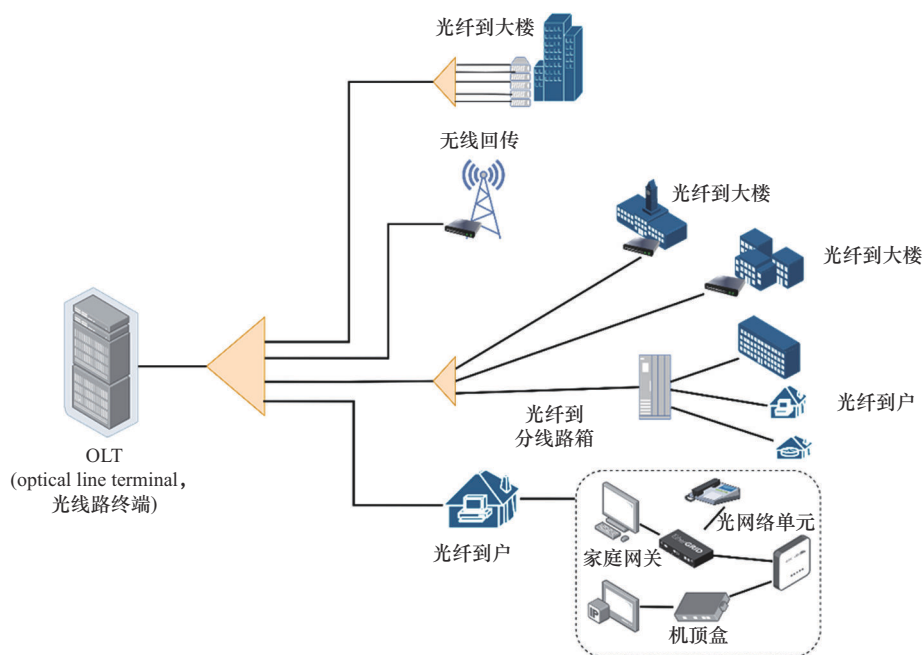


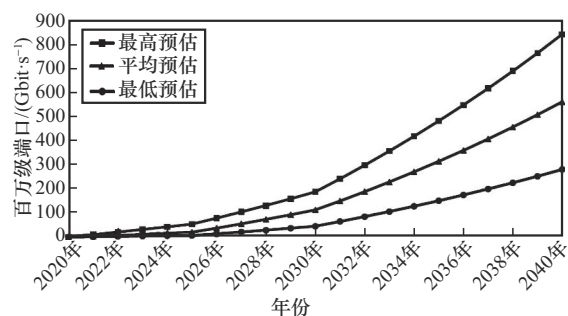
图3 PON应用场景

G.9808.1 (100 Gbit/s PON) 等核心标准；在 IEEE 802.3ca (50 Gbit/s PON) 工作组及 ITU-T SG15 Q2/Q3 中提交技术方案占比超过 50%。中国主导的 PON 技术路线已形成全球影响力。

2.2 车载光通信的优势

汽车线束是由多根导线按拓扑捆扎，集成了连接器、支架等的模块化组件，承担电力传输、信号传递、数据传输等功能，将汽车的电源、传感器、控制器、执行器等电子设备连接在一起。在通信带宽、抗电磁干扰、质量和成本等因素驱动下，汽车线束正经历从传统的铜缆线束向光纤线束的演进。

随着智能网联汽车的快速发展，更高的自动驾驶等级需要更多数量和更高精度的视频和雷达等传感器信号。预计到2026年，L3等级的自动驾驶汽车将产生超100 Gbit/s的带宽需求。L3及其以上自动驾驶的带宽需求预测^[7]如图4所示。铜线依靠提升电信号频率来提升通信带宽，然而更高电信号频率对电磁干扰更敏感，造成铜缆线束的电磁屏蔽成本越高。因此，车载单端口带宽需求已接近10年前固网光纤接入“光进铜退”的临界点。

图4 L3及其以上自动驾驶的带宽需求预测^[4]

随着汽车电子功能的增加，双绞线、同轴电缆等车载线束已占一辆汽车制造总成本的第三位，前两位分别是引擎和车架。由于线束的复杂度攀升，一辆车在装配时线束所占的人力成本高达50%；在质量方面，目前车载铜缆线束占车辆总质量的第三位，前两位分别为车架和引擎。车载线束如采用光纤线束，可比铜缆线束减重60%以上^[8]。车载石英光纤线束和铜缆线束之间的性能对比见表5，石英光纤线束在通信带宽、传输距离、电磁兼容（electro magnetic compatibility, EMC）、单位面积质量与体积等方面具有显著优势。

表5 车载石英光纤线束和铜缆线束性能对比

性能	石英光纤线束	铜缆线束
通信带宽/(Gbit·s ⁻¹)	>50	<10
传输距离/m	40	15
EMC	优	差
单位面积质量/(g·m ⁻²)	10~15	50~120
体积	小	大

因此,在车内 10 Gbit/s 带宽的分水岭选择上,光纤无疑是最优选择。2020 年 IEEE 发布 802.3ch 和 802.3cz 等标准^[9],为“光纤上车”提供了可行性支撑。未来的车载通信架构将形成以车载光通信为主控网络,车载以太网、车载 CAN 等原有总线连接相应终端与控制系统的混合车载通信网络架构,更高效地支撑智能网联汽车高质量发展。

2.3 车载光通信的挑战

L2 到 L4,甚至更高等级的自动驾驶需求、驾乘体验的不断提升,车内 EEA 从分布式到区域集中式的演进等,都推动着“光纤上车”的进程。车载 PON 为汽车 EEA 的车载通信提供了新的技术路线,却仍存在通信协议重构适配、车规级光器件等关键技术问题。

智能网联汽车在通信系统方面有着大带宽、低时延、高可靠性的新需求,现有 PON 协议在面对车载环境中高动态变化、大规模数据流、多业务融合等复杂场景时,存在适应性不足的问题。需要研究适配车载环境的车载 PON 技术,以重点解决低时延、高可靠性的 PON 通信协议与链路层控制机制。

车辆在运行过程中存在高达 105 ℃ 乃至更高

的工作温度、长期振动、动态弯折和狭小布线空间等工作要求,需进一步研究符合车规使用场景的可靠性、稳定性、适应性和小型化等要求的光纤线束、光器件等。

车内布局紧凑,光纤铺设易受挤压、高温等影响,导致线束损伤和性能下降,影响传输性能和网络稳定性。车载光纤线束的实车布线技术目前还是空白,需要进一步研究以保障车载光纤网络的可靠性和稳定性。

2.4 车载 PON 与车载以太网的比较

车载 PON 与车载以太网的相同之处在于,它们都是基于已有技术——PON 与以太网,且为适应汽车环境设计和优化的新技术。

目前车载以太网已开始应用,IEEE 802.3cz 也提出了通光纤来承载高带宽以太网的方案,但车载以太网与车载 PON 在功能与性能上有较大差异。这些差异使以太网难以作为独立技术满足车载通信网络的全部需求。

以太网、PON 的通信模式对比如图 5 所示。以太网仅支持点对点通信,如果需要建立多个节点间通信则要用到交换机,因此以太网的核心在于交换,适合于东西向流量为主的应用场景,如图 5 (a) 和图 5 (b) 所示。PON 支持点到多点通信,其核心在于下行分发或上行汇聚,更符合车内南北向流量为主的应用场景,如图 5 (c) 所示。

车载以太网也可以采用光纤传输,但车载 PON 采用无源分光器与车载以太网采用交换机相比,具有更低处理时延与成本,且布线灵活、扩

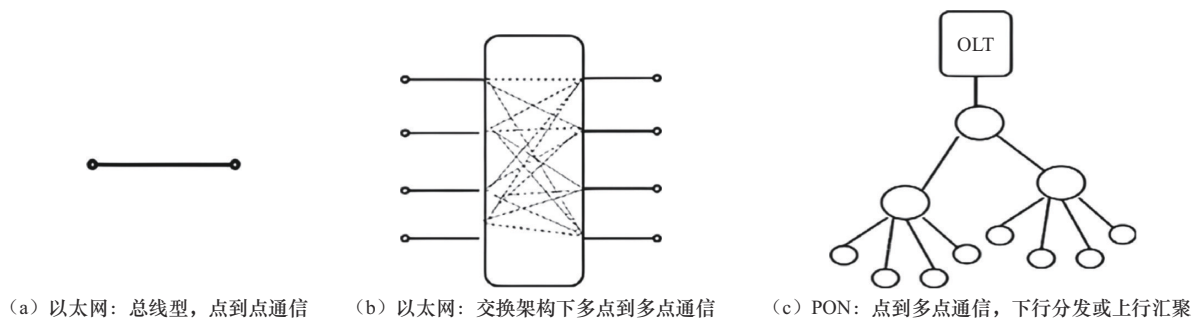


图5 以太网、PON的通信模式对比



展性强，具体性能对比见表6。

与传统汽车相比，智能网联汽车在智能座舱和智能驾驶方面的变化最大，更多数量、更高精度的传感器和更高清的显示屏，以及不断提升的中央计算平台集成度，这些都带来了通信带宽的急剧增加。车内流量中，智能驾驶域的高性能传感器（雷达与视频等）到中央域控的上行流量远大于下行流量；而智能座舱域的下行流量远大于上行流量，车内通信流量流向示意图如图6所示。但是智能驾驶域、智能座舱域的内部各设备间基本无相互通信需求（即没有东西向流量），均为直接上行或下行通信（即都是南北向流量），因此，车载PON天然比车载以太网更适合这种流量流向模型。需要指出的是，目前已出现将智能座舱域和智能驾驶域集成到一个计算平台上，称为舱驾一体化，但不影响上面分析的通信流量流向。

在智能座舱域，车载通信需要支持中控屏、仪表盘、AR-HUD等的多屏交互，并支持4K视频流及OTA升级等，典型流量为1~10 Gbit/s，时延容忍度>10 ms。在智能驾驶域，L3及其以上的自动驾驶依赖高清摄像头、激光雷达和4D毫米

波雷达等，单传感器数据量最高可超过9 Gbit/s，要求端到端时延<1 ms。PON的动态带宽分配机制可为高级驾驶辅助系统（advanced driver assistance system, ADAS）预留专属时隙，并将时延波动控制在±50 ns，相比车载以太网，可为智能驾驶场景提供更低的端到端时延。

构建以PON为中央计算域与区域控制的主控网络，提供100 Gbit/s级带宽与<100 μs时延，终端连接则可通过车载以太网或CAN总线等接入，构建“光主铜辅”的车载通信网络，将为智能座舱与智能驾驶等场景提供优选技术路径。

3 V-PON及其关键技术

车载PON是面向下一代智能网联汽车通信架构的颠覆性解决方案，需以传统PON技术为基础，发展具有无源拓扑简化、高带宽、轻量化与低功耗和动态资源调度等新技术特点，并可扩展兼容多种总线协议。

3.1 车载PON与传统PON的差异

传统PON已经有比较成熟的标准协议。结合车内网络特征和工作环境，PON的关键核心技术

表6 车载PON与车载以太网性能对比

功能与性能	车载以太网	车载PON	备注
通信模式	点对点通信	点对多点通信	PON可在点对多点下，实现点对点
接入方式	有源	无源	PON减少交换机与有源器件，从而节省成本
时延	较低，100 μs	低，可低于60 μs	PON没有交换机处理时延，实现更低时延
扩展灵活性	低	高	PON通过无源分光，快速扩展终端
功耗	高	低	无源PON架构，实现更低功耗

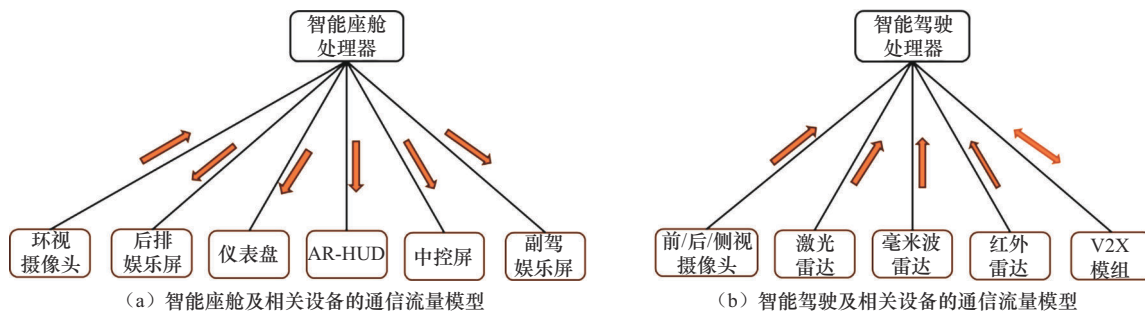


图6 车内通信流量流向示意图

表 7 传统 PON 与车载 PON 的需求差异性对比

功能需求	传统 PON	车载 PON
服务需求	可承载以太网、PDH、SDH、无线侧、POTS 服务等报文	可承载 CAN、LIN、FlexRay、MOST、MIPI、HDMI 等报文
流量与流向需求	下行分发	下行分发、上行汇聚
物理层需求	系统容量	10 Gbit/s/50 Gbit/s/200 Gbit/s
	分光比	1 : 256~1 : 16
	传输距离	km 级
	波长选择	C+L
	户外温度范围	-45~70 °C
		-45~125 °C

在优化重构后,可满足车内网(in-vehicle network, IVN)的流量和时延等要求。例如,车载PON技术可沿用PON中下行时分复用(time division multiplexing, TDM)、上行广播的方式,这两种通信方式的结合非常适合车内上下行非对称的带宽需求。

然而,车载PON和传统PON的需求存在差异,其对比见表7。

车载PON和传统PON的工作环境和性能要求也有差异,总体来说,车载PON要求更为苛刻。传统PON与车载PON的基本性能要求对比见表8。

表 8 传统 PON 与车载 PON 的基本性能要求对比

性能	传统 PON	车载 PON
寿命	5~10 年	>15 年
温度	-40~85 °C	-40~125 °C
抗振动、冲击等	低	高
可靠性	较高	高
出错率	<1%	0
测试标准	JESD47 等	AEC-Q100、ISO 26262 等
系统成本	较高	高

3.2 车载 PON 的挑战

将PON技术用在汽车特殊环境面临新的技术挑战,包括PON协议适应性、传输介质的可靠性、芯片/模组小型化、低功耗、低时延等方面。

(1) 适应车内特有流量特征的通信与网络架构挑战:虽然车载PON比车载以太网更适合智能网联汽车的车内通信流量流向模型,但具体设计时,还是需要建立基于车载PON的流量模型,通过提高车载PON OLT 芯片的SerDes速率、提供

基于单纤双向的下行控制消息透传机制等方式满足车内流量特征需求。

(2) 车载PON协议的适应性挑战:传统PON由于接入业务、优先级不同,多采用动态带宽分配(dynamic bandwidth assignment, DBA)算法。车内流量相对较为固定,可通过增加固定带宽的刚性管道方式,为车内终端提供确定性的带宽保障。此外,PON的传输时延一般为单向125 μs,难以满足车内低时延的应用场景,可通过减少帧长、优化其报文结构的方法将时延降到100 μs以下。由于各光网络单元(optical network unit, ONU)到光线路终端(optical line terminal, OLT)的距离各不相同,因此,传统PON主要通过测距的方式保证ONU上行的同步。而车内传输距离较短,在终端接入过程中可优化测距过程,降低注册复杂度及降低时延。

(3) 光纤线束及连接器的可靠性挑战:光纤光缆是一种通信性能优但相对脆弱的物理传输介质。传统PON虽然传输距离较远(≥ 20 km),但工作外部环境相对稳定。车内传输距离虽短(≤ 40 m),但工作时面临高温、振动颠簸、弯曲等恶劣环境,需提升光纤光缆的工作宽温、动态抗弯折和抗振性能,并相应提升光连接器的可靠性。

(4) 激光器失效性的挑战:车载光通信在光电转换期间一般选用垂直腔面激光器(vertical cavity surface-emitting laser, VCSEL)或分布式反馈激光器(distributed feedback laser, DFB)。这些激光器都存在遇高温失效的问题。尤其在车载光网络



的终端，如车载摄像头，由于其功耗、尺寸、成本等限制因素，无法为光电器件提供额外的降温/散热模块。为解决此难题，可通过优化工艺、材料的方式提高激光器的耐高温性能，或采用远端光源的设计，将光源设置在具备温度控制功能的中央域控板卡中，终端光电转换器件采用硅基调制器、探测器以消除激光器高温失效的难题^[10]。

(5) PON 模组小型化、低成本、低功耗挑战：目前车内主要大带宽需求来源于高性能传感器及高清显示屏，其中，高清摄像头对于尺寸、成本及功耗要求较高。车载 PON 的终端芯片可通过更高工艺制程、功能裁剪以及裁剪微控制单元等方式满足小型化、低功耗需求。

(6) 安全冗余保护、故障诊断定位等问题：车载 PON 技术在传统 PON 基础上需要进行协议重构、算法优化、安全加密等技术创新，以适用于车内应用场景。

3.3 V-PON 结构及其关键技术方向

基于上述分析，本文提出的 V-PON 技术是对传

统 PON 技术加以改造，通过光纤将车载电子设备连接成一个网络，以适应车载环境。其核心原理是利用光分路器等无源器件，将来自光源的光信号分配到各个车载终端设备，实现点对多点的通信连接。

V-PON 技术利用光纤传输的大容量、大带宽特性，可提供数十 Gbit/s 及更高的传输带宽，满足智能网联汽车对高清视频流、海量传感器数据的实时传输需求。同时，光纤传输具有极佳的抗电磁干扰能力，能够在车内复杂的电磁环境下确保数据传输的稳定性与可靠性，为智能驾驶、智能座舱等新应用提供坚实保障。

V-PON 结构示意图如图 7 所示。与传统 PON 类似，V-PON 由 OLT、无源分光器及光分配网、ONU 组成。其结构整体趋向于中央集中区域控制架构：车内不同功能的 ECU 和终端接入离之最近的 ONU 模组，多个 ONU 模组通过光分配网接入位于中央的 OLT。V-PON 结构通过不同的分光比，实现网络的灵活扩展，其中央的多个 PON 端口构成 OLT/域控模组。这些 OLT 模组可通过 PCIe 等方式接入

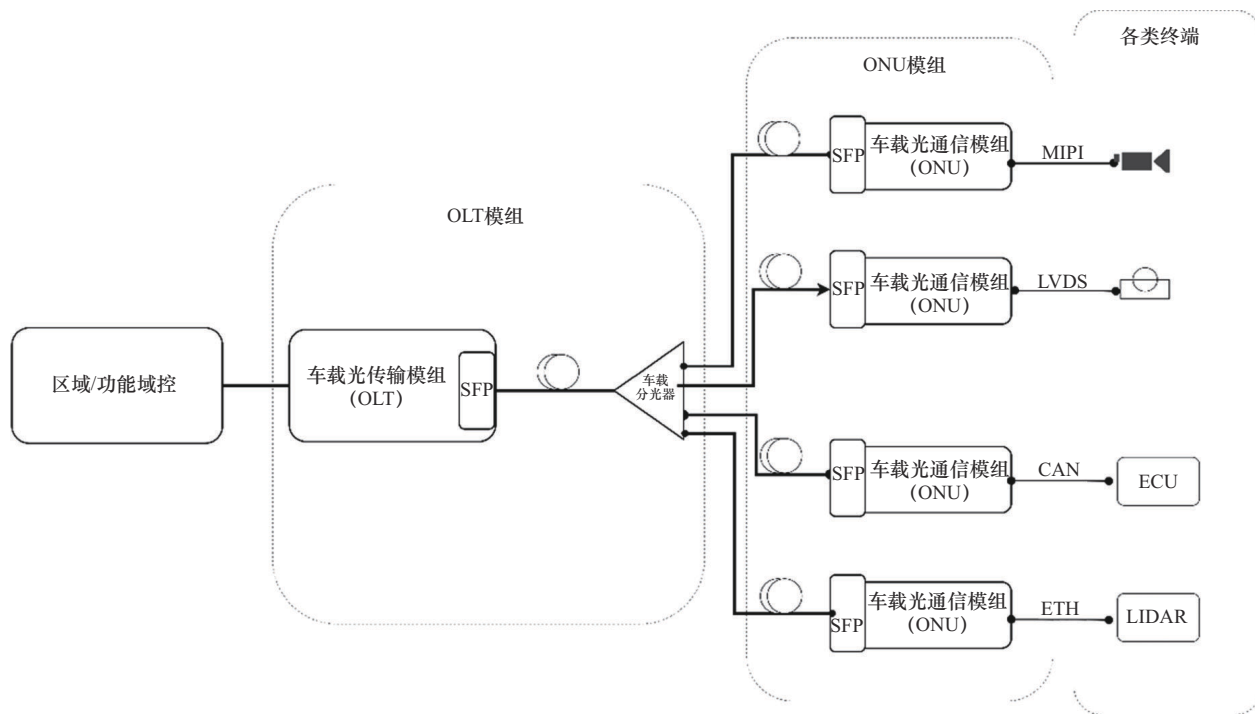


图7 V-PON结构示意图

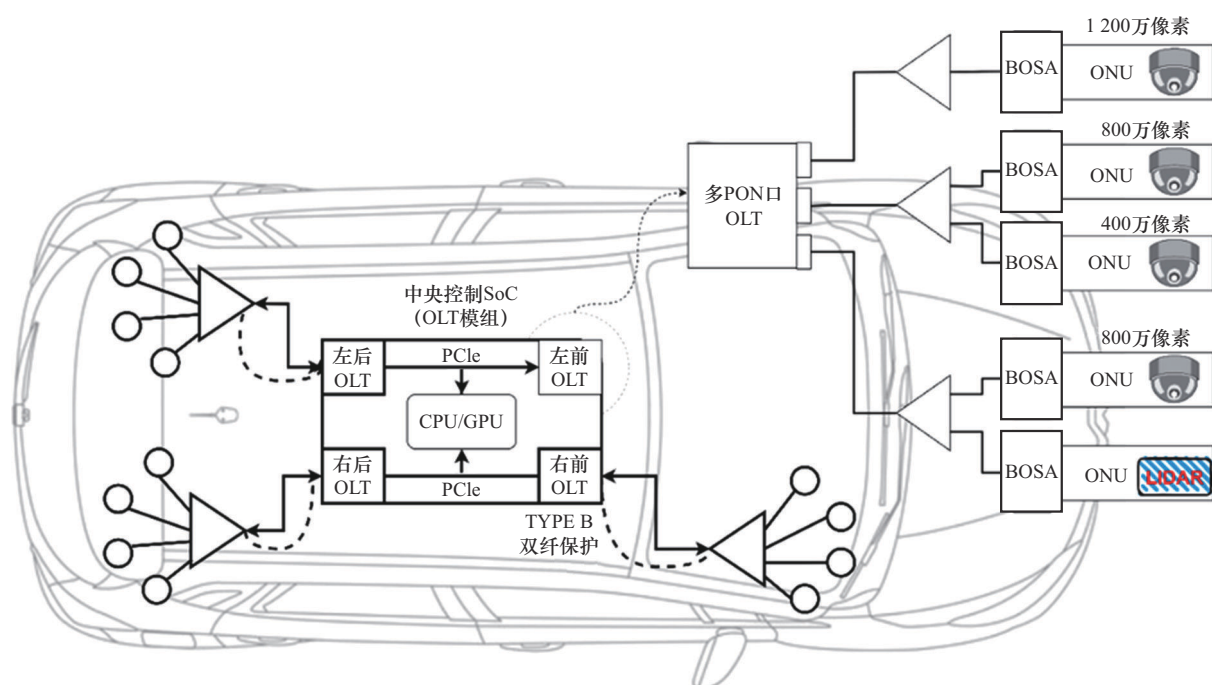


图8 V-PON在车内的应用示意图

中央SoC。V-PON在车内的具体应用,如图8所示。

与传统光通信PON技术相比,V-PON技术在继承PON核心技术原理的基础上,还需研发适合车载工作环境、智能化网联化特定需求的增强型功能与新性能,其中包括:车载低功耗的休眠唤醒,可实现软硬件解耦的扩展升级,以及复杂环境的冗余保护能力的资源调度、报文协议、通信机制和安全加密等技术。

V-PON的关键技术主要有以下5个方面。

(1) 单纤双向传输机制。相比传统PON技术,V-PON技术在OLT与ONU间的流量与流向发生了变化。在智能驾驶舱应用,车载娱乐系统下行流量远大于上行流量;在智能驾驶应用,上行流量则远大于下行流量,而且各类车载传感器将长时间占用传输通道。因此,与传统PON技术类似,V-PON下行流量考虑更短周期的帧结构,以TDM的方式由OLT广播给各个ONU,帧结构中除了下行的报文载荷,还包含指示每个ONU中报文载体的上行时隙位置。V-PON通信示意图如图9所示。根据下行报文中各ONU承载

单元的时隙信息,ONU将各报文按照时隙要求放入上行链路中。由于各终端流量模式相对固定,因此可减少下行带宽分配控制报文,以减少上下行折返的时延。上下行的报文传输依赖于报文结构、WDM以及DBA算法的实现。

(2) 轻量化与高可靠通信协议。需要适配智能网联汽车高带宽、低时延、高可靠性需求,形成基于V-PON架构的通信协议,构建V-PON协议优化设计与智能调度、容错恢复与拓扑自适应机制,并发展V-PON安全与故障诊断体系,形成轻量认证与多维冗余机制、反射编码支路识别方案。通过确定性调度算法与细颗粒度时隙分配技术,实现业务纳秒级精准同步与微秒级动态重构,从而构建冗余保护倒换、业务恢复和时间确定性服务能力。

(3) 先进纠错码与补偿技术。PON随着传输速率的提高,光层的损耗和色散也会相应增加,接收端的灵敏度随之下降、功率预算降低^[11],需要通过电层的先进纠错码和物理层的数字信号处理进行补偿。例如,在XGPON中采用非归零编码

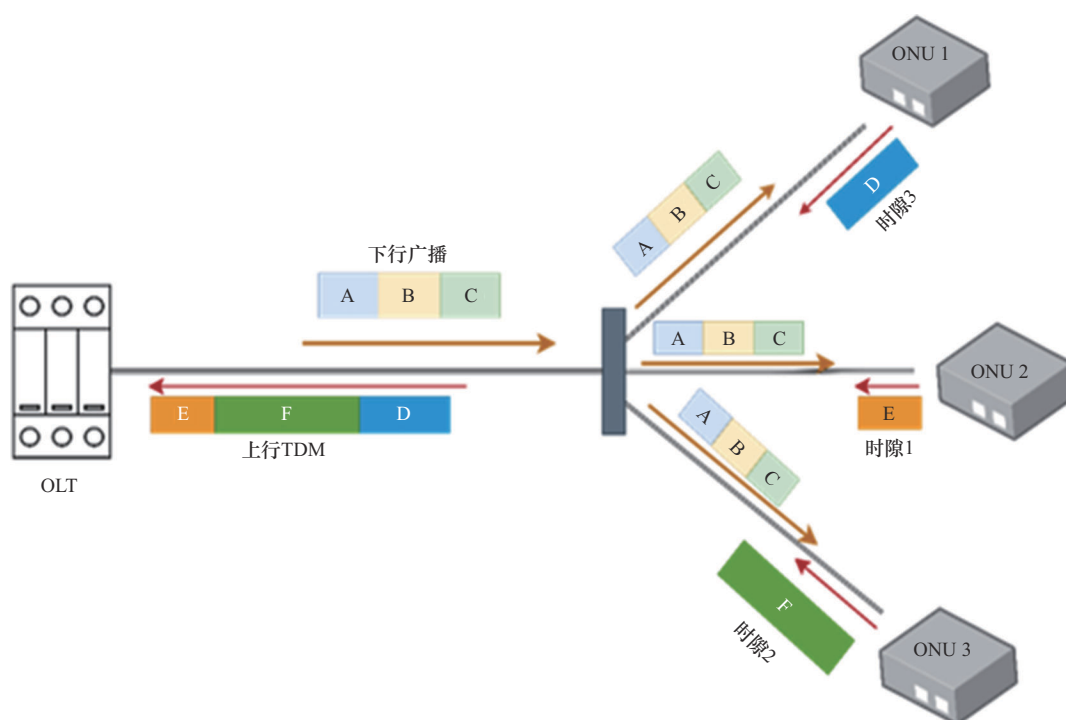


图9 V-PON通信示意图

(non-return-to-zero, NRZ) 纠错码, 而在 50 Gbit/s PON 中则采用纠错性能更好的低密度奇偶校验 (low density parity check, LDPC)。在 V-PON 中, 需要根据带宽的需求、光功率预算研究采用哪一种纠错码更为合适。

(4) 加密认证安全机制。PON 的下行报文由 OLT 广播到所有 ONU, 具有一定的安全隐患。当存在恶意 ONU 时, OLT 的下行报文有泄密的可能。因此, PON 应采用高级加密标准 (advanced encryption standard, AES) 加密算法对报文进行安全保护。同时, PON 支持多种 ONU 和 OLT 的认证方式, 通过加密算法和认证流程, 确保设备的合法性接入, 减少网络攻击和数据泄露的风险^[12]。

(5) 光纤光缆与光器件的高可靠性技术。针对车辆长时间、高频振动、宽域温度工作特性, 需开展光纤光缆与光器件在结构、护套、材料、工艺等方面的创新研究, 使之符合车规级要求。同时, 还需结合汽车行业和通信行业

标准, 开发对应的验证方法及相关检测设备, 从而构建成体系的车载光器件与光网络检验与认证规范。

4 V-PON 标准与产业发展建议

本文提出的 V-PON 技术是基于成熟的光纤通信和 PON 技术发展而来, 需要从产业协同、技术与产品标准、测试与认证体系、产业政策以及人才培养等多方面进行全面考虑, 才能更好地应对车载通信的各种技术与应用推广挑战。

(1) 加强汽车与光通信产业跨界协同。由于汽车产业对车载通信有特殊需求和工作环境要求, 且对成本与性能均非常敏感, 需要光通信产业与汽车产业需求对接、协同创新、协同攻关, 充分发挥光通信技术的特性和优势, 形成适应智能网联汽车应用特色的 V-PON 技术。在此基础上, 汽车产业可与通信产业共同制定技术与产品路线图, 如 10 Gbit/s V-PON、50 Gbit/s V-PON 演进路径。

(2) 合作制定 V-PON 技术标准规范。车载通信领域不同厂商自定义的车载 PON 相关协议等, 不同企业之间的兼容性较差, 难以互连互通, 难以通过规模经济降低成本。通过跨界合作着力推进 V-PON 技术的标准化, 实现资源共享, 降低研发成本和研发风险, 快速推进 V-PON 技术产业化, 为智能网联汽车的高带宽、低时延与高可靠实现建立良好的标准基础。

(3) 制定 V-PON 测试方法与工具链。汽车产业的发展需要高度关注安全性。在不断完善技术与产品标准的基础上, 可融合 AEC-Q102 与 Telcordia GR-468 等, 形成统一车规级光器件标准, 并联合定义高速车载光通信协议, 衍生形成体系化的测试与质量认证体系标准。在这方面, 可由汽车主机厂明确需求, 包括架构、功能、性能、应用场景、成本等, 光通信企业据此提供解决方案及关键技术, 共同分析其可行性, 进行实车测试验证, 共同推进 V-PON 测试认证体系化的发展。

(4) 制定有利于光纤上车和 V-PON 的产业政策。车载光通信技术属于新生事物, 涉及汽车产业与光通信产业两个万亿级产业, 是跨行业的系统工程。需要加强顶层设计, 加强跨行业组织协调, 推进核心技术突破, 通过补贴、税收优惠等财政支持政策, 扩大应用示范, 加速 V-PON 在智能网联汽车产业中的规模应用。

(5) 加强复合型人才队伍的培养与建设。V-PON 技术作为光通信、集成电路技术与车辆工程领域的交叉前沿技术, 对复合型人才需求迫切。这类复合型人才不仅需要精通光通信、集成电路设计等专业知识, 还需熟悉汽车电子电气架构、智能交通系统应用等领域。为此, 可鼓励高校开设此类跨领域前沿专业学科, 构建学研产用一体化的汽车与光通信产业协同, 将能更好推进人才互补、技术共享, 丰富复合型人才资源池。

5 结束语

未来汽车电子电气架构向域集中式/中央计算式发展, 对数据通信带宽、实时性和抗干扰性的需求急剧提升。本文提出基于光纤通信的 V-PON 技术将为智能网联汽车发展提供新的可能, 但也面临着诸如车规级光纤线束、连接器乃至高性能光电芯片与高可靠、低时延通信协议等挑战。建议发挥中国在光通信和 PON 领域的技术与产业优势, 快速攻克 V-PON 关键技术, 制定相关标准, 通过汽车与通信产业的良性互动, 实现车载通信的“光进铜退”, 助力车载 EEA 的快速演变, 推动中国智能网联汽车产业的高质量发展, 提升中国企业的国际竞争力。

致谢:

感谢中信科智联公司吴体龙专家提供关于智能座舱和智能驾驶的通信带宽需求分析素材!

参考文献:

- [1] 陈山枝, 胡金玲, 等. 蜂窝车联网 (C-V2X)[M]. 2 版. 北京: 人民邮电出版社, 2025.
CHEN S Z, HU J L, et al. Cellular vehicle-to-everything (C-V2X)[M]. 2th ed. Beijing: Posts and Telecom Press, 2025.
- [2] LO BELLO L, PATTI G, LEONARDI L. A perspective on Ethernet in automotive communications: current status and future trends[J]. Applied Sciences, 2023, 13(3): 1278.
- [3] ALPARSLAN O, ARAKAWA S, MURATA M. Next generation intra-vehicle backbone network architectures[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 22nd International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.
- [4] McKinsey and Company. Outlook on the automotive software and electronics market through 2030[EB]. 2020.
- [5] IEEE standard for Ethernet amendment 7: physical layer specifications and management parameters for multi-gigabit glass optical fiber automotive Ethernet: 802.3cz-2023[S]. 2023.
- [6] 黄旭阳, 罗智明, 唐慧敏. 50G PON 承载特性和应用浅析[J]. 数字通信世界, 2023(1): 111-113.
HUANG X Y, LUO Z M, TANG H M. Analysis of 50G PON bearing characteristics and application[J]. Digital Commun-



- tion World, 2023(1): 111-113.
- [7] IEEE802.3 Working Group. 10G+ automotive Ethernet electrical PHYs, call for interest consensus presentation[EB]. 2019.
- [8] FADHLI R, PRABOWO M A, APRIONO C, et al. Comparison analysis of plastic optical fiber as a replacement for copper cables for car communication links[C]//Proceedings of the 2023 6th International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT). Piscataway: IEEE Press, 2023: 76-81.
- [9] IEEE standard for Ethernet amendment 10: media access control parameters, physical layers, and management parameters for 200 Gb/s and 400 Gb/s operation: 802.3bs-2017[S].2017.
- [10] TSUDA H, KUBO R, FURUYA T, et al. Proposal for a highly reliable in-vehicle optical network: SiPhON (Si-photonics-based in-vehicle optical network) [C]//Proceedings of the 2022 27th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2022 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-3.
- [11] KAMINOW I P, LI T Y, WILLNER A E. Optical fiber telecommunications VIB: systems and networks[M]. 6th ed. San Diego: Elsevier, 2013.
- [12] ITU-T. Higher speed passive optical networks - common transmission, international telecommunication union: G.9804.2[S].2021.

[作者简介]



陈山枝（1969- ），男，博士，中国信息通信科技集团有限公司（CICT）副总经理、总工程师、科技委主任、正高级工程师，无线移动通信全国重点实验室主任，移动通信与车联网国家工程研究中心主任、博士生导师，IEEE Fellow，《电信科学》主编，中国电子学会会士，中国通信学会会士，国家杰出青年科学基金获得者。负责4G和5G移动通信、C-V2X的技术与标准研究及产业化工作。曾获国家科技进步奖特等奖、一等奖、二等奖，国家技术发明奖二等奖等。目前主要研究方向为B5G和6G、车联网、星地融合移动通信与卫星互联网等。



罗文勇（1980- ），男，中国信息通信科技集团有限公司科技委委员，烽火通信科技股份有限公司技术研究中心总经理、正高级工程师。申请发明专利120余项，曾获得国家科技进步奖二等奖、省部级一等奖、中国专利奖银奖等。目前主要研究方向为新型光纤光缆、光纤通信、光纤传感、光纤激光等。