

激光与光电子学进展

车载网络发展趋势和车载光纤传输研究进展

盛炜杰¹, 陈锦云¹, 王雅思¹, 孙林^{1,2}, 蔡轶^{1,2}, 沈纲祥^{1,2}, 刘宁^{1,2*}¹苏州大学电子信息学院, 江苏 苏州 215006;²苏州市先进光通信网络技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

摘要 随着智能网联汽车的发展,车载网络作为汽车内传感器、处理器和执行器间的信息共享平台,逐步向简化架构和更高带宽方向发展。通过对智能网联汽车上几种主要新型车载传感器的工作原理介绍和带宽需求分析,分析了车载网络的带宽需求趋势。同时,本文根据对传统车载网络的网络架构和主流协议的回顾,以及对当前车载网络发展的追踪,指出了车载网络在汽车智能化趋势下面临的带宽瓶颈,光纤传输是未来车载网络的发展方向。最后,通过车载网络对光纤要求的分析和对塑料光纤传输技术的行业现状和最新研究进展的调研,说明了车载光纤传输技术亟须进一步研究。

关键词 光纤通信; 摄像头; 激光雷达; 雷达; 智能网联汽车; 车载网络

中图分类号 TN913.7 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220669

Development Trend of In-Vehicle Networks and Research Progress of In-Vehicle Optical Fiber Transmission

Sheng Weijie¹, Chen Jinyun¹, Wang Yasi¹, Sun Lin^{1,2}, Cai Yi^{1,2},
Shen Gangxiang^{1,2}, Liu Ning^{1,2*}¹ School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;² Key Laboratory of Suzhou Advanced Optical Communication Network Technologies, Suzhou 215006, Jiangsu, China

Abstract With the development of intelligent and connected vehicles, in-vehicle networks, as information sharing platforms between sensors, processors, and actuators in automobiles, are gradually moving in the direction of simplified architecture and higher bandwidth. In this paper, the bandwidth demand trend of in-vehicle network is analyzed through the introduction of the principle and bandwidth demand of several major new in-vehicle sensors on intelligent and connected vehicles. At the same time, based on the review of the network architecture and topologies of traditional in-vehicle networks, as well as the current progress of in-vehicle networks, we point out the bandwidth bottleneck faced by the in-vehicle networks under the trend of automotive intelligence, and optical fiber transmission is the development direction of future in-vehicle networks. Finally, through the analysis of the requirements of in-vehicle networks for optical fiber and the investigation of the latest research progress of plastic optical fiber transmission technology, the article shows that the in-vehicle optical fiber transmission is worthy of further research urgently.

Key words fiber optics communications; cameras; LiDAR; radar; intelligent and connected vehicle; in-vehicle networks

1 引言

智能网联汽车是以完全自动驾驶代替人工驾驶为目标的下一代新型汽车,将搭载先进的传感器、控制器、执行器等设备和一流的通信设施或网络。随着人类社会不断发展,汽车向电动化、网联化和智能化融

合发展,智能网联汽车成为国内外的产业关注焦点和热门研究方向。2022年1月中国信息通信研究院发布的《全球自动驾驶战略与政策观察》指出,北京批准自动驾驶出租车首批商业化试点服务,标志着2021年成为自动驾驶商业化元年^[1]。美国交通部的报告中指出,为使美国在自动驾驶汽车技术上处于领导地位,需

收稿日期: 2022-02-08; 修回日期: 2022-03-01; 录用日期: 2022-03-17; 网络首发日期: 2022-03-27

基金项目: 江苏省“双创博士”(JSSCBS20210666)

通信作者: *gordonliu@suda.edu.cn

在车载网络、传感器等方面加强与企业的合作,关于智能网联汽车的研究也越来越迫切^[2]。

智能网联汽车可以根据解放驾驶员的不同程度分为 L0~L4 五个等级^[3]。较低层级自动驾驶的典型应用是近年来快速发展的自动巡航和自动泊车系统。而更高层级的自动驾驶,近年来也发展迅速。最高层级 L4 可以在任何路况条件下行驶,并独立处理任何威胁安全的紧急情况。为此,不同的企业提出了各自的解决方案。以特斯拉为代表的车企着眼视觉解决方案,其完全基于摄像头的自动驾驶解决方案,采用 8 个高清摄像头绘制车身周边情况^[4]。谷歌 Waymo 和百度 Apollo 则提出了以摄像头和激光雷达为核心,以毫米波雷达、超声波雷达为辅助的自动驾驶解决方案^[5]。

随着传感器的大量使用和自动控制的研究,车载网络也得到了相当大的发展。当前智能网联汽车的车载网络所需要的通信速率上升至 50 Gb/s 以上,而支持全自动驾驶的智能网联汽车则需要更多的传感器和更高的传输带宽。现有车载网络标准只规定了 1 Gb/s 的传输速率,国际电子电气工程师协会(IEEE)工作组正在对 2.5~50 Gb/s 的车载以太网标准展开讨论,而对 100 Gb/s 以上的车载网络传输速率目前尚处于研究阶段^[6]。

本文分析了智能网联汽车中新型传感器的功能和带宽需求,回顾了传统的车载网络架构和传输带宽,总结了当前车载网络及其中光纤传输技术的最新研究进展,展望了未来智能网联汽车的车载网络发展,并据此指出了快速发展的智能网联汽车车载网络带宽需求与当前有限的车载网络带宽提供能力之间的矛盾,提出

加大对车载网络中光纤传输技术的研究,以满足未来车载网络的带宽需求。

2 新型传感器及其带宽需求

车载传感器是智能网联汽车的关键部件,合理选型与使用布局至关重要。与传感器在实验室的测试环境不同,车载传感器需要面对真实交通环境下的人-车-路多因素耦合的复杂情景。因此需要从单一走向多元,综合多种感知渠道,满足全天候、多路况的驾驶需求^[7]。然而,随着传感器环境感知力、定位能力以及自感知能力的提升,传感器的带宽需求急剧增大。本节将着重介绍自动驾驶技术所需要的新型传感器,并分析其使用情况和带宽需求。

2.1 摄像头

摄像头作为常用的可视化成像传感器,按照成像算法可分为单目摄像头和双目摄像头等。双目摄像头类似人的眼睛,双目聚焦同一场景或物体,再利用视差来测距。而单目摄像头则利用图像与预定参数比较,加以用于视域中运动物体检测的光流技术辅助,来获取距离信息^[8]。

由于摄像头的技术相对成熟且成本低,目前广泛用于辅助驾驶员泊车、触发紧急刹车或者其他场景下的辅助驾驶功能^[9]。同时,现有 L3 以上的主流自动驾驶汽车很多采用视觉传达方案,以摄像头为主要探测设备。目前主流自动驾驶车型所搭载的摄像头数目在 5~14 个不等,摄像头精度在 100 万~800 万像素不等,详见表 1。其中,环视摄像头指的是一组能够覆盖车周所有视场的摄像头。

表 1 现有汽车的摄像头搭载方案
Table 1 Existing car cameras installation schemes

Brand	Vehicle model	Resolution (highest pixel of cameras)	Camera number	Circular camera number	Other camera number
XPeng	P7(XPILOT 3.0) ^[10]	2 million	14	4	10 (high sensing camera)
	P5(XPILOT 3.4) ^[11]	2 million	13	3	10 (high sensing camera)
NIO	ET7 ^[12]	8 million	11	4	7
	ES8 ^[13]	2 million	5	4	1
TESLA	Autopilot 2.0 ^[4]	1.2 million	8	2	3 (front facing camera)+3 (rear camera)

而随着自动驾驶技术的发展,L3 以上自动驾驶车型对摄像头的数量需求将进一步增加。此外,为满足更高层级的自动驾驶,我们需要像素更高、色彩更加丰富的高清摄像头,其单个摄像头每秒可产生的数据量也将相应增加。其数据传输速率的计算公式^[14]为

$$B = X \times R \times f, \quad (1)$$

式中: X 表示分辨率; R 表示每个分辨率单位原生数据大小,单位为 bit; f 表示帧频,单位为 frame/s; B 是最终计算的数据传输速率,单位为 bit/s。

以基恩士 200 万像素摄像头 CA-H200C 为例,对于 30 frame/s 的帧频、原生数据 R 为 12 bit、分辨率

1600 pixel×1200 pixel 的该款摄像头根据式(1)可得传输速率的需求为 $1600 \times 1200 \times 30 \times 12 = 0.691$ Gb/s。其中 12 bit 代表每个分量是 4096 色,红绿蓝三原色共可以组合 $4096 \times 4096 \times 4096 = 68719476736$ 种不同的颜色。

目前,高速公路上因小型障碍物诱发的交通事故占高速公路事故总量的 10% 左右,这些小型障碍物主要来源于货车行驶过程中洒落的货物或车辆损坏的零部件如碎石、轮胎等。将来的智能网联汽车为了更好地识别并规避这些小型障碍物,将会采用 8K 等更清晰度的摄像头,其带宽需求也就更大,车载网络总

带宽需求进一步增加。以 2021 年 1 月蔚来发布的其首款自动驾驶车型 ET7 为例,共配置了 7 个 800 万像素高清摄像头和 4 个 300 万像素环视摄像头,按帧频 30 frame/s、原生数据 12 bit 计算,总的带宽需求约为 26 Gb/s。未来的全自动驾驶智能网联汽车需要的带宽会更高,可达上百吉比特每秒,这对于现有的车载网络而言是一个巨大的挑战。

2.2 激光雷达

激光雷达(LiDAR)是传统雷达与现代激光技术融合的产物,在气象学和空天科学领域有着广泛应用。由于车载传感器往往需要面对沙尘、暴雨、大雾等干扰性天气,于是单色性好、方向性强、相干性好、体积小的激光雷达得到了广泛的应用^[15]。激光雷达的探测原理和激光测距类似,激光束不断地扫描目标物,就可以根

据反射激光信号得到目标物上全部目标点。激光雷达在一次扫描后,根据物体距离可以生成三维(3D)点云图,再根据激光在不同材料表面反射率不同,为点云图划分不同颜色。在得到目标的点云图后结合深度学习的图像处理技术,在点云图上将背景与物体分开,实现动态检测的目的^[16]。

激光雷达以其特有的优势获得大量车企青睐。早期激光雷达价格较为昂贵,如著名激光雷达供应商 Velodyne,其混合固态 64 线激光雷达单个售价超过 10 万美元。近年来,随着激光雷达价格不断下降,智能网联汽车的车载激光雷达的使用数量也不断增加。当前,不同车企相关车型的激光雷达数量及详细参数如表 2 所示。

表 2 不同车企的激光雷达数量及相关参数
Table 2 LiDAR numbers and relative data for different car vendors

Model	LiDAR brand and quantity	Field angle / [(°)×(°)]	Angular resolution / [(°)×(°)]	Remark
MARVEL R7 ^[17]	A Luminar-Iris rotary scanning LiDAR ^[18]	120×26	0.05×0.05	640 line equivalent
ARCFOX α S HI ^[19]	3 LiDARs of Huawei 96 line ^[20]	120×25	0.25×0.26	Point cloud 96 line
NIO ET7 ^[21]	Ultra long distance high precision LiDAR with 1 innovusion-Falcon ^[22]	120×25	0.06×0.06	300 line equivalent

激光雷达输出数据速率取决于其点云图的出点数速率,包括激光雷达的线数(即可同时扫描的不同俯仰角的个数)、水平扫描范围、扫描频率、单次出点数和水平分辨率等参数。此外,激光雷达输出数据通常采用主数据流输出协议(MSOP)等,会增加帧头和帧尾的协议开销,进一步增加了最终传输带宽需求。

以速腾聚创生产的激光雷达 RS-LIDAR-32 为例,它与主控之间的通信使用有效载荷占比约 96% 的 MSOP 协议。根据 MSOP 要求,发送间隔为 0.667 ms、单个包大小为 1248 字节,换算成数据带宽为 14.96 Mb/s^[23]。表 3 是速腾聚创和 Velodyne 几款激光雷达的传输速率。

表 3 主流厂商激光雷达传输速率
Table 3 LiDAR transmission speed of main stream manufacturers

Product name	Data bandwidth / (Mb·s ⁻¹)
RS-Ruby (64) (Robosense) ^[24]	29.72
RS-Ruby (128) (Robosense)	47.55
Alpha Prima (VLS-128) (Velodyne) ^[25]	47.55

(note: above data are based on the dual echo mode, bandwidth of the single echo mode is halved)

由此可见,激光雷达的带宽需求普遍在 10~100 Mb/s 之间。随着高精度激光雷达的价格下降,越来越多的激光雷达应用于智能网联汽车,其带宽需求

也会不断增加。但是,总体来说,带宽需求远低于高清摄像头。

2.3 毫米波雷达

毫米波(MMW)的波长介于 1~10 mm 之间。由于毫米波具有良好的穿透性,适应智能网联汽车的全天候驾驶环境和存在杂波的电磁环境。毫米波雷达借助毫米波的往返时间、频率变化、相位差分别来测速、测距、测方位角^[26-27]。在面对大雨天气时,穿透性强的毫米波雷达则可以排除雨的干扰,打破天气障碍^[28]。但是,毫米波雷达探测精度受限,并且成像困难,一般车企会配合激光雷达和高清摄像头使用,部分车企则放弃了毫米波雷达。采取毫米波雷达解决方案的车企,一般使用“一长四短”的解决方案,即装配 1 个长距离毫米波雷达,4 个短距离或者中距离毫米波雷达。部分车企的毫米波雷达解决方案如表 4 所示。

常见的国外毫米波雷达有德国大陆的 ARS30X、ARS40X 系列,以及美国德尔福的 ESR、SSR 系列等,占据国内车规级毫米波雷达市场的 70% 以上。国内则只有为数不多的几家企业能够生成高精度、高质量的车规级毫米波雷达,它们的主要参数如表 5 所示。

可以发现,近年来毫米波雷达探测范围不断提高,精度也不断攀升。不过,由于其探测原理是基于反射回波,其数据带宽较小,单个毫米波雷达传感器一般采用控制器局域网络(CAN)传输,传输带宽也较小。毫米波雷达处理的数据带宽都在 400~600 kb/s 之间,传输带宽为 1 Mb/s^[35]。即使每辆智能网联汽车装配 6 台

表 4 部分车企毫米波雷达解决方案

Table 4 Millimeter wave radar solutions for some car vendors

Model	Millimeter wave radar
Audi A8 ^[29]	Equipped with 5 millimeter wave radars (1 LRR+4 MRR)
Mercedes-Benz S ^[30]	Equipped with 6 millimeter wave radars (1 LRR+1 MRR+4 SRR)
Bavarian Motor Work Pro ^[31]	Equipped with 5 millimeter wave radars (4 SRR +1 LRR)

(note: LRR means long range millimeter wave radar, MRR means medium range millimeter wave radar, and SRR means short range millimeter wave radar)

表 5 不同车企的毫米波雷达参数

Table 5 Millimeter wave radar specifications of different car vendors

Millimeter Wave Radar	Radar frequency band /GHz	Angle /(^{\circ})	Distance /m	Transmission
Continental ARS 404-21 long range millimeter wave radar ^[32]	76-77	Azimuth: -9.0-+9.0 Elevation: 0-18	0.20-170	1\times CAN -high speed 500 kb\cdot s^{-1}
Delphi ESR millimeter wave radar ^[33]	7.7\times 10^{-8}	Azimuth: -10-+10 Elevation: 0-14	1-175	CAN
Continental ARS 408-21 ultra long range millimeter wave radar ^[34]	76-77	Azimuth: -9.0-+9.0 Elevation: 0-14	0.20-1200 (long distance)	1\times CAN-high speed 500 kb\cdot s^{-1}

毫米波雷达,其总带宽也不足 10 Mb/s,这样的带宽相比摄像头和激光雷达都很小。

2.4 传感器融合

以前的传感器拥有自己独立的处理单元,因此每一个传感器需要的传输带宽不会很大。随着智能网联汽车的进一步发展,传感器融合成为趋势,车辆要同时通过多个传感器的数据进行协同处理以提高对路况和周边环境的准确判断^[36],如表 6 所示。传感器融合可以简化系统复杂性以提升稳定性,在不同环境下可以提高识别精度,利用传感器之间优劣势互补还可以扩大时间和空间上的探测范围^[37]。

表 6 各传感器在不同情况下的对比

Table 6 Comparison of sensors in different situations

Factor	Camera	LiDAR	Radar	Fusion
Range	-	-	✓	✓
Resolution	✓	-	×	✓
Distance accuracy	-	✓	✓	✓
Color perception	✓	×	×	✓
Lane detection	✓	×	×	✓
Obstacle edge detection	✓	✓	×	✓
Weather condition	×	-	✓	✓

车载传感器的融合按照融合程度可以分为:低度融合(LLF)、中度融合(MLF)和高度融合(HLF)。在低度传感器融合中,传感器的原始数据直接进行融合,所有的数据均可以保持原有的精度。在高度传感器融合中,每一个传感器独立地对数据进行采集并处理,再进行融合^[38]。而中度融合则介于两者之间。三种融合方式各有所长,而非代与代之间的递进关系。

就通用传感器的常规数据采集处理而言,一般先

进行数据压缩后,再传输到中央处理器(CPU)进行数据处理,以有效减小传输时所需要的带宽。但是这一过程会带来时延问题,以使用帕尔制(PAL)的压缩视频格式为例,视频压缩会带来 100 ms 的延时^[39],这对于高速行驶的汽车是不可接受的。部分激光雷达采取对 3D 点云图数的二维处理来进行数据压缩,也存在一定的延时,是否适用于自动驾驶尚待研究。

所以,一般而言自动驾驶应用场景下车载传感器传输的数据是未经压缩的原始数据,这样就大大增加了带宽需求。如图 1 所示,在传感器融合的情况下,所有传感器均需要将未经处理、未经压缩的数据直接传输给 CPU 统一进行运算。相比传输由处理单元处理后的数据,此时传输带宽增加 5~8 倍。

2.5 小结

综合来看:激光雷达在穿透性、定向性方面表现优异,主要用于自动导航、障碍规避等方面;而毫米波雷达也在穿透性方面比较优异,且环境适应性强,不良天气环境下仍能正常工作。摄像头相比前两种雷达具有低成本优势,同时其成像能力可以通过人工智能辅助判断目标的性质,但是在远距离探测方面存在不足。

在带宽方面,多个高清摄像头的传输带宽在数十乃至数百 Gb/s,而多个激光雷达总传输带宽一般为 10~100 Mb/s,毫米波雷达所需带宽则不足 10 Mb/s。可以发现,车载网络传感器数据传输所需要的总带宽主要取决于摄像头数据传输所需的总带宽。此外,随着自动驾驶的发展和更清晰度的摄像头的逐步普及,车载网络传感器数据传输所需要的总带宽将超过 100 Gb/s。

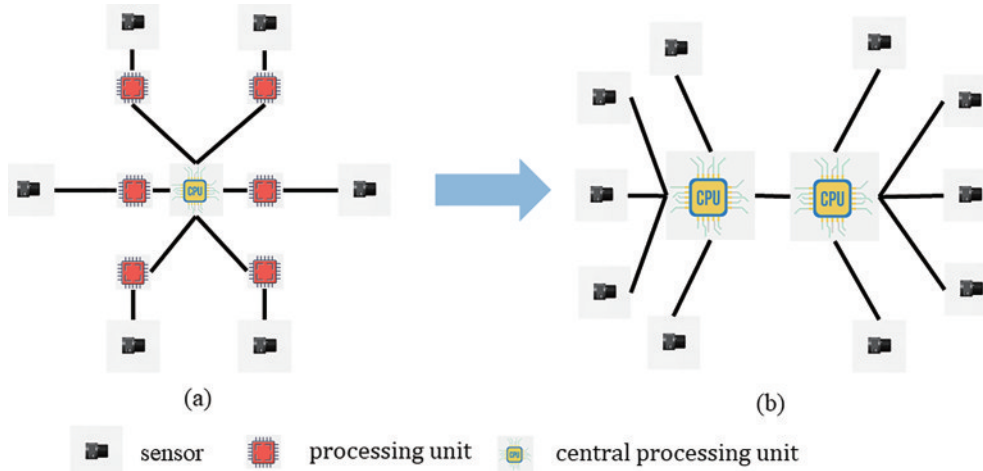


图 1 传感器融合演进。(a) 数据处理后传输; (b) 数据处理前传输^[40]

Fig. 1 Evolution of sensor fusion. (a) Transmission after data processing; (b) transmission before data processing^[40]

3 车载网络及其发展趋势

为了实现车辆内部传感器、处理器与执行器之间的信息交换,同时通过传输线路和设备的共享简化布线、降低成本、提高可靠性,车载网络随着汽车中传感器和电控单元数量的增加替代了独立的点对点通信。由此,传统网络架构被改变,总线协议也得到更新与发展。本节中,我们将详细介绍传统车载网络架构的演变,并着重关注几种常用总线通信协议及其传输带宽。

3.1 网络架构演变

当前车载传感器一般直接连接车载嵌入式系统——电子控制单元(ECU)。这些 ECU 都不是孤立的,为了连接这些 ECU,传统车载网络使用网关架构,由一个中央网关通过不同的总线管理着多个 ECU^[41],如图 2(a)所示。在传感器数量不多和自动驾驶级别不高的情况下,该架构能够满足当前对带宽和延时需求,并得以广泛地应用。

然而,随着汽车的智能化程度越来越高,ECU 的数量呈爆炸式增长,可达到 150 以上^[42]。在现有的架构中单个控制网关难以满足对各个 ECU 的控制和管

理。除此以外,传统架构中由于每一个 ECU 都要连接至网关上,导致车载线路重叠冗杂,增加了线缆重量和成本,且带来不稳定性。为此车载网络中引入了域架构,如图 2(b)所示。在域架构中,有着相似功能的 ECU 连接至同一个域控制器上,再经过总线连接至网关^[43]。在这种架构中,由于相同功能的传感器一般具有相近的带宽和时延要求,所以会具有更好地排布不同类型总线的优势。但是,如果有相同功能的设备在车辆内的布局比较分散,仍会带来布线重叠冗杂的问题,比如智能网联汽车的摄像头在车头车尾均有分布,则较难连接。

为解决这一问题,业界提出了新的区域架构,在未来很有可能取代域架构,如图 2(c)所示。区域架构中,按照车身的物理位置,将车辆分为多个区域,每一个区域都有自己的网关,每个网关在汇聚了多个 ECU 的数据后再与其他网关互联,保证了信息传递的可靠性^[44]。在区域架构中,不同区域网关之间的通信链路组成了车载骨干网,而同一区域内 ECU 和网关的通信链路则构成了车载接入网。虽然这种区域架构可以进一步降低处理冗余、减少线缆长度和数量进而降低相关成本,但是相较于过去的架构,区域架构中多个网关

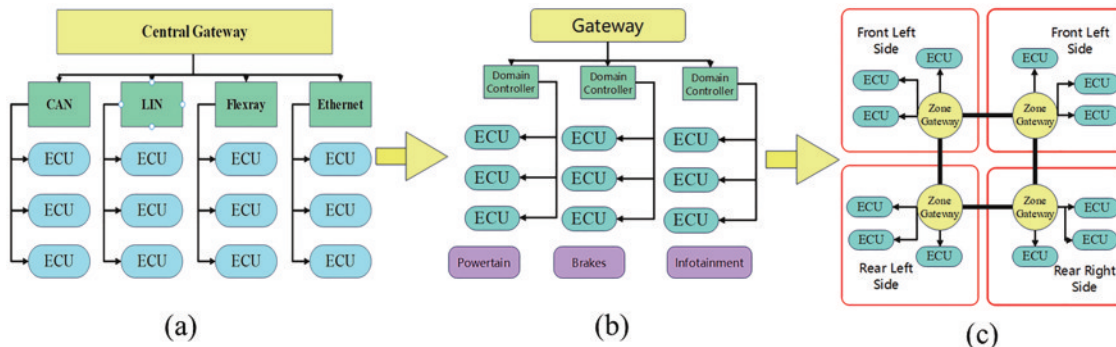


图 2 现有车载网络架构及其演进。(a)网关架构;(b)域架构;(c)区域架构^[44]

Fig. 2 Existing in-vehicle network architecture and its evolution. (a) Gateway architecture; (b) domain architecture; (c) zone architecture^[44]

之间的互连带宽将远大于原有两种架构中 ECU 和网关间的互连带宽。因此,区域架构对车载网络提出了更高的带宽需求。

3.2 传统车载总线技术

传统车载网络架构中,主要依赖低速电缆车载总线将各种低速传感器连接到 ECU。这些总线技术包括 CAN、本地互连网络(LIN)和 FlexRay 总线。

20 世纪 80 年代,Robert Bosch 公司在汽车工程协会上提出了 CAN 总线技术,之后得到了广泛应用。CAN 一般采取双绞线为传输介质,也可以使用光缆传输。CAN 目前仍是车载网络中最流行的车载网络总线,一般汽车的动力系统和底盘控制均由 CAN 总线组成。CAN 总线由两根线构成,通过高低电平差来传递信息,具有可靠性高、容易修复的特点。结构如图 3(a)所示,不同的 ECU 通过高低电平 CAN 驱动直接连接在 CAN 总线上,其传输速率约 125 kb/s~

1 Mb/s^[45]。

LIN 总线是 CAN 的子总线系统,它的目标定位于车身网络模块节点间的低速通信。作为 CAN 网络的补充,LIN 的引入可有效降低汽车制造成本。LIN 通信网络具备单主/多从方式、单线传输,且传输距离较短的特点。LIN 速率只有 10~125 kb/s,用于速率要求较低的两刮器等部件调节^[45]。

FlexRay 总线是一种混合触发式的总线,最大特点在于它将事件触发与时间触发两种方式相结合。如图 3(b)所示,事件依次进入总线,根据优先级不同进行传输,并且没有事件发生时,不会进行传输。因此,它不仅拥有时间触发时序清楚、各帧明确的优点,还具备事件触发节约带宽的特点^[46]。其传输速率明显高于过去在动力系统和底盘方面所用的数据总线,可达 10 Mb/s 以上。因此,当前 FlexRay 总线受到许多汽车厂商的青睐。

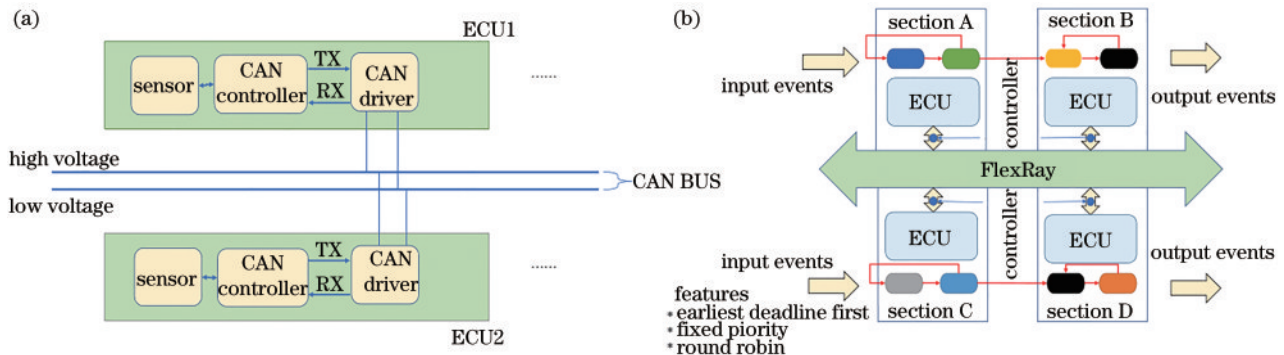


图 3 传统车载网络总线。(a) CAN 总线;(b) FlexRay 总线

Fig. 3 Traditional in-vehicle network bus. (a) CAN bus; (b) FlexRay bus

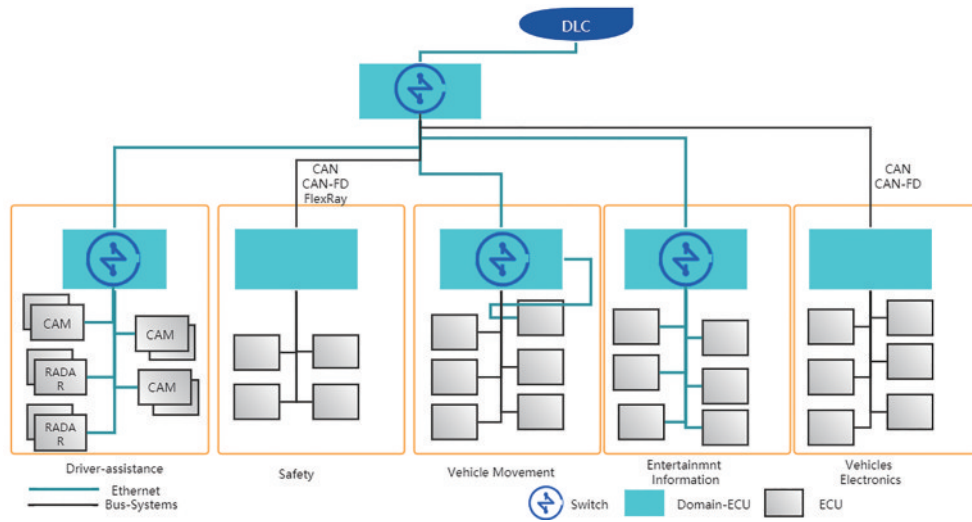
3.3 车载以太网

以太网在通信的发展中起着至关重要的作用。在车载网络领域,以太网也得到了广泛的应用^[47]。车载以太网是一种用以太网来连接车内电子单元的新型局域网技术,它主要有以下优点:1)为先进的驾驶功能和信息娱乐系统增加了通信带宽;2)将车内网络结构从分散的拓扑结构转变为层次结构;3)提高了未来车载网络架构的可拓展性和灵活性^[48]。但是在车载网络中目前还无法实现全以太网架构,现有的车载以太网架构是在一个混合架构中进行的,包括以太网核心和总线系统,还引入了具有更加丰富帧结构的 CAN-FD (CAN with Flexible Data-Rate) 和连接接头诊断器(DLC),如图 4 所示。其中,DLC 作为诊断接口用于故障的检查,中央网关通过不同的总线连接到各域控制器,负责对整个网络任务的调度。域控制器负责对车辆各功能的控制,对于信息量较大的控制单元,额外地加上域交换机方便整车之间数据的交流。车载以太网中时间敏感网络为其提供确定性的传输,保证了确定性的低延迟和抖动,为车载网络提供了安

全保障,使以太网在车载网络中成为一个良好的解决方案。

IEEE 在 2016 年批准了第一个车载以太网标准“100BASE-T1”,其基于博通公司的 BroadR-Reach 解决方案,通过一根双绞线在 MAC 接口上提供 100 Mb/s 的数据速率,但每个端口仅支持最长 15 m 的双绞线连接^[49]。虽然带宽和传输距离相对有限,但能够满足当前车载网络的混合架构中成本、线束重量和带宽等方面的要求^[50]。为了支持高级驾驶辅助系统(ADAS)的发展并进一步降低线束成本,IEEE 开始了 1000BASE-T1 标准的研究,可以用一对双绞线实现 1 Gb/s 的传输,支持 15~40 m 的传输距离^[51]。

车载以太网作为车载网络的发展方向,仍存在一些问题。一方面,电子连接会产生电磁噪声,而且电子线路对于噪声十分敏感,易受干扰。另一方面,电子线路需要汽车提供高低电平的电气隔离,增加布线的复杂度。此外,当前的车载以太网依旧不能满足未来车载网络超过 100 Gb/s 通信速率的要求。

图 4 车载以太网网络架构^[45]Fig. 4 Architecture of in-vehicle Ethernet network^[45]

3.4 小结

从网络架构来看,车载网络经历了从网关网络到域架构,再到区域架构的演变。从总线协议来看,车载 CAN 总线作为目前使用最为广泛的车载网络,一般用于汽车的动力系统和底盘,其传输速率 125 kb/s~1 Mb/s。LIN 总线作为 CAN 总线的子系统,速率只有 10~125 kb/s,用于速率要求较低的雨刮器等部件调节。而 FlexRay 总线可以将时间触发与事件触发相结合,其传输速率 10 Mb/s 以上。此外,为解决传统车载网络带宽不足的问题,车载以太网被提出用来连接车内各网关和电子单元,从而增加通信带宽、优化网络拓扑结构、提高网络的可拓展性和灵活性。但是从目前来看,这些传统车载网络的传输速率还远达不到自动驾驶对传输速率的需求,因此如何合理有效地将这些传统总线系统利用于智能驾驶,并研究符合带宽需求的新型车载网络,是智能汽车业下一步发展应当考虑的问题。

4 车载光纤传输行业现状及研究进展

随着智能网联汽车的发展,传统车载网络架构和总线技术无法满足带宽需求,新型车载网络及更高速的传输技术逐步成为越来越重要的研究课题。相比电缆,采用光纤连接具有带宽大、重量轻、电磁兼容性(EMC)好、电流隔离性强等优点。因此,针对更高传输速率车载网络的需求,光纤有望替代电缆成为主流传输介质。本节中,我们将详细介绍车载光纤传输技术的国内外行业现状和研究进展。

4.1 行业现状

随着车载视听娱乐的不断发展,CAN 总线等不能满足多媒体信息的大带宽车载传输。为了适应全球定位系统(GPS)导航、VCD 视频播放等功能,宝马公司率先研发了面向媒体系统的传送总线(MOST)。

MOST 网络一般使用低成本 LED 作为信号发射光源,塑料光纤作为传输介质,最高速率可达到 150 Mb/s^[52]。

2017 年 IEEE 在尽可能重用 MOST 里定义的物理层器件的前提下,定义了用于 1 Gb/s 传输的车载以太网标准 1000BASE-RHC^[53]。

2020 年 7 月,IEEE 成立了 802.3cz 工作组,在现有用于数据中心光互连场景的以太网光纤传输标准基础上,专门讨论从 2.5 Gb/s 到 50 Gb/s 的用于车载网络的光纤传输物理层规范,其中传输距离包含 15 m(含两个光纤连接器)和 40 m(含四个光纤连接器)两种规格^[54]。当前已商用的基于 850 nm 多模垂直腔面发射激光器(VCSEL)和 OM3/OM4 多模光纤(MMF)的数据中心光互连技术可以支持以上速率和传输距离。然而,由于车载网络相比数据中心的工作环境更为严酷(如 -40~+85 °C 的座舱环境温度、持续剧烈的振动、灰尘油污的污染等^[55]),对于其物理层器件的要求也更为苛刻,在数据中心光互连中广泛使用的高速传输技术还缺少在汽车工业中的验证。

为了构建面向车载网络的大容量光纤传输系统,大带宽的光纤传输链路是基础。由于车载网络中光纤的长度较短,其成本在整体成本中占比很低,光纤连接器成本占比更高,因此车载网络光纤要求大芯径/大数值孔径(NA),以便降低光耦合精度要求,采用公差较大的注塑模具的低成本光纤连接器。此外,适用于车载网络的光纤还需要满足可弯曲半径小、抗拉强度高、对振动不敏感、抗灰尘油污、耐高低温环境等要求。芯径 500 μm 或 1 mm 的聚甲基丙烯酸酯(PMMA)阶跃折射率(SI)-POF 已在车载网络(MOST, 802.3bv)中使用了 20 多年,满足上述要求^[56]。但是作为一种衰减大同时又受模式色散影响严重的光纤,PMMA SI-POF 的带宽 \times 距离积只能达到 200 MHz \times 50 m,限制

了其在高速车载光纤传输的应用。

另一方面, PMMA POF 传输窗口在可见光波段, 在 850 nm 的衰减(约 3 dB/m)远大于 650 nm 的衰减(约 0.15 dB/m), 因此通常需要选择 650 nm 的光源, 如谐振腔发光二极管(RC-LED)。RC-LED 的带宽通常小于 300 MHz。尽管 25 GBaud 的 850 nm 砷化铝镓(AIGaAs) VCSEL 受数据中心光互连市场的海量需求驱动早已规模商用, 但 650 nm 的磷化铟镓(InGaP) VCSEL 的制备难度高很多, 目前只能支持到不足 10 GBaud。因此, 缺少合适的高速低成本光源是 PMMA POF 应用于高速车载光纤传输面临的又一个巨大挑战。

4.2 研究进展

最近一二十年, 随着智能网联汽车日益增长的网络传输需求, 学术界更加重视车载光纤的应用性研究, 众多团队投入到车载光纤传输研究中。随着高速模数转换器(ADC)和数模转换器(DAC)的成熟和数字信号处理技术(DSP)在光纤通信领域的逐步普及, 通过 DSP 实现高阶调制格式并对低成本光电器件和光纤带来的信号损伤进行补偿, 从而在车载光纤上通过提高频谱效率实现高速传输的技术方向引起了广泛关注。

2011 年, 丹麦理工大学 Monroy 教授团队把无载波幅度相位调制(CAP)引入使用 PMMA POF 和 650 nm RC-LED 的传输系统, 实现了 300 Mb/s 50 m 传输, 频谱效率(SE)达到了 $4.6 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ^[57]。2012 年, 希腊学者将离散傅里叶变换扩频(DFT-S)离散多频调制(DMT)算法应用到 1 mm 芯径的 SI-POF 上, 实现了 1 Gb/s 的 100 m 传输^[58]。该团队还对比了 DFT-S DMT 和传统 DMT 以及 CAP 的性能, 初步研究认为 DFT-S DMT 比传统 DMT 性能更优, 和 CAP 性能相当, 但是 CAP 具有更低功耗^[59]。2013 年, 德国 Ziemann 团队使用 SI-POF 实现 26.75 Gb/s 1 m 的传输^[60]。他们还在 500 μm 芯径 PMMA 渐变折射率(GI)POF 上通过四电平脉冲幅度调制(PAM4)调制实现了 42 Gb/s 1 m 的传输^[61]。但这个传输距离无法满足实际车载网络应用中的需求。在[62]中, 即使引入了 PAM4 和 DMT 调制, 也只达到了在 25 m SI-POF 和 60 m GI-POF 上传输 10.7 Gb/s 的能力。2017 年比利时 Gimeno 等^[63]针对 50 m 传输距离开展了研究, 结果显示, 即使在接收机前端引入均衡器也只能实现 2.5 Gb/s 传输。

业界已商用的多芯(MC)POF 为高速车载光纤传输提供了另一种光纤选择的可能性。但是 2018 年西班牙学者通过对比 1 mm 芯径 PMMA 的两种 SI-POF 和两种 MC-POF 的传输性能, 证明了尽管 MC-POF 可以进一步提高光纤的可弯曲性, 但是传输性能要差于 SI-POF^[64]。2021 年以色列 Sadot 教授团队使用 15 m MC-POF, 即使引入空分复用和多输入多输出

(MIMO)算法也仅实现了 2.4 Gb/s 传输^[65]。

综上所述, 当前在 PMMA POF 上开展的传输研究无法满足未来自动驾驶车载网络的传输需求。能够适用于车载网络内严苛工作环境的高速光纤传输技术尚有待进一步研究。

4.3 小结

近年来使用光纤替代车载以太网中的电缆进行传输具有带宽大、重量轻、电磁兼容性好、电流隔离性强等优点, 适合用于车载网络中骨干互连线路。然而, 车载网络中严苛的工作环境使得在数据中心光互连中广泛使用的玻璃光纤传输技术无法直接使用。另一方面, 近年来的各种研究成果表明, 曾经普遍用于传统车载网络光纤传输的大芯径 PMMA 塑料光纤无法满足智能网联汽车 100 Gb/s 以上的传输带宽需求。为此, 相应关键技术的研究迫在眉睫。

5 结束语

本文面向新一代智能网联汽车, 通过对摄像头、激光雷达和毫米波雷达三种主流新型车载传感器的分析计算出带宽需求。通过对网络架构的演进趋势和传统车载网络中几种主流总线类型 CAN、LIN 和 FlexRay 的分析调研, 揭示了智能网联汽车对车载网络的带宽需求与传统车载网络带宽提供能力弱之间的矛盾。接下来, 本文调研了当前车载网络的研究热点, 车载以太网的最新研究成果和 MOST 总线, 指出使用光纤在车载网络中骨干互连链路替代电缆进行传输有望解决车载网络带宽瓶颈问题。车载网络中严苛的工作环境、大芯径 PMMA 塑料光纤有限的带宽 \times 距离积和 650 nm 波段光源有限的带宽给高速车载网络中的光纤传输提出了众多挑战, 目前尚无满足智能网联汽车车载网络带宽需求的车载光纤传输方案。未来我们的主要研究方向将着眼于在车载网络的工作环境下通过各种新型光纤通信技术解决车载网络带宽瓶颈问题。此外, 和车载网络一样, 近年来业界提出的车联网也是实现自动驾驶和未来智能交通系统的重要组成部分。作为一项新技术, 车联网的出现也面临各种技术挑战, 这些亟待突破的关键技术也将成为我们的研究内容, 从而最终满足智能网联汽车和智能交通系统这一新兴应用需求^[66]。

参 考 文 献

- [1] 中国信息通信研究院. 全球自动驾驶战略与政策观察[EB/OL]. (2022-01)[2022-01-15]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202201/P020220126549881872325.pdf>. CAICT. Global autonomous driving strategy and policy observation[EB/OL]. (2022-01) [2022-01-15]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202201/P020220126549881872325.pdf>.
- [2] U. S. Department of Transportation. Ensuring American

- leadership in automated vehicle technologies[EB/OL]. (2020-01)[2020-12-16]. <https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/docs/policy-initiatives/automated-vehicles/360956/ensuringamericanleadershipav4.pdf>.
- [3] U. S. Department of Transportation. National highway traffic safety administration. Preliminary statement of policy concerning automated vehicles[EB/OL]. [2021-12-20]. https://nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/Automated_Vehicles_Policy.pdf.
- [4] TESLA. Autopilot future of driving advanced sensor coverage[EB/OL]. [2021-12-20]. <https://www.tesla.com/autopilot>.
- [5] 彭育辉, 江铭, 马中原, 等. 汽车自动驾驶关键技术研究进展[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 691-703.
Peng Y H, Jiang M, Ma Z Y, et al. Review on development of key technology for autonomous vehicle [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2021, 49(5): 691-703.
- [6] Zhou Z F, Lee J, Berger M S, et al. Simulating TSN traffic scheduling and shaping for future automotive Ethernet[J]. Journal of Communications and Networks, 2021, 23(1): 53-62.
- [7] 崔明阳, 黄荷叶, 许庆, 等. 智能网联汽车架构、功能与应用关键技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(3): 493-508.
Cui M Y, Huang H Y, Xu Q, et al. Survey of intelligent and connected vehicle technologies: Architectures, functions and applications[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(3): 493-508.
- [8] Zhou S, Zhang G, Yi R, et al. Research on vehicle adaptive real-time positioning based on binocular vision [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2021, 14(4):47-59.
- [9] Liu S S, Tang J, Zhang Z, et al. Computer architectures for autonomous driving[J]. Computer, 2017, 50(8): 18-25.
- [10] 小鹏汽车. P7 XPILOT3.0 智能辅助驾驶系统参数配置手册 [EB/OL]. [2022-01-08]. <https://www.xiaopeng.com/p7/configuration.html#id-4>.
Xiaopeng. P7 XPILOT3.0 parameter configuration manual of intelligent assisted driving system[EB/OL]. [2022-01-08]. <https://www.xiaopeng.com/p7/configuration.html#id-4>.
- [11] 小鹏汽车. P5 系列 智能辅助驾驶系统参数配置手册 [EB/OL]. [2022-01-08]. <https://www.xiaopeng.com/p5/configuration.html#id-3>.
Xiaopeng. P5 series intelligent assistant driving system parameter configuration manual[EB/OL]. [2022-01-08]. <https://www.xiaopeng.com/p5/configuration.html#id-3>.
- [12] 蔚来公司. NIO ET7 摄像头详细配置表[EB/OL]. [2022-01-08]. <https://www.nio.cn/vehicle/configuration/ET7>.
NIO. NIO ET7 camera detailed configuration table[EB/OL]. [2022-01-08]. <https://www.nio.cn/vehicle/configuration/ET7>.
- [13] 蔚来公司. ES8 摄像头详细配置表[EB/OL]. [2022-01-08]. <https://www.nio.cn/vehicle/configuration/es8>.
NIO. Detailed configuration table of ES8 camera[EB/OL]. [2022-01-08]. <https://www.nio.cn/vehicle/configuration/es8>.
- [14] Lin Y C, Lian F L. Data reduction and bandwidth allocation for video-based network system[C]//2012 IEEE International Conference on Information and Automation, June 6-8, 2012, Shenyang, China. New York: IEEE Press, 2012: 116-121.
- [15] 熊兴隆, 王婕, 刘逵, 等. 多次散射影响的激光雷达斜程能见度反演方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(4): 0429001.
Xiong X L, Wang J, Liu K, et al. Lidar slant-range visibility retrieval method based on effect of multiple scattering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(4): 0429001.
- [16] Zamanakos G, Tsochatzidis L, Amanatiadis A, et al. A comprehensive survey of LIDAR-based 3D object detection methods with deep learning for autonomous driving[J]. Computers & Graphics, 2021, 99: 153-181.
- [17] 非凡汽车. R7 参数配置表[EB/OL]. [2022-01-09] <https://r.saicmotor.com/es33/>.
FEIFAN. R7 parameter configuration table[EB/OL]. [2022-01-09] <https://r.saicmotor.com/es33/>.
- [18] Luminar. Luminar iris specs automotive[EB/OL]. [2022-01-09]. <https://www.luminartech.com/products/>.
- [19] ARCFOX. 极狐 阿尔法 S 全新 HI 版参数表[EB/OL]. [2022-01-09]. <https://www.arcfox.com.cn/configuration.html?carType=hi>.
ARCFOX. Alpha S new HI version parameter table[EB/OL]. [2022-01-09]. <https://www.arcfox.com.cn/configuration.html?carType=hi>.
- [20] 华为. ICT 新视界[EB/OL]. [2022-01-09] https://e.huawei.com/cn/publications/cn/ict_insights.
HUAWEI. New horizons of ICT[EB/OL]. [2022-01-09] https://e.huawei.com/cn/publications/cn/ict_insights.
- [21] 蔚来汽车. ET7 详细配置表[EB/OL]. [2022-01-09]. <https://www.nio.cn/vehicle/configuration/ET7>.
NIO. ET7 detailed configuration table[EB/OL]. [2022-01-09]. <https://www.nio.cn/vehicle/configuration/ET7>.
- [22] Innovusion. Brief introduction of innovusion-Falcon[EB/OL]. [2022-01-10]. <https://www.innovusion.com/falcon>.
- [23] Robosense. 激光雷达产品手册[EB/OL]. [2022-01-10]. https://cdn.robosense.cn/20200723161607_95470.pdf.
Robosense. Lidar product manual[EB/OL]. [2022-01-10]. https://cdn.robosense.cn/20200723161607_95470.pdf.
- [24] Robosense. Product information[EB/OL]. [2022-01-10]. <https://www.robosense.cn/en/resources>.
- [25] Velodyne. Product guide[EB/OL]. [2022-01-10]. <https://velodynelidar.com/products/alpha-prime/>.
- [26] Balal N, Pinhasi G A, Pinhasi Y. Atmospheric and fog effects on ultra-wide band radar operating at extremely high frequencies[J]. Sensors, 2016, 16(5): 751.
- [27] Zhao P J, Lu C X, Wang J N, et al. Human tracking and identification through a millimeter wave radar[J]. Ad Hoc Networks, 2021, 116: 102475.

- [28] Li X, Tao X W, Zhu B, et al. Research on a simulation method of the millimeter wave radar virtual test environment for intelligent driving[J]. *Sensors*, 2020, 20(7): 1929.
- [29] 一汽奥迪. 奥迪 A8L 四季度产品手册[EB/OL]. [2022-01-10]. <https://www.audi.cn/zh/models/a/a8/a8l.html>. AUDI. AUDI A8L fourth quarter Brochure[EB/OL]. [2022-01-10]. <https://www.audi.cn/zh/models/a/a8/a8l.html>.
- [30] Mercedes-Benz. The new S-Class Cares for what matters[EB/OL]. [2022-1-10]. <https://www.mercedes-benz.com/en/vehicles/passenger-cars/s-class/>.
- [31] 宝马. 宝马 X 系列产品手册[EB/OL]. [2022-01-10]. <https://www.bmw.com.cn/zh/ssl/requests/rfi.html>. BMW. BMW X series product manual[EB/OL]. [2022-01-10]. <https://www.bmw.com.cn/zh/ssl/requests/rfi.html>.
- [32] Continental. Long range radar autonomous mobility datasheet of ARS 404-2[EB/OL]. [2022-01-10]. <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Autonomous-Mobility/Enablers/Radars/Long-Range-Radar>.
- [33] Delphi. Safety first for automated driving[EB/OL]. [2022-01-10] <https://www.apativ.com/docs/default-source/white-papers/safety-first-for-automated-driving-ativ-white-paper.pdf>.
- [34] Continental. Long range radar autonomous mobility datasheet of ARS 408-21[EB/OL]. [2022-01-10]. <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Autonomous-Mobility/Enablers/Radars>.
- [35] TEXAS Instruments. Datasheet of AWR1443 [EB/OL]. [2022-01-10] <https://www.ti.com/product/AWR1443>.
- [36] Ogle T L, Blair W D, Slocumb B J, et al. Assessment of hierarchical multi-sensor multi-target track fusion in the presence of large sensor biases[C]//2019 22th International Conference on Information Fusion (FUSION), July 2-5, 2019, Ottawa, ON, Canada. New York: IEEE Press, 2019.
- [37] Gogineni S. Multi-sensor fusion and sensor calibration for autonomous vehicles[J]. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2018, 7(7): 1073-1078.
- [38] Shahian Jahromi B, Tulabandhula T, Cetin S. Real-time hybrid multi-sensor fusion framework for perception in autonomous vehicles[J]. *Sensors*, 2019, 19(20): 4357.
- [39] Pantel L, Wolf L C. On the impact of delay on real-time multiplayer games[C]//NOSSDAV '02: Proceedings of the 12th international workshop on Network and operating systems support for digital audio and video, May 12-14, 2002, Miami Beach, Florida. New York: ACM Press, 2002: 23-29.
- [40] Yeong D J, Velasco-Hernandez G, Barry J, et al. Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: a review[J]. *Sensors*, 2021, 21(6): 2140.
- [41] Huang J, Zhao M L, Zhou Y D, et al. In-vehicle networking: protocols, challenges, and solutions[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(1): 92-98.
- [42] Gong Y J, Gong H L, Zhang C. Research on the development strategy of the internet of vehicles[C]// International Conference on Electronic Materials and Information Engineering (EMIE 2021), April 9-11 2021, Xi'an, China. London: Institute of Physics (IOP), 2021.
- [43] Rumez M, Grimm D, Kriesten R, et al. An overview of automotive service-oriented architectures and implications for security countermeasures[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 221852-221870.
- [44] Alparslan O, Arakawa S, Murata M. Next generation intra-vehicle backbone network architectures[C]//2021 IEEE 22nd International Conference on High Performance Switching and Routing, June 7-10, 2021, Paris, France. New York: IEEE Press, 2021.
- [45] 刘春晖, 刘光晓. 汽车车载网络技术详解[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2019: 100-203. Liu C H, Liu G X. Detailed explanation of vehicle network technology[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2019: 100-203.
- [46] Chen L H, Josef D, William L, et al. Use cases - IEEE P802.1DG[EB/OL]. (2019-09-12) [2022-01-08]. <https://grouper.ieee.org/groups/802/1/files/public/docs2019/dg-pannell-automotive-use-cases-0919-v04.pdf>.
- [47] IEEE. 802.3-2018-IEEE standard for ethernet[S]. New York: IEEE Press, 2018.
- [48] Yu T, Wang X. Topology verification enabled intrusion detection for in-vehicle CAN-FD networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(1): 227-230
- [49] IEEE. 802.3bw-2015-IEEE standard for Ethernet amendment 1: physical layer specifications and management parameters for 100 mb/s operation over a single balanced twisted pair cable (100BASE-T1) [S]. New York: IEEE Press, 2016: 1-88.
- [50] Porter D. 100BASE-T1 Ethernet: the evolution of automotive networking[EB/OL]. (2018) [2022-01-20]. <https://www.ti.com/lit/wp/szzy009/szzy009.pdf>.
- [51] IEEE. 802.3bp-2016-IEEE standard for ethernet amendment 4: physical layer specifications and management parameters for 1 Gb/s operation over a single twisted-pair copper cable[S]. New York: IEEE Press, 2016.
- [52] MOST Cooperation. MOST version 4V0 specification [EB/OL]. (2017-07) [2022-01-06]. <https://www.mostcooperation.com/specifications/>.
- [53] IEEE. 802.3bv. IEEE standard for ethernet amendment 9: physical layer specifications and management parameters for 1000 Mb/s operation over plastic optical fiber[S]. New York: IEEE Press, 2017.
- [54] IEEE. IEEE 802.3cz Task Force. Objectives OMEGA [EB/OL]. (2020-05) [2022-01-13] https://www.ieee802.org/3/cz/P802d3cz_objectives_01_0520.pdf.
- [55] Kibler T, Pofert S, Bock G, et al. Optical data buses for automotive applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(9): 2184-2199.
- [56] 孔德鹏, 张大明, 袁苑, 等. 塑料光纤的研究与应用进展[J]. *光子学报*, 2019, 48(11): 1148006. Kong D P, Zhang D M, Yuan Y, et al. Progress in research and applications of plastic optical fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(11): 1148006.
- [57] Wieckowski M, Jensen J B, Tafur Monroy I, et al.

- 300 Mbps transmission with 4.6 bit/s/Hz spectral efficiency over 50 m PMMA POF link using RC-LED and multilevel Carrierless Amplitude Phase modulation [C]//2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 6-10, 2011, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2011.
- [58] Karabetos S, Pikasis E, Nikas T, et al. DFT-spread DMT modulation for 1-Gb/s transmission rate over 100 m of 1-mm SI-POF[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(10): 836-838.
- [59] Pikasis E, Karabetos S, Nikas T, et al. Comparison of CAP and DFT-spread DMT for high speed transmission over 50m SI-POF[C]//2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), July 20-22, 2016, Prague, Czech Republic. New York: IEEE Press, 2016.
- [60] Loquai S, Winkler F, Kruglov R, et al. 26.75 Gb/s short-reach transmission over up to 15 m of large-core PMMA polymer optical fiber for next-generation 100 GbE[C]//2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), March 17-21, 2013, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2013.
- [61] Loquai S, Kruglov R, Winkler F, et al. 42-Gb/s transmission over large-core 1-mm PMMA graded-index polymer optical fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(6): 602-605.
- [62] Loquai S, Kruglov R, Schmauss B, et al. Comparison of modulation schemes for 10.7 Gb/s transmission over large-core 1 mm PMMA polymer optical fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(13): 2170-2176.
- [63] Gimeno C, Guerrero E, Sánchez-Azqueta C, et al. Multi-rate adaptive equalizer for transmission over up to 50-m SI-POF[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(7): 587-590.
- [64] López A, Ángeles Losada M, Mateo J, et al. Transmission performance of plastic optical fibers designed for avionics platforms[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(21): 5082-5088.
- [65] Yahav I, Sheffi N, Biofcic Y, et al. Multi-gigabit spatial-division multiplexing transmission over multicore plastic optical fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(8): 2296-2304.
- [66] 陈勇, 李加莉, 刘焕淋, 等. 车联网中室外可见光通信多属性切换算法[J]. 中国激光, 2021, 48(17): 1706004. Chen Y, Li J L, Liu H L, et al. Multiattribute switching algorithm for outdoor visible light communication in vehicle networking[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1706004.