doi:10. 13756/j. gtxyj. 2026. 250248.
光通信系统与网络技术
高宇洋,刘磊磊,韩嘉欣, 等. 面向商用车的车载光纤通信技术需求与挑战[J]. 光通信研究, 2026(5):40-50.
Gao Y, Liu L L, Han J X, et al. Demands and Challenges of In-Vehicle Optical Fiber Communication Technology for Commercial Vehicles[J]. Study on Optical Communications, 2026(5):40-50.

面向商用车的车载光纤通信技术需求与挑战

高宇洋[1],刘磊磊[1,2],韩嘉欣[1],倪有乐[1],刘 壮[2],李明辉[2],田俊涛[2],孙 京[1,2],周 娴[1]
(1. 北京科技大学 计算机与通信工程学院,北京 100083; 2. 北汽福田汽车股份有限公司,北京 102206)

摘要:商用车因其结构化运行场景、成本敏感性等特点,有望成为自动驾驶技术率先落地的领域。随着自动驾驶传感器对车载网络传输需求的快速增加,光纤通信技术由于高带宽、抗电磁干扰以及重量轻等优势有望成为下一代商用车车载网络解决方案。文章从商用车车载通信系统的带宽需求、车载光学总线以及车载以太网出发,分析了商用车车载光纤通信面临的振动和宽温的挑战以及可能的解决方案,最后讨论了实现商用车轻量化的光纤能信共传方案。

关键词:光纤通信;商用车;自动驾驶;传感器
中图分类号:TN913. 7 **文献标志码**:A

Demands and Challenges of In-vehicle Optical Fiber CommunicationTechnology for Commercial Vehicles

GAO Yuyang[1], LIU Leilei[1,2], HAN Jiaxin[1], NI Youle[1], LIU Zhuang[2], LI Minghui[2], TIAN Juntao[2], SUN Jing[1,2], ZHOU Xian[1]
(1. School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beiqi Foton Motor Co., Ltd., Beijing 102206, China)

Abstract: Commercial vehicles will be the first field to implement autonomous driving technology due to their structured operating scenarios and cost sensitivity. The transmission requirements of autonomous driving sensors for vehicle networks are increasing rapidly. Fiber-optic communication technology is expected to become the next-generation in-vehicle network of commercial vehicles due to its advantages such as high bandwidth, good electromagnetic compatibility and light weight. Starting from the bandwidth requirements of in-vehicle communication systems of commercial vehicle, the in-vehicle optical bus and in-vehicle Ethernet, this article analyzes the challenges of vibration and wide temperature range faced by the in-vehicle fiber-optic communications of commercial vehicle and possible solutions. Finally, this article discusses the energy-communication co-transmission solution over fiberto further achieve lightweight commercial vehicles.

Key words: optical fiber communication; commercial vehicles; autonomous driving; sensors

0 引 言

随着人工智能、传感器、高算力自动驾驶芯片和高精度地图等技术的快速发展,搭载高级驾驶辅助系统或自动驾驶功能的智能网联汽车的市场规模逐年扩大[1]。尽管乘用车受到的关注更多,但诸多因素表明自动驾驶技术更有可能在商用车上率先实现商用化。商用车指运送人员和货物的汽车,含所有的货车及 9 座以上的客车[2]。商用车多运行于高速公路、封闭园区、固定路线等结构化场景,此类场景交通参与者少、路线可预测、突发变量可控,显著降低了自动驾驶系统的感知与决策复杂度。例如,干线物流卡车可依赖高精度地图与预设路径实现长距离稳定控制[3];港口无人集卡则通过标准化流程与低速运行规避复杂动态环境带来的技术挑战[4]。而乘用车需应对城市道路中的行人、非机动车及复杂交叉路口,自动驾驶的实现难度更高。此外,商用车作为生产资料,其运营成本敏感度显著高于乘用车。在干线物流商用车上引入 L3(Level 3,L3)及以上级别自动驾驶技术能够大幅度降低驾驶员劳动强度,不仅能在双驾线路上减少 1 名驾驶员,还可以提升货运安全系数,有效降低疲劳驾驶引发的事故概率[5]。除降低人力成本外,自动驾驶商用车可实现更合理的路径规划和控制,达

收稿日期:2025-07-08; 修回日期:2025-08-20; 纸质出版日期:2026-10-10
基金项目:北京市自然科学基金资助项目(L247023)
作者简介:高宇洋(1989-),男,安徽庐江人。副教授,博士,主要研究方向为光纤通信系统与光电子器件。
刘磊磊(1982-),男,山东诸城人。硕士,主要研究方向为智能网联汽车信息技术。
作者贡献声明:高宇洋和刘磊磊贡献等同,为共同第一作者。
通信作者:周娴,教授。E-mail:zhouxian219@ustb. edu. cn
© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

到或超越优秀人类驾驶员驾驶水平，节约能耗并进一步降低运营成本。此外，自动驾驶危险品运输货车可大幅降低人员暴露风险。得益于上述优势，各国政府均在推动商用车自动驾驶试点。例如，日本修订《道路交通法》允许L4级别卡车在特定路段进行自动驾驶测试[6]；美国加州车管局提出允许轻型自动驾驶卡车进行公共道路测试[7]；中国《智能网联汽车技术路线图2.0》提出，货运和客运商用车辆将分别于2030年和2035年前后实现高速公路自动驾驶商业化应用[8]。

汽车自动驾驶需依赖高清摄像头、激光雷达和毫米波雷达等传感器探测感知周围环境。各类传感器功能与覆盖范围不同，首先将感知数据传输至自动驾驶处理单元进行行为决策与运动规划，处理单元再通过控制执行器将规划轨迹转化为车辆动作。此过程中，数据传输和交换通过车载网络与总线实现。但随着自动驾驶摄像头数量、分辨率提升以及各类传感器增多，车载网络干线铜缆在传输带宽、传输损耗、电磁干扰及线束重量方面的瓶颈，已阻碍自动驾驶技术进一步发展[9]。传统分布式车载网络架构已难以满足车载网络交换能力需求。对此，更先进的车内电子电气架构被提出应用，基于光纤作为传输介质的车载网络研究与试验也在加速推进[10]。相对于铜缆，光纤具备超大带宽、超低传输损耗、无电磁干扰，重量轻等优势。尽管光纤通信技术已在诸如数据中心光互联等应用场景取得了巨大的成功，但无法直接应用于车载通信网络。这是由于数据中心多为室内机房，温湿度稳定且便于人工维护。而车载网络需要适应大温跨、强振动以及尘土水汽等恶劣环境，且需在车辆使用寿命内持续稳定运行。目前，高速光纤通信技术在乘用车车载网络上的研究与应用已展开讨论并验证，但其应用于商用车却面临着更大的挑战。首先，货运类商用车并不优先考虑乘坐舒适性，因此在车辆的噪声、振动与声振粗糙度（Noise、Vibration、Harshness，NVH）设计方面弱于乘用车。同时，由于商用车车身更高且普遍搭载更强的动力系统，导致整车振动明显强于乘用车，对光纤通信链路中光电器件和光纤的耦合以及光纤连接器的抗振动能力构成极大挑战。其次，乘用车长度一般不超过6 m，商用车则普遍较长，一些巴士长度甚至超过30 m[11]。导致摄像头等传感器与处理器之间的连接需更长的光缆和更多的连接器，这无疑会引起更大的传输损伤。第三，商用车车身重量大，制动距离长，自动驾驶所需感知距离更远，要求前视摄像头分辨率更高、信息传输时延更低，因此对车载光纤传输速率与时延要求更为苛刻。最后，商用车的生产工具属性使其对成本高度敏感，车载光纤通信技术若不能有效控制整套方案的软硬件成本，将阻碍其在商用车上的应用。

本文分析了商用车车载通信带宽需求，回顾了车载光学总线和车载光学以太网的发展，指出光纤有望代替铜缆成为下一代车载网络的传输介质，讨论了振动和宽温对车载光纤通信系统的影响以及可能的解决方案，最后提出了一种可进一步实现商用车轻量化的能信共传方案。

1 商用车车载网络带宽需求

自动驾驶系统中，传感器是车辆感知周围环境的核心组件，为车辆提供实时准确的环境信息，是实现自动驾驶功能的关键基础[12]。乘用车车载网络带宽流量既有来自自动驾驶各类传感器产生的上行带宽需求，也有车内各处多媒体显示屏所需的下行传输带宽。而商用车对车载多媒体功能要求较低，一般仅配备一块显示屏，通信带宽需求以自动驾驶传感器上行通信为主。图1为自动驾驶货车搭载的传感器分布示意图，主要包含各类摄像头、激光雷达和毫米波雷达[13-15]。随着自动驾驶要求的提高，各类传感器数量与带宽需求快速增长。表1所示为几款主流商用车型所搭载的各类传感器数量。由于车载激光雷达和毫米波雷达自带信号处理模块，因此所需传输带宽远低于摄像头，现有车载总线带宽已能满足需求[16]。

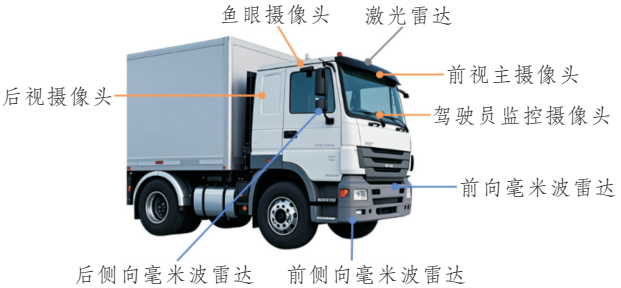


图1 商用车自动驾驶传感器分布示意图

Figure 1 Distribution diagram of autonomous driving sensors in commercial vehicle

摄像头通过光学传感器捕捉环境图像，功耗低且能够识别颜色和纹理，具有复杂场景中的目标分类能力，成为当前主流自动驾驶方案中最主要的信息来源[17]。摄像头的感知能力主要依赖于分辨率、色深和帧率这三个参数：分辨率影响图像的细节捕

捉能力，色深影响图像的色彩还原和明暗细节表现，帧率决定动态场景的捕捉流畅度。摄像头原始数据传输速率等于这三个参数的乘积。表 2 列出了不同像素数车载摄像头的主要参数值和总数据速率需求。其中 1 700 万和 800 万像素摄像头用于前视检测，200 万～300 万像素摄像头为鱼眼或后向摄像头。单枚索尼最新的 1 742 万像素 IMX735 摄像头传感器在色深 24 bit 以及帧率 45 fps 下，传输速率已经超过 10 Gbit/s。以福田欧曼银河 9 重卡为例，其搭载 3 个 800 万像素、7 个 200 万像素摄像头[13]，摄像头数据总传输速率超过 40 Gbit/s。与制动距离通常不超过 40 m 的乘用车相比，重卡的刹车距离显著增加。例如载重 20 t 的重卡在 100 km/h 速度下的安全刹车距离通常超过 200 m。此外，摄像头对光照敏感，夜间、隧道、大雾等弱光照环境下受影响较大，且许多大货车受道路法规限制仅能夜间通行。因此，商用车自动驾驶需要更远的识别距离，特殊路况条件下甚至需达千米级别，这一方面依赖更先进的激光雷达技术，另一方面需通过提升摄像头像素实现[18]。未来，商用车的自动驾驶有望率先搭载 1 700 万像素摄像头，这对车载通信系统的带宽提出了更高的要求。

表 1　部分商用车型传感器搭载数量[13-15]

Table 1　The number of sensors assembled by some commercial vehicles[13-15]

车型	摄像头	毫米波雷达	激光雷达
欧曼银河 9	10	5	1
江淮 K7+	8	7	1
东风天龙 GX	8	5	0

表 2　不同分辨率车载摄像头的主要参数

Table 2　Main parameters of in-vehicle cameras with different resolution

分辨率（百万像素）	色深/bit	帧率/fps	总速率/Gbit/s
17.42	24	45	18.82
8.30	24	40	8.00
2.90	24	60	4.25
1.70	24	60	2.50

目前，车载高速数据传输方案主要基于串行器/解串器（Serializer/Deserializer，SerDes）技术，其中千兆多媒体串行链路（Gigabit Multimedia Serial Links，GMSL）和平板显示器链路（Flat Panel Display Link，FPD-LINK）在车载视频传输领域应用广泛。GMSL3 最大传输速率为 12 Gbit/s，使用 50 Ω 同轴电缆时最大传输距离为 14 m，使用 100 Ω 屏蔽双绞线时仅 7 m[19]。在大尺寸商用车对更长传输距离、更高像素摄像头的双重需求下，未来基于双绞线的 SerDes 方案将面临瓶颈。此外，各类传感器的工作原理与物理特性不同，为确保感知的全面性和精确性，自动驾驶系统通常采用多传感器融合的方式实现[20]，但数据融合上传也会大幅增加车载网络主干链路的通信容量，进一步提升带宽需求。此外，当前商用车和乘用车所搭载的自动驾驶传感器数量相当，但商用车尺寸远大于乘用车，因此商用车上搭载的各传感器感知范围的重叠度较低[21]。为提高自动驾驶系统的精度，未来商用车搭载的自动驾驶传感器数量可能超过乘用车。

2　车载光学总线与车载以太网

1998 年，第一个车载光学总线——数字数据总线（Digital Data Bus，D2B）首次应用于奔驰汽车，传输介质为芯径 1 mm 的阶跃折射率聚甲基丙烯酸甲酯塑料光纤（Step-Index Plastic Optical Fiber，SI-POF），光源为 650 nm 红光 LED 光源，传输速率为 5.6 Mbit/s[22]。随后，采用相同传输介质和光源的 MOST 总线（Media Oriented Systems Transport，MOST）在车载多媒体系统中被广泛采用，为汽车的娱乐、导航等功能提供了有效的通信保障。MOST 总线采用环形拓扑结构，第三代 MOST 总线的数据传输速率可达 150 Mbit/s[23]。IEEE 于 2016 年发布了车载千兆以太网 IEEE 802.3bp 标准（1000BASE-T1），传输介质为单对双绞线铜缆[24]。次年 3 月，光学车载千兆以太网 IEEE 802.3bv 标准正式发布，沿用 SI-POF 作为传输介质，成为首个专为车载应用设计的光学以太网标准[25]。与对应的电方案 IEEE 802.3bp 标准相比，IEEE 802.3bv 同样支持 1 Gbit/s 的传输速率，且在短距离内通信性能更稳定、抗电磁干扰能力更强，为汽车内部高速短距离通信提供了更有效的解决方案。2023 年 4 月，IEEE 802.3cz 标准的发布进一步推动了车载光学以太网的发展[26]。该标准首次建议使用 980 nm 的垂直腔面发射激光器（Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser，VCSEL）作为光源，使用纤芯直径为 50 μm 的弯曲不敏感石英多模光纤（Multimode Fiber，MMF）OM3 作为传输介质。考虑到小客车、巴士和卡车等车辆尺寸差异，该标准规定车载光纤链路最大传输距离为 40 m（含 4 个光连接器）。与传统 SI-POF 相比，OM3 光纤纤芯直径缩

小 20 倍，工作波长更长，支持的模式数量显著减少。OM3 光纤的纤芯呈渐变折射率分布，模式群时延降低，模式色散得到了有效的控制，带宽距离积显著提升。即便在商用车 40 m 的传输场景下，OM3 光纤传输速率上限仍超 100 Gbit/s[27]。但石英光纤的机械性能弱于塑料光纤，需通过成缆时的加强来满足车规级的要求[28]。IEEE 802.3cz 规定了 2.5/5/10/25/50 Gbit/s 几种传输速率，其中 50 Gbit/s 使用四电平脉冲幅度调制（4-Level Pulse Amplitude Modulation，PAM4）调制格式，25 Gbit/s 及以下速率使用不归零编码（Non-return-to-zero Line Code，NRZ）。而基于屏蔽双绞线铜缆的车载以太网标准 IEEE 802.3ch 和 IEEE 802.3cy 最高支持 25 Gbit/s，且为 PAM4 调制格式，最远传输距离为 11 m，包含 2 个连接器[29-30]。可见，未来大尺寸商用车对更远信号传输距离、更大传输带宽的需求，基于单对双绞线铜缆的车载以太网已难以从物理层面满足，光学以太网方案优势更显著。

3 振动对商用车车载光纤通信的挑战

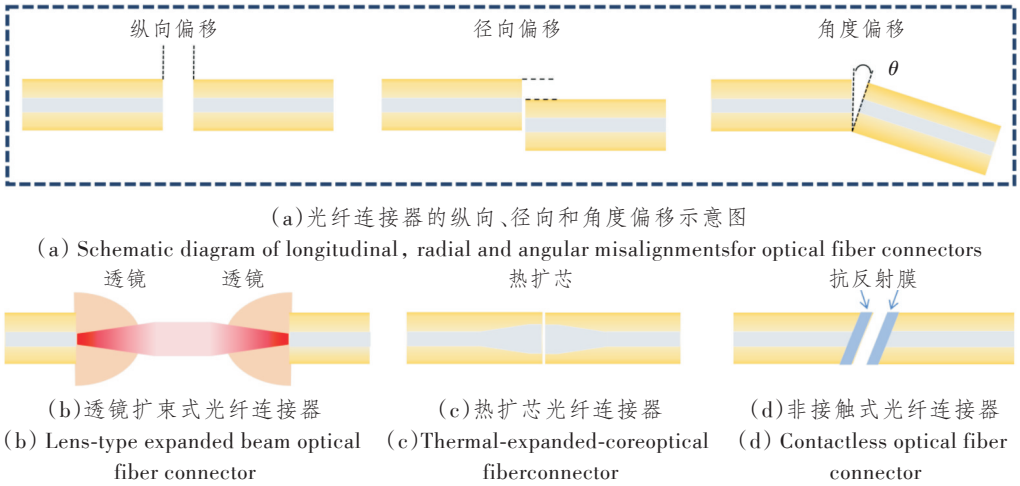
车载光纤通信系统中，振动不可避免。这也是数据中心光互联方案无法直接应用于车载光纤网络的主要原因之一。相对于发动机等动力系统引发的振动，更大的车身振动和冲击可能来自复杂路况及减速带。与乘用车相比，商用车在行驶过程中所承受的振动和冲击更为剧烈。一方面，货运类商用车主要功能是运输，并不优先考虑驾驶员乘坐舒适性，尤其是无人驾驶货车，车辆设计阶段基本不考虑 NVH。例如大货车的轮胎为满足重载需求一般设计为高刚性，路面冲击更易传递至车身。且大货车车身更高，振动传导至车身后振幅更大。另一方面，在矿山等野外环境作业的大货车，常行驶于碎石路、颠簸路等坑洼路面。上述多重因素共同加剧了商用车实际运行中的振动问题。因此，商用车车载光纤通信系统中的光电器件需满足更严格的车规级标准。对于车载光纤通信链路，振动会加剧光纤传输链路的各类损伤，包含连接器处引入的多路径干涉（Multi-path Interference，MPI）、多模光纤链路中的模式分配噪声以及随机的耦合损耗等[31-32]。其中，耦合损耗可能源于光纤与光电器件的耦合接口及光纤连接器等部件，会导致光接收机端的光功率产生随机波动，严重时会引发通信中断。为应对振动导致的光纤链路损伤，除了提高发射端功率预算外，还需要从多方面入手提升链路的防振能力。首先可以考虑提升商用车的 NVH 性能，需系统性地从振动源头、传递路径及接收端三个环节入手。源头控制包括优化发动机与动力总成的动平衡、燃烧过程以及轮胎的动平衡与均匀性，从根本上减少振动产生。第二步为传递路径阻断，可通过优化悬架系统、发动机变速箱悬置系统以及排气吊挂，有效隔离车辆底盘的振动向车身传递。接收端的抗振动则聚焦于应用强化结构提升车身强度并在车身钣金件敷设 NVH 阻尼材料，吸收并耗散振动能量。其次，车载光纤通信系统可采用高模量、高强度材料制作车载光缆，优化光缆结构并增加钢丝铠装等防护层以提升其抗振能力[33]。除优化车载光缆外，还可采用抗振动光纤连接器及提升光接收动态范围等方案，降低振动影响。

3.1 抗振动光纤连接器的设计

大型商用车中的通信链路距离长，且受车辆生产装配工序限制，无法使用整根光缆，因此车载光纤连接器不可或缺，对抗振动连接器的研究显得尤为重要。物理连接型光纤连接器因其结构简单、成本较低，被广泛应用于传统光纤通信系统，其设计如图 2 所示。振动引起的连接器损耗主要来自连接器两端的纵向、径向和角度偏移，如图 2(a)所示[34]。采用光斑扩束式光纤连接器可有效降低径向偏移带来的损耗。光斑扩束型连接器有两种实现工艺：第一种是在光纤连接两端各加装一个球形透镜，如图 2(b)所示[35]。该方法的优点是扩束倍数大，抗偏移能力更强。例如，韩国光云大学研究团队在单模光纤连接点使用无间隙球形透镜，成功将光束模场扩大 35 倍，在同样 0.5 dB 的耦合损耗下，扩束后的连接点可以容忍的光纤间径向偏移是扩束前的 48 倍[36]。但透镜扩束方案需在连接器中集成微透镜，增加了连接器结构的复杂度，成本也较高。第二种扩束连接器的实现方法是热扩芯法，如图 2(c)所示[37]。通过高温持续加热光纤端面，使纤芯中掺杂的锗离子扩散形成锥形，引导光束在传输过程中光斑逐渐扩大，在连接处具有一定的抗横向偏移能力。热扩芯光纤的加工工艺成熟且成本低，基于该工艺的光纤连接器可在不增加透镜的情况下实现光斑扩束。但相对于透镜扩束的方案，热扩芯法能够扩大光斑模场的倍数有限，因此还需要优化扩芯锥区的线型结构，并综合考虑多模光纤中不同模式的光斑特性。

虽然理论上光纤连接器的纵向偏移引入的损耗小于横向偏移，但空气隙的产生有可能导致尘土

和油污堵塞纤芯，更关键的是光束会在空气隙处产生反射从而增加 MPI 效应，影响系统性能。对此，宁波莱塔思公司发明了一种非接触式光纤连接器，如图 2(d)所示，通过在光纤连接器端面镀制抗反射膜且保持固定空气间隙，有效降低了连接器端面的反射，在保持低损耗的同时具备防尘抗污的性能[38]。该连接器在制作时需放入真空蒸镀箱进行镀膜，加工成本较高，目前主要应用于超高速光背板等场景。如何在保证可靠性的前提下降低成本，是未来车载光纤连接器的研究方向。



(a)光纤连接器的纵向、径向和角度偏移示意图
(a) Schematic diagram of longitudinal, radial and angular misalignmentsfor optical fiber connectors

(b)透镜扩束式光纤连接器
(b) Lens-type expanded beam optical fiber connector

(c)热扩芯光纤连接器
(c)Thermal-expanded-coreoptical fiberconnector

(d)非接触式光纤连接器
(d) Contactless optical fiber connector

图 2　光纤连接器设计

Figure 2　Optical fiber connector design

3.2　大动态范围光接收机

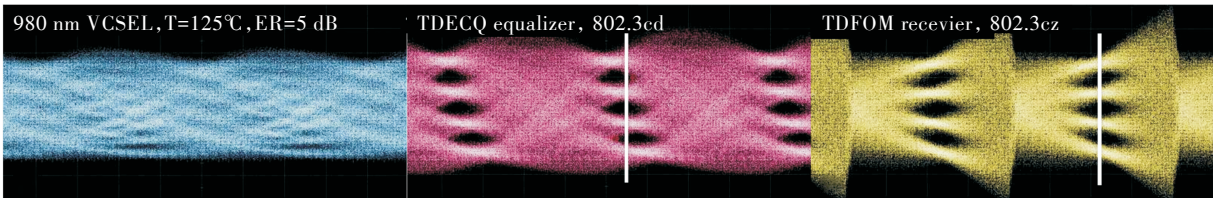
除采用抗振动光缆和连接器等方案，扩大光接收机动态范围也能降低振动带来的影响。实际上，大动态范围光接收机在无源光接入网(Passive Optical Network，PON)上行链路的光线路终端侧(Optical Line Terminal，OLT)已经被广泛使用[39-40]。在光接收机中，光电探测器先将接收到的光信号转换为电流输出，随后输出电流被跨阻放大器(Trans-Impedance Amplifier，TIA)转换成电压信号[41]。TIA 是光接收机中广泛使用的前置放大器。传统 TIA 的动态范围较小，当接收端信号光功率的波动超出接收机动态范围时，输出信号不再与输出信号成线性关系，导致信号波形失真，影响系统性能。因此，在 TIA 中加入快速自动增益控制(Automatic Gain Control，AGC)功能能扩大光接收机的动态范围，减小振动带来的功率波动影响。在接收机收到功率波动的信号时，AGC 模块会产生一个随输入信号强度而变化的电压或电流来控制增益，从而使输出保持恒定或在小范围内波动，确保了通信系统的稳定性[42]。灵敏度和过载光功率是衡量 AGC 功能的重要指标，二者差值即为光接收机的动态范围。不同接收功率下电路状态的建立时间，反映了光接收机自动增益控制的速度。AGC 功能的实现可以根据输入光功率动态调整反馈电阻从而直接调整 TIA 的增益[43]，也可以在固定增益的 TIA 之后，级联一个或多个可变增益放大器，通过精确控制其增益来调整信号的整体幅度[44]。目前，具备 AGC 功能的宽带光接收机仍较难实现。如何合理设计 AGC 的控制策略以适配车载环境下信号的动态范围，以及如何确保 AGC 建立时间与高速通信需求相匹配，仍需进一步研究探索。

4　宽温环境对车载 VCSEL 的挑战

不同于数据中心机房有良好的温湿度控制，车载环境下光纤通信系统需要适应更宽的工作温度范围。IEEE 802.3cz 标准定义了三种温度范围等级，分别为 Class 1：−40～125 ℃，Class 2：−40～105 ℃和 Class 3：−40～85 ℃，以适配汽车发动机舱、靠近车顶区域以及驾驶舱等不同区域的温度需求[26]。其中，高温对 VCSEL 的稳定性提出了严峻挑战。具体表现为温度升高时，VCSEL 阈值电流增大，输出功率下降，发射波长产生漂移，同时斜率效率及微分量子效率均有所降低[45]。温度升高还会导致 VCSEL 的调制带宽收缩，调制中心频率下降[46]。此外，高温会显著加速 VCSEL 的老化过程，导致故障率上升，使用寿命呈指数级衰减。因此，传统数据中心光互联采用的 850 nm VCSEL 在车载环境下不再适用。980 nm VCSEL 使用 InGaAs 量子阱构建，与基于 GaAs 量子阱的 850 nmVCSEL 相比，其在高温环境下具有更长的寿命和更高的可

靠性[47]。因此，IEEE802.3cz 标准建议将中心波长为 980 nm 的 VCSEL 作为车载光纤通信系统的光源。目前，西班牙 KDPOF 公司和国内三安光电均报道了宽温环境下 VCSEL 光模块的相关产品[47-48]。

除 VCSEL 自身性能退化外，高温对其传输高速调制信号时的非线性失真也有显著影响。在高速 PAM4 光信号传输场景中，眼图歪斜是一种典型的非线性损伤。眼图歪斜会导致接收端最佳采样时刻偏移，使通信系统的误码率上升。眼图歪斜的原因是 VCSEL 对驱动电流的非线性动态响应特性，具体表现为高电平信号激励下器件呈现更快的瞬态响应速度。从频域维度分析，这是因为驱动电流变化时调制带宽存在差异。数值仿真已验证，VCSEL 驱动电流越高，调制带宽越宽，对于信号的响应速度也越快，进而引发眼图歪斜问题[49]，且环境温度升高会进一步加剧这一损伤。研究表明，高温下 VCSEL 各符号电平间响应速度的不均衡性明显增强，使得 PAM4 光信号眼图歪斜这一非线性失真被显著放大[50]。因此，数据中心常用的发射机色散眼图闭合四相（Transmitter Dispersion and Eye Closure Quaternary，TDECQ）在宽温车载环境下已不再适用。为保证车载光互连系统的性能一致性和可靠性。IEEE Std 802.3cz 标准为 PAM4 光信号规定了一种名为发射机失真品质因数（Transmitter and Distortion Figure Of Merit，TDFOM）的新测试方法[26]。该方法包含一个带有信号滤波、定时恢复以及最小均方差前馈和判决反馈均衡器的参考接收器。图 3 展示了在 125 ℃、消光比（Extinction Ratio，ER）为 5 dB 条件下，使用 980 nm VCSEL 产生的高速 PAM4 光信号在不同接收端下的信号眼图对比，图 3(a)为原始眼图，此时眼睛完全闭合。图 3(b)为经 TDECQ 接收机处理后的眼图，眼睛能够张开但歪斜现象明显。图 3(c)为经 TDFOM 接收机处理后的眼图，在眼睛张开的同时眼图歪斜得到明显缓解。可见，TDFOM 接收机能够更准确地评估车载环境下光纤通信系统的性能。通过 TDFOM 测试，一方面可验证不同厂家的发射机是否符合标准要求，另一方面可对接收机灵敏度测试用参考发射机进行校准[51]。

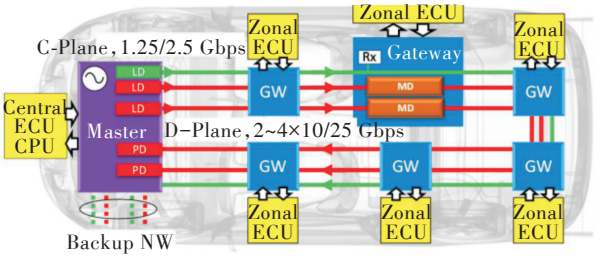


(a)原始 PAM4 眼图 (a) Raw PAM4 eye diagram　(b)经 TDECQ 接收机处理后的眼图 (b) Eye diagram after TDECQ receiver processing　(c)经 TDFOM 接收机处理后的眼图[51] (c) Eye diagram after TDFOM receiver processing[51]

图 3　980 nm VCSEL 在 125 ℃、消光比为 5 dB 时不同接收机下的 PAM4 信号眼图对比

Figure 3　Comparison of PAM4 eye diagrams at the receiver for 980 nm VCSEL at 125 ℃ with ER=5 dB and different processing effects

为使 VCSEL 在车载高温环境下稳定工作，可采用热电冷却器（Thermo-electric Coolers，TEC）控制温度。但若将包含 VCSEL 的光发射模块分散分布，则每个 VCSEL 均需单独配置 TEC，这会大幅增加成本且不利于安装与维护。针对该问题，一种解决方案是采用集中式温度管理，将 VCSEL 统一部署于车内温度相对稳定的中央控制区域，利用 TEC 进行集中温控[10,52]。图 4 为一种车载集中温控架构方案的示意图。中央控制区域外的通信节点采用分布式调制器，对来自集中温控区域的光源进行数据调制，这些分布式的调制器可采用对温度变化不敏感的硅光调制器。集中温控方案一方面确保了 VCSEL 的长期稳定运行，另一方面无需为每个分布点安装温控设备，从而大幅降低了成本。



注：Master 为主节点；GW/Gateway 为网关；C-Plane 为控制平面；D-Plane 为数据平面；Central ECU CPU 为中央级电子控制单元的核心处理器；Zonal ECU 为区域电子控制单元；MD 为调制与检测设备；LD 为激光二极管；PD 为电二极管；Backup NW 为备份网络

图 4　车载光纤通信系统集中温控示意图[52]

Figure 4　Schematic diagram of centralized temperature-control in-vehicle optical fiber communication system[52]

综上，车载光纤通信系统发射端采用 InGaAs 量子阱构建的 980 nm 的 VCSEL，接收端采用具有非线性损伤补偿功能的 TDFOM 接收机，在系统架构层面使用集中温控方案，可以有效降低宽温环境带来的影响，提高车载光纤通信系统的稳定性。

5　商用车轻量化要求下的能信共传

商用车的轻量化直接关系到营运公司的收益，有助于降低行驶过程中的燃油消耗，提高收益并增加续航里程[53]。采用先进的轻量化车身材料是目前行业发展的主要方向。而使用光纤替代传统铜缆也是一种极具潜力的整车轻量化方案。使用光纤不仅能够大幅降低车载线束重量，还能够避免车内的电磁干扰。一辆现代汽车中的铜缆总长度可达 3 km，总重量可达 60～100 kg。常用的 24 根以下光纤组成的光缆的重量为 11 kg/km。若将车内铜缆用光缆代替，可实现总线束质量减重约 50%[54]。

自动驾驶技术的快速发展，促使车载传感器数量大幅增加，这些传感器的正常运行不仅依赖高速数据传输，还需稳定的电力供应。尽管光纤能够替代传统铜缆进行信号传输，提升带宽并降低重量，但车载系统仍需要大量电缆用于供电，导致线束复杂度上升，影响整体轻量化效果。为进一步优化车内线缆设计、减少线束重量，同时提升系统的集成度和可靠性，光纤传能（Power over Fiber，PoF）技术成为一种创新解决方案[55]。该技术利用光纤同时传输信号与能量，通过光电转换方式为分布在车身各处的传感器提供电能，从而减少独立供电电缆的使用。

为实现车载传感器的高效供电与信息传输，本文设计了一种基于能信共传的车载传感器供电与信息传输系统，其结构如图 5 所示。该系统在车载控制中心附近配置高功率激光器作为能量光源，激光器输出的能量光通过能信共传光缆中的传能光纤进行传输。相较于传统单模光纤，车辆中使用的多模光纤芯径更大，更利于能量传输，可满足车载设备的功率需求。在车载传感器端，光伏电池模块负责将传输来的能量光进行光电转换，并由能量管理单元存储电能，并对电能进行稳压和调控，使其适配各类传感器的供电需求，从而为分布在车身各处的传感器提供稳定的电源。此外，考虑到传感器不仅需要上传采集到的信号，还需接收来自控制中心的指令，能量管理单元同时为信号收发单元供电，确保系统的正常通信。信号传输方面，控制中心与传感器端之间的数据交互由信号收发单元完成，通信信号通过能信共传光缆中的传信光纤进行高速传输。上述方案不仅降低了车载线缆总重量，同时也有效减少了电磁干扰对信号的影响，提升了通信稳定性和可靠性。

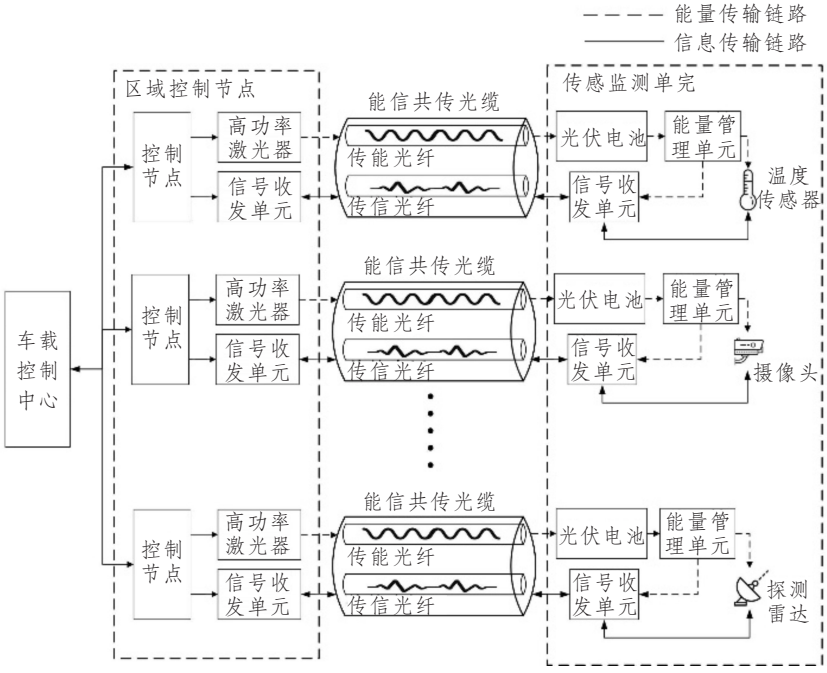


图 5　一种基于光纤能信共传的车载传感器供电与信息传输系统示意图

Figure 5　Schematic diagram of afiber-based power and data co-transmission system for vehicle sensors

6 结束语

自动驾驶技术在商用车领域的加速落地，使得车载通信系统面临带宽激增、环境严苛及轻量化等核心技术挑战。光纤有望替代铜缆，成为下一代车载网络的物理传输介质。本文首先分析了当前以及未来商用车自动驾驶对车载网络传输带宽的需求，随后回顾了车载光学总线和车载以太网的标准进展，接着分析了振动和宽温环境对车载光纤通信器件与系统的影响，提出可以采用抗振动光纤连接器结合 AGC 技术降低振动带来的影响；针对高温对 VCSEL 带来的不利影响，分别分析了使用 980nm VCSEL 的优势以及使用 TDFOM 替代 TDECQ 衡量 PAM4 光信号的原因，并介绍了集中式温控方案可以在保证系统性能的同时大大降低温控成本。进一步针对整车轻量化的需求，设计了一种能信共传系统，通过多模光纤同时传输能量与数据，能够实现整车线束重量的减少。本文研究结果表明，车载光纤通信技术可有效支撑商用车自动驾驶发展，未来需重点突破新型车载光纤网络架构，实现抗振动连接器成本优化、宽温 VCSEL 可靠性提升等方面的技术创新，最终实现车载光纤网络在商用车上的规模化应用。

参考文献：

[1] 郝文丽. L3自动驾驶制度规范即将启用，2025会成为L3商用元年吗？[EB/OL]. (2025-03-11)[2025-04-10]. http://www. cnautonews. com/chengyongcar/2025/03/11/detail_20250311372433. html.
Hao W L. Will 2025 Become the First Year of L3 Commercialization as L3 Autonomous Driving Regulations are about to be Implemented? [EB/OL]. (2025-03-11)[2025-04-10]. http://www. cnautonews. com/chengyongcar/2025/03/11/detail_20250311372433. html.

[2] GB/T 3730. 1-2022 汽车、挂车及汽车列车的术语和定义 第1部分：类型[S]. 北京：中国标准出版社，2022.
GB/T 3730. 1-2022 Terms and Definitions of Motor Vehicles, Trailers and Combination Vehicles—Part 1: Types[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.

[3] 创业邦. 2022年中国商用车自动驾驶产业发展报告[EB/OL]. (2022-09-14)[2025-04-10]. https://cdn. eetrend. com/files/2022-09/% E5%8D% 9A% E5%A E% A2/100564214-271735-2022nian_shang_yong_che_ zi_dong _jia_shi_chan_ ye_fa_zhan_bao_gao_. pdf.
CYZONE. 2022 China's Commercial Vehicle Autonomous Driving Industry Development Report[EB/OL]. (2022-09-14) [2025-04-10]. https://cdn. eetrend. com/files/2022-09/% E5%8D% 9A% E5%A E% A2/100564214-271735-2022nian_shang_yong_che_zi_dong _jia_shi_chan_ ye_fa_zhan_bao_gao_. pdf.

[4] 沙利文公司. 全球港口无人驾驶行业独立市场研究[EB/OL]. (2024-07-04)[2025-04-10]. https://img. frostchina. com/attachment/17199360/sTwW2UEi44H6FjsB31E8tc. pdf.
Frost & Sullivan. Independent Market Research on the Global Port Unmanned Driving Industry [EB/OL]. (2024-07-04) [2025-04-10]. https://img. frostchina. com/attachment/17199360/sTwW2UEi44H6FjsB31E8tc. pdf.

[5] 赢彻科技. 自动驾驶卡车量产白皮书[EB/OL]. (2022-09-01)[2025-04-08]. http://whitepaper. inceptio. cn/.
Inceptio. White Paper on Mass Production of Autonomous Trucks[EB/OL]. (2022-09-01) [2025-04-08]. http://whitepaper. inceptio. cn/.

[6] 大谷达也. 修订版《道路交通法》实施，“L4”级自动驾驶车辆解禁[EB/OL]. (2023-09-07)[2025-04-10].
ŌTANI Tatsuya. Implementation of the Revised Road Traffic Act, L4-Level Autonomous Driving Vehicles Unlocked [EB/OL]. (2023-09-07) [2025-04-10]. https://www. nippon. com/cn/in-depth/d00917/.

[7] 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)[2025-04-10]. https://www. caict. ac. cn/kxyj/qwfb/ztbg/202201/P020220126549881872325. pdf.
CAICT. Global Autonomous Driving Strategy and Policy Observation [EB/OL]. (2022-01) [2025-04-10]. https://www. caict. ac. cn/kxyj/qwfb/ztbg/202201/P020220126549881872325. pdf.

[8] 李克强. 智能网联汽车技术路线图2. 0[R]. 北京：中国智能网联汽车产业创新联盟2020.
Li K Q. Intelligentand Connected Vehicle Technology Roadmap 2. 0[R]. Beijing: China Industry Innovation Alliance for Intelligent and Connected Vehicles, 2020.

[9] Navale V, Williams K, Lagospiris A, et al. (R)evolution of E/E Architectures[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems, 2015, 8(2): 282–288.

[10] Liang Q, Lai X H, Li Z H, et al. Optical Communications in Autonomous Driving Vehicles: Requirements, Challenges, and Opportunities [J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(4): 1690–1699.

[11] Fraunhofer IVI. Fraunhofer IVI AutoTram[EB/OL].

(2021-09-14) [2025-04-10]. https://www.autotram.info/en.html.

[12] 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.

[13] 福田汽车集团. 欧曼银河9[EB/OL]. (2024-08-28) [2025-04-08]. https://www.aumantruck.com/wap/chexingxq/14.html.
FOTON. AUMAN GALAXY 9[EB/OL]. (2024-08-28)[2025-04-08]. https://www.aumantruck.com/wap/chexingxq/14.html.

[14] 江淮重卡. 跨越K7 4×2 [EB/OL]. (2023-02-13) [2025-04-08]. https://jacgallop.jac.com.cn/kyK74%C3%972/.
JAC GROUP. GALLOP K7 4×2[EB/OL]. (2023-02-13) [2025-04-08]. https://jacgallop.jac.com.cn/kyK74%C3%972/.

[15] 东风商用车. 东风商用车产品展示[EB/OL]. (2024-10-15) [2025-04-08]. http://www.dfcv.com.cn/Product.aspx.
DONGFENG TRUCKS. Dongfeng Commercial Vehicle Product Display [EB/OL]. (2024-10-15) [2025-04-08]. http://www.dfcv.com.cn/Product.aspx.

[16] Texas Instruments. TI mmWave Radar Sensor 硬件外设设计参考 [EB/OL]. (2025-01-25) [2025-04-08]. https://www.ti.com.cn/cn/lit/an/zhcaas0/zhcaas0.pdf?ts=1696839228965&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com.cn%252Fproduct%252Fcn%252FAWR1642#page=9&zoom=100,84,681.
Texas Instruments. Hardware Peripheral Design Reference for TI mmWave Radar Sensors [EB/OL]. (2025-01-25) [2025-04-08]. https://www.ti.com.cn/cn/lit/an/zhcaas0/zhcaas0.pdf?ts=1696839228965&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com.cn%252Fproduct%252Fcn%252FAWR1642#page=9&zoom=100,84,681.

[17] Pidurkar A, Sadakale R, Prakash A K. Monocular Camera based Computer Vision System for Cost Effective Autonomous Vehicle [C]// 2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). Kanpur, India: IEEE, 2019: 1–5.

[18] Roriz R, Cabral J, Gomes T. Automotive LiDAR Technology: a Survey[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(7): 6282–6297.

[19] Analog Devices. MAX96792A Data Sheet [EB/OL]. (2019-10-14) [2025-07-03]. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max96792a.pdf.

[20] Kocić J, Jovičić N, Drndarević V. Sensors and Sensor Fusion in Autonomous Vehicles[C]// 2018 26th Telecommunications Forum (TELFOR). Belgrade, Serbia: IEEE, 2018: 420–425.

[21] Gupta S, Snigdh I. Chapter 19-Multi-sensor Fusion in Autonomous Heavy vehicles [M]//Krishnamurthi R, Kumar A, Gill S S. Intelligent Data-Centric Systems: Autonomous and Connected Heavy Vehicle Technology. Academic Press, 2022: 375–389.

[22] Seidl D, Merget P, Schneider J, et al. Application of POFs in Data Links of Mobile Systems[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Polymer Optical Fiber. Berlin, Germany: IEEE, 1998: 205–211.

[23] Sun Z, Qin G, Dong J N, et al. Design of on-vehicle Radio Node based on OS81050 in MOST Network [C]// 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, Changchun, China: IEEE, 2010: 222–224.

[24] IEEE. 802.3bp. 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.

[25] 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.

[26] IEEE. 802.3cz. IEEE Standard for Ethernet Amendment 7: Physical Layer Specifications and Management Parameters for Multi-Gigabit Glass Optical Fiber Automotive Ethernet [S]. New York: IEEE Press, 2023.

[27] Motaghiannezam S M R, Kocot C. 104 Gbps PAM4 Transmission over OM3 and OM4 Fibers using 850 and 880 nm VCSELs[C]//2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). CA, USA: IEEE, 2016: 1–2.

[28] 长飞光纤光缆股份有限公司. 弯曲不敏感单模光纤(BI-SMF) [EB/OL]. (2021-03-09) [2025-04-08]. https://www.yofc.com/view/2139.html.
YOFC. Bending-insensitive Single-mode Optical Fiber (BI-SMF) [EB/OL]. (2021-03-09) [2025-04-08]. https://www.yofc.com/view/2139.html.

[29] IEEE. 802.3ch. IEEE Standard for Ethernet—Amendment 8: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 2.5 Gb/s, 5 Gb/s, and 10 Gb/s Automotive Electrical Ethernet [S]. New York:

IEEE Press, 2020.

[30] IEEE. 802.3cy. IEEE Standard for Ethernet Amendment 8: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 25 Gb/s-Electrical Automotive Ethernet [S]. New York: IEEE Press, 2023.

[31] Cui W, Huo J, Zhu J, et al. Machine Learning-Assisted Mitigation of Optical Multipath Interference in PAM4 IM-DD Transmission Systems[J]. Photonics, 2025, 12(4): 310.

[32] Li S, Nezami M S, Liboiron-Ladouceur O. Mitigation of Mode Partition Noise in VCSEL-MMF Links by Optimizing Launch Conditions [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(23): 1313–1316.

[33] 陈兰英, 周晓琴. 关于220 kV线路ADSS光缆防振与耐电腐蚀的解决建议[J]. 现代传输, 2006 (4): 25–26.
Chen L Y, Zhou X Q. Suggestions on Vibration Prevention and Electric Corrosion Resistance of ADSS Optical Cable for 220 kV Transmission Lines[J]. Modern Transmission, 2006(4): 25–26.

[34] 何青林. 光纤热扩芯与连接技术的研究及应用[D]. 杭州:浙江大学, 2021.
He Q L. Research and Application of Fiber Optic Thermal Expansion and Connection Technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.

[35] Baker J C, Payne D N. Expanded-Beam Connector Design Study [J]. Applied Optics, 1981, 20(16): 2861–2867.

[36] Lee Y G, Park C H, Back S W, et al. Alignment Tolerant Expanded Beam Connector based on a Gapless Fiber-Lens Interface [J]. Applied optics, 2016, 55(2): 341–344.

[37] Presby H M, Benner A, Amitay N. Research on an Expanded Beam Single-mode Fiber-optic Connector [J]. Applied optics, 1988, 27(15): 3121–3123.

[38] Jian B. The Non-contact Connector: A New Category of Optical Fiber Connector [C]// 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2015: 1–3.

[39] Bi X J, Gu Z, Xu Q F. Analysis and Design of Ultra-Large Dynamic Range CMOS Transimpedance Amplifier with Automatically-Controlled Multi-Current-Bleeding Paths [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2019, 66(9): 3266–3278.

[40] Le Q, Lee S G, Oh T H, et al. A Burst-Mode Receiver for 1.25-Gb/s Ethernet PON with AGC and Internally Created Reset Signal [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2004, 39(12): 2379–2388.

[41] Deng S, Cleary E, McAuliffe M A, et al. Design of an Auto-Gain Control Transimpedance Amplifier for Optical Sensing Applications [C]// 2016 27th Irish Signals and Systems Conference (ISSC). Londonderry, Northern Ireland: IEEE, 2016: 1–5.

[42] 卢霄. 对自动增益控制电路动态性能的研究[J]. 电子制作, 2024, 32(15): 105–109.
Lu X. Research on Dynamic Performance of Automatic Gain Control Circuits[J]. Electronic Production, 2024, 32(15): 105–109.

[43] Ikeda H, Ohshima T, Tsunotani M, et al. An Auto-Gain Control Transimpedance Amplifier with Low Noise And Wide Input Dynamic Range for 10-Gb/s Optical Communication Systems[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2002, 36(9): 1303–1308.

[44] Effenberger F J, Zeng H, Shen A, et al. Burst-mode Error Distribution and Mitigation in DSP-assisted High-speed PONs[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 38(4): 754–760.

[45] TJasim F Z, Omar K, Hassan Z. Temperature Effect on VCSEL Output Performance[J]. J. Optoelectron. Adv. Mater, 2009, 3: 1136–1138.

[46] Peng C Y, Tsai C T, Wang H Y, et al. High-temperature Insensitivity of 50-Gb/s 16-QAM-DMT Transmission by using the Temperature-Compensated Vertical-cavity Surface-emitting lasers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(16): 3332–3343.

[47] Pérez-Aranda R, Pankert J. Optical Neurons to Interconnect Sensors and Artificial Brains in Autonomous Vehicles: Fiber Optics Connectivity based on Long-wavelength VCSELs and Fully-integrated and Adaptive Electronics [J]. PhotonicsViews, 2024, 21(1): 39–43.

[48] 三安光电. 三安光电发布自主品牌“San'an Semiconductor”并亮相慕尼黑上海电子展 [EB/OL]. (2024-07-09)[2025-04-15]. https://www.sanan-e.com/news-45.
Sanan Optoelectronics. Sanan Optoelectronics Launches Its Own Brand “San'an Semiconductor” and Debuts at Electronica China [EB/OL]. (2024-07-09)[2025-04-15]. https://www.sanan-e.com/news-45.

[49] Mena P V, Morikuni J J, Kang S M, et al. A Simple Rate-equation-based Thermal VCSEL Model [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(5): 865.

[50] You Y, Zhang W, Sun L, et al. Time Skewing and Amplitude Nonlinearity Mitigation by Feedback Equalization for 56 Gbps VCSEL-based PAM-4 links[J].

Optics Communications, 2018, 410: 909–915.

[51] Pérez-Aranda R. KD7251: Automotive Optical Multi-protocol Transceiver[EB/OL]. (2024-09-25) [2025-07-07]. https://www.ecocexhibition.com/wp-content/uploads/Ruben_Perez-Aranda_ECOC2024_ProdctFocus_v1.2_compressed-1.pdf.

[52] 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]// 2022 27th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2022 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC). Toyama, Japan:IEEE, 2022: 1–3.

[53] 王晓龙,冯世荣.商用车轻量化技术综述[J].汽车实用技术,2025,50(01):136–141.

Wang X L, Feng S R. A Review of Lightweight Technologies for Commercial Vehicles[J]. Practical Automotive Technology, 2025, 50(01): 136–141.

[54] Kraus D,Leitgeb E,Plank T, et al. Replacement of the Controller Area Network (CAN) Protocol for Future Automotive Bus System Solutions by Substitution via Optical Networks[C]// 2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Trento, Italy: IEEE, 2016: 1–8.

[55] Guo H, Li Y, Guo Y, et al. A Monitoring System based on Power-Over-Fiber for Electromagnetically Confined Spaces [C]// 2024 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC). Beijing, China: IEEE, 2024:1–3.