

引用本文:迟楠,胡卓然,徐增熠,等.高速可见光通信关键技术综述[J].光通信技术,2026,50(4):9-15.

高速可见光通信关键技术综述

迟楠[†],胡卓然[†],徐增熠,戴领航,关苏宁,易子路

(复旦大学 未来信息创新学院,上海 200438)

摘要:为满足数据中心互连和高性能计算对高速、低时延、大容量传输的需求,综述了高速可见光通信(VLC)系统中发射器件、接收器件及编码调制技术的研究进展,并介绍一种基于多波长激光阵列的波分复用(WDM)可见光互连样机。该样机采用比特功率加载与神经网络后均衡技术,实现500 Gbit/s传输速率,40个波长通道误码率(BER)均低于7%硬判决前向纠错阈值。相关研究表明,高速发射器件、高带宽接收器件和先进编码调制技术的协同优化,是推动VLC向大容量光互连应用发展的关键路径。

关键词:可见光通信;光互连;通信器件;编码调制

中图分类号:TN929 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)04-0009-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.04.002

Review of key technologies for high-speed visible light communication

CHI Nan[†], HU Zhuoran[†], XU Zengyi, DAI Linghang, GUAN Suning, YI Zilu

(College of Future Information Technology, Fudan University, Shanghai 200438, China)

Abstract: To meet the demands for high-speed, low-latency, and large-capacity transmission in data center interconnects and high-performance computing, this paper reviews the research progress on transmitter devices, receiver devices, and coding and modulation technologies in high-speed visible light communication(VLC) systems, and introduces a wavelength-division multiplexing(WDM) visible-light interconnect prototype based on a multi-wavelength laser array. By employing bit-power loading and neural network post-equalization techniques, the prototype achieves a transmission rate of 500 Gbit/s, with the bit error rate(BER) of all 40 wavelength channels remaining below the 7% hard-decision forward error correction threshold. These findings indicate that the synergistic optimization of high-speed transmitter devices, high-bandwidth receiver devices, and advanced coding and modulation technologies is the critical pathway for advancing VLC toward high-capacity optical interconnect applications.

Key words: visible light communication, optical interconnection, communication device, encoding and modulation

0 引言

随着移动通信、云计算、人工智能和高性能计算

收稿日期:2026-06-02。

基金项目:国家自然科学基金项目(62525102)资助。

作者简介:迟楠(1974—),女,博士,教授,博士生导师。获得国家杰出青年科学基金及青杰延续资助,美国光学学会会士。担任6G推进组新频谱组召集人,中国电子学会通信分会副主任委员,电路与系统分会副主任委员,中国通信学会水下通信分会副主任委员,光通信分会专委委员。长期从事高速光通信和高速VLC方面的研究。发表论文400余篇,Google引用18 000余次,出版专著10部。获中国通信学会自然科学一等奖、教育部自然科学二等奖、中国产学研合作创新一等奖等各1项。
胡卓然(2003—),男,博士研究生,主要从事高速VLC、可见光互连研究。

[†]迟楠和胡卓然为本文共同第一作者,对本文有同等贡献。



等应用的快速发展,短距离无线接入和片间、板间、机柜间数据互连对传输容量、时延和系统能效提出了更高要求。传统射频通信频谱资源日益紧张,在高密度接入、强电磁干扰和安全敏感场景中面临一定限制。可见光通信(VLC)利用约400~800 THz的未授权可见光频谱进行信息传输,可在实现高速数据通信的同时具备抗电磁干扰、保密性高和易于空间复用等优势,被认为是未来第六代移动通信(6G)及短距离光无线通信的重要补充技术^[1-3]。典型VLC系统多采用强度调制/直接探测(IM/DD)体系,系统结构相对简单,但传输速率受到发射端电光调制响应、接收端光电探测带宽、信道频率选择性衰落以及器件非线性等因素共同制约。近年来,发射器件不断提升可用调制带宽和

迟楠,胡卓然,徐增熠,等:高速可见光通信关键技术综述

输出光功率;探测器的发展改善了接收灵敏度、响应速度和有效接收面积;编码、调制和神经网络均衡等数字信号处理技术则进一步提高了有限带宽下的频谱效率和链路鲁棒性^[4]。因此,高速VLC的研究已经从早期单链路速率提升,逐步发展到发射、接收、调制和系统架构协同优化的新阶段。

本文围绕高速VLC中的发射器件、接收器件和编码调制技术进行综述,并介绍一种多波长波分复用(WDM)可见光光互连样机及其实验结果,以展示高速VLC关键技术在大容量短距离光互连场景中的系统集成潜力。

1 高速VLC关键技术

1.1 发射器件

在高速VLC系统中,发射端器件的性能直接决定了加载信号的调制带宽、输出光功率、信噪比及线性度等关键指标,是制约系统容量进一步提升的核心瓶颈之一。VLC系统发射端应用的半导体器件主要有发光二极管(LED)和激光二极管(LD)。其中,LED有成本低、结构简单和易与照明系统兼容等优势,是早期室内短距VLC应用中的代表性器件。然而,传统大面积LED属于自发辐射器件,其载流子寿命、结电容、串联电阻和热效应等因素会限制其调制响应,器件带宽相对有限。micro-LED通过缩小发光面积、改善电流扩展和降低结电容,可以提升高频调制能力,是突破LED带宽瓶颈的重要方向。另一方面,在单个LED通道带宽和速率受限制的情况下,多波长LED阵列和WDM技术进一步通过并行传输实现容量扩展,使得LED发射端从单通道高速化走向多通道容量聚合。在应用micro-LED的发射端高速化研究中,早期GaN基micro-LED与高阶调制相结合,已验证数百兆赫兹调制带宽下的传输能力^[5]。2021年,Wang Lei等人^[6]进一步对GaN基micro-LED结构进行优化,将器件电光带宽提升至1.3 GHz,在3 m自由空间链路中分别实现了2 Gbit/s非归零键控(NRZ-OOK)传输和4 Gbit/s正交相移键控-正交频分复用(QPSK-OFDM)传输。除了缩小器件尺寸,优化LED外延结构和调制效率也是提升系统性能的重要方向。2021年,Hu Fangchen等人^[7]针对Si衬底InGaN/GaN LED中超晶格中间层周期数对通信性能的影响开展研究,将LED带宽提升至约290 MHz,在1.2 m自由空间链路中实现了3.37 Gbit/s传输速率。然而,单个LED通道的带宽和速率仍然存在上限,因此多波长LED阵列和WDM技术成为进一

步提高系统容量的重要方案。2023年,Xu Zengyi等人^[8]提出了一种采用V型坑(V-pit)与侧壁量子阱结构增强的GaN基8波长LED阵列。该结构使载流子能够通过侧壁通道注入量子阱,并进一步横向输运至平面量子阱区域,从而有效提升载流子注入效率与辐射复合速率,使其最高调制带宽达到800 MHz。通过多波长阵列并行传输,该8波长LED阵列获得31.38 Gbit/s的总传输速率。

与LED相比,基于受激辐射的LD的光子寿命更短、调制带宽和输出光功率更高,对高速、大容量VLC链路的适配性更高。因此,在提高单通道传输速率的同时,LD路线从早期蓝光LD高速传输可行性验证,逐步发展到多波长容量扩展和器件结构高速化设计。2015年,Chi Nan等人^[9]使用450 nm GaN蓝光LD实现了9 Gbit/s的传输速率,其器件调制带宽为1.5 GHz,验证了GaN蓝光LD作为高速VLC发射器件的可行性。面向自由空间长距离传输场景,Huang Yufang等人^[10]使用蓝光LD在16 m自由空间链路中实现了18 Gbit/s传输速率,器件调制带宽为4.6 GHz。与此同时,为了解决单LD通道速率受限的问题,Hu Junhui等人^[11]构建了紧凑型红、绿、蓝三色LD发射机,通过反射镜、二向色镜和准直光路实现多色光束合成,并采用离散多音(DMT)调制和自适应比特加载技术提高频谱效率,最终实现了46.41 Gbit/s的总传输速率,并提高了多波长LD发射端的系统集成度。此外,LD本身结构的高速化设计也是提升VLC性能的关键。Wang Junfei等人^[12]针对c-plane GaN蓝光LD调制带宽不足的问题,设计了短腔长、窄脊波导和单纵模Fabry-Perot结构的mini-LD,调制带宽达到5.9 GHz,在4 GHz调制带宽下实现了20.06 Gbit/s传输速率。2025年,Jia Haolin等人^[13]从有源区能带结构出发,在蓝光GaN基短腔LD中引入InGaN量子垒,以减小量子阱与量子垒之间的极化差异和应力失配,提高电子-空穴波函数重叠、差分增益和光场限制因子。该器件调制带宽达到8.1 GHz,在7.5 GHz调制带宽下实现了36.5 Gbit/s传输速率。为了进一步明确蓝光InGaN基LD的高速设计规律,Hu Junhui等人^[14]系统研究了波导层厚度、有源区量子阱/量子垒厚度、量子阱数以及腔长对载流子-光子动力学和调制响应的影响,在30 mW光功率下实现了超过10 GHz的调制带宽。

1.2 接收器件

在高速VLC系统中,接收端器件将光强信号转换

为电信号,其接收灵敏度、响应带宽、噪声水平和有效视场等因素共同决定了系统的接收能力。围绕高速探测和高效光收集需求,VLC接收端形成了多类典型技术路线,包含光电二极管(PIN)、雪崩二极管(APD)、荧光天线(FA)、发光太阳能聚集器(LSC)和GaN/In-GaN基接收机等。对于PIN和APD类器件,其具有较小结电容和较高调制带宽,适合高速信号探测,然而存在带宽与接收面积之间的折中问题。增大探测面积可以提高接收光功率,却会增加结电容并降低频率响应;减小光敏面积可以降低结电容,提升频率响应,但会降低接收光功率。阵列化PIN接收和集成APD接收从空间分集、内部增益和片上电路补偿等角度为解决这一问题提供思路。PIN结构简单、线性度好、暗电流较低,适合低成本集成和阵列化应用。2015年,Li Jiehui等人^[15]设计并演示了一种集成PIN阵列接收机,将多个硅PIN裸片、跨阻放大器和后级放大电路进行集成,采用最大比合并算法在30 cm自由空间链路中实现了1.2 Gbit/s通信速率,实现PIN阵列空间分集接收,在保持单元高速响应的同时扩大了有效接收能力^[15]。此外,2019年,Li Jiehui等人^[16]采用 2×2 PIN阵列接收机和等增益合并算法,在1.2 m水下传输距离上实现了1.8 Gbit/s通信速率的大覆盖接收。APD通过雪崩倍增提供内部增益,在弱光探测中具有更高灵敏度。相较于上述PIN的多接收单元结构,APD集成接收可依赖内部增益和电路补偿。同年,Yan Dong等人^[17]提出一种单片集成APD光接收机,将APD、差分跨阻放大器和限幅放大器等集成在互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺芯片中,利用有源电感峰化和片上后均衡来补偿大面积APD带来的高频响应衰减。该接收芯片将面积为 $150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$ APD的带宽由300 MHz扩展至420 MHz,实现了大面积与高速响应的折中。

除了直接扩大光电二极管(PD)阵列面积,另一类思路是在探测器前端引入FA或LSC。在该类结构中,荧光材料首先吸收入射信号光,再通过斯托克斯位移以较长波长再次发射,经过高折射率波导结构中的内全反射,被引导至边缘或小面积出口处由高速PD探测。由于吸收和再发射过程中光子的波长和相空间分布发生改变,LSC/FA可以在一定程度上突破传统无源聚光器的étendue限制,从而兼顾较大的接收面积和较宽的视场(FoV)。2017年,Dong Yurong等人^[18]提出了纳米图案化LSC接收前端,在柔性塑料基底上制备平面LSC,并引入纳米压印闪耀光栅结构,使更多再发

射光沿出口方向传播并被PD收集,实现了约2倍光学增益,在VLC链路中达到400 Mbit/s传输速率,并保持 $\pm 60^\circ$ FoV。2025年,Lin Xianhao等人^[19]采用CsPbBr₃量子点构建宽视场FA,通过上下玻璃层保护量子点荧光层,使用短通滤光膜降低波导损耗并抑制环境光噪声,借助银反射层则增强未吸收信号光和再发射光的二次利用,在1 m传输距离下实现1.23 Gbit/s宽视场高速接收。

随着高速VLC系统的发展,许多大容量VLC链路越发集中于405~470 nm短波长可见光波段。因此,接收器件不仅需要高带宽和高灵敏度,还需要与发射波段具有良好的光谱匹配能力。然而,目前商用的Si/GaAs探测器的响应峰值多位于近红外波段,对405~470 nm短波可见光的响应度相对较低。此外,这类探测器有较宽的光谱响应范围,易引入环境光和其他波长光噪声。GaN/InGaN材料体系是短波长探测器的重要候选。GaN具有宽禁带和低暗电流等优势,GaN/InGaN多量子阱(MQW)结构则可以通过调节In组分、量子阱厚度和能带结构实现对目标波段的吸收调控。2022年,Shi Jianyang等人^[20]提出并制备了Si衬底垂直结构InGaN/GaN MQW μLED -based PD,将GaN micro-LED反向作为高速短波光探测器使用,进一步利用自设计 4×4 阵列接收机实现10.14 Gbit/s传输速率。2023年,Xu Zengyi等人^[21]进一步研究了Si衬底GaN mini-PD中超晶格中间层周期数和有效接收面积对器件与通信性能的影响,并实现了15.26 Gbit/s的通信速率。2024年,Xu Zengyi等人^[22]报道了一种基于Si衬底GaN/InGaN MQW的集成micro-PD阵列,构建了 2×2 多输入多输出可见光通信(MIMO-VLC)系统,为小型化、集成化、多用户接收提供了实验验证。

1.3 编码与调制

高速VLC通信系统多采用IM/DD体系,为了实现更高的频谱效率和解决信道估计误差、非线性失真等问题,先进的编码与调制技术已成为高速VLC系统的重要支撑,可在有限带宽条件下提高频谱效率和增强系统对信道估计误差、非线性失真的鲁棒性。在高速VLC系统的调制技术中,无载波幅度相位(CAP)调制是最早被广泛采用的高频谱效率调制格式之一,其无需额外的电域或光域复数-实数转换,也省去离散傅里叶变换/离散傅里叶逆变换(DFT/IDFT)运算。发射端将比特序列映射为复数正交幅度调制(QAM)符号后,分别通过一对正交的脉冲成形滤波器生成同相和正交分量,再叠加形成实值调制信号。2018年,Chi Nan

迟楠,胡卓然,徐增熠,等:高速可见光通信关键技术综述

等人^[23]研究了高阶CAP调制与预均衡、后均衡的联合优化,在1 m自由空间链路中验证了32-CAP、64-CAP和128-CAP传输。在基础CAP调制之后,多维CAP成为面向高频谱效率和多用户接入的重要扩展方向。当VLC系统需要支持多用户接入时, N 维CAP(N -D CAP)则从另一角度扩展CAP调制,通过设计 N 组相互正交的脉冲成形滤波器,使多个维度或多个用户共享同一频带。2024年,应对链路中的低频噪声问题,Lin Xianhao等人^[24]提出zero-padding N -D CAP调制方案,在脉冲成形滤波器的低频段引入补零区域,使信号频谱主动避开噪声集中区域;应用zero-padding 8-D滤波器,在100 m多模光纤(MMF)链路中的635、520、488 nm波长下实现了10.8、9.0、7.5 Gbit/s的传输速率。同年,Lin Xianhao等人^[25]提出超奈奎斯特 N -D CAP(FTN N -D CAP)调制,主动压缩信号带宽,打破严格正交条件,以可控的非正交性换取更高的频谱效率,FTN 3-D/4-D CAP可实现最高70%的带宽压缩比,相较于正交CAP频谱效率提升42.9%。面向室内多终端接入,2025年,Lin Xianhao等人^[26]进一步提出多频带 N -D CAP调制,并将其应用于宽视场白光VLC系统。传统多频带CAP便于频带分配,却容易造成高频用户性能下降。多频带 N -D CAP将两者结合,在不同子带之间采用频分复用,在同一子带内部采用 N -D CAP的多维复用方式,从而能够灵活调整子带数、每个子带内的用户数和速率。该方案面向12个用户设计了多种接入配置,在1 m距离下实现2.75~3.45 Gbit/s总速率,在2.5 m距离下仍能实现1~1.35 Gbit/s总速率。除CAP类调制外,DMT/OFDM多载波调制也广泛用于高速VLC系统。该类方案可根据信道频率响应和各子载波信噪比分布进行自适应比特加载和功率分配,从而在带宽受限、频率响应不平坦的器件链路中提高频谱利用率。多载波调制与接收端均衡相结合,也为后续WDM多通道可见光互连系统提供了重要的信号处理基础。

高速VLC系统中的编码技术用于改善信号统计分布、抑制非线性失真、提高信道估计精度和增强系统鲁棒性,包含非线性编码、预编码、导频编码等编码方法。在改善非线性性能方面,2022年,Xu Zengyi等人^[27]提出的非线性编码非均匀叠加正交幅度调制(NCNS-QAM),通过非线性栅格预编码将电平PAM4信号映射为PAM₆信号,减少高功率符号出现概率,使更多符号集中在低功率区域,从而避免进入严重非线性区。相比PAM4,NCNS方法下最大可用电压 V_{pp} 提高

了约16%,可用动态范围面积扩大大约33%。同年,Niu Wenqing等人^[28]提出将发射端预编码与非线性补偿结合的编码方法,在发射端预编码预先补偿码间干扰(ISI)的基础上,引入反馈神经网络,使预编码器同时处理带宽受限导致的ISI和器件非线性效应。该方法在2.2 Gbit/s速率下相较LMS线性后均衡的 Q 因子提升了3.39 dB。此外,在WDM-VLC大容量系统中,编码技术的重点进一步转向导频设计和信道估计精度。2025年,Zhou Yingjun等人^[29]提出差分导频编码(DPC)方案,在导频设计中插入正负成对的导频块,接收端对正负导频进行差分处理,从而消除导频中的直流(DC)分量和信号间拍频干扰(SSBI),获得更准确的信道估计,并用于后续零迫均衡和线性损伤补偿。

综上所述,高速VLC系统的容量提升依赖发射器件、接收器件和编码调制技术的协同发展。在发射端,LED和LD器件的调制带宽、输出光功率和非线性特性决定了高速信号加载的物理基础。在接收端,PIN、APD以及GaN/InGaN基短波探测器的响应带宽、灵敏度和接收面积影响高速光信号的有效恢复。在信号处理层面,CAP、DMT、高阶QAM、比特功率加载、预编码和非线性均衡等技术进一步提高了有限器件带宽下的频谱效率和链路鲁棒性。随着器件、算法和系统研究的不断成熟,单通道或少通道VLC速率提升至数10 Gbit/s量级,但面向数据中心、板间互连、机柜间互连和高性能计算等大容量传输场景,仅依靠单一器件带宽提升或调制格式优化已难以满足需求。因此,高速VLC技术需要从器件和算法层面的单点突破进一步向多通道、多波长、多维度的系统集成而发展。可见光互连链路具有并行扩展能力强等特点,能够应用WDM、空分复用(SDM)和模分复用(MDM)等技术,可充分发挥高速发射器件、高带宽光电探测和先进调制均衡技术的综合优势。因此,可见光互连可以验证多路高速可见光信道的容量聚合能力,成为展示VLC系统的大容量、可扩展、高度集成等特性的平台。

2 WDM 500 Gbit/s 可见光互连样机

图1为本文作者团队搭建的40路500 Gbit/s可见光互连样机实验装置。发射端首先生成多载波调制信号,经数字信号处理后,生成的数字波形经任意波形发生器(AWG)被转换为高速模拟电信号。该电信号经过电放大器(EA)放大后,加载至多波长激光阵列,实现多路波长信道的强度调制。调制后的光信号分别耦合进入1 m MMF,用于模拟短距离光互连中

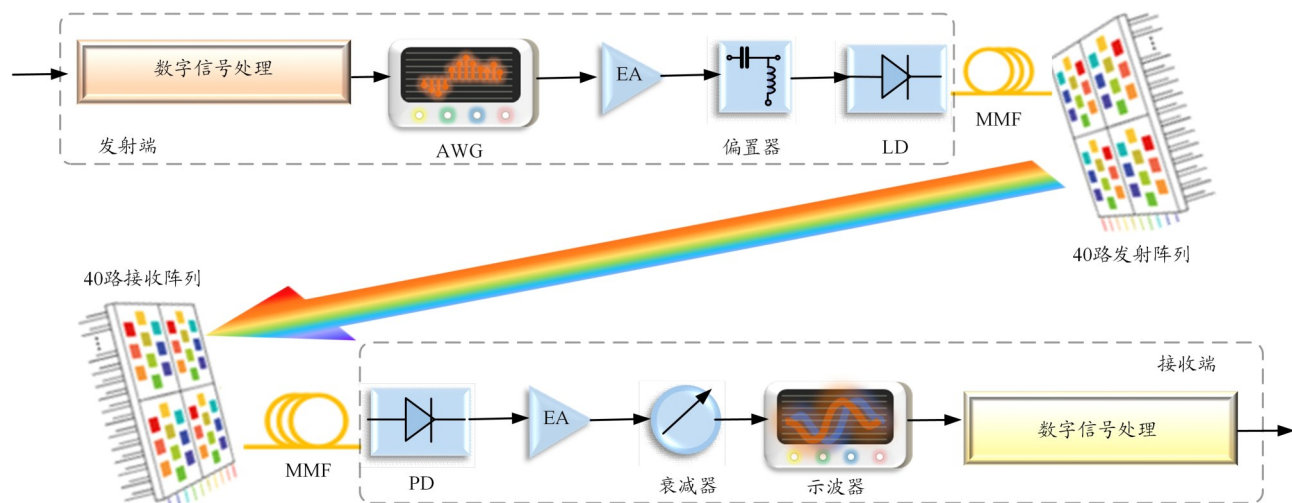


图1 40路500 Gbit/s可见光光互连样机实验装置

的光纤传输段。随后光束进入自由空间传输通道,完成40路多波长并行传输。经过自由空间链路后,接收端将光信号重新耦合至另一段1 m MMF,并由PD完成光/电转换。在接收端,转换后的电信号再经EA放大,并由示波器进行高速采样,经数字信号处理后,对采样波形进行同步和频域解调,并利用基于神经网络的后均衡算法补偿信道的损耗。最终,将恢复得到的比特序列用于计算各波长通道及系统误码率(BER)。

本文作者团队搭建的40路WDM可见光光互连样机系统中,选取用于展示实验结果的4个特定波长(450、488、520、660 nm)的并行传输通道在2 GHz传输带宽下的子载波信噪比(SNR)分布及自适应比特加载结果如图2所示。

各通道均包含512个有效子载波,红色曲线表示不同子载波上的测量SNR,蓝色阶梯曲线为根据测量

SNR并通过LC比特加载算法计算得到的比特分配结果,其右侧纵坐标对应每个子载波加载的每符号比特数。可以看出,不同波长通道的SNR随子载波频率升高呈现差异,其中低序号子载波区域,即前100个子载波范围内受系统低频响应和噪声影响,部分子载波的SNR相对较低,可分配的比特数较低。在中间子载波区域,多个通道均可维持较高SNR,因此能够加载更高阶调制格式。而在高序号子载波区域,受发射器件、探测器以及链路整体频率响应滚降影响,SNR下降,对应的每符号比特数也随之降低。基于SNR分布,系统通过比特加载算法对各子载波的调制阶数进行自适应配置,从而充分利用不同频率位置的信道容量。统计40个波长通道的实际传输速率表明:各通道速率整体分布在10~14 Gbit/s内,最终实现500 Gbit/s的总传输速率;对应40个通道的BER测试结果,所有通道BER均低于7%硬判决前向纠错阈值 3.8×10^{-3} ,多波长并行传输在获得高传输速率的同时仍保持了可靠的链路性能。上述结果表明,本文所搭建的可见光光互连样机能够实现多通道高速传输,并验证了多波长激光阵列、比特加载调制和接收端均衡处理在大容量短距离光互连系统中的有效性。

3 结束语

本文围绕高速VLC系统的关键技术进行了系统分析与讨论,并进一步结合多波长光互连样机验证了大容量可见光链路的系统集成能力。高速VLC的容量提升并非由单一环节决定,而是依赖发射、接收、传输链路和数字信号处理之间的协同优化。器件性能决定了系统带宽和链路信噪比的物理基础,调制与编

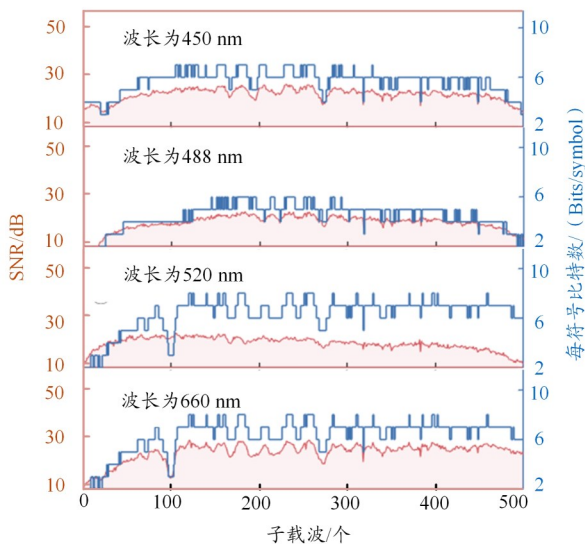


图2 实验结果

迟楠,胡卓然,徐增熠,等:高速可见光通信关键技术综述

码技术则进一步释放有限硬件资源下的频谱效率和抗损伤能力。多波长光互连样机的实验结果表明,通过多通道并行传输和系统级信号处理,VLC已具备面向短距离大容量互连场景的应用潜力。

未来,高速VLC将进一步从单链路速率提升走向多维度容量扩展和高度集成化发展。面向Tbit/s级通信和光互连需求,多波长、多空间通道、多偏振态和多模式等复用维度的协同利用成为突破容量瓶颈的核心路径。其中,空分复用(SDM)和模分复用(MDM)推动芯片级高集成互联,SDM和偏振复用(PDM)则可以提升自由空间链路和数据中心互联的通信容量。与此同时,VLC系统逐步迈向可见光光子集成平台,基于SiN、LNOI等材料体系,采用异质集成、单片集成等工艺,研发高带宽阵列发射机、高灵敏度短波探测器、可见光调制器和波分复用/解复用器等关键片上器件,从而提高系统的集成度与可扩展性,推动VLC与光互连、光计算、新型显示等平台的融合。人工智能技术将在信道估计、非线性补偿、链路自适应和系统联合优化中发挥更重要作用,使高速VLC逐渐转向具备环境感知和自优化能力的智能光通信系统。随着材料、器件、集成工艺、复用架构和智能算法的持续发展,VLC有望进一步拓展到数据中心光互连、高性能计算、空间-空中-水下通信以及通信感知计算融合等应用场景,形成兼具大容量、低时延、强抗干扰和高安全性的下一代光通信技术体系。

参考文献:

- [1] Chi Nan, Zhou Yingjun, Wei Yiran, et al. Visible light communication in 6G: advances, challenges, and prospects[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020, 15(4): 93-102.
- [2] Matheus L E M, Vieira A B, Vieira L F M, et al. Visible light communication: concepts, applications and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(4): 3204-3237.
- [3] Jovicic A, Li Junyi, Richardson T. Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(12): 26-32.
- [4] Grobe L, Paraskevopoulos A, Hilt J, et al. High-speed visible light communication systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(12): 60-66.
- [5] Islim M S, Ferreira R X, He Xiangyu, et al. Towards 10 gb/s orthogonal frequency division multiplexing-based visible light communication using a GaN violet micro-LED[J]. Photonics Research, 2017, 5(2): A35-A43.
- [6] Wang Lei, Wei Zixian, Chen Chien-Ju, et al. 1.3 GHz E-O bandwidth GaN-based micro-LED for multi-gigabit visible light communication[J]. Photonics Research, 2021, 9(5): 792-802.
- [7] Hu Fangchen, Chen Shouqing, Zhang Yuyi, et al. High-speed visible light communication systems based on si-substrate LEDs with multiple superlattice interlayers[J]. Photonix, 2021, 2(1): 16.
- [8] Xu Zengyi, Niu Wenqing, Liu Yu, et al. 31.38 gb/s GaN-based LED array visible light communication system enhanced with V-pit and sidewall quantum well structure[J]. Opto-Electronic Science, 2023, 2(5): 230005.
- [9] Chi Yichun, Hsieh D H, Tsai C T, et al. 450-nm GaN laser diode enables high-speed visible light communication with 9-gbps QAM-OFDM[J]. Optics Express, 2015, 23(10): 13051-13059.
- [10] Huang Yufang, Chi Y C, Kao H Y, et al. Blue laser diode based free-space optical data transmission elevated to 18 gbps over 16 m[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 10478.
- [11] Hu Junhui, Hu Fangchen, Jia Junlian, et al. 46.4 gbps visible light communication system utilizing a compact tricolor laser transmitter[J]. Optics Express, 2022, 30(3): 4365.
- [12] Wang Junfei, Hu Junhui, Guan Chaowen, et al. High-speed GaN-based laser diode with modulation bandwidth exceeding 5 GHz for 20 gbps visible light communication[J]. Photonics Research, 2024, 12(6): 1186.
- [13] Jia Haolin, Hu Junhui, Xu Zengyi, et al. High-speed blue laser diodes with InGaN quantum barrier for beyond 36 gbps visible light communications[J]. Laser & Photonics Reviews, 2025, 19(11): 2401751.
- [14] Hu Junhui, Jia Haolin, Gu Zhenqian, et al. Investigation on large modulation bandwidth InGaN-based blue laser diodes[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 185: 112601.
- [15] Li Jiehui, Huang Xingxing, Ji Xinming, et al. An integrated PIN-array receiver for visible light communication[J]. Journal of Optics, 2015, 17(10): 105805.
- [16] Li Jiehui, Wang Fumin, Zhao Mingming, et al. Large-coverage underwater visible light communication system based on blue LED employing equal gain combining with integrated PIN array reception[J]. Applied Optics, 2019, 58(2): 383-388.
- [17] Yan Dong, Mao Xurui, Cong Jia, et al. Fully integrated receiver for free-space visible light communication[J]. IEICE Electronics Express, 2019, 16(18): 20190418.
- [18] Dong Yurong, Shi Meng, Yang Xilu, et al. Nanopatterned luminescent concentrators for visible light communications[J]. Optics Express, 2017, 25: 21926-21934.
- [19] Lin Xianhao, Yang Peng, Li Jiali, et al. 120° field-of-view CsPbBr₃ quantum dots fluorescent antenna for visible light communication beyond 1 gbps[C]//IEEE. Proceedings of 2025 30th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2025 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC). Sapporo: IEEE, 2025: 1-4.
- [20] Shi Jianyang, Xu Zengyi, Niu Wenqing, et al. Si-substrate vertical-structure InGaN/GaN micro-LED-based photodetector for beyond 10 gbps visible light communication[J]. Photonics Research, 2022, 10(10): 2394.
- [21] Xu Zengyi, Luo Zhiteng, Lin Xianhao, et al. 15.26 Gb/s si-substrate GaN high-speed visible light photodetector with super-lattice structure[J]. Optics Express, 2023, 31: 33064-33076.
- [22] Xu Zengyi, Lin Xianhao, Luo Zhiteng, et al. Flexible 2×2 multiple access visible light communication system based on an integrated parallel

- GaN/InGaN micro-photodetector array module[J]. Photonics Research, 2024, 12(4): 793.
- [23] Chi Nan, Zhou Yingjun, Liang Shangyu, et al. Enabling technologies for high-speed visible light communication employing CAP modulation [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 510–518.
- [24] Lin Xianhao, Xu Zengyi, Luo Zhiteng, et al. Mobile fronthaul solution based on visible light fiber communication and zero-padding 8-D CAP modulation[J]. Optics Express, 2024, 32(13): 22153–22168.
- [25] Lin Xianhao, Zhang Haoyu, Niu Wenqing, et al. Faster-than-nyquist N-dimensional CAP modulation scheme based on slicing sphere decoder for visible light communication[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(24): 8713–8729.
- [26] Lin Xianhao, Wang Zhichong, Zhou Yingjun, et al. Flexible multi-access scheme for indoor VLC using multiband N-dimensional CAP and a wide field-of-view white laser transmitter[J]. Optics Express, 2025, 33(3): 4194–4210.
- [27] Xu Zengyi, Niu Wenqing, Shi Jianyang, et al. Nonlinear coded non-uniform superposition QAM by trellis-coding for MISO system in visible light communication[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(4): 042501.
- [28] Niu Wenqing, Chen Hui, Hu Fangchen, et al. Neural-network-based nonlinear tomlinson-harashima precoding for bandwidth-limited underwater visible light communication[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(8): 2296–2306.
- [29] Zhou Yingjun, Lin Xianhao, Xu Zengyi, et al. Beyond 600 gbps optical interconnect utilizing wavelength division multiplexed visible light laser communication [invited] [J]. Chinese Optics Letters, 2025, 23(5): 050002.