

激光与光电子学进展

超高速星载可见光激光通信技术研究(特邀)

迟楠^{1,3,4*}, 林显浩¹, 罗志腾¹, 徐增熠¹, 陈慧², 贺志学², 余少华²¹复旦大学信息学院电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433;²鹏城实验室, 广东 深圳 518055;³上海低轨卫星通信与应用工程技术研究中心, 上海 200433;⁴上海市低轨卫星通信技术协同创新中心, 上海 200433

摘要 可见光通信因其显著优势逐渐成为星间通信的研究热点。可见光通信能够提供丰富且无需授权的频谱资源, 传输速率高, 保密性强以及抗电磁干扰等。可见光激光通信器件发射功率较高、抗辐照能力强、激光束散角小, 有望应用于星间大容量长距离通信链路传输。实现了集成的 40 路波分复用可见光激光通信系统, 复用 29 个可见光波长, 采用离散多音比特加载调制和 Levin-Campello 算法, 达到了 418.3 Gbit/s 的总传输数据。针对可见光激光通信系统中的带宽受限和高频衰落的问题, 该系统采用了数字预均衡技术, 根据该系统的信号特点, 设计了相应的佐贝尔网络, 通过增强高频信号能量和减小低频信号能量实现整体通信性能的提升。实验表明, 数字预均衡可显著提升可见光激光通信性能。该系统证明了可见光激光通信在星间大容量通信中的巨大潜力。

关键词 波分复用; 激光通信; 可见光通信; 卫星通信

中图分类号 TN929

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232770

Research on Ultra-High-Speed Satellite Visible Light Laser Communication Technology (Invited)

Chi Nan^{1,3,4*}, Lin Xianhao¹, Luo Zhiteng¹, Xu Zengyi¹, Chen Hui², He Zhixue², Yu Shaohua²¹The-Ministry of Education Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Science, School of Information science and technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;²Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055, Guangdong, China;³Shanghai Engineering Research Center of Low-Earth-Orbit Satellite Communication and Applications, Shanghai 200433, China;⁴Shanghai Collaborative Innovation Center of Low-Earth-Orbit Satellite Communication Technology, Shanghai 200433, China

Abstract Visible light communication (VLC) has gradually become a research hotspot in satellite communication owing to its significant advantages. For example, VLC provides rich and unlicensed spectrum resources, high transmission rates, strong security, and resistance to electromagnetic interference. Laser VLC devices exhibit high emission power, strong resistance to radiation, and a narrow laser beam divergence angle and are expected to be used in high-capacity long-distance satellite communication link transmissions. In this study, we implement an integrated 40-channel wavelength division multiplexing (WDM) laser VLC system, utilizing 29 visible light wavelengths. The system employs discrete multi-tone (DMT) bit loading modulation and the Levin-Campello (LC) algorithm, achieving a total transmission data rate of 418.3 Gbit/s. To the best of our knowledge, this represents the highest data rate achieved in laser VLC using WDM to date. To address the issues of bandwidth limitation and high-frequency fading in laser VLC systems, this system employs digital pre-equalization technology. Based on the signal characteristics of the system, a corresponding Zobel network is designed to enhance and reduce the energy of high-frequency and low-frequency signals, respectively, thereby improving the overall communication performance. The experimental results reveal that digital pre-equalization significantly enhances the laser VLC performance. This system demonstrates the significant potential of laser VLC in high-capacity satellite

收稿日期: 2023-12-27; 修回日期: 2024-01-18; 录用日期: 2024-01-22; 网络首发日期: 2024-02-02

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB2802803)、国家自然科学基金(61925104; 62031011)、鹏城实验室资助项目

通信作者: *nanchi@fudan.edu.cn

communication.

Key words wavelength division multiplexing; laser communication; visible light communication; satellite communication

1 引言

随着卫星通信业务和互联网技术的快速发展,传统的单星独立任务模式难以满足空间应用需求,正逐步被具有更高的空间和时间分辨率的多卫星协同网络所替代。大量的异构小卫星被部署在太空中,它们能够通过更长的观测基线来增强任务,具有大故障容限、实时可重构、低成本和较强的灵活性等优势^[1-3]。为实现分布式多卫星节点之间的实时性协作,建立大容量、低延时、高可靠性的星间通信链路是关键技术之一^[4]。

目前,卫星之间大多采用红外波段进行星间或星地激光通信。与频谱资源紧张的传统射频通信相比,激光通信有着更高的带宽资源,并且具有激光发散角小、能量集中、传输距离远以及抗电磁干扰等优点。经过几十年的发展,红外波段已经拥有了较为成熟的配套器件。然而,红外波段在传输速率和信号衰减方面仍存在一定限制。近年来,可见光通信(VLC)^[5-10]作为非常有前景的补充方案,引起了各国学者的广泛关注。可见光通信具有丰富且无需授权的频谱资源、传输速率高、抗电磁干扰和保密性强等优势。与红外波段相比,可见光波长更短,这意味着可见光激光可能具有更小的束散角,有望实现远距离传输。此外,可见光波段使用基于宽禁带半导体氮化镓材料的激光器,其发射功率可达数瓦量级^[11-13]。同时,宽禁带还意味着很强的抗干扰能力,基于宽禁带半导体氮化镓材料的可见光器件位移阈值能量大、抗辐照强度高^[14]。因此,可见光激光通信有望应用于大容量远距离星间通信链路传输。

在可见光激光通信(VLLC)领域,波分复用(WDM)技术显著提升了通信容量。2019年,Chun等^[15]使用四色(R/G/B/V)复用激光器,在4 m自由空

间信道上实现了35 Gbit/s的传输数据率。同年,Wei等^[16]运用R/G/B激光器和偏振复用技术展示了40.665 Gbit/s的可见光通信系统。2020年,Wang等^[17]展示了基于R/G/V激光器和黄色LED的可见光通信系统,采用正交幅度调制-离散多音(QAM-DMT)调制在0.3 m自由空间内获得了34.8 Gbit/s的数据传输速率。2022年,Hu等^[18]展示了基于R/G/B激光器的可见光系统,通过离散多音调制和自适应比特加载技术,记录的数据传输速率达到46.41 Gbit/s。

为了探索可见光激光通信在大容量通信方面的潜力,本文结合波分复用和空分复用技术,实现了多波长多路信号经光纤引导后通过空间光学透镜天线阵列传输的大容量通信。在1 m多模光纤(MMF)-17 cm自由空间(FSO)-1 m MMF链路上演示了一个集成的40路波分复用可见光激光通信系统,共复用29个波长。该系统成功实现了418.3 Gbit/s总数据传输速率。每个信道的误码率(BER)均低于7%硬决策前向纠错(3.8×10^{-3})。本文系统采用了离散多音调制(DMT)比特功率加载和Levin-Campello(LC)算法^[19]。该系统展示了波分复用可见光激光通信系统在星间大容量通信中的应用潜力。

2 实验原理

2.1 波分复用可见光激光通信系统

图1展示了波分复用可见光激光通信系统的示意图,包括发射机、光学透镜天线阵列和接收机,用以实现超高速可见光激光通信。40个发射器集成在4个4U机箱中,其中每个机箱包含10个发射器。在发射器中,信号通过偏置器(Bias-Tee)与可调谐直流源耦合,经放大后驱动每个可见激光器。半导体制冷器(TEC)和水冷系统用于控制温度。每个激光器发出

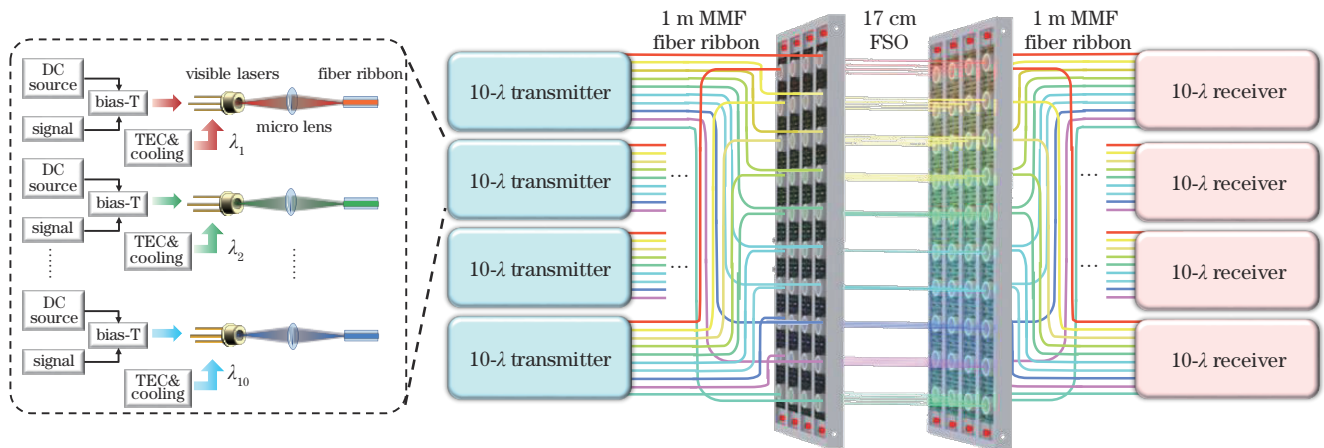


图1 演示的波分复用可见光激光通信系统示意图,包括发射机、光学透镜天线阵列和接收机

Fig. 1 Schematic diagram of demonstrated WDM VLLC system including transmitters, cage systems and receivers

不同波长的激光,通过微型透镜耦合到光纤中。发射器的输出端通过 1 m 长的 MMF 连接到 40 个光学透镜天线阵列单元,每个光学透镜天线阵列单元宽度为 17 cm,模拟自由空间传输。接收器也通过 1 m 长的 MMF 连接到光学透镜天线阵列。在接收机中,传输信号被光电探测器所检测,通过电子放大器放大后由示波器采集。

2.2 数字佐贝尔预均衡网络

基于佐贝尔网络(Zobel network)的硬件预均衡网络已被证明可以有效提高基于 LED 可见光高速通信的速率^[20-21]。然而,对于硬件预均衡,参数设计完成后一般不能灵活调整。而基于软件定义的预失真通常采用基于训练序列的迫零均衡算法,但是这种算法会导致信噪比的损失^[22]。级联的数字佐贝尔预均衡网络在基于 LED 的可见光通信系统中也有所应用,并能显著提升通信性能^[23]。然而,该算法在基于激光二极管(LD)的可见光通信系统中的应用还有待研究。由于基于 LD 和 LED 可见光通信系统所用器件的带宽、信道的频率响应等不同,数字佐贝尔预均衡网络应根据实际信道响应等选取合适的设计参数。下面将阐述数字佐贝尔预均衡应用于比特加载 DMT 的可见光激光通信系统的原理。

比特加载的 DMT 发射信号 $x(n)$ 可以表示为

$$x(n) = \sum_{i=0}^{N-1} P(i)s(i) \exp\left(j \frac{2\pi i n}{N}\right), \quad (1)$$

式中: N 是子载波个数; $P(i)$ 表示第 i 个子载波对应的功率分配因子; $s(i)$ 表示第 i 个子载波传输的数据符号。

经过预均衡网络后的信号 $x'(n)$ 可以表示为

$$x'(n) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{x(n)\} \cdot H(n)\}, \quad (2)$$

式中: $\mathcal{F}\{\}$ 表示傅里叶变换操作; $\mathcal{F}^{-1}\{\}$ 表示傅里叶逆变换操作; $H(n)$ 表示数字佐贝尔预均衡网络的频域响应采样值。该网络对应的电路如图 2 所示。

频域响应可表示为

$$H = \frac{1}{2 \left[1 + \frac{R_L}{R_4 + j\omega L_1 / (1 - \omega^2 C_1 L_1)} \right]}, \quad (3)$$

式中: R_L 表示负载电阻,一般取 $R_L = 50 \Omega$, $R_2 = R_3 = R_L$, $R_1 R_4 = R_L^2$, $C_1 = C_2$, $L_1 = L_2$ 。参数可选取为

$$R_4 = \frac{R_L}{10^{\frac{A_m}{10}} - 1}, L_1 = \sqrt{\frac{(R_4 + R_L)^2 - 10^{\frac{A_h}{10}} R_4^2}{\left(10^{\frac{A_m}{10}} - 1\right) \left(\frac{4\pi f_0}{3}\right)^2}}, \quad (4)$$

$$C_1 = \frac{1}{L_1 (2\pi f_0)^2},$$

式中: f_0 表示中心频率; A_m 为最大衰减倍数; A_h 为 $f_0/2$ 处对应的衰减倍数。针对该可见光激光通信系统的信道响应和信号带宽等,选取参数 $f_0 = 1.8 \text{ GHz}$, $A_m =$

20 dB, $A_h = 9.5 \text{ dB}$ 。图 3 是佐贝尔预均衡网络的幅频响应曲线。发射信号经过该预均衡网络后,高频部分的功率增大,低频部分的功率减小。经过信道后,接收信号的频谱将变得相对平坦,使得整体的通信性能提高。

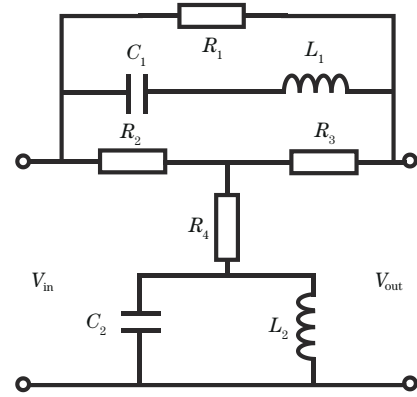


图 2 佐贝尔预均衡网络的电路图

Fig. 2 Circuit of the Zobel pre-equalization network

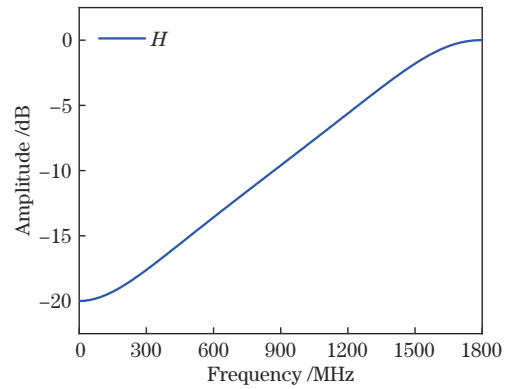
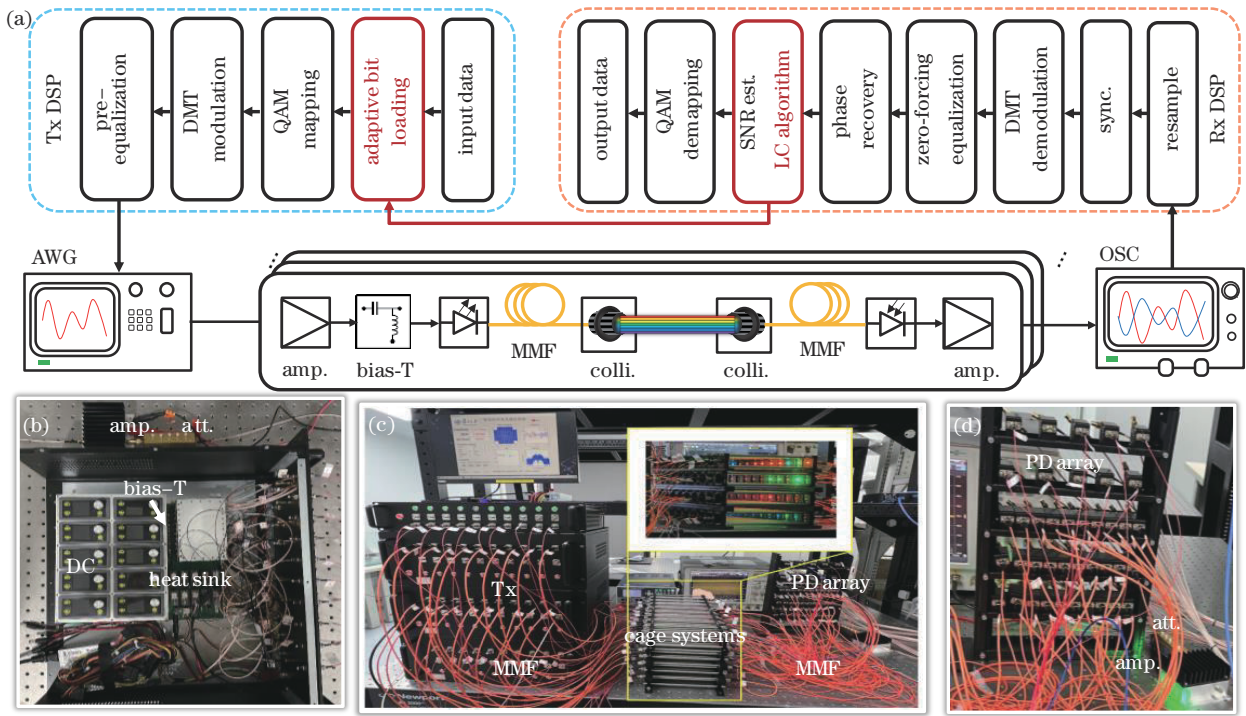


图 3 设计的佐贝尔预均衡网络的幅频响应曲线

Fig. 3 Amplitude-frequency response curve of designed Zobel pre-equalization network

3 实验装置

图 4(a)为该高速波分复用可见光激光通信系统的实验装置,该系统采用离散多音比特功率加载和 LC 算法。在发射端,离散多音调制信号由离线 MATLAB 程序生成,并加载到任意波形发生器(M8190A, Keysight, 美国)中。然后,该信号经电子放大器(ZHL-1042J+, Mini-Circuits)放大,并通过偏置器(ZFBT-4R2GW-FT+, Mini-Circuits)与直流电耦合。该信号用于驱动一个可见光激光器。产生的光信号经准直后在多模光纤-自由空间-多模光纤链路中传输。多模光纤的芯径为 $105 \mu\text{m}$,长度约为 1 m,自由空间链路长度为 17 cm。在接收端,信号由光电探测器(DET025 AFC, Thorlabs, 美国)检测并放大。然后,用示波器(MSO9404A, Agilent Technology, 美国)对信号进行采样。



Tx: transmitters; Rx: receivers; SNR Est.: SNR estimation; sync.: synchronization; amp.: amplifier; AWG: arbitrary waveform generator; colli.: collimator; att.: attenuator; MMF: multi-mode fiber

图 4 高速波分复用可见光激光通信系统的实验装置。(a) 实验装置图;(b) 发射机实物照片;(c) 系统整体照片;(d) 接收机实物照片
Fig. 4 Experimental setup of high-speed WDM VLLC system. (a) Experimental setup diagram; (b) photo of the transmitter; (c) overall system photo; (d) photo of the receiver

对于发射端的离线信号生成,信噪比的估计是关键一步,它采用正交相移键控(QPSK)信号来获取不同频率分量的信道状态,即信噪比。然后进行自适应比特加载,将输入数据映射为不同频率子载波信噪比所能支持的最高阶数正交幅度调制(QAM)符号,并进行离散多音调制。最后,进行离散多音调制。为了抵抗高频衰落,该系统采用了数字预均衡网络来提高通信性能。

在接收端进行离线数字信号处理时,先对接收信号进行重采样和同步,然后再进行离散多音解调。为补偿信号失真和相位偏差,采用了迫零后均衡和相位恢复。然后,进行QAM解映射,恢复原始数据。

图 4(b)~(d)为该系统的实物照片,图 4(b)为发射机的细节,每 10 个带尾纤的可见光激光器集成在一个 4U 机箱中,包括直流电源、偏置器、散热器等。图 4(c)为系统整体的照片。图 4(d)展示了探测器阵列,每个探测器都能通过多模光纤连接并检测到传输信号。本文成功演示了一个高速波分复用可见光激光通信系统,在 40 路通道上实现了超过 400 Gbit/s 的总数据传输速率。

4 实验结果分析

由于器件等的带宽限制,可见光系统中存在高频衰落的现象,这会降低高频子载波的信噪比。为了抵消高频衰落,在将信号加载到任意波形发生器之前,利

用数字预均衡来增强高频信号的功率,减小低频信号的功率。图 5 测试了数字预均衡的效果。以信号带宽为 2 GHz 的 638 nm 可见光激光信号为例。图 5(a)展示了发射信号和接收信号在未进行预均衡的情况下的频谱。从图 5 可以看出,信号的高频衰减严重,高频成分的最大衰减达到 35 dB,频率最高子载波处的信噪比为 11 dB。图 5(b)显示了经过预均衡的发射信号及其接收信号的频谱。数字预均衡将更多的信号功率分配给高频成分,以更好地利用信道带宽资源。最大信号衰减从 35 dB 减小到 17 dB,频率最高子载波处的信噪比从 11 dB 增加到 19 dB。图 5(c)展示了采用数字预均衡后的信噪比响应,与未采用预均衡的响应进行对比。采用预均衡时,高频成分的信噪比显著提高,但低频成分的信噪比降低了。实验结果最终证明,使用预均衡后,通信容量有了大幅提高。

图 6 展示了数字预均衡对三种典型波长的提升,分别为 486.8 nm(蓝光)、517.7 nm(绿光)和 638.6 nm(红光)。有或无数字预均衡时的传输速率与信号峰峰值(V_{pp})的关系分别如图 6(a)~(c)所示。可以看出,使用预均衡后,传输速率可以大大提高。具体来说,486.8 nm 的最大数据传输速率从 7.5 Gbit/s 提高到 9.2 Gbit/s,517.7 nm 的最大数据传输速率从 8.0 Gbit/s 提高到 8.7 Gbit/s,638.6 nm 的最大数据传输速率从 9.5 Gbit/s 提高到 10.3 Gbit/s。当信号 V_{pp} 较小时,由于信号功率不足,数据传输速率相对较低。当信号 V_{pp}

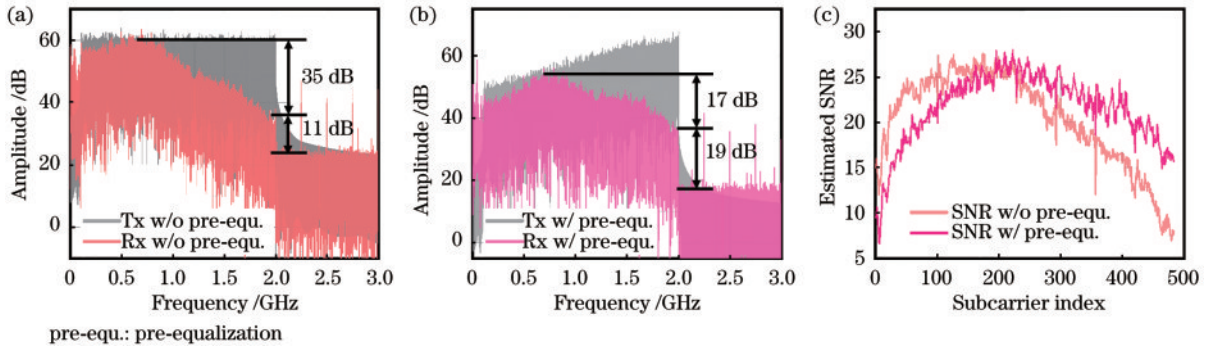


图 5 发射信号和接收信号的频谱。(a) 无预均衡; (b) 有预均衡; (c) 有或无预均衡时的估计信噪比

Fig. 5 Frequency spectrum of transmitted signal and received signal. (a) Without pre-equalization; (b) with pre-equalization; (c) estimated SNR with or without pre-equalization

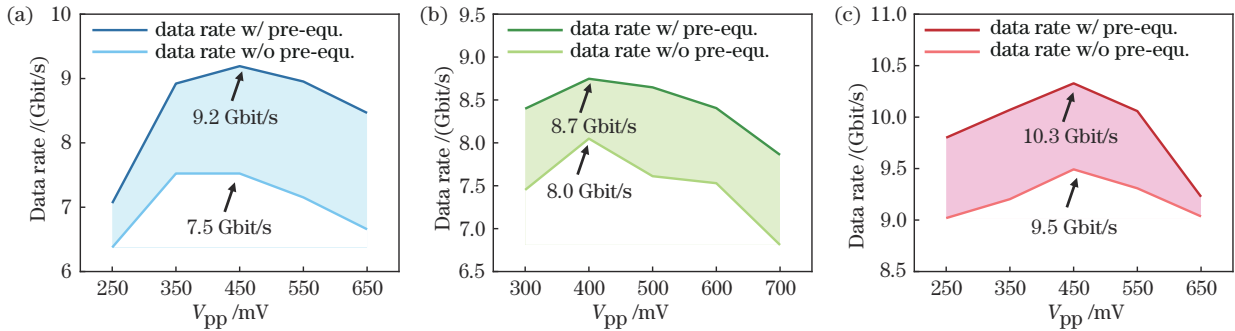


图 6 在不同波长下,有无预均衡的数据传输率与信号 V_{pp} 的关系。(a) 486.8 nm; (b) 517.7 nm; (c) 638.6 nm

Fig. 6 Relationship between data transmission rate with and without pre-equalization and signal V_{pp} at different wavelengths. (a) 486.8 nm; (b) 517.7 nm; (c) 638.6 nm

增加时,数据传输速率也随之增加。当信号 V_{pp} 继续增加时,由于非线性的存在,数据传输速率开始下降。

图 7(a)~(c) 分别显示了 486.8 nm、517.7 nm 和 638.6 nm 的信噪比响应和比特加载结果。在比特功率加载算法中,信噪比响应可通过发射 QPSK 信号进行估计,不同子载波的调制阶数将根据信噪比响应确定,更高的信噪比可以支持更高阶的数据传输。在图 7(a)~(c) 中,分配的比特数为 1~7,对应的调制格式为二进制相移键控(BPSK)到 128QAM。接收到的星座图如图 7(a)~(c) 中插图所示。除比特分配外,子

载波的信号功率也重新分配。超出子载波所需的多余功率将被移至其他功率不足的子载波。图 7(d1)~(d3) 分别显示了 486.8 nm、517.7 nm 和 638.6 nm 不同子载波的功率比。按照图 7(d) 调整子载波的发射功率,从而得到比特加载所需的信噪比。以图 7(d3) 为例,由图 7(c) 可知:在低频部分,均等发射功率 QPSK 估计的信噪比较 128QAM 所需信噪比更高,即存在部分多余的能量;在高频部分,估计的信噪比较相应阶数所需的信噪比略低,即发射功率不足。因此,在图 7(d3) 中低频部分的功率比更低,应降低发射功率,而高频部分的功率比更高,应提高发射功率。

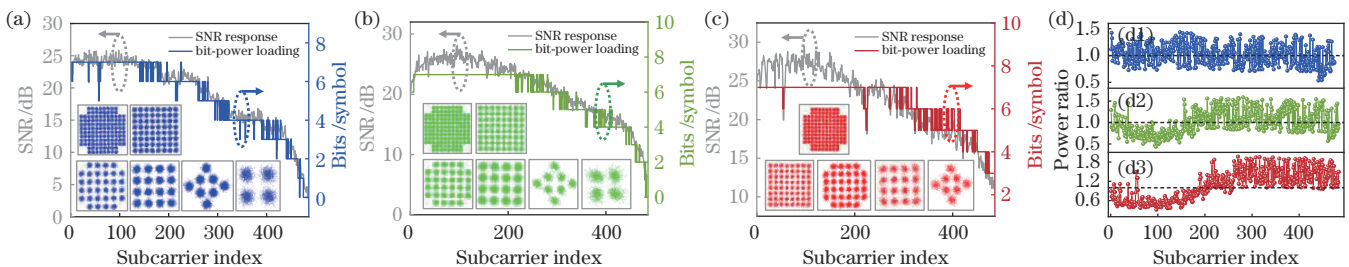


图 7 不同波长的比特分配、信噪比响应和接收星座图。(a) 486.8 nm; (b) 517.7 nm; (c) 638.6 nm; (d) 对应图(a)~(c) 的每个子载波的加载功率比

Fig. 7 Bit allocation, SNR response, and the received constellation diagram for different wavelengths. (a) 486.8 nm; (b) 517.7 nm; (c) 638.6 nm; (d) loaded power ratio of each subcarrier in corresponding Figs. (a)~(c)

最后,本文展示了一个集成的 40 路波分复用可见光激光通信系统,总速率超过 400 Gbit/s。实验结果如图 8 所示。图 8(a)展示了 40 路信号的光谱。该系统复用了从 484.479~688.603 nm 共 29 个不同的可见光波长。图 8(b)展示了 40 路数据传输率和误码率,

误码率门限为 3.8×10^{-3} ,单路最大可实现数据传输速率为 11.95 Gbit/s,最小可实现数据传输速率为 6.44 Gbit/s。该波分复用可见光激光通信系统在多模光纤-自由空间-多模光纤链路上实现了 418.3 Gbit/s 的总数据传输速率。

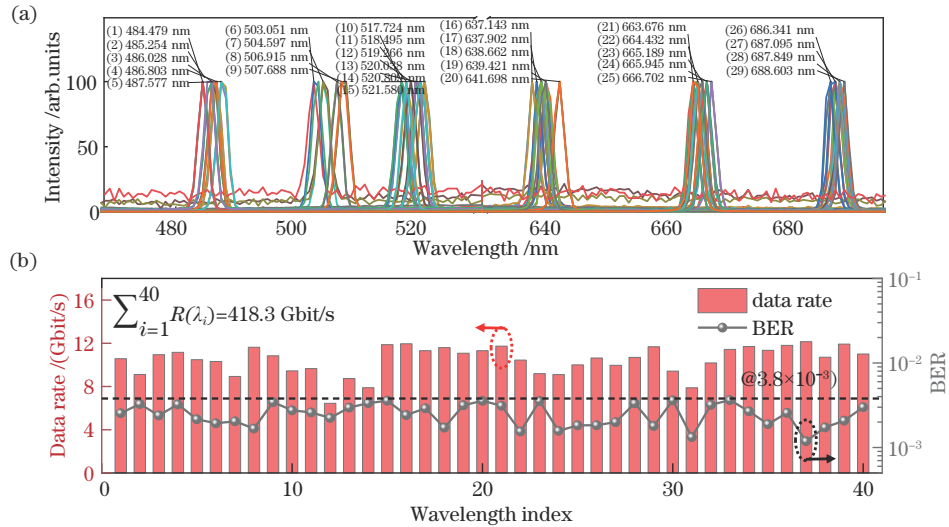


图 8 40 路波分复用可见光激光通信系统。(a) 光谱图;(b) 数据速率和误码率(误码率门限为 3.8×10^{-3})
Fig. 8 40 channel WDM VLC system. (a) Spectra; (b) data rates and BER (BER threshold is 3.8×10^{-3})

5 结 论

为了探索大容量可见光激光通信的潜力,结合波分复用和空分复用,本文实现了多路可见光激光通信的集成化,并取得了超过 400 Gbit/s 的总速率。具体来说,本文构建了集成的 40 路波分复用可见光激光通信系统,在 1 m 多模光纤-17 cm 自由空间-1 m 多模光纤链路上实现了总共 418.3 Gbit/s 的数据传输。据我们所知,这是波分复用可见光激光通信系统达到的最高数据传输速率。该系统复用了 29 个可见光波长,并采用了离散多音比特功率加载调制和 LC 算法。本文根据实际可见光激光通信的信号带宽等特征,设计了合适的佐贝尔网络用以对发射信号进行数字预均衡,抵抗高频信号的衰落,更好地利用带宽资源。经实验证明,数字佐贝尔网络预均衡可以显著提升可见光激光通信系统的通信容量。该系统未来可结合波束整形技术、调制带宽更大的激光器以及更加先进有效的数字信号处理技术,通信容量有望进一步提升。本文研究表明,波分复用可见光激光通信在星间大容量通信中具有巨大的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] Carpenter J R, Leitner J, Folta D, et al. Benchmark problems for spacecraft formation flying missions[C]// Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, August 11-14, 2003, Austin, Texas. Virginia: AIAA Press, 2003: 5364.
- [2] 姜会林,付强,赵义武,等.空间信息网络与激光通信

发展现状及趋势[J]. 物联网学报, 2019, 3(2): 1-8.

Jiang H L, Fu Q, Zhao Y W, et al. Development status and trend of space information network and laser communication[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2019, 3(2): 1-8.

- [3] Kodheli O, Lagunas E, Maturo N, et al. Satellite communications in the new space era: a survey and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(1): 70-109.
- [4] 陈泉润,虞翔,崔文楠,等.基于中短距离星间链路的可见光通信及性能分析[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006003.
Chen Q R, Yu X, Cui W N, et al. Visible-light communication and performance analysis based on medium- and short-distance inter-satellite links[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006003.
- [5] 郝少伟,李勇军,赵尚弘,等.基于非正交多址接入的星间可见光通信最优功率分配研究[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0706002.
Hao S W, Li Y J, Zhao S H, et al. Study on optimal power allocation for inter-satellite visible light communication based on non-orthogonal multiple accesses[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0706002.
- [6] Chi N, Zhou Y J, Wei Y R, et al. Visible light communication in 6G: advances, challenges, and prospects[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020, 15(4): 93-102.
- [7] Chi N, Haas H, Kavehrad M, et al. Visible light communications: demand factors, benefits and opportunities [guest editorial] [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(2): 5-7.

- [8] Niu W Q, Xu Z Y, Liu Y, et al. Key technologies for high-speed Si-substrate LED based visible light communication[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(11): 3316-3331.
- [9] Shi J Y, Xu Z Y, Niu W Q, 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): 2394-2404.
- [10] Xu Z Y, Niu W Q, Liu Y, 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.
- [11] König H, Ali M, Bergbauer W, et al. Visible GaN laser diodes: from lowest thresholds to highest power levels[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10939: 109390C.
- [12] Strauß U, Hager T, Brüderl G, et al. Recent advances in c-plane GaN visible lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8986: 89861L.
- [13] Fujita S, Tanaka H, Kannari F. Output characteristics of Pr:YAlO₃ and P:YAG lasers pumped by high-power GaN laser diodes[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(17): 5124-5130.
- [14] Pearton S J, Deist R, Polyakov A Y, et al. Radiation damage in GaN-based materials and devices[M]// *Advanced energy materials*. Weinheim: Wiley, 2014: 345-387.
- [15] Chun H, Gomez A, Quintana C, et al. A wide-area coverage 35 Gb/s visible light communications link for indoor wireless applications[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 4952.
- [16] Wei L Y, Chow C W, Chen G H, et al. Tricolor visible-light laser diodes based visible light communication operated at 40.665 Gbit/s and 2 m free-space transmission [J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25072-25077.
- [17] Wang W C, Cheng C H, Wang H Y, et al. White-light color conversion with red/green/violet laser diodes and yellow light-emitting diode mixing for 34.8 Gbit/s visible lighting communication[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(8): 1398-1408.
- [18] Hu J H, Hu F C, Jia J L, et al. 46.4 Gbps visible light communication system utilizing a compact tricolor laser transmitter[J]. *Optics Express*, 2022, 30(3): 4365-4373.
- [19] Campello J. Practical bit loading for DMT[C]//1999 IEEE International Conference on Communications (Cat. No. 99CH36311), June 6-10, 1999, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE Press, 2002: 801-805.
- [20] Zhu X, Wang F M, Shi M, et al. 10.72 Gb/s visible light communication system based on single packaged RGBYC LED utilizing QAM-DMT modulation with hardware pre-equalization[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 11-15, 2018, San Diego, California. Washington, DC: OSA, 2018: M3K.3.
- [21] Huang X X, Shi J Y, Li J H, et al. A Gb/s VLC transmission using hardware preequalization circuit[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(18): 1915-1918.
- [22] Zou D D, Chen Y C, Li F, et al. Comparison of bit-loading DMT and pre-equalized DFT-spread DMT for 2-km optical interconnect system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(10): 2194-2200.
- [23] Shi J Y, Xiao W H, Ha Y, et al. 3.76-Gbps yellow-light visible light communication system over 1.2 m free space transmission utilizing a Si-substrate LED and a cascaded pre-equalizer network[J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 33337-33352.