



DOI: 10.12086/oe.2020.190687

高速可见光通信的前沿研究进展

迟楠*, 陈慧

复旦大学通信科学与工程系电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433

摘要: 本文立足于通信领域近年来备受关注的研究热点——可见光通信, 阐述了其研究背景和基础系统架构, 围绕材料器件、高速系统、异构网络、水下可见光通信和机器学习等五个前沿研究方向展开了对可见光通信研究进展的探讨, 并概述了现阶段高速可见光通信技术面临的若干挑战。最后展望了可见光通信的前景: 在未来万物互联的智能时代, 可见光通信将以其高速传输的优势成为通信网络中不可缺少的一部分, 与其它通信方式合作互补共同造福人类生活。

关键词: 可见光通信; 材料器件; 异构组网; 水下可见光通信; 机器学习

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

引用格式: 迟楠, 陈慧. 高速可见光通信的前沿研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(3): 190687

Progress and prospect of high-speed visible light communication

Chi Nan*, Chen Hui

Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves (MoE), Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract: Based on visible light communication technology which has been a research hotspot in the field of communication, this paper reviews the background of visible light communication, illustrates the basic system architecture and explores the research progress of visible light communication around five frontier directions: material chips, high-speed systems, multiplexing networks, underwater visible light communication and machine learning. The challenges faced by visible light communication are analyzed. Finally, looking forward to the prospect of visible light communication: in the intelligent era of future, visible light communication will become an indispensable part of communication networks with its advantages of high-speed transmission, and cooperate with other communication technologies to complement human life.

Keywords: visible light communication; material chips; multiplexing networks; underwater visible light communication; machine learning

Citation: Chi N, Chen H. Progress and prospect of high-speed visible light communication[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(3): 190687

1 引言

随着物联网(Internet of things, IoT)的兴起以及人

工智能的迅猛发展, 人类正迈向以“万物感知、万物互联、万物智能”为特征的智能时代。在智能时代,

收稿日期: 2019-11-13; 收到修改稿日期: 2020-02-11

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0403603); 国家自然科学基金资助项目(61571133)

作者简介: 迟楠(1974-), 女, 博士, 教授, 主要从事光通信系统的研究。E-mail: nanchi@fudan.edu.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

移动数字终端和通讯媒介的范畴将会发生革命性变化,由此产生的海量数据对通信系统的高速率和低时延提出了更高要求,这些将给传统通信接入网技术带来巨大的考验。在这种背景下,一种具有拓宽频谱资源、绿色节能、高速可移动接入的新型通信方式——可见光通信(visible light communication, VLC)应运而生^[1],并被《时代周刊》评为 2011 年全球 50 大科技发明之一。

可见光通信是一种利用波长在 380 nm 到 790 nm 范围内的可见光进行数据通信的无线光传输技术^[2]。相比于传统无线通信日益匮乏的频谱资源,可见光的频谱资源丰富,频谱带宽约为 400 THz,是人类有待研究的空白领域。此外,可见光通信兼具照明、通信和控制定位等功能,易与现有基础照明设施相融合,符合国家节能减排的战略思想。在电磁敏感区域如核电站、矿井、加油站等和具有强电磁环境的特殊场所,如变电站、现代军事战场等,可见光通信具有不受无线电干扰、无电磁辐射、高度保密性的优势,是解决无法使用传统无线电通信时最有效的途径之一^[3]。可见光通信最大的优势是高速,目前已有的 VLC 实验可以实现每秒十几吉比特的传输速率,这一优势使得可见光通信成为未来智能时代 B5G/6G 超高速泛在光联网中一种不可或缺的无线通信方式。由于具有众多优势,可见光通信一经问世便成为各国政府支持的重要科学主题。日本在 2003 年成立了可见光协会(VLCC);美国国家自然科学基金(NSF)成立了 ERC 中心和 FIWIN 中心研究可见光通信;欧盟的欧盟第七框架协议(FP7)、5G PPP(public private partnership)项目中都重点支持了可见光通信。与此同时,我国科技部将可见光通信列入重点研发计划中。复旦大学、中国科学院半导体所、北京邮电大学、东南大学等科研单位在可见光通信技术方面开展了多年研究并取得了一系列显著的科研成果。

本文首先介绍了可见光通信系统的基础结构,接着详细分析了目前可见光通信领域的五个前沿研究方向,最后提出了对可见光通信未来的展望。

2 系统结构

可见光通信系统的基础结构一般由三个部分组成,包括可见光信号发射端、可见光信号传输信道和可见光信号接收端,图 1 展示了可见光通信系统的基础结构^[4]。可见光信号发射端包括调制模块、驱动电路、光发射器等。原始的二进制信号首先经过编码、调制和预均衡等变换,得到的预处理信号经过模数转换后驱动光发射器如 LED(light emitting diode)以控制其光照强度,从而实现电信号到光信号的转换。此外,在光发射器后加上光学透镜和聚光杯可以进一步提高接收端信号强度,从而增大传输距离。

经过调制后的可见光信号在大气或者水下等自由空间信道中传播,到达可见光信号接收端。可见光信号接收端包括接收天线、光电检测器、解调模块等。一般使用光电二极管 PIN、雪崩光电二极管 APD 等光电检测器来检测光信号,实现光信号到电信号的转换。得到的电信号经过后均衡、解调和解码等数字信号处理后,恢复出原始发射信号。

3 前沿研究方向

目前研究学者对可见光通信的研究主要集中于五个方面,分别是材料器件、高速系统、异构组网、水下可见光通信以及机器学习在可见光通信中的应用。其中,材料器件主要包括新型光发射器件与光接收器件;高速系统介绍了可见光通信传输速率的发展情况;异构组网围绕着可见光通信组网展开;水下可见光通信和机器学习,是目前可见光通信领域发展较为迅速和热门的研究方向,也是本文介绍的重点。

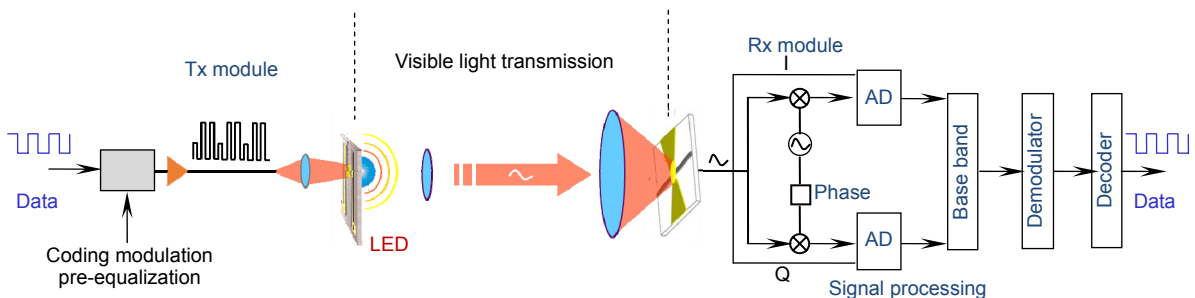


图 1 可见光通信系统的基础结构

Fig. 1 Base structure of visible light communication system

3.1 材料器件

可见光通信中用到的光发射器件有激光二极管 LD(laser diode)、超辐射激光二极管 SLD(super luminescent diode)和发光二极管 LED。其中,LD 属于受激辐射,它发出的激光在频率、相位、偏振状态等方面完全一样,相干性(coherence)高是其最大特点。LD 不存在效率跌落效应(droop effect),具有大于 1 GHz 的 3 dB 调制带宽,能够适应点对点的长距离 VLC 高速传输^[5]。然而由于激光对人眼潜在的危险性以及相干产生的散斑效应,在一定程度上限制了 LD 的发展。SLD 是一种介于 LD 和 LED 之间的半导体光源,具有宽光谱、弱时间相干性、低强度噪声、高效率的特点^[6]。它不存在反射形成的光学反馈,因此不会产生激光,对人眼安全。新型研制的基于 InGaN 的高功率蓝光 SLD 实现了 800 MHz 左右的调制带宽,而且不受散斑效应的影响^[7]。随着未来制作工艺的日益完善,SLD 将会是一种很有前景的光发射器件。LED 是目前广泛应用的低成本光发射器。LED 属于自发性辐射发光,具有开启速度快、效率高、使用寿命长、对人眼安全等优势。然而,现有商用 LED 的 3 dB 调制带宽小于 100 MHz,限制了其高速传输。因此,研究人员研制了相应的 LED 芯片来实现 LED 的高速传输。

在目前的高速 VLC 系统中,主要使用硅基 LED(Si-LED)、微结构 LED(micro-LED)和表面等离子体 LED(SP-LED)三种 LED 芯片。硅基 LED 芯片抗静电能力强,使用寿命长、生产效率高。南昌大学与复旦大学合作研制了一款基于 GaN 的共阳极硅衬底 LED 芯片,图 2 展示了此硅衬底 LED 的结构^[8]。芯片采用单面发光具有垂直结构的硅衬底 LED、具有垂直结构的电极和特殊的量子阱结构,有效提高了 LED 的调制带宽。基于此芯片的五色 RGBYC LED 在实验中

首次实现了 15.17 Gbps 的水下 VLC 高速通信,这是目前基于 LED 的水下最高通信速率。Micro-LED 具有寿命长、频率响应快等优点,是实现照明即服务(lighting as a service, LaaS)和物联网的一种潜在光源。Micro-LED 因有较小的有源区域,可实现电流高密度注入,从而将调制带宽驱动至数百兆赫兹^[9]。Ferreira 等^[10]研制了一种 Micro-LED 阵列,该阵列使用一个内部和一个外部圆形 Micro-LED,分别包含 5 pixel 和 10 pixel,像素的有效面积是 435 $\mu\text{m}\times 435 \mu\text{m}$ 和 465 $\mu\text{m}\times 465 \mu\text{m}$ 。文献[11]的实验结果表明,该 Micro-LED 带宽可达 655 MHz,在低于前向纠错(FEC)阈值(7%)的情况下,实现了 7.91 Gbps 的传输速率。SP-LED 能够提高 LED 发光的内量子效率和外量子效率。中国科学院团队^[12]研制了一款基于 GaN 的 SP-LED,其中 Ag 纳米颗粒横向沉积在多量子阱(MQWs)区域附近,这样的结构可以研究量子阱-表面等离子体(QW-SP)耦合效应。实验结果表明 Ag 纳米颗粒的 SP 共振波长接近 QW 发射波长时,QW-SP 耦合效应显著提高,当使用较短波长的光源时会进一步提高自发射速率,这对于高速 VLC 系统的发展具有重要意义。

在可见光通信光接收部分使用的光电探测器一般为 PIN 和 APD。PIN 成本低但灵敏度不高,APD 灵敏度较高但成本高于 PIN,且偏置电路需要高压,还会引入额外的噪声。复旦大学研究了集成 PIN 平面阵列并首次设计了一种 3 \times 3 的集成 PIN 阵列^[13]。PIN 二极管通过快速热化学气相沉积(RTCVD)技术制成^[14]。此集成 PIN 阵列将 PIN 阵列、光电检测器和相关电路同时集成到 PCB 上,集成的 PIN 阵列的尺寸小于 5 cm \times 5 cm,每个 PIN 的带宽为 25 MHz,最终实现了 1.2 Gbps 的可见光通信,实验证实集成 PIN 阵列的使用可以提升可见光通信系统的接收性能。在此基础上,文献[15]

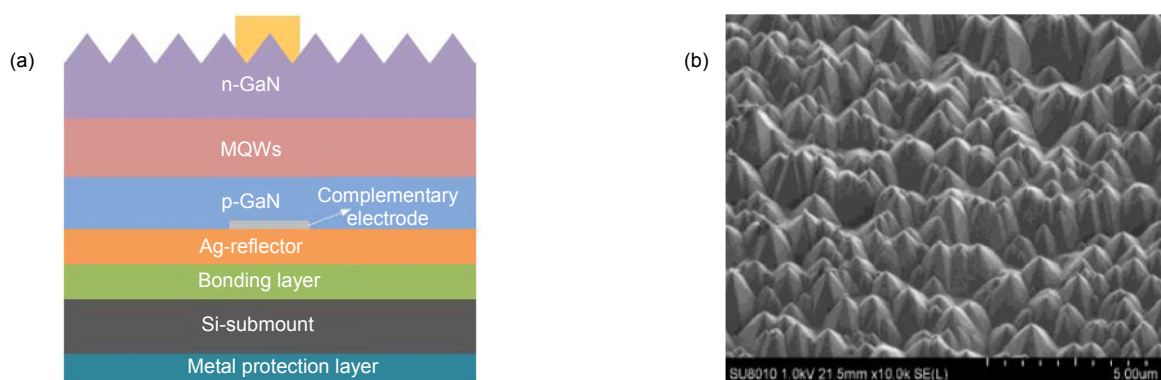


图 2 硅衬底 LED 垂直结构示意图和表面纹理图^[8]

Fig. 2 Vertical structure of the LED chip on the Si substrate and SEM image of texture surface^[8]

实现了单输入多输出(SIMO)水下可见光通信系统,传输数据使用 16QAM-OFDM 调制,接收机采用 2×2 集成 PIN 阵列,实现了 1.2 m 的传输距离和 1 Gbps 的传输速率。表 1 总结了上述不同光发射与光探测器各自的特点。此外,特殊的光电探测器如单光子探测器(single-photon avalanche diode, SPAD)价格昂贵,但由于其具有的超低噪声以及超高探测灵敏度特性,也被研究学者们尝试应用于长距离可见光通信系统中。Wang 等^[16]使用 SPAD 作为光电探测器实现了传输距离高达 500 m 的水下可见光通信仿真实验。Ji 等^[17]使用 10 W LED 发射光信号,采用 NRZ-OOK 调制格式,经过室外 1.2 km 的传输距离,接收端使用 SPAD 作为光探测器,最终实现了传输速率为 2 Mbps 的实时可见光通信系统。文献[18]利用 SPAD 能够在恶劣环境中探测微弱信号的特点,将其用于车灯通信系统中并通过仿真实验探讨 SPAD 的性能。

3.2 高速系统

与其它通信方式相比,可见光通信在理论上具有超大的通信容量。因此,可见光通信的最大优势是实现数据高速传输。为了进一步提高可见光通信的传输速率,研究学者们从先进调制技术、数据预均衡和后

均衡等方面进行了大量的研究,并取得了一系列突破性进展。其中,先进调制技术包括无载波幅度相位调制(carrierless amplitude and phase, CAP)、正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)和离散多音(discrete multitone, DMT)等。CAP 调制通过有效设计的正交基函数脉冲,实现多维度高阶调制,在有限带宽的情况下实现高频谱效率的传输。然而,LED 频率响应存在严重的高频衰落,会影响单载波 CAP 信号接收频谱的平坦度并带来严重的码间串扰。OFDM 调制利用相互正交的子载波,将发射端的串行数据转换成多路并行数据,可有效抵抗可见光系统的频率衰落,最大化利用系统的频谱资源,提升系统的频谱效率。但是 LED 无法直接调制和发射复数信号,OFDM 调制需将生成的复数信号转换成实数表示,增加了系统成本。在 DMT 调制中,频域信号经过共轭镜像对称,产生时域实数信号,从而避免时域产生复数信号,减少了发射端、接收端之间频偏的影响,但会损失了一半的频谱资源。表 2 总结了三种调制方式的优缺点。数据预均衡^[19-20]和后均衡^[21-22]是为了补偿接收发射器件、传输信道、噪声等对信号带来的失真,从而提高系统性能。图 3 展示了高速 LED 可见光通信

表 1 不同光发射/探测器件比较

Table 1 Comparison of different light emitters/detectors

Light emitters/detectors	Advantages	Disadvantages
LD	High coherence; no efficiency drop; 3 dB bandwidth>1 GHz	Speckle effect; dangerous to human eyes
SLD	High efficiency; safe to human eyes; no speckle effect; 3 dB bandwidth 400 MHz~800 MHz	No reliability assessment model; risk of coupling failure
LED	Low cost; long lifespan; safe to human eyes	3 dB bandwidth<100 MHz
PIN	Low cost	Low sensitivity; limited response bandwidth
APD	High sensitivity	High cost; additional noise

表 2 三种调制方式优缺点

Table 2 Strengths and weaknesses of three different modulation methods

Modulation	Strengths	Weaknesses
CAP	Multi-dimensional high-order modulation and high spectral efficiency are achieved through efficient design of orthogonal basis function pulses	LED frequency response has serious high-frequency fading, which would cause serious inter-symbol interference
OFDM	Effectively resisting the frequency fading of VLC channel, improving spectral efficiency	The generated complex signals need to be converted into real numbers, which would increase system cost
DMT	Avoiding the transformation of complex signals into time domain, reducing the effect of frequency offset between the transmitters and receivers	Losing half of the spectral efficiency

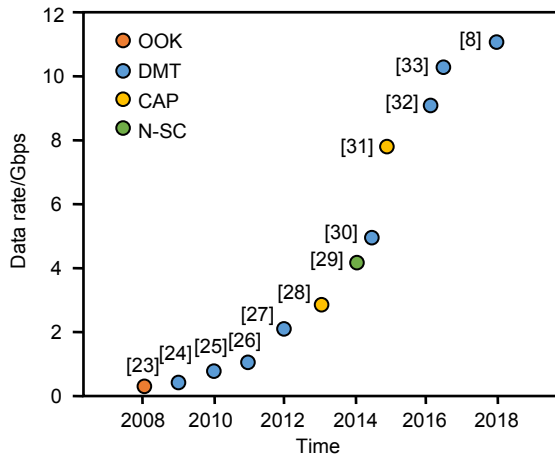


图3 高速LED可见光通信部分研究成果
Fig. 3 Summary of high-speed VLC achievements

的部分重要研究成果，方括号中的为参考文献序号。随着关于可见光通信研究的不断深入，具有超高传输速率的可见光通信必将在未来万物互联的时代扮演及其重要的角色，与其它通信方式合作互补，协同助力社会发展。

3.3 异构组网

可见光通信与其它通信方式的异构组网是未来实际应用中必须要解决的问题。研究如何将可见光通信接入到现有通信网络中，研究如何将多个可见光接入点(VLC access point, VAP)组成的可见光系统组网，以及在异构组网中采用何种调制方式和接入协议、发挥可见光通信的优势并支持大规模高速通信，是可见光通信实用化的关键。

复旦大学在2014年研制了第一套PON(passive optical network)和VLC无缝组网的系统^[34]。该系统基

于奈奎斯特单载波频域均衡(N-SC-FDE)调制的方法，经过40 km的光纤传输和30 cm的可见光传输，实现了可供三个有线用户接入的10 Gbps PON和可供一个无线用户接入的500 Mbps VLC，实验证实了可见光组网的可行性。次年，复旦大学验证了多个可见光接入点接入骨干网的可行性，如图4所示^[35]，实验采用光纤链路作为可见光接入网络的主干路，利用32QAM-OFDM调制方式并经过25 km的光纤传输和75 cm的可见光传输，实现了8 Gbps的吞吐量，可支持8个可见光接入点的高速无线接入。

此外，研究学者也研究了VLC与WiFi、VLC与RF以及VLC与IR(infrared)的异构组网^[36]。Shao等^[37]提出了两种VLC-WiFi集成系统来论证VLC与WiFi共存的可行性。在第一种VLC-WiFi集成系统中，VLC用于下行链路的数据传输，WiFi则用于上行链路的数据传输。实验结果表明，这种VLC-WiFi集成系统比传统WiFi系统可以实现更高的传输速率。为了进一步利用VLC具有的高带宽特性以及WiFi具有的高可用性，第二种VLC-WiFi集成系统使用绑定技术将VLC与WiFi信道结合在一起，并在实验中展示了强鲁棒性和大吞吐量的优势。Hammouda等^[38]提出了一种VLC-RF系统旨在支持多种用户需求的服务质量(QoS)。Alresheedi等^[39]提出了一种快速自适应波束引导红外(FABS-IR)系统来增强接收的光功率信号，并减轻在高传输速率时的信道时延现象。在此系统中，IR用于上行链路传输，VLC用于下行链路传输，成像接收机用于提高系统性能。实验结果表明，FABS-IR系统可以在室内移动场景中达到2.5 Gbps的传输速率，为VLC-IR在某些如飞机上通信、点对点通信等特定场景的应用提供了可能。

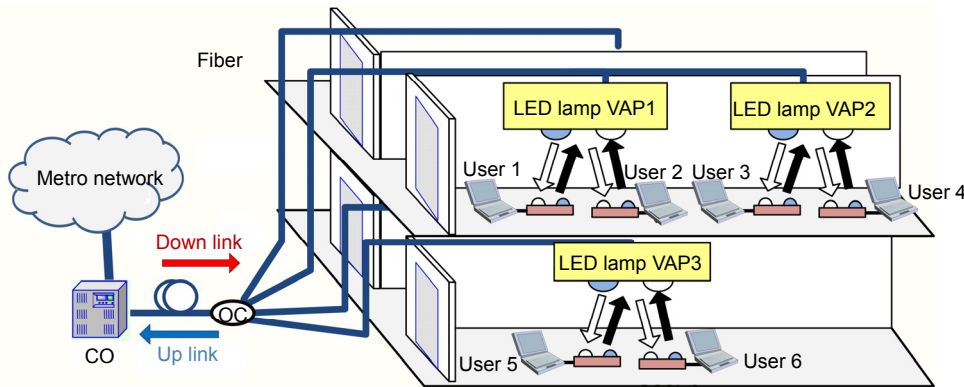


图4 可见光多用户接入网示意图^[35]
Fig. 4 Schematic diagram of multi-user VLC network^[35]

3.4 水下可见光通信

在未来万物互联的智能时代，水下物联网是必不可少的组成部分。如图 5 所示^[40]，海洋观测传感器物联网的互联互通及信息回传、水下运动装备与水面舰艇及通信浮标等目标的超高速非接触数据通信、水下航行器集群及编队组网通信、海底光缆网与水下无线光通信的无线融合组网等功能的实现，都需要水下通信技术作为支撑。

水下通信技术主要分为有线和无线两大类。水下有线通信主要是在海底铺设使用光纤作为介质的电缆进行通信。由于光纤具有传输容量大、传输损耗小、中继距离长、抗电磁干扰等优点，是目前大部分越洋数据的主要传输方式。然而，由于有线通信需要物理媒介传输信息，这将严重制约水下潜航器、传感器等动态通信网络的灵活性。水下无线通信技术则不需要借助光纤等传输介质，目前主要基于声波和射频进行

水下通信。其中，声波是应用最广泛的水下无线通信技术，声波在海水中衰减小，能够实现低速率长距离的水下传输。但是水声通信带宽窄、载波频率低、时延大且安全性差。射频传输适用于水下短距离高速率的通信。然而电磁波在海水中存在趋肤效应，穿透深度有限、数据传输速率低、发射功率高。因此，研制新型水下通信技术成为迫切需求。在 1963 年，Duntley 等^[41]在研究中发现海水对 450 nm ~ 550 nm 波段内蓝绿光的衰减比其它光波段的衰减要小很多。这一物理现象的发现为水下可见光通信(underwater visible light communication, UVLC)的发展奠定了理论基础。相比于水声通信和水下射频通信，水下可见光通信具有成本低、传输速率高、抗干扰能力强、保密性好等优势，已成为国际竞争的焦点之一。

目前水下可见光通信主要包括基于 LD 的通信和基于 LED 的通信。表 3 展示了最近几年水下可见光通

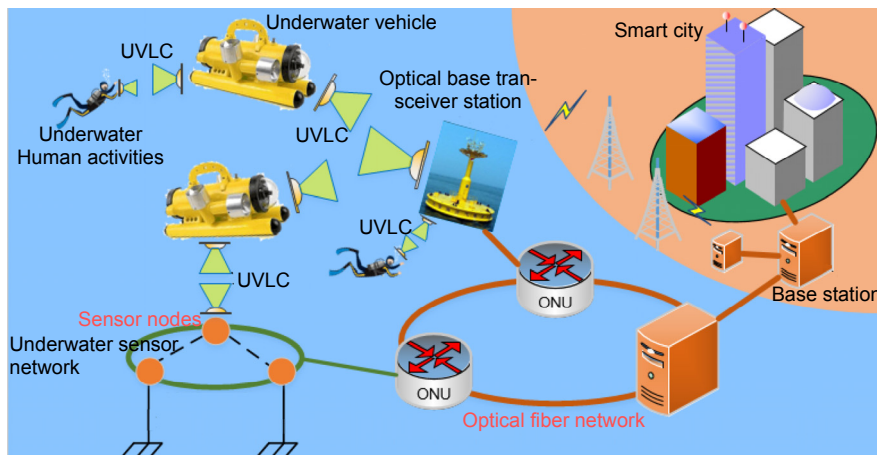


图 5 未来水下无线光网络示意图^[40]

Fig. 5 Schematic diagram of future underwater visible light communication network^[40]

表 3 水下可见光通信部分研究成果

Table 3 Summary of recent UVLC achievements

Light emitters	Modulation	Data rate	Distance	BER	Year	Real time (Yes/No)
405 nm LD	64QAM-OFDM	1.45 Gbps	4.8 m	9.1×10^{-4}	2015 ^[42]	No
450 nm LD	NRZ-OOK	1.5 Gbps	20 m	3.0×10^{-3}	2016 ^[43]	No
405 nm LD	16QAM-OFDM	10 Gbps	10 m	$\approx 10^{-4}$	2017 ^[44]	No
680 nm LD	16QAM-OFDM	10 Gbps	6 m	2.9×10^{-4}	2018 ^[45]	No
457 nm LED	128QAM-SGS	2.534 Gbps	1.2 m	3.7×10^{-3}	2018 ^[46]	No
448 nm LED	NRZ-OOK	25 Mbps	10 m	1×10^{-4}	2018 ^[47]	Yes
457 nm LED	64QAM-DMT	3.075 Gbps	1.2 m	3.7×10^{-3}	2019 ^[48]	No
450 nm LD	NRZ-OOK	2.5 Gbps	60 m	3.5×10^{-3}	2019 ^[49]	No
520 nm LD	NRZ-OOK	500 Mbps	100 m	2.5×10^{-3}	2019 ^[50]	No
RGBYC LED	Bit-loading-DMT	15.17 Gbps	1.2 m	$< 3.8 \times 10^{-3}$	2019 ^[8]	No

信的部分研究成果^[42-50]。基于 LD 的水下通信实现了越来越远的传输距离。日本山梨大学在 2015 年利用 64QAM-OFDM 的调制方式,实现了 1.45 Gbit/s 的传输速率和 4.8 m 的传输距离^[42]。台北科技大学实现了 10 Gbit/s 的传输速率和 10 m 的传输距离^[44]。NTUT 利用波长为 450 nm 的蓝光 LD 和 NRZ-OOK 的调制方式,在 60 m 传输距离的情况下,实现了 2.5 Gbps 的传输速率^[49]。中国科学技术大学在传输距离为 100 m 时获得了 500 Mbps 的传输速率^[50]。与此同时,基于 LED 的水下通信实现了越来越高的传输速率。在文献[46]中,作者提出了一种利用方形几何整形(SGS)调制 128QAM 信号的方法,采用硅衬底蓝光 LED,实现了 2.534 Gbps 的传输速率和 1.2 m 的传输距离。文献[48]研制了一种新型硬件预均衡板,将传输速率提升至 3.075 Gbps。文献[8]实现了 15.17 Gbps 水下 LED 通信,这是目前水下可见光通信的最高速率。文献[47]基于 FPGA(field programmable gate array)在传输距离 10 m 的水中实现了 25 Mbps 的实时传输系统。

在科研人员不断地探索中,水下可见光通信实现了更高的传输速率和更远的传输距离。然而,由于水下环境恶劣,水中颗粒物对可见光的遮挡、衰减、散射,水温变化以及水下气泡、湍流等因素会严重干扰可见光通信信道状态,增加水下可见光通信系统性能的不确定性。因此,水下可见光信道的建模至关重要。文献[51]利用基于 Henyey-Greenstein 函数的蒙特卡洛方法模拟水下激光束多重散射效应。文献[52]提出了一种闭合双伽玛(closed-form double-Gamma)函数来对水下可见光信道脉冲响应进行建模。Zedini 等^[53]在 2019 年提出了一种统计数学模型来表征在淡/咸水中存在气泡、湍流和温度阶梯差异的情况下水下可见光信道衰落特性。在这个模型中,信道波动幅度用混合指数广义伽玛(exponential generalized Gamma, EGG)

来刻画,利用期望最大化(EM)算法更新并估计模型的最大似然参数。实验结果表明,此数学模型的特性与实际水下信道的特性几乎完全吻合,这是首个能够解决由于气泡和温度梯度引起的水下光束波动的信道模型。然而,目前对于水下信道完整建模的研究还比较少,需要研究学者在未来进一步探索。

3.5 机器学习

随着机器学习(machine learning)的迅猛发展,基于机器学习的方法已广泛应用于数据挖掘、计算机视觉、自然语言处理等领域,在人类生活中发挥着越来越重要的作用。机器学习能够在基础物理和数学难以分析或无法明确描述的情况下,有效地逼近和拟合任意复杂函数并提取和处理其隐含的特征。机器学习的目的是使系统从经验中学习,自主提高性能。具体到可见光通信领域的研究中,如图 6 所示,机器学习可以用于系统非线性抑制和补偿、光网络性能监控、调制方式识别以及相位估计等任务中,是可见光通信系统实现智能化的关键。

目前,一些经典的机器学习算法如 K-means^[54]、DBSCAN^[55]等已被研究学者尝试用于解决可见光通信中的难题。可见光系统中的 LED、发射驱动电路、接收放大电路等都会引入非线性,而非线性会严重损害系统性能。文献[56]利用 K-means 算法补偿系统非线性,并成功将误码率 BER 由 2.4×10^{-1} 降低至 3.6×10^{-3} 。

卢星宇等^[57]研究了 VLC 系统中非线性对多带 CAP 中不同频带的影响,提出了一种聚类感知边界(clustering algorithms perception decision, CAPD)算法来代替原有的标准星座点判定边界,以减小多带 CAP VLC 系统的非线性损耗。与纯线性补偿相比,VLC 系统的 Q 因子提高了 1.6 dB~2.5 dB。实验也对比了基于 Volterra 的非线性均衡器,CAPD 比 Volterra 均衡器性

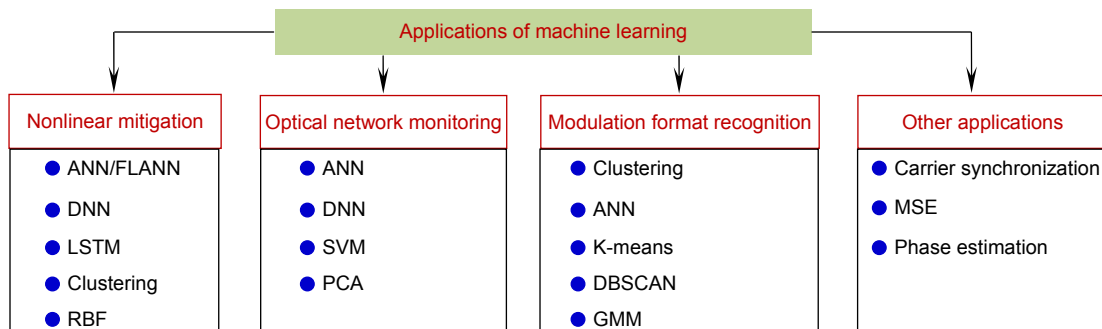


图 6 机器学习在可见光通信中的应用
Fig. 6 Applications of machine learning in VLC

能更好, BER 至少降低 10%, 并且复杂度更低, 此实验证实了作者所提出的非线性补偿方案的可行性。在可见光通信系统中会出现信号幅度抖动的现象, 这将会影响判决门限对于抖动时间点附近信号的误判。针对此问题, 文献[58]提出了一种基于 DBSCAN 的时间幅度二维重新估计算法(2DDB)来区分有幅度抖动的信号。该算法将原有的一维 PAM 信号扩展出时间轴, 将信号变为二维, 使用基于密度的聚类 DBSCAN 算法实现信号的重新分类和判决, 如图 7 所示。

实验结果表明 VLC 系统的 Q 因子提高了 1.6 dB ~3.2 dB, 证明了 2DDB 可以减小 PAM8 系统幅度抖动所带来的影响, 这是 DBSCAN 算法首次成功应用于可见光通信系统中。针对水下可见光多输入单输出(MISO)通信系统中多个发射机存在的功率不平衡问题, 石蒙等^[59]提出了一种基于 DBSCAN 的空间聚类方法用来定位每个簇的实际中心点并区分 PAM7 信号的每个电平, 最终实现了 1.22 Gbps 的水下可见光通信。文献[60]等人利用概率贝叶斯学习(probabilistic Bayesian learning, PBL)回归估计 LED 发射端功率-电流的非线性曲线, 从而补偿 LED 系统的非线性。文献[61]将 VLC 系统的非线性均衡看作稀疏恢复(sparse recovery)的问题。在实验中使用匹配追踪(matching pursuit, MP)、正交匹配追踪(orthogonal MP, OMP)和正则正交匹配追踪(regularized OMP, ROMP)三种稀疏恢复方法来补偿 VLC 的非线性, 实验结果表明该方法能够显著降低系统复杂性。

近年来得益于大数据、云计算等技术的涌现, 计算机的计算能力得到了大幅提高, 机器学习的重要分

支——深度学习(deep learning)获得了飞速发展。深度学习是一种深层的机器学习模型, 其深度体现在对特征的多次变换上。常用的深度学习模型为多层神经网络, 可以直接把原始观测数据作为输入, 通过多层非线性映射进行逐级特征提取与变换, 从海量数据中学习规律。基于深度学习强大的学习能力, 研究学者尝试将深度学习应用到可见光通信领域中来解决如数据后均衡、信道模型估计等问题, 从而提升可见光通信系统的性能。

文献[62]提出了一种基于高斯核函数(Gaussian kernel)的多层神经网络 GK-DNN 用于水下可见光通信中的数据后均衡。高斯核的加入使得网络收敛速度加快, 训练次数减少了 47.06%, 成功实现了水下 1.5 Gbps PAM8 信号的传输。文献[63]首次将长短期记忆网络 LSTM(long-short term memory)应用于 VLC 系统中, 并利用 LSTM 进行数据后均衡, 实现了 1.15 Gbps PAM4 信号的传输。相比于传统的均衡方法, 基于 LSTM 的均衡方法将系统 Q 因子提高了 1.2 dB, 传输距离延长了三分之一, 同时降低了系统复杂度, 提高了系统性能。通信实时性对于可见光通信系统具有重要的意义, 深度神经网络应用于可见光通信实时系统中最大的障碍之一是深度学习需要数量庞大的网络参数来提高网络性能, 因此需要考虑如何降低网络的参数数量同时保障网络性能。在文献[64]中, 作者提出了一种异构双臂神经网络 TTHnet 用来估计水下可见光信道模型。在图 8 中, TTHnet 由多层感知机 MLP(multi-layer perception)和卷积神经网络 CNN(convolutional neural network)两个分支网络构

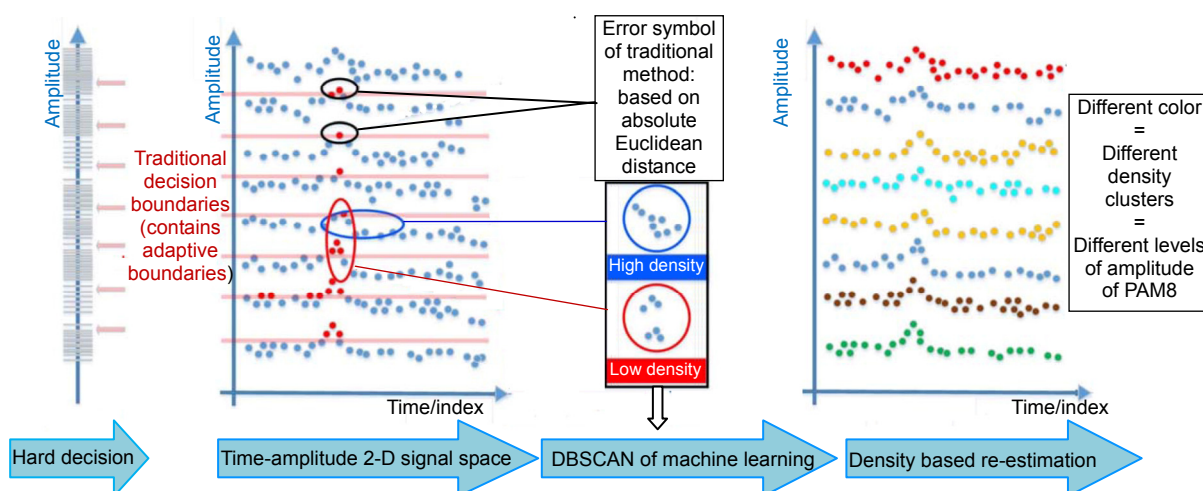


图 7 2DDB 原理^[58]

Fig. 7 Schematic diagram of 2DDB^[58]

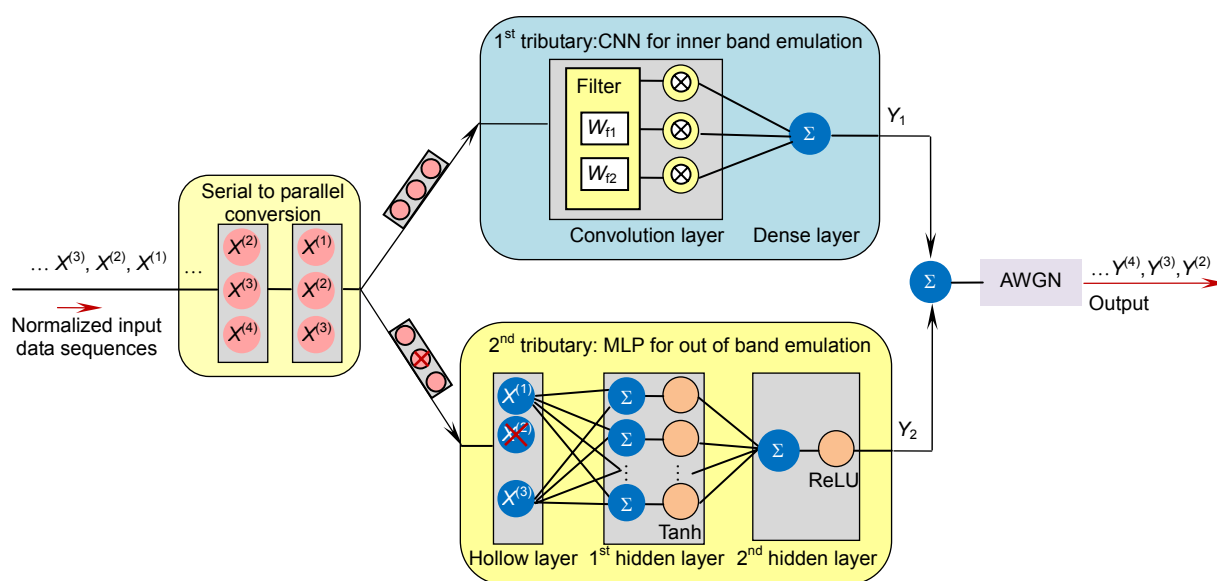


图 8 TTHnet 原理^[64]

Fig. 8 Schematic diagram of TTHnet^[64]

成，经过归一化的输入信号分别输入到两个分支中。第一个分支 CNN 主要用来估计带内信道，第二个分支 MLP 加入了预处理层(hollow layer)，将输入信号中间的信号去掉，这样可以使其主要估计带外信号。两个分支的结合，使得 TTHnet 能够准确估计单载波和多载波可见光信道模型。与传统神经网络所需众多的训练参数相比，TTHnet 只有 1932 个训练参数，极大地降低了网络参数的复杂度，为神经网络用于可见光实时通信系统中提供了可能。

4 总结与展望

本文介绍了可见光通信系统的基本结构，接着从材料器件、高速系统、异构组网、水下可见光通信和机器学习等五个前沿研究方面展开了对可见光通信发展的探讨，并重点分析了本领域内的部分研究方法与技术路线。在研究学者们共同的努力下，可见光通信已经取得了一系列令人瞩目的成果。然而，可见光通信目前仍面临着各方面严峻的挑战，例如现有的光发射和接收器件仍然限制了可见光通信系统性能的提升，未来将需要研究更多的新型器件来突破性能瓶颈；现有的可见光通信信道理论模型还没有全面涉及实际信道中各种恶劣因素的影响，未来将需要研究实际且全面的可见光信道理论模型，为高速可见光通信提供理论指导；现有的可见光异构组网还处于初级研究阶

段，未来将需要研究如何合理解决上行链路传输以及可见光与太赫兹通信、毫米波通信和微波无线通信等通信方式如何共存与兼容；现有的基于机器学习的可见光通信系统还没有实现智能化，未来将需要研究更多的新型机器学习算法协同工作，共同实现可见光系统的智能化。

随着可见光通信的不断发展，我们有理由相信：可见光通信将会同其它通信方式一起，高效、智能地处理海量数据，服务于未来万物互联的时代，造福人类生活。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Chi N. *LED Visible Light Communication Technologies*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. 迟楠. LED 可见光通信技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [3] Chi N, Shi M, Ha Y, et al. LiFi: development status and prospects of visible light communication technology[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2019, 30(1): 1-9, 24. 迟楠, 石蒙, 哈依那尔, 等. LiFi: 可见光通信技术发展现状与展望[J]. *照明工程学报*, 2019, 30(1): 1-9, 24.
- [4] Chi N. The transmitter of the visible light communication system[M]//Chi N. *LED-Based Visible Light Communications*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018: 13-38.
- [5] Fujieda I, Kosugi T, Inaba Y. Speckle noise evaluation and reduction of an edge-lit backlight system utilizing laser diodes and an optical fiber[J]. *Journal of Display Technology*, 2009, 5(11): 414-417.

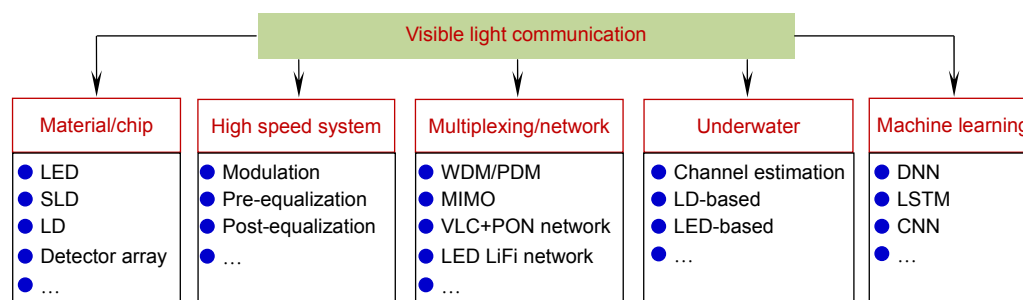
- [6] Zhao Y J, Fu H Q, Wang G T, *et al.* Toward ultimate efficiency: progress and prospects on planar and 3D nanostructured nonpolar and semipolar InGaN light-emitting diodes[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2018, **10**(1): 246–308.
- [7] Shen C, Lee C, Ng T K, *et al.* High-speed 405-nm Superluminescent Diode (SLD) with 807-MHz modulation bandwidth[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(18): 20281–20286.
- [8] Zhou Y J, Zhu X, Hu F C, *et al.* Common-anode LED on a Si substrate for beyond 15 Gbit/s underwater visible light communication[J]. *Photonics Research*, 2019, **7**(9): 1019–1029.
- [9] Maaskant P P, Shams H, Akhter M, *et al.* High-speed substrate-emitting micro-light-emitting diodes for applications requiring high radiance[J]. *Applied Physics Express*, 2013, **6**(2): 022102.
- [10] Ferreira R X G, Xie E Y, McKendry J J D, *et al.* High bandwidth GaN-based micro-LEDs for multi-Gb/s visible light communications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(19): 2023–2026.
- [11] Islim M S, Ferreira R X, He X Y, *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.
- [12] Zhu S C, Yu Z G, Liu L, *et al.* Enhancing the spontaneous emission rate by modulating carrier distribution in GaN-based surface plasmon light-emitting diodes[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(9): 9617–9627.
- [13] Li J H, Huang X X, Ji X M, *et al.* An integrated PIN-array receiver for visible light communication[J]. *Journal of Optics*, 2015, **17**(10): 105805.
- [14] Yang H D, Kil Y H, Yang J H, *et al.* Characterization of n-Ge/i-Ge/p-Si PIN photo-diode[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2014, **22**: 37–43.
- [15] Li J H, Wang F M, Zhao M M, *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.
- [16] Wang C, Yu H Y, Zhu Y J. A long distance underwater visible light communication system with single photon avalanche diode[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, **8**(5): 7906311.
- [17] Ji Y W, Wu G F, Wang C, *et al.* Experimental study of SPAD-based long distance outdoor VLC systems[J]. *Optics Communications*, 2018, **424**: 7–12.
- [18] Karbalayghareh M, Miramirkhani F, Safari M, *et al.* Vehicular visible light communications with SPAD receivers[C]//*Proceedings of 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Marrakesh, Morocco, 2019: 1–5.
- [19] Huang X X, Shi J Y, Li J H, *et al.* 750Mbit/s visible light communications employing 64QAM-OFDM based on amplitude equalization circuit[C]//*Proceedings of 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, Los Angeles, CA, USA, 2015: 1–3.
- [20] Wang F M, Liu Y F, Shi M, *et al.* 3.075 Gb/s underwater visible light communication utilizing hardware pre-equalizer with multiple feature points[J]. *Optical Engineering*, 2019, **58**(5): 056117.
- [21] Wang Y G, Tao L, Huang X X, *et al.* 8-Gb/s RGBY LED-based WDM VLC system employing high-order CAP modulation and hybrid post equalizer[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(6): 7904507.
- [22] Zou P, Liu Y F, Wang F M, *et al.* Mitigating nonlinearity characteristics of gray-coding square 8QAM in underwater VLC system[C]//*Proceedings of 2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, Hangzhou, China, 2018: 1–3.
- [23] Le Minh H, O'Brien D, Faulkner G, *et al.* 80 Mbit/s visible light communications using pre-equalized white LED[C]//*Proceedings of the 34th European Conference on Optical Communication*, Brussels, Belgium, 2008.
- [24] Vucic J, Kottke C, Nerreter S, *et al.* White light wireless transmission at 200+ Mb/s net data rate by use of discrete-multitone modulation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(20): 1511–1513.
- [25] Vučić J, Kottke C, Nerreter S, *et al.* 513 Mbit/s visible light communications link based on DMT-modulation of a white LED[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(24): 3512–3518.
- [26] Vučić J, Kottke C, Habel K, *et al.* 803 Mbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary[C]//*Proceedings of 2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*, Los Angeles, CA, USA, 2011.
- [27] Cossu G, Khalid A M, Choudhury P, *et al.* 2.1 Gbit/s visible optical wireless transmission[C]//*Proceedings of the 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications*, Amsterdam, Netherlands, 2012.
- [28] Wu F M, Lin C T, Wei C C, *et al.* 3.22-Gb/s WDM visible light communication of a single RGB LED employing carrier-less amplitude and phase modulation[C]//*Proceedings of 2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, Anaheim, CA, USA, 2013.
- [29] Wang Y Q, Huang X X, Zhang J W, *et al.* Enhanced performance of visible light communication employing 512-QAM N-SC-FDE and DD-LMS[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(13): 15328–15334.
- [30] Cossu G, Wajahat A, Corsini R, *et al.* 5.6 Gbit/s downlink and 1.5 Gbit/s uplink optical wireless transmission at indoor distances (≥ 1.5 m)[C]//*Proceedings of 2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Cannes, France, 2014.
- [31] Wang Y G, Tao L, Huang X X, *et al.* 8-Gb/s RGBY LED-based WDM VLC system employing high-order CAP modulation and hybrid post equalizer[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(6): 7904507.
- [32] Chi N, Shi J Y, Zhou Y J, *et al.* High speed LED based visible light communication for 5G wireless backhaul[C]//*Proceedings of 2016 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM)*, Newport Beach, CA, USA, 2016.
- [33] Chun H, Rajbhandari S, Faulkner G, *et al.* LED based wavelength division multiplexed 10 Gb/s visible light communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(13): 3047–3052.
- [34] Wang Y Q, Shi J Y, Yang C, *et al.* Integrated 10 Gb/s multilevel multiband passive optical network and 500 Mb/s indoor visible light communication system based on Nyquist single carrier frequency domain equalization modulation[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(9): 2576–2579.
- [35] Wang Y G, Chi N, Wang Y Q, *et al.* Network architecture of a high-speed visible light communication local area network[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(2): 197–200.
- [36] Rehman S U, Ullah S, Chong P H J, *et al.* Visible light communication: a system perspective—overview and challenges[J]. *Sensors*, 2019, **19**(5): 1153.
- [37] Shao S H, Khreishah A, Ayyash M, *et al.* Design and analysis of

- a visible-light-communication enhanced WiFi system[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, **7**(10): 960–973.
- [38] Hammouda M, Akln S, Vegni A M, *et al.* Hybrid RF/LC Systems under QoS Constraints[C]//*Proceedings of the 25th International Conference on Telecommunications (ICT)*, St. Malo, France, 2018: 312–318.
- [39] Alreshedi M T, Hussein A T, Elmirghani J M H. Uplink design in VLC systems with IR sources and beam steering[J]. *IET Communications*, 2017, **11**(3): 311–317.
- [40] Chi N, Hu F C, Zhou Y J. The challenges and prospects of high-speed visible light communication technology[J]. *ZTE Technology Journal*, 2019, **25**(5): 56–61.
迟楠, 胡昉辰, 周盈君. 高速可见光通信技术的挑战与展望[J]. *中兴通讯技术*, 2019, **25**(5): 56–61.
- [41] Duntley S Q. Light in the sea[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1963, **53**(2): 214–233.
- [42] Nakamura K, Mizukoshi I, Hanawa M. Optical wireless transmission of 405 nm, 1.45 Gbit/s optical IM/DD-OFDM signals through a 4.8 m underwater channel[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(2): 1558–1566.
- [43] Shen C, Guo Y J, Oubei H M, *et al.* 20-meter underwater wireless optical communication link with 1.5 Gbps data rate[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(22): 25502–25509.
- [44] Ho C M, Lu C K, Lu H H, *et al.* A 10m/10Gbps underwater wireless laser transmission system[C]//*Proceedings of 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, Los Angeles, CA, USA, 2017.
- [45] Huang X H, Li C Y, Lu H H, *et al.* 6-m/10-Gbps underwater wireless red-light laser transmission system[J]. *Optical Engineering*, 2018, **57**(6): 066110.
- [46] Zou P, Liu Y F, Wang F M, *et al.* Enhanced performance of odd order square geometrical shaping QAM constellation in underwater and free space VLC system[J]. *Optics Communications*, 2019, **438**: 132–140.
- [47] Wang P L, Li C, Xu Z Y. A cost-efficient real-time 25 Mb/s system for LED-UOWC: design, channel coding, FPGA implementation, and characterization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, **36**(13): 2627–2637.
- [48] Wang F M, Liu Y F, Shi M, *et al.* 3.075 Gb/s underwater visible light communication utilizing hardware pre-equalizer with multiple feature points[J]. *Optical Engineering*, 2019, **58**(5): 056117.
- [49] Lu C H, Wang J M, Li S B, *et al.* 60m/2.5 Gbps underwater optical wireless communication with NRZ-OOK modulation and digital nonlinear equalization[C]//*2019 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. IEEE, 2019: 1–2.
- [50] Wang J M, Lu C H, Li S B, *et al.* 100 m/500 Mbps underwater optical wireless communication using an NRZ-OOK modulated 520 nm laser diode[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(9): 12171–12181.
- [51] Cochenour B M, Mullen L J, Laux A E. Characterization of the beam-spread function for underwater wireless optical communications links[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2008, **33**(4): 513–521.
- [52] Tang S J, Dong Y H, Zhang X D. Impulse response modeling for underwater wireless optical communication links[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, **62**(1): 226–234.
- [53] Zedini E, Oubei H M, Kammoun A, *et al.* Unified statistical channel model for turbulence-induced fading in underwater wireless optical communication systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, **67**(4): 2893–2907.
- [54] Kanungo T, Mount D M, Netanyahu N S, *et al.* An efficient k-means clustering algorithm: analysis and implementation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, **24**(7): 881–892.
- [55] Khan K, Rehman S U, Aziz K, *et al.* DBSCAN: past, present and future[C]//*Proceedings of the 5th International Conference on the Applications of Digital Information and Web Technologies*, Bangalore, India, 2014.
- [56] Ma J, He J, Shi J, *et al.* Nonlinear compensation based on k-means clustering algorithm for Nyquist PAM-4 VLC system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, **31**(12): 935–938.
- [57] Lu X Y, Wang K H, Qiao L, *et al.* Nonlinear compensation of multi-CAP VLC system employing clustering algorithm based perception decision[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **9**(5): 7906509.
- [58] Lu X Y, Zhou Y J, Qiao L, *et al.* Amplitude jitter compensation of PAM-8 VLC system employing time-amplitude two-dimensional re-estimation base on density clustering of machine learning[J]. *Physica Scripta*, 2019, **94**(5): 055506.
- [59] Shi M, Zhao Y H, Yu W X, *et al.* Enhanced performance of PAM7 MISO underwater VLC system utilizing machine learning algorithm based on DBSCAN[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, **11**(4): 7905013.
- [60] Chen C, Deng X, Yang Y B, *et al.* LED nonlinearity estimation and compensation in VLC systems using probabilistic Bayesian learning[J]. *Applied Sciences*, 2019, **9**(13): 2711.
- [61] Zhang G W, Hong X J, Fei C, *et al.* Sparsity-aware nonlinear equalization with greedy algorithms for LED-based visible light communication systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, **37**(20): 5273–5281.
- [62] Chi N, Zhao Y H, Shi M, *et al.* Gaussian kernel-aided deep neural network equalizer utilized in underwater PAM8 visible light communication system[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(20): 26700–26712.
- [63] Lu X Y, Lu C, Yu W X, *et al.* Memory-controlled deep LSTM neural network post-equalizer used in high-speed PAM VLC system[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(5): 7822–7833.
- [64] Zhao Y H, Zou P, Yu W X, *et al.* Two tributaries heterogeneous neural network based channel emulator for underwater visible light communication systems[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(16): 22532–22541.

Progress and prospect of high-speed visible light communication

Chi Nan*, Chen Hui

Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves (MoE), Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China



Frontier researches of visible light communication

Overview: Visible light communication (VLC) is a wireless optical transmission technology that utilizes visible light with a wavelength in the range of 380 nm to 790 nm. It can realize high-speed data transmission by using LED (light emitting diode) with fast response characteristics as a transmitter. VLC has offered several advantages such as license-free, cost-effective, immunity to electromagnetic interference and high security, comparing with traditional wireless communication. The biggest advantage of VLC is high speed. The existing VLC experiment can achieve a transmission rate of more than ten gigabits per second. This advantage makes VLC inevitable in the future intelligent era B5G/6G ultra-high speed ubiquitous optical networking. With such advantages, VLC has become an important scientific theme supported by governments since its inception. This paper explores the research progress of VLC around five frontier directions: material chips, high-speed systems, multiplexing networks, underwater visible light communication and applications of machine learning in VLC. Among them, material chips mainly include new light-emitting devices and light-receiving devices; high-speed systems introduce the development of VLC transmission rates; multiplexing networks are built around VLC access networks; underwater visible light communication and machine learning are the rapid and popular research directions in the field of VLC currently. High performance materials including light transmitters and receivers are indispensable for high-speed VLC. Many researchers have been concentrated on the fabrication of new LED materials. In order to further improve the transmission rate of VLC, researchers have done a lot of research from advanced modulation technology, signal pre-equalization and post-equalization, and made a series of breakthroughs. Studying how to connect VLC to an existing communication network and how to build a visible light wireless system composed of multiple visible light access points (VAPs), are the keys to the practical use of VLC. Under the intelligent era of the Internet of Everything, the underwater visible light communication is an indispensable component. Along with the constant exploration of researchers, underwater visible light communication achieves higher and higher transmission rates. However, due to the harsh underwater environment, there are few relevant theoretical models for the effects of suspended matter and particulate matter, the influence of underwater turbulence on the VLC channel. These disturbances increase the uncertainty of the performance of underwater visible light communication systems and require further research in the future. Some classical machine learning algorithms such as K-means, DBSCAN, deep learning, etc. have shown great potential and been tried by researchers to solve the problems in VLC. Looking forward to the prospect of VLC: in the intelligent era of future, VLC will become an indispensable part of communication networks with its advantages of high-speed transmission, and cooperate with other communication technologies to complement human life.

Citation: Chi N, Chen H. Progress and prospect of high-speed visible light communication[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(3): 190687

Supported by National Key R&D Program of China (2017YFB0403603) and National Natural Science Foundation of China (61571133)

* E-mail: nanchi@fudan.edu.cn