



高速可见光通信技术的挑战与展望

The Challenges and Prospects of High-Speed Visible Light Communication Technology

迟楠/CHI Nan, 胡昉辰/HU Fangchen,
周盈君/ZHOU Yingjun

(复旦大学, 上海 200433)
(Fudan University, Shanghai 200433, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.201905009

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20190925.1651.004.html>

网络出版日期: 2019-09-26

收稿日期: 2019-08-15

摘要: 目前, 高速可见光通信(VLC)系统在器件、算法、组网等方面均存在着一定的技术瓶颈, 需要有针对性地突破这些瓶颈, 进一步提升其系统速率, 使之在未来 B5G/6G 架构中发挥重要作用。阐述了现阶段高速可见光通信面临的若干挑战, 并对其未来前景提出了展望。

关键词: 光通信; 可见光通信; 5G/B5G

Abstract: At present, high-speed visible light communication (VLC) systems have certain technical bottlenecks in terms of devices, algorithms, networking, etc. If these bottlenecks can be broken through in a targeted manner, the system speed will be further increased, and VLC will play a pivotal role in the future B5G/6G architecture. This paper describes several challenges and solutions for high-speed VLC at this stage, and proposes its future prospects.

Key words: optical communications; visible light communication; 5G/B5G

如今, 随着移动互联网的数
据大发展以及 5G/B5G 技
术的标准化和产业化, 通信技术
不断进行着翻新与再创造, 随之
而来的是虚拟现实、智慧城市、
云计算、自动驾驶等。这些大数
据业务在飞速发展的同时, 也对
通信网络的数据承载能力提出
了新的挑战。但在无线接入方
面, 传统的无线通信正陷入现有
无线频谱资源逐渐匮乏的困境
中。在这种情况下, 一种新型的
通信方式——可见光通信出现
在了人们的视野中^[1]。可见光通
信是利用波长范围在 380 nm ~
760 nm 的可见光作为信息的载
体, 调制信号进行传输的一种新

型通信手段。可见光光谱带宽
约为 400 THz, 远远大于现有的
无线通信频谱, 如此巨大的带宽
资源使得可见光通信能够具有
高速通信的潜力。在现有 5G/
B5G 频谱的瓜分下, 可见光通信
技术的使用, 能够大大拓展现有
的无线频谱资源, 有效缓解资源
即将耗尽的燃眉之急。

可见光通信自问世起就得到
了世界各国的广泛关注。2003
年, 日本成立了可见光联盟
(VLCC), 已经发展成为一个研
究可见光产业的国际组织。美
国国家自然科学基金(NSF)成
立的工程研究中心(ERC)也在研
究可见光通信。与此同时, 欧盟的

欧盟第七框架协议(FP7)、5G
基础设施公私合作伙伴关系
(5GPPP)项目中都重点支持了
可见光通信。在中国, 科技部的
重点研发计划都将可见光通信
列入其中^[2]。世界各国对可见光
通信的重视是基于其在各个领
域中的应用多样性。例如, 在未
来 B5G/6G 的通信方式来临之
际, 将照明与通信结合应用于路
灯、车灯、室内照明等领域, 将
为全社会构建一个覆盖范围广、
成本低廉的泛在光通信网络; 在
核电站等电磁敏感的区域中, 可
见光通信是一种不可或缺的无
线通信方式; 在军用通信中, 可
见光通信可以抵抗无线电干扰,

实现空气、水域的远距离高速通信;可见光通信还可被运用在如医疗、航空、工业制造的众多特定场景中。可见光通信潜在的应用领域多样,用户数量巨大,将会带来非常大的经济效益,而如何实现更高速率的可见光系统也是当前的一个研究热点。

1 可见光通信系统的架构

可见光通信系统的基本架构是点对点系统^[3],近些年随着对通信容量的需求增大,可见光多输入多输出(MIMO)系统^[4]也在逐步发展中。目前的点对点可见光系统主要由发射和接收2部分构成^[5],如图1所示。发射部分分为电学部分与光学部分,电学部分主要包括信号处理电路与发射机驱动电路,光学部分则包括发射机光学芯片以及光学天线。2部分之间的光电子器件的就是可见光通信系统的发射机,目前主要是发光二极管(LED)与激光二极管(LD)^[6-7]。信号经过信号处理电路完成编码和调制之后,通过驱动LED/LD来实现对LED/LD的强度调

制,从而将电信号转换为光信号。接收部分同样包括光学部分和电学部分。光学部分主要包括接收光学天线和探测器芯片,目前主流探测器芯片为光电二极管(PIN)和雪崩光电二极管(APD)。接收光学天线把尽可能多的光学信息聚焦到探测器芯片表面上。电学部分主要是信号处理模块,光电探测器将接收到的光信号转换为电信号,对信号进行解调制、解码等信号处理过程之后,恢复出原始的发送信号。

虽然可见光理论上具有超大的通信容量,但是其受限于现有发射接收机的材料器件、光学系统、数字信号处理算法等,因此进一步提升可见光通信系统的速率依旧充满挑战。

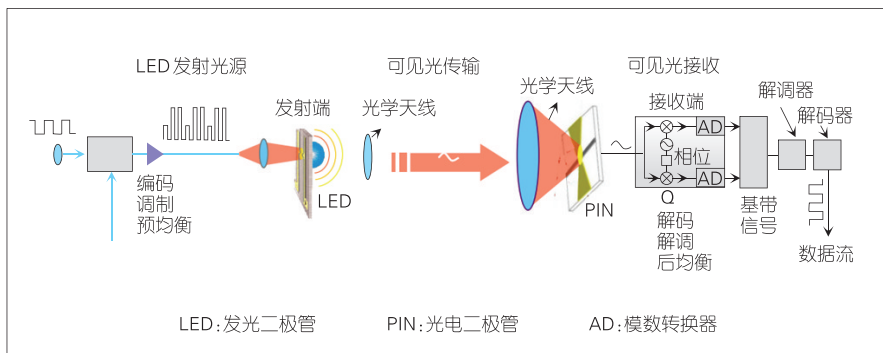
2 高速可见光通信面临的挑战

2.1 新材料与新器件

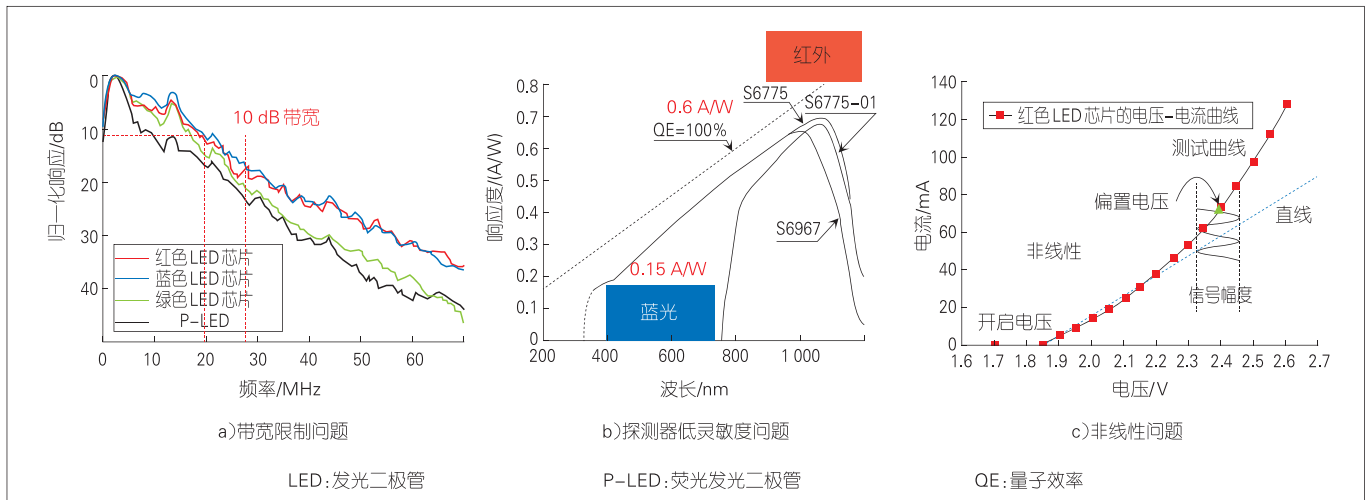
可见光通信的发射机和接收机近年来被广泛关注,主要的挑战如图2所示。LED和LD是

目前主流的发射机,LED被用作发射机主要是因为它的易耦合性、安全性以及低成本,但是现有的廉价商用LED的3 dB带宽小于100 MHz,无法满足高速通信的需要。LD作为发射机主要是因为激光具有相干性,所以天然地拥有大于吉咖(Giga)赫兹的带宽,但是其在使用的时候耦合对准较难且具有散斑效应,同时对于人眼的安全性也存在潜在的威胁。在接收机方面,PIN是目前成本较低的主流探测器,但其灵敏度低,不能进行远距离通信且响应带宽有限。APD是利用雪崩效应以提供较大放大倍数的光电二极管。虽然它的接收灵敏度很高,但是引入的噪声却很大,不适用于对信噪比要求高的应用场景中。在目前商用的接收机中,如果想要增大接收机的调制带宽,其噪声系数必然增大,与此同时光敏面的面积也会相应缩小,这为接收机端的光学天线带来了严峻的考验。因此,需要研制新的适用于未来高速可见光通信的发射机与接收机,以满足大带宽、低成本、易耦合、高灵敏度等需求。

为了实现可见光通信系统器件上的突破,世界各国许多研究学者都做出了相应的研究。南昌大学研制的硅衬底LED^[8]能有效提升发射机的调制带宽。硅衬底LED单面发光,具有较好的一致性,垂直结构电极降低了载流子寿命,特殊设计的量子阱结构也提高了载流子的抽取效



▲图1 点对点可见光通信系统的基本架构



▲图2 高速可见光通信系统在器件上的挑战

率。除此之外,基于InGaN的高功率蓝光超发射二极管(SLD)是一种新型研制的光电二极管^[9],该种光电二极管有效结合了LED与LD的优点,不仅可以实现800 MHz左右的调制带宽,还能有效避免LD的散斑效应。但是目前这种器件的工艺还不成熟,只研制成功了蓝光和绿光SLD。台湾大学和阿卜杜拉国王科技大学(KAUST)采用新工艺和新材料实现了超高带宽的可见LD^[10-11]。总的来说,未来的VLC发射机逐渐朝着传统器件更新化、新型器件完善化的方向发展。

在接收机方面,为提升PIN的灵敏度,集成PIN焦平面阵列成为很有潜力的研究方向。2015年,复旦大学首次设计了3×3硅基集成PIN阵列^[12],并实现了1.2 Gbit/s可见光通信。接收机端的光学天线一直是接收机集成化的一大阻碍,为简化光学天线,研究学者开始研究新型

材料与结构来替代传统透镜。复旦大学在2017年将柔性纳米材料首次应用为可见光通信系统的光学天线^[13],一定程度上简化了可见光通信的瞄准问题,并将速率提升了60%。

2.2 先进的调制编码和数字信号处理算法

高速可见光通信除了在器件材料方向面临挑战,先进的调制编码和数字信号处理算法同样至关重要。在有限带宽下,不断逼近通信容量极限是高速可见光通信面临的核心科学问题和最大挑战。

多维复用技术是进一步提升可见光通信容量的一种有效手段,如图3所示。具体来说,传统的相移键控(PSK)、频移键控(FSK)等典型的一维调制需要向多维调制方式发展,融合振幅、频率、相位、横向空间分布、偏振等多维度调制信号。同时,在可见光通信系统的不断优化

下,系统的信噪比也在进一步提升,运用高阶调制,例如64 QAM、128 QAM等,可以进一步提升频谱效率。波分复用、偏振复用等复用技术更是可以进一步提升系统容量。牛津大学、复旦大学、爱丁堡大学先后利用波分复用技术与先进的调制格式,分别实现了10.4 Gbit/s、10.7 Gbit/s、15.7 Gbit/s的多色LED高速可见光通信系统^[8,14,15]。

但是,目前普通的波分复用(WDM)可见光通信系统并没有充分利用频带资源,不同频带之间的带隙浪费了频谱资源。另外,不完美的调制和编码方式,使得目前信道容量远没有到达香农极限。近年来,超奈奎斯特调制、概率几何整形、极化码等新技术不断涌现并成功应用于可见光通信系统中,进一步提升可见光通信系统的频谱利用率。

2.3 可见光异构组网

在未来应用中,可见光通信

与其他通信方式的异构融合是必不可少的一步,如图4所示,如何将可见光系统成功接入现有通信网络、发挥其优势并支撑室内多用户大容量通信,是未来可见光发展的又一大挑战。复旦大学于2014年实现了25 km光纤与75 cm可见光组网,通过32 QAM-正交频分复用(OFDM)调制方式实现了8 Gbit/s总吞吐量,可同时支持8个用户的接入^[16]。这一实验证明了可见光系统可以兼容目前的骨干网,成为接入网中一种大容量的无线通信方式。

但是在实际运用当中,可见光异构组网依旧存在很多亟待解决的问题。首先是可见光通信的上行链路问题,若以可见光的方式回传,对于移动端的功耗要求太高。此外,上下行光路之间可能会互相干扰,所以如何合理地解决可见光的上行链路问题一直是人们在考虑的问题。在室内布设可见光接入点时,接入点数量要与用户数匹配。在多接入点接入时,会遇到互相干扰、移动性管理等问题。当现有的业务流到灯时,如何利用可见光通信顺畅地与这些业务对接,以及可见光与空间激光通信、太赫兹通信、毫米波通信和微波无线通信等通信技术如何共存和兼容,这些问题值得研究学者在未来进一步探索。

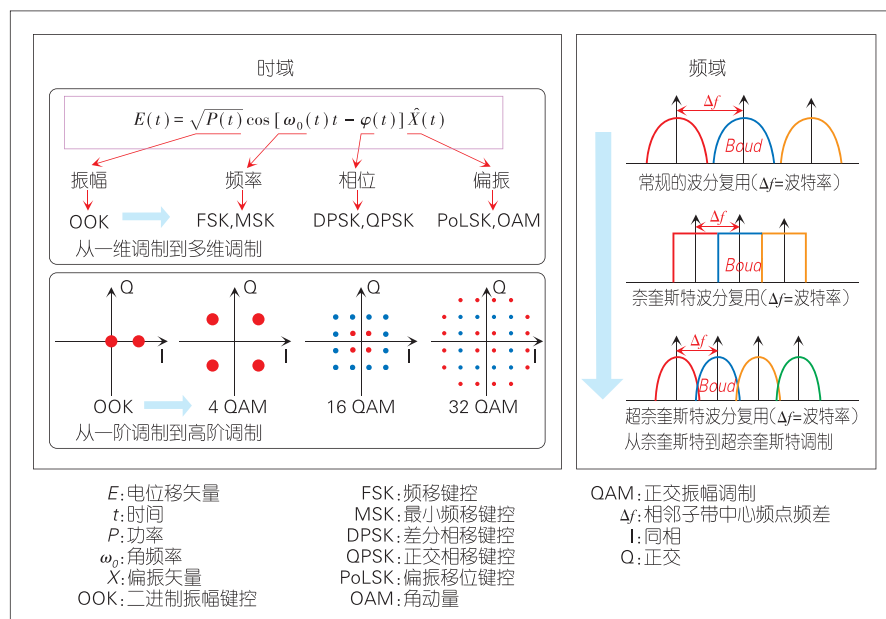
2.4 水下可见光通信

如图5所示,随着未来B5G/

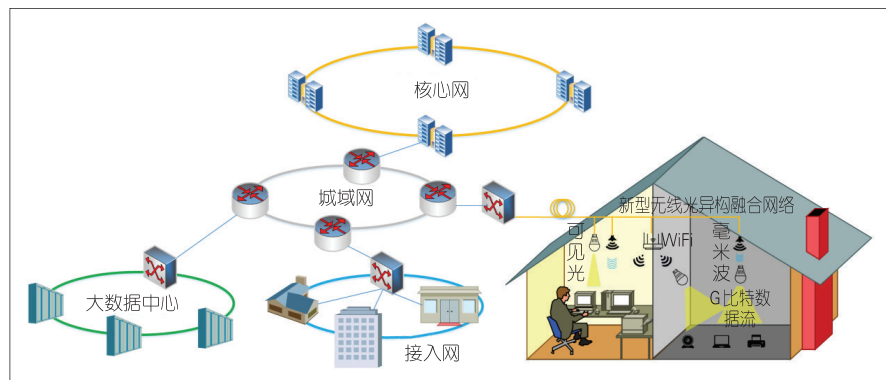
6G的发展,水下与陆上的通信网络不再孤立存在,它们将会形成一个智能通信网络,传感器、水下机器人、人类都需要进行水下活动,并进行必要的通信互联,所以水下无线通信的需求日益迫切。微波通信、声波通信是目前比较常用的水下通信手段,但是微波信号(~ 100 MHz)在海水中里面的衰减极大,趋肤深度只有厘米级别。声波通信在海水中的穿透能力极强,但是通信带宽太低。所以为同时实现远

距离、高速率的水下无线通信,水下无线光通信逐渐发展起来^[17]。目前水下无线光通信方式主要有两种:LD通信与LED可见光通信。KAUST已经实现了水下1.5 Gbit/s的20 m蓝光激光通信^[18]。复旦大学则实现了总速率14.6 Gbit/s的1.2 m水下LED通信^[19]。

但是,水下无线光通信的挑战依旧严峻。首先,水下环境恶劣,吸收、散射以及湍流是影响水下光通信的主要环境因素。



▲图3 可见光通信系统实现高速调制的途径



▲图4 高速可见光通信系统在异构组网上的挑战



▲图5 水下高速无线光网络

其次,光通信器件复杂多样,波长跨度从紫外波段、可见光波段到红外波段,这些器件的物理光电特性都有很大区别。最后,水下通信节点经常涉及到运动目标,来自不同方向、不同运动速度、连续非连续干扰等都会对于信息高速传输产生致命影响,水下环境中应考虑相对广覆盖和大视场角接收问题。此外,目前的长距离高速水下无线光通信大部分停留在实验室阶段,所以如何在实际环境中实现更长距离、更高速率的水下无线光通信,是未来水下可见光通信面临的巨大挑战。

3 高速可见光通信的展望

可见光通信是未来 B5G/6G 蓝图的重要组成板块,为进一步拓宽未来可见光通信的应用场景、提升其通信性能、突破应用

瓶颈,本节从4个方面给出对未来高速可见光通信前景的展望。

3.1 新机理器件

为解决目前 LED 带宽限制、探测器灵敏度低与非线性等问题,未来高速可见光通信系统还需要新型的光源、探测器和光电器件。新型可见光光源需要有更宽的调制带宽、更高的光效,一些新型 LED 已经初有成果,例如微结构 LED、表面等离子体 LED 以及超辐射 LED。新型可见光探测器需要提高可见光的选择性吸收、提升内外量子效率和接收光通量,目前最新成果有复旦大学的 3×3 硅基集成 PIN 阵列和基于纳米图形荧光材料可见光吸收器。未来可见光通信系统作为一个独立的通信体系,还需要更多的独立光电器件,如外调制器、放大器、复用/解复用

器、光开关、集成收发器等。

3.2 可见光信道建模

目前可见光信道建模都只是根据 LED 或 LD 器件本身光场分布与空间特性建立的。但是,实际的可见光信道还包括接收机频响特性、光学天线、空间光场分布、大气湍流、背景光噪声、散射衍射反射等。结合这些信息的可见光信道建模将在未来给高速可见光通信提供理论指导,对空间无线可见光通信、水下无线可见光通信都有重大意义。

3.3 可见光协议组网

可见光通信作为一种理想的室内通信方式,能够根据室内空间大小设置合适的无线接入点,同时结合动态配置与固定配置解决室内多用户造成的互干扰、移动问题。为减少用户端的功率损耗,可见光上行链路可用红外或者无线通信进行替代,在室内组成混合网络。为解决业务流到灯的问题,可以尝试电力线、千兆以太网或者是光纤与灯相连,与局域网、广域网相连。

3.4 全频谱智能通信

可见光通信将作为未来 B5G/6G 中一种可靠的通信方式,联同其他通信方式,组成全频谱网络,在特定场景中提供大容量、高速率、稳定可靠的无线传输。例如,智能可见光定位系统、室内可见光、毫米波无线混

合网络等。为适应未来系统复杂的数据处理,机器学习智能算法应当成为重点研究的对象,并被作为一种先进的信号处理算法应用在可见光通信系统中。例如,深度神经网络可进行非线性抑制、信道性能检测与调制格式识别等。因可见光和毫米波太赫兹通信都具有视距特性,未来网络需要对融合接收端进行精准定位和多天线协作通信,集感知、通信、智能、计算一体化。

4 结束语

本文中,我们详细阐述了高速可见光通信系统在器件、算法、组网等方面均存在的技术瓶颈,并对其未来发展提出了几点建议:(1)重点关注与发展可见光新机理器件,提升发射、接收机整体性能;(2)完善可见光通信系统理论基础,建立传输信道的数学与物理模型;(3)针对水下无线光通信应用场景,努力突破瓶颈;(4)重点研究可见光异构融合网络,兼容现有通信网络;(5)大力发展智能算法,适应未来全频谱通信网络。

目前,虽然可见光通信的商用尚待时日,但不可否认的是,它仍然具有非常重要的理论和实际应用意义。高速可见光通信技术在未来B5G/6G的应用前景是非常广阔的,只要认清当前技术形式,制定合理稳健的发展计划,可见光通信技术必定能够在人们未来的生产生活中大放光彩。

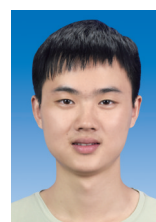
参考文献

- [1] CHI N, HAAS H, KAVEHRAD M, et al. Visible Light Communications: Demand Factors, Benefits and Opportunities[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(2): 5–7. DOI: 10.1109/MWC.2015.7096278
- [2] 李荣玲. 基于白光LED的可见光通信系统[D]. 复旦大学, 2014. 10.14016/j.cnki.jgz.2016.09.069
- [3] WANG Y, TAO L, HUANG 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): 1–7. DOI: 10.1109/JPHOT.2015.2489927
- [4] QIAO L, LU X, LIANG S, et al. Performance Analysis of Space Multiplexing by Superposed Signal in Multi-Dimensional VLC System[J]. Optics Express 2018, 26(16): 19762–19772
- [5] CHI N. The Transmitter of the Visible Light Communication System[M]//CHI N. LED-Based Visible Light Communications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018: 13–38
- [6] WANG F, LIU Y, 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): 1–9
- [7] 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. DOI: 10.1109/JDT.2009.2027612
- [8] ZHU X, WANG F, 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. San Diego, California: Optical Society of America, 2018. DOI: 10.1364/OFC.2018.M3K.3
- [9] SHEN C, LEE C, Ng TK, et al. High-Speed 405-nm Superluminescent Diode (SLD) with 807-MHz Modulation Bandwidth[J]. Optics Express, 2016, 24(18): 20281–20286. DOI: 10.1364/OE.24.020281
- [10] SHEN C, GUO Y, SUN X, et al. Going Beyond 10-meter, Gbit/s Underwater Optical Wireless Communication Links Based on Visible Lasers[C]//2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC). Singapore: IEEE, 2017: 1–3. DOI: 10.1109/OECC.2017.8115036
- [11] HUANG Y, CHI Y, 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. DOI: 10.1038/s41598-017-10289-y
- [12] LI J, WANG F, ZHAO 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. DOI: 10.1364/AO.58.000383
- [13] DONG Y, SHI M, YANG X, et al. Nanopatterned Luminescent Concentrators for Visible Light Communications[J]. Optics Express, 2017, 25(18): 21926–21934. DOI: 10.1364/OE.25.021926
- [14] CHUN H, RAJHANDARI 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. DOI: 10.1109/JLT.2016.2554145
- [15] BIAN R, TAVAKKOLNIA I, HAAS H. 15.73 Gb/s Visible Light Communication With Off-the-Shelf LEDs[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(10): 2418–2424. DOI: 10.1109/JLT.2019.2906464
- [16] WANG Y, YANG C, WANG Y, et al. Gigabit Polarization Division Multiplexing in Visible Light Communication[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 1823–1826. DOI: 10.1364/OL.39.001823
- [17] 胡昉辰, 迟楠. 水下可见光通信的原理、关键技术与应用[J]. 中国照明电器, 2018, (1): 6–13. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6150.2018.01.002
- [18] SHEN C, GUO Y, OUBEI HM, et al. 20-Meter Underwater Wireless Optical Communication Link with 1.5 Gbps Data Rate [J]. Optics Express, 2016, 24(22): 25502–25509. DOI: 10.1364/OE.24.025502
- [19] SHI J, ZHU X, WANG F, et al. Net Data Rate of 14.6 Gbit/s Underwater VLC Utilizing Silicon Substrate Common-Anode Five Primary Colors LED[C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). 2019: 1–3

作者简介



迟楠, 复旦大学教授、博士生导师; 长期从事高速光通信和高速可见光通信方面的研究, 主要研究高谱效率多维多阶光调制技术和数字信号处理技术; 获教育部自然科学二等奖、中国产学研合作创新一等奖、国际工业博览会创新奖等各1项; 发表SCI检索论文260余篇, 累计SCI他引2 400余次, Google引用6 100余次, 4篇ESI高被引论文, 出版专著5部, 获发明专利18项, 入选国家标准和IEEE标准提案。



胡昉辰, 复旦大学通信系在读博士生; 研究方向为高速可见光通信。



周盈君, 复旦大学通信系在读博士生; 研究方向为高速可见光通信。