

# 面向 6G 的可见光通信

## Visible Light Communication Towards 6G



迟楠 /CHI Nan, 贾俊连 /JIA Junlian  
(复旦大学, 上海 200433)  
(Fudan University, Shanghai 200433, China)

**摘要:** 无线通信中的频段资源已经十分紧张, 在 6G 复杂的通信环境下, 传统的无线通信也难以达到全面的高速覆盖。可见光通信作为一种利用 400 ~ 800 THz 无须授权频段的高速通信技术, 将在 6G 网络中担任重要的角色。从器件、速率、特殊场景应用、异构组网和高速光互联 5 个方面讨论了可见光通信的进展, 并介绍了现阶段面临的挑战和对未来的展望。

**关键词:** 可见光通信; 6G; 光互联

**Abstract:** Frequency band resources in wireless communication are already very tight, and it is difficult for traditional wireless communication to reach full high-speed coverage in 6G complex communication environment. Visible light communication (VLC), as a high-speed communication technique taking advantage of unlicensed spectrum of 400–800 THz, will take an important role in 6G. In this paper, the recent research in VLC including devices, rate, special scene applications, heterogeneous networking and high-speed optical interconnection is discussed, as well as the challenges and the prospects.

**Keywords:** visible light communication; 6G; optical interconnection

DOI: 10.12142/ZTETJ.202002003

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200423.1354.002.html>

网络出版日期: 2020-04-23

收稿日期: 2020-02-18

**截**至 2019 年年底, 5G 已经开始商用部署, 各个国家的机构也逐步开始了 6G 的研究。早在 2018 年 7 月, 国际电信联盟就针对 2030 年及之后的通信系统技术发展, 成立了一个焦点小组。相比于现有的 5G 网络, 6G 网络能提供更好的性能, 以满足如工业 4.0、个人健康服务、虚拟出席等

新兴且极具挑战性的应用要求; 因此, 6G 的目标速度应该比 5G 快 1 000 倍。从 2G 开始, 一直到 4G, 一共有大约 6 GHz 带宽的频谱资源已被占用。5G 通过整合 24 ~ 100 GHz 的频谱资源, 尽可能地提升了频谱利用的效率<sup>[1]</sup>。而如今, 研究者们发现目前的频谱资源已经逐渐满足不了飞速增长的带宽需求; 因此, 在 6G 的研究中, 探索如何能够进一步扩展 100 GHz 以上的频谱资源, 如何能够寻得不同的频谱来源显得极为重要。

此外, 不仅仅满足于现有的“城市、车联网、物联网”的 5G 覆盖范围, 6G 的覆盖范围将进一步扩充至偏远地区、水面、水下、空中乃至卫星中, 成为一个空天地一体化的网络<sup>[2]</sup>, 其概念图如图 1 所示。但这些场景的环境差异巨大, 这意味着 6G 网络将不再是一个使用单一通信手段的通信网络, 只有融合各种无线通信方法, 发挥其各自优势, 才能够实现一个一体化的网络。

可见光通信作为一种频谱无须授

**基金项目:** 科技部重点研发计划“高速可见光通信技术研究及芯片化设计”(2017YFB0403603)、国家自然科学基金(61925104)

权的高速率通信方式，是常规无线局域网的一个很好的替代品。在室内环境中，可见光通信有其独特的优势，可以实现高保密、人体无害、无电磁辐射的高速通信，能够覆盖人们近 80% 的活动范围。可见光通信在室外地面通信中也有很好的应用场景，如车间通信很可能成为首个实现可见光通信的场景<sup>[3]</sup>。可见光通信利用了从 400 ~ 800 THz 的超宽频谱，在图 1 所示的 6G 网络场景中，可以用于实现大气内外、水面水下等场景中的同环境设备之间以及不同环境设备间的通信。

本文中，我们主要针对 6G 中可见光通信的应用，从器件、速率、组网和一些新的应用方面来介绍可见光通信的研究进展和挑战，并展望了可见光通信在未来的研究。

### 1 可见光通信中的器件

可见光通信的基础是点对点系统<sup>[4]</sup>，多输入多输出 (MIMO) 的可见光通信系统也在随着系统容量的增加而逐渐发展<sup>[5]</sup>。一个典型的可见光通信分为发射和接收两个部分<sup>[6]</sup>，而这两部分的关键器件在于发射部分中的电光转换器件、接收部分中的光电转换器件。其中，发射器件主要分为发光二极管 (LED)、激光二极管 (LD) 和最新研发的超辐射二极管 (SLD)，接收器件主要分为光电二极管 (PIN)、雪崩二极管 (APD)、图像传感器，以及一些特殊应用场景下的特种接收器，如日盲型光电探测器 (日盲 PD) 和单光子探测器 (SPAD) 等。作为可见光通信系统的主要性能瓶颈，这些器件的发展极大地制约了可见光通信的发展。

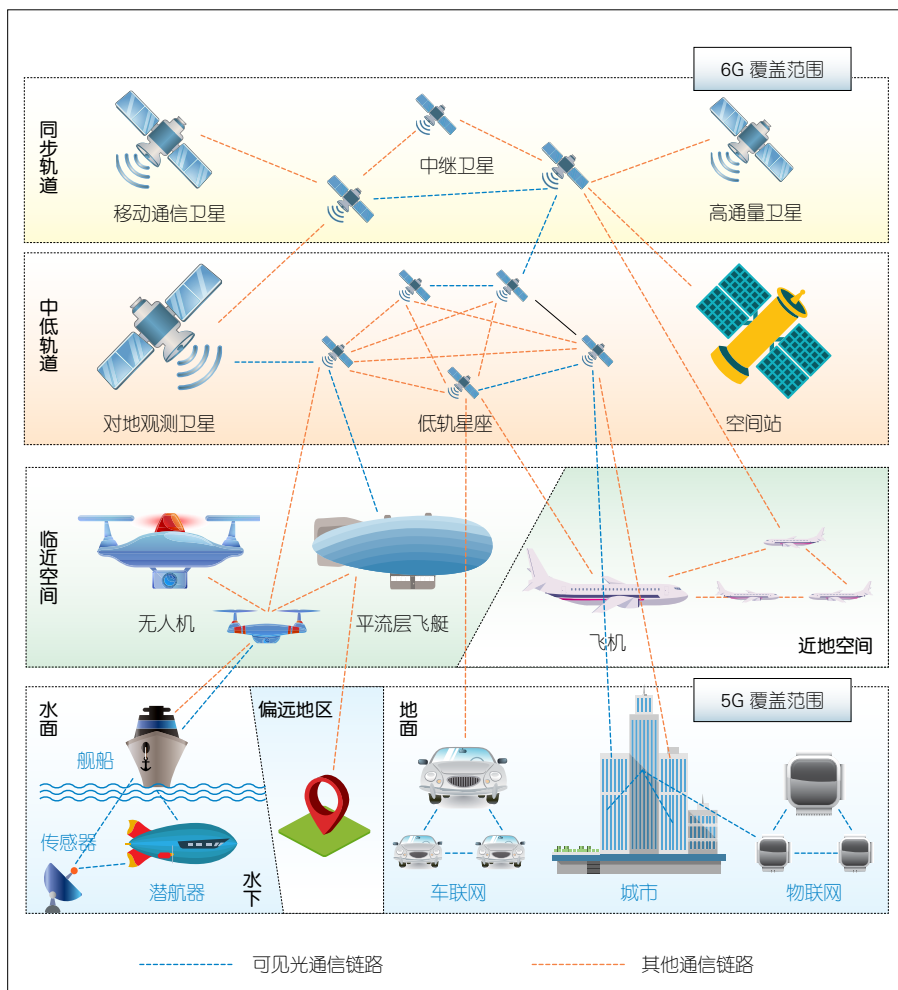
#### 1.1 可见光通信系统中的发射器件

上述 3 种发光器件的主要参数对比如表 1 所示。LED 和 LD 为目前最

常见的两种发光器件<sup>[7-8]</sup>，而 SLD 是一种介于 LED 和 LD 之间的发光器件。SLD 不仅结合了 LD 的光束方向性与 LED 大发散度的优点，还具有大带宽、高亮度和无斑点的优点。一种基于 InGaN 的高功率蓝光 SLD 首先在 2016 年被提出，它拥有 800 MHz 的极高带宽。随着制造工艺逐步成熟，SLD 将成为一种极有前途的可见光通信发光器件。

最常见的 LED 为通过蓝光 LED

激发黄色荧光粉而产生白光的白色 LED、通过紫外 LED 激发红绿蓝 (RGB) 荧光粉产生白光的白色 LED，以及集成了红绿蓝 3 色 LED 的 RGB LED。最近的研究表明，等离子体 LED<sup>[9]</sup> 和微 LED ( $\mu$ LED)<sup>[10]</sup> 拥有比普通 LED 更高的带宽，因而也被应用到可见光通信系统中。复旦大学与丹麦技术大学合作的表面等离子体 LED，通过表面等离子体增大了载流子的自发发射速率，将 LED 的带宽提



▲ 图 1 6G 空天地一体化概念图

▼ 表 1 可见光通信中的发射器件对比

器件类型	辐射方式	存在光效下降现象	-3 dB 带宽
LED	自发辐射	是	< 100 MHz
LD	受激辐射	否	吉赫兹量级
SLD	放大的自发辐射	否	400 ~ 800 MHz

LD: 激光二极管

LED: 发光二极管

SLD: 超辐射二极管

升至 201.13 MHz<sup>[9]</sup>。中山大学与复旦大学合作的  $\mu$ LED 阵列, 像素大小为 30 ~ 60  $\mu\text{m}$  不等, 无须预均衡即可达到 600 MHz 的带宽, 实现了单通道 3 Gbit/s 的高速传输<sup>[10]</sup>。

此外, 硅基 LED (Si-LED) 因其抗静电能力强、寿命长以及生产效率高<sup>[11]</sup> 等特点, 也逐渐在可见光通信中被大量使用。复旦大学与南昌大学合作的 Si-LED 使用基于表面纹理化的 GaN, 提高了发光效率, 并配合 Ag 反射层和互补电极, 降低了硅表面和电极对光线的吸收, 改善了垂直 LED 单面发光的发光性能。复旦大学研究团队使用该 LED, 实现了水下 1.2 m、15.17 Gbit/s 的高速传输<sup>[11]</sup>。

使用成品 LED 也是可见光通信系统的一个选择, 英国爱丁堡大学使用了价格低于 50 美分的成品 LED, 并在 1.6 m 的自由空间中创下了 15.73 Gbit/s 的可见光通信速率记录<sup>[12]</sup>。

## 1.2 可见光通信系统中的接收器件

在可见光通信系统的接收器件中, PIN 和 APD 是当前主流的接收器。一般地, 在高速可见光通信中使用 PIN, 因为 PIN 拥有高至 1 Gbit/s 的接收速率, 且其成本与 APD 相比较低。APD 主要用于需要更高接收灵敏度的场景中。为了进一步提升 PIN 的灵敏度, 复旦大学提出了一个集成的  $3 \times 3$  的 PIN 阵列, 单个 PIN 的大小为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ , 带宽为 25 MHz, 集成阵列的总大小小于  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ <sup>[13]</sup>。使用该 PIN 阵列可以实现 1.2 Gbit/s 的可见光通信, 并且极大地增加了接收端的视场角<sup>[14]</sup>。

太阳背景光是可见光通信系统的一大噪声干扰源, 过强的环境光会造成接收器饱和, 以至于失去接收信号的能力。基于 AlGaIn 的日盲 PD 便是针对强太阳光场景的接收器件, 因其

仅对太阳光中所不覆盖的一部分紫外波段敏感, 不会受到太阳光的影响。2005 年, 土耳其毕尔肯大学使用 AlGaIn 肖特基二极管作为日盲 PD, 在日盲区可达 0.147 A/W 的响应度<sup>[15]</sup>。2015 年, 日本东京大学研发出一种具有金属-半导体-金属 (MSM) 结构的钙钛矿日盲 PD, 响应度增至 7.85 A/W<sup>[16]</sup>。然而, 日盲 PD 作为通信接收器的瞬态响应和稳定性仍待进一步研究, 其在通信中的应用实现方法也十分缺乏。

针对灵敏度要求极高的特殊应用场景, 如水下长距离可见光通信, 单光子检测技术因其具有超高的灵敏度而被广泛研究。2002 年, A. A. VEREVKIN 等研发出一种基于氮化铌 (NbN) 的超薄膜超导单光子检测器 (SSPD)。该检测器对 405 nm 波长的光有约 10% 的量子效率, 并可达 10 GHz 的光子计数频率<sup>[17]</sup>。2015—2017 年, 美国国家标准与计数研究院 (NIST) 研发了针对红外波段和紫外波段的硅化钼 (MoSi) 超导纳米线单光子探测器 (SNSPD)<sup>[18-19]</sup>。SSPD 和 SNSPD 相比于传统的技术, 具有高检测效率、低暗计数和低定时抖动的优势; 但对于复杂度极高的冷却技术的需求是其在应用中的一大缺陷。

聚焦用的光学元件在可见光通信系统中也是重要的一环。通过对接收到的光线进行聚焦, 可以提升接收信号的信噪比, 从而提高传输速率; 然而, 这种信噪比的增加是以视场角的降低为代价的。因此, 复旦大学提出了一款使用柔性纳米材料的非成像光学聚焦器, 将可见光转换为接收器更敏感的红外光, 提高了接收器的灵活性, 实现自由空间 0.5 m、400 Mbit/s 的可见光通信, 速率提升了 60%<sup>[20]</sup>。进一步地, 通过在杂化聚合物的基底上添加一个一维二元布拉格光栅, 复旦大学实现了带宽 125 MHz、速率 250 Mbit/s 的可

见光通信, 速率提升了 67%<sup>[21]</sup>。

目前的可见光通信仍主要面临 LED 的带宽限制、探测器的灵敏度低以及系统中的非线性问题, 而面向 6G 的可见光通信要求将更高。未来的高速可见光通信系统需要基于新材料的新的光电、电光器件。新的光源应具有更宽的调制带宽和更高的光效率, 而新的探测器应具有更优的可见光波段的灵敏度以及内部和外部的量子效率。可见光通信的进一步发展中还引入更多先进的光电子设备, 如外调制器、光放大器、光开关、多路复用器及解复用器等。

## 2 高速可见光通信系统

相比于传统的无线通信, 传输速率高是可见光通信的一大优势, 也是面向 6G 的可见光通信的一大特点; 因此, 研究人员将很大的精力放在了提升可见光通信系统的速率上。高速可见光通信系统可以分为两种: 离线系统和实时系统。离线系统使用示波器或其他数据采集设备记录接收到的信号, 之后使用离线程序对数据进行处理; 而在实时系统中, 接收到的信号会被实时地进行处理、解算为实际传输的数据。在实验室中, 研究人员通常搭建离线系统来进行新的技术研究。

### 2.1 可见光通信中的先进调制技术

受制于 LED 的带宽限制, 高速可见光通信系统中的关键问题之一就是如何实现高频谱效率的高速传输。光电场的表达式如公式 (1) 所示:

$$\mathbf{E}(t) = \sqrt{P(t)} \cos[\omega_0(t)t - \phi(t)] \hat{\mathbf{x}}(t) \quad (1)$$

其中,  $\sqrt{P(t)}$  表示信号的幅度,  $\omega_0(t)$  表示信号的频率,  $\phi(t)$  表示信号的相位,  $\hat{\mathbf{x}}(t)$  表示信号偏振态。这 4 个维度共同

表征了光电场的信号，而对于每一个维度，我们都可以对其进行调制。典型的调制方式如表 2 所示。如果同时对两个或两个以上的维度组合在一起进行调制，则可以进一步地增加系统容量。

同时，随着可见光通信系统的不断发展和完善，系统的信噪比已得到了显著提升。高阶调制的运用可以进一步增加系统的容量。如图 2 所示，从开关键控法（OOK）调制一直到高阶的正交振幅调制（QAM）调制，虽然系统的噪声容限逐步下降，但每个符号所携带的信息量逐步增加，系统的传输速率自然也随之增加。在信噪比允许的情况下，利用高阶的调制方式可以进一步增加频谱效率。

另外，在可见光通信常规的波分

复用方式中，为保证信号质量，各个子带之间的间隔频率一般大于各子带的带宽，子带之间存在保护间隔。这样做可以减小子带间串扰和码间干扰，但并没有充分利用频谱资源。图 3 展示了如何减少子带间隔来提高频谱效率。在奈奎斯特系统中，子带之间的间隔频率与子带带宽相等，在提高了频谱效率的同时没有引入更多的子带间串扰和码间干扰。在超奈奎斯特中，子带间隔小于子带带宽，这进一步提高了频谱利用效率；但引入了子带间的串扰和码间干扰，需要使用如多符号判决等先进的数字信号处理技术来进行接收端的处理。

因此，提升可见光通信系统中的通信速率主要有 3 个方向：从一维调制增加到多维调制，从二电平调制到

多电平调制，以及从奈奎斯特调制到超奈奎斯特调制。近年来，可见光通信也逐步开始使用诸如概率整形（PS）、几何整形（GS）和极化码（PC）等新技术，进一步地减少频谱资源的浪费。

研究者们通过各种先进的调制技术，不断地提升了可见光通信系统的频谱利用效率。2015 年，HUANG X. X. 等研究应用比特加载的正交频分复用技术（OFDM），使用单个白色磷光 LED 实现了带宽为 600 MHz、速率为 2.28 Gbit/s 的 1.5 m 自由空间可见光通信传输<sup>[22]</sup>。2016 年，WANG Y. 等首次将超奈奎斯特技术引入可见光通信，使用分数阶傅里叶变换，提升了可见光通信系统中有限的带宽频谱利用效率<sup>[23]</sup>。进一步地，2017 年，ZHANG M. J. 等研究并应用了奈奎斯特的脉冲幅度调制（PAM8），在 RGB LED 上实现了 4.05 Gbit/s 的可见光通信传输，验证了奈奎斯特技术可以提高频谱利用率；但会带来严重的码间干扰<sup>[24]</sup>。同年，CHI N. 等研究应用超奈奎斯特的无载波相幅调制（CAP），使用单个红光 LED 实现了带宽为 350 MHz、速率为 1.47 Gbit/s 的 1.5 m 自由空间可见光通信传输，节省了 20% 的带宽需求<sup>[25]</sup>。

表 2 针对各维度的典型调制方式

幅度调制	频率调制	相位调制	偏振调制
OOK	FSK	DPSK	PolSK
QAM	MSK	QPSK	OAM

DPSK: 差分相移键控  
FSK: 数字频率调制  
MSK: 最小频移键控

OAM: 轨道角动量  
OOK: 开关键控法  
PolSK: 偏振移位键控

QAM: 正交振幅调制  
QPSK: 正交相移键控

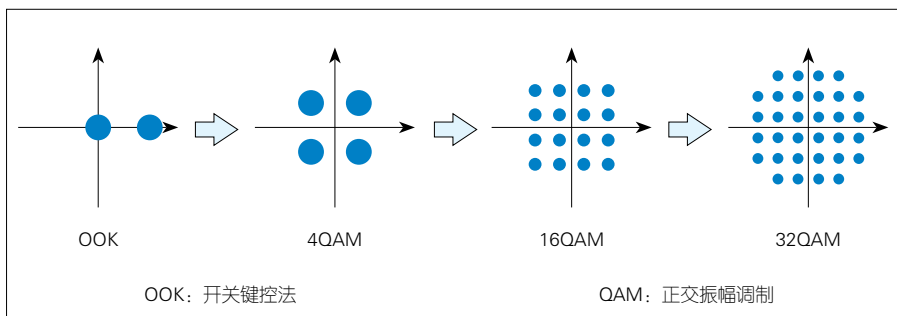


图 2 高阶调制

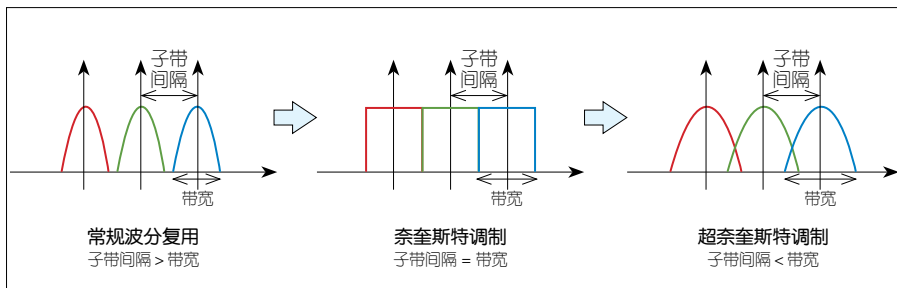


图 3 高频谱效率调制

件均衡。其中，硬件均衡技术因电路参数固定，难以根据实际情况进行动态调整，而软件均衡技术则更为自由。

HUANG X. X. 等使用了级联的硬件预均衡，提升了可用带宽，在单个白色磷光 LED 实现了 1.6 Gbit/s 的可见光通信<sup>[26]</sup>。ZHOU Y. J. 等考虑了 LED 和 PIN 存在饱和的问题，比较了 3 种软件预均衡曲线在不同参数下的表现，实现了单个白光 LED 在自由空间 1 m 距离下 2.32 Gbit/s 的可见光通信的传输<sup>[27]</sup>。针对后均衡技术，WANG Y. G. 等使用了线性均衡器、基于 Volterra 级数的非线性均衡器，以及 DD-LMS 均衡器混合级联，将原本只有 25 MHz 的 LED 带宽提升至 320 MHz，在 RGBY LED 上实现了 8 Gbit/s 的高速传输<sup>[28]</sup>。ZHU X. 等结合硬件预均衡技术和软件后均衡技术，在 RGBYC 五色硅基 LED 上实现了 1.2 m 自由空间中总速

率为 10.72 Gbit/s 的可见光通信传输，创下了当时 LED 可见光通信速率的世界最高纪录<sup>[29]</sup>。

### 2.3 实时可见光通信系统

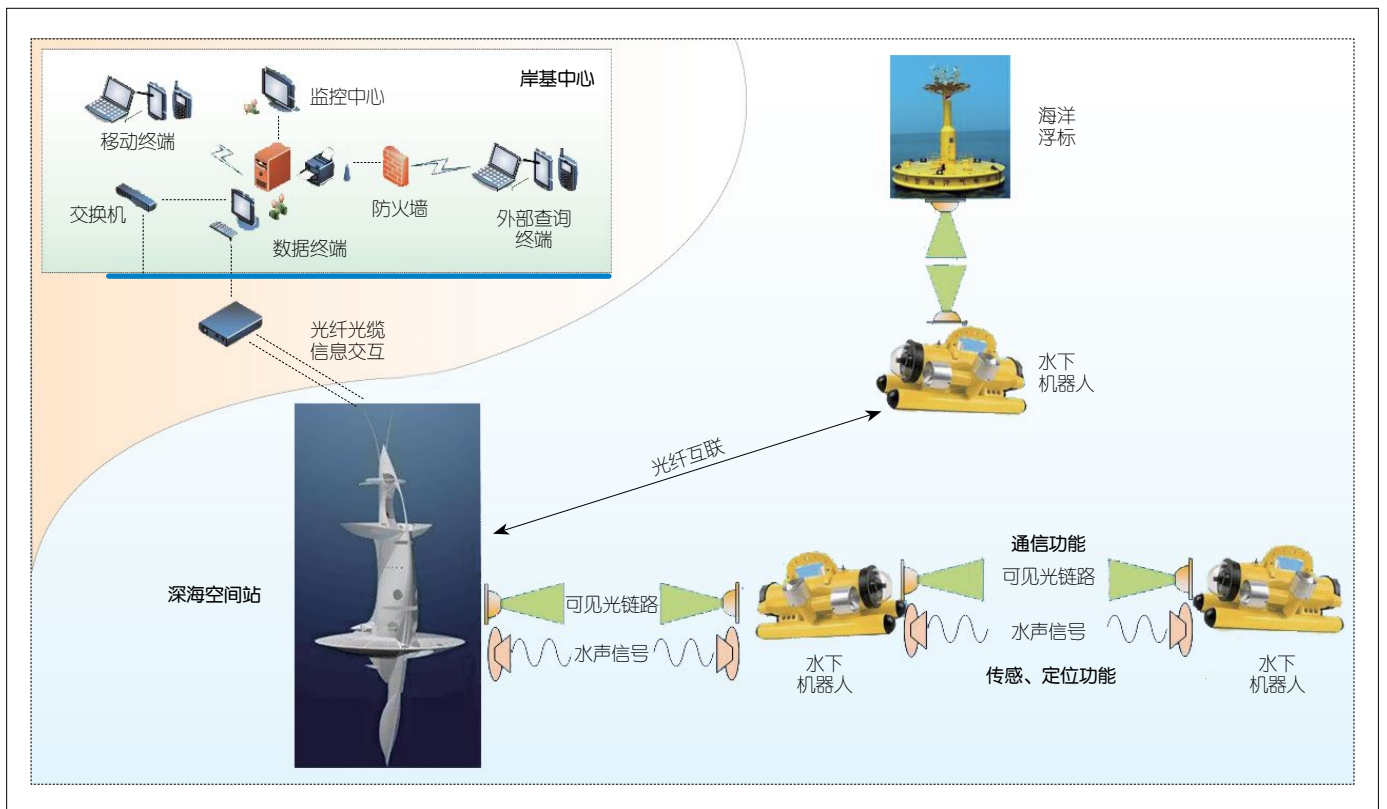
实时的可见光通信系统能够对海量的收发数据进行实时处理，这对于未来 6G 可见光通信的商业应用至关重要；因此，实时系统的研究也十分重要。2018 年，业界报道了一种基于不归零开关键控调制（NRZ-OOK）的自由空间 1.5 m 下 1 Gbit/s 的实时可见光通信系统。在 2019 年，复旦大学与华为公司合作，使用离散多音频调制（DMT）技术的  $2 \times 2$  MIMO 系统实现了自由空间 1.7 m 下 5 Gbit/s 的实时可见光通信。这也是迄今为止，单颗 LED 实时可见光通信系统速率的世界最高纪录<sup>[30]</sup>。

高速可见光通信技术不仅在器件

材料上至关重要，在先进的调制技术以及数字信号处理方面也充满挑战。如何提升系统带宽，如何在有限的系统带宽下进一步提升系统容量，不断地逼近容量的极限，是面向 6G 的高速可见光通信的核心问题，也是一个极大的挑战。

## 3 水下可见光通信技术

在图 1 所示的空天地一体化网络中，水下通信是不可或缺的一部分。海洋中的各类设备之间的超高速非接触式数据通信，以及水面至水下设备之间的数据链路均需要水下通信技术的支持，如图 4 所示。除了无线光通信之外，水下无线通信目前主要的手段包括声波和射频电波。声波是目前实现水下无线通信最常见的方法，由于声波在海水中衰减较小，可以实现极长距离的水下无线数据传输；然而，因声波带宽窄、



▲图 4 水下通信场景图

载频低且方向性差，它有着速率低、延迟大、安全性差的劣势。射频电波在水中的传输虽能实现比声波高的传输速率，但因海水作为导体而存在的趋肤效应，在海水中射频电波的衰减十分巨大，传输距离非常有限，所需的发射功率也很高。由此可见，这两种方式都无法满足 6G 中水下通信的需求。而波长在 450 ~ 550 nm 的蓝绿色可见光在水中的衰减远小于其他波段的衰减，这为水下可见光通信的发展奠定了天然的基础。与上述两种方法相比，水下可见光通信有着成本低、速率高、抗干扰强、安全性高等优点，成为了水下无线通信国际竞争的焦点。

目前，水下的可见光通信主要使用 LD 和 LED 实现。相比于 LED，LD 可以实现更长的传输距离和传输速率，但对于对准的要求十分苛刻。2018 年，FEI C. 等基于比特和功率加载的 DMT 技术，使用 450 nm 激光在水下实现了 1.7 m、14.8 Gbit/s 的通信<sup>[31]</sup>。LI C.Y. 等使用包含了 3 个 LD 的垂直腔面发射激光器（VECSEL）在浑水中实现了 5 m 距离下 25 Gbit/s 的通信<sup>[32]</sup>。

基于 LED 的水下可见光通信也在飞速发展。2019 年，复旦大学 LI J. H. 等使用 2×2 的 PIN 阵列扩大 LED 水下可见光通信的接收范围，利用单一蓝色 LED 实现了水下 1.2 m、1.8 Gbit/s 的通信<sup>[33]</sup>。同年，复旦大学 HU F. C. 等基于波分复用技术实现水下 20.09 Gbit/s 的 LED 可见光通信传输，刷新了水下 LED 可见光通信离线系统的最高速率记录<sup>[34]</sup>。随后，CHEN M. 等实现了水下 2.34 Gbit/s 的实时水下 LED 可将光通信系统，这也是目前实时水下 LED 可见光通信的最高速率<sup>[35]</sup>。

随着研究人员的不断探索，水下可见光通信的距离和速率不断增加；但在实际自然环境中，恶劣的水体环境会对通信造成极大的影响，散射、

湍流和吸收是 3 大主要影响因素。对水下可见光通信信道模型的建立仍然是一个十分关键的问题。2019 年，E. ZEDINI 等提出了一个首次能够描述淡水与咸水中气泡、湍流以及温差梯度导致水下可见光信道变化的模型<sup>[36]</sup>。然而，水下可见光信道的建模仍不完善，需要进一步的研究和发展。复旦大学 2018 年首次将机器学习应用在水下可见光通信的信道建模中，提出利用高斯核辅助的深度神经网络建立信道损伤模型<sup>[37]</sup>，并于 2019 年提出双支异构神经网络实现了水下可见光信道模拟器<sup>[38]</sup>。这些模型均经过实验得到了完美的验证，为水下可见光通信信道建模开辟了新的重要研究方向。

#### 4 可见光通信的异构和组网技术

在面向 6G 的实际应用中，可见光通信的组网技术需更深一步的研究，以满足 6G 中多用户以及混合架构等场景的需求。例如，多址接入和全双工的实现问题，如何实现接入灵活、服务质量高、用户体验好的低复杂度系统；网络价格的设计问题，如何设计基本网元结构和网络拓扑结构；接入点的布设问题，如何在房间内分配接入点数量，同时不会大幅度增加系统的复杂度；上行链路的设计问题，如何通过红外或其他无线方式实现上行链路，提高用户体验，减少干扰等等。

可见光通信与无线通信和光纤通信中现有的业务整合也是目前研究的一个热点方向。2014 年，WANG Y. Q. 等实现了可见光通信与被动光网络（PON）的整合，实现了自由空间中 30 cm、500 Mbit/s 的可见光通信与 40 km、10 Gbit/s 的 PON 结合的异构通信<sup>[39]</sup>。该团队同年亦针对多用户的可见光无线接入开展了研究，提出了一个以光纤作为网络骨干、星型拓扑的可见光通信接入网<sup>[40]</sup>。2018 年，

SHI J. Y. 等将基于红光 LED 的可见光通信信号耦合到直径为 1 mm 的特种光纤中，从而实现了 5 m 光纤中速率为 3.1 Gbit/s、100 m 光纤中速率为 2 Gbit/s 的可见光通信<sup>[41]</sup>。

在水下的可见光通信组网技术中，目前大多数的研究主要集中在物理层，缺少从系统级路由协议出发，设计具有扩展边界和高用户容量系统的相关研究。这些研究对于水下可见光通信组网系统的鲁棒性和可靠性具有着重要的作用。目前现有的研究主要基于陆地无线通信蜂窝网络结构，着重考虑海水的强衰减效应以及环境对于通信链路的影响。受限于水下的特殊环境，为了适应不同数据速率和通信距离的多节点网络构建，可见光通信与水声通信结合的声光混合网络得到了学术界和产业界的关注。对于各个节点来说，可见光通信具备高数据速率和低延迟的优点，而水声通信可以补齐长通信距离和鲁棒性的系统短板。L. J. JOHNSON 等的研究表明，使用声光混合网络模型的最大数据速率相较于传统水声链路扩大了 150 倍<sup>[42]</sup>。水下声光通信的异构组网为系统提供了一定的自由度，可以根据负载和水质情况选择最佳的传输方法。

未来的 6G 通信将是一个使用各种通信手段的全频谱网络，从网络中心、小区，一直到接入点和用户，不同的通信方式将担任不同的职责。面向 6G 的可见光通信需要有能力和如空间激光通信、毫米波太赫兹通信、微波无线通信和水声通信等技术兼容并共存，这将是 6G 中研究的一个重点内容。

#### 5 可见光芯片高速光互联

6G 通信网络的超高数据传输速率和超高数据吞吐量，将对作为网络服务基础的数据中心的容量和速率提出新的挑战。传统的数据中心中，信息

通过老式的铜线进行传输, 不仅数据吞吐量受限, 而且能耗巨大, 远远无法满足爆炸式的数据传输量增长。光作为一种新型的高速信息传播载体, 为信息传播的性能带来了历史性的跨越。目前, 大规模数据中心的光互联传输普遍采用的还是基于小型可插拔(SFP)标准的 10 Gbit/s 直接调制直接检测方案, 40 Gbit/s 的光互联则需要 4 路 10 Gbit/s 链路共同实现。然而, 目前 40 Gbit/s 已经不足以满足数据中心对于带宽的要求。针对未来更为高速的 100 Gbit/s 光互联链路, 各个光器件、芯片设备厂商已经加大了研发力度, 但在标准与技术上还没有特定的具体方案。

现有高速数据链路发展的瓶颈主要在于大量光纤的使用带来的巨大成本。大量的光线连接及其配套的发射接收设备不仅增加了建设成本, 同时也大大增加了能源消耗, 包括设备自身运行以及空调散热所需的能量; 因此, 既要实现超高速、超大容量的数据连接, 又要实现绿色节能环保, 那么如何提高单根光纤的数据容量, 减少光纤连接数量, 同时降低系统的能源消耗, 成为了 6G 时代需要面临的一大挑战。

数据中心核心的高性能处理器芯片是设备能耗和发热的主要部分。在主频逐渐提高、芯片面积逐渐扩大的情况下, 芯片内电互联所固有的带宽小、延时大、互联密度低、串扰大、功耗高等缺点已成为高速芯片性能进一步提高的瓶颈。芯片内的光互联, 即使用光链路代替电链路实现芯片内部的高速信号传输, 是一种具有带宽高、延时小、功耗低等诸多电互联不可比拟的、有点的新兴互联方式。在未来, 芯片内的光互联将是高性能处理器芯片中替代电互联的普遍选择。

世界上一些主要发达国家启动了相关计划开展片内光互联的研究, 如

美国 DARPA 的“硅基光电集成回路”项目、欧盟的“硅异质结发射器”项目等。一些计算机领域的超级企业也启动了相应的研究计划, 如美国英特尔公司的“Teraflop Research Chip”项目、美国太阳微系统公司的“Super-Computer on a Chip”项目等。这些项目的研究热点主要集中在硅基光器件、片内光互联网络结构、节点路由交换、调制、复用、器件兼容等方面。

在硅基电光调制器的研究方面, 美国英特尔公司和美国康奈尔大学研制出了调制速率 20 Gbit/s 以上的电光调制器。在复用/解复用器的研究方面, 加拿大北电网络、IBM 和美国麻省理工大学、美国太阳微系统公司等研制出了 4 信道复用/解复用器, 美国 Luxtera 公司和新加坡微电子所研制出了 8 信道复用/解复用器。在节点路由交换器件的研究方面, 美国康奈尔大学和美国耶鲁大学实现了 4 端口的节点路由交换器件。在光互联网络结构的研究方面, 除二维 Mesh 网络以外, 美国亚利桑那大学 2009 年提出了用于分布和并行计算机系统的  $N$  维可重构全光互联结构, 美国太阳微系统公司同年提出了用于片上超级计算机的光互联网络结构。

中国在硅基光子集成领域的研究虽起步稍晚, 但发展迅速。中科院半导体所和中科院上海微系统研究所分别研制出了调制速率为 10 Gbit/s 的电光调制器, 中科院半导体所研制出了信道间隔为 100 GHz 的 4 信道复用/解复用器, 北京大学和浙江大学在电光调制器、偏振分束器和偏振旋转器方面做出了很好的研究工作, 中科院计算所和国防科技大学在光互联网络结构具有很强的研究基础, 上海交通大学和吉林大学在硅基光子集成方面也具有很强的研究基础。可以说, 中国在硅基光互联的部分研究已与国际

高水平团队并跑。

## 6 可见光通信面向 6G 的挑战与展望

在过去的十几年间, 可见光通信经历了一个飞速发展的时期。可见光通信作为一种新型的通信技术, 吸引了全世界大量的研究人员, 取得了可喜的进展。除了室内的短距离高速通信, 可见光通信技术还可以应用于从低速、高速到超高速的各种距离下的应用, 如低速的室内定位、车联网、船联网, 高速的医疗通信、高安全性通信、专网通信以及深空通信, 超高速的室内超高速接入网等。与其他通信手段相结合, 可见光通信将是未来 6G 蓝图中十分重要的组成部分。相应地, 有关可见光通信的研究还需要深入发展。目前, 6G 中可见光通信实现集成化商用的挑战主要有如下 5 个方面:

(1) LED 器件的带宽十分有限。带宽极大地制约了系统的传输速率。在未来, 应该更多地针对可见光通信的应用需求, 研究使用新材料和利用新机制的超宽带光源器件。

(2) 硅基光探测器在可见光波段灵敏度远低于红外波段。接收器的灵敏度直接影响了接收信号的信噪比。使用基于 AlGaAs 的探测器, 以及具有极高光电转换效率的单光子探测器将可能成为针对这一问题的解决方案。

(3) 缺少针对可见光通信基带信号处理的专用集成电路(ASIC)。可见光通信系统的小型化离不开 ASIC 的支持。ASIC 集成了包括驱动芯片、跨阻放大器(TIA)的模拟前端(AFE)以及基带数字信号处理在内的三部分功能。

(4) 可见光通信的主要结构仍为单点对单点。为了进一步提高系统容量、增加用户数量, 基于发射器阵

列和接收器阵列的 MIMO 通信系统将是未来可见光通信的趋势。

(5) 收发光学天线体积过大。目前常用的光学天线仍为较大的透镜组,这也极大地影响了可见光通信系统集成化的进展。菲涅尔透镜和基于纳米光学天线的波束控制将可能用于解决这一问题。

此外,可见光通信系统的整体建模还亟待进一步深入的研究。当前的可见光通信信道模型仅基于 LED 或 LD 器件的光场分布和空间特性;但实际的可见光通信信道远比这些模型复杂,还包括了接收器的频率响应特性、光学天线参数、空间光场分布、湍流、背景光噪声、散射、衍射和反射等等。对可见光通信信道建模将能够有效地指导可见光通信理论研究,为未来 6G 中的高速空间通信和 underwater 通信打下基础。

可见光通信作为一种高速可靠的无线通信方法,将与 6G 中的其他技术融合形成异构网络,共同提供大容量、高速率、稳定可靠的传输。在这样的一个网络中,每个接入点可以支持以超过 10 ms 的切换时间持续地服务多个终端,上行链路速率可以达到 10 Gbit/s,点对点的下行数据链路可以达到 100 ~ 200 Gbit/s。可见光通信为了能够适应未来 6G 系统中的复杂数据场景,亦应引入机器学习与人工智能算法,并成为下一阶段研究的重点。

## 7 结束语

本文中,结合目前可见光通信在器件、高速、组网和水下的最新研究进展,我们介绍了面向 6G 的可见光通信的发展、未来挑战和展望。研究人员已经在可见光通信领域中取得一系列令人瞩目的成果;但从专用的器件、光学天线的研究,一直到信道模型、异构网络架构的设计,该领域仍

有许多严峻的挑战。机器学习在可见光通信中的应用尚不深入,智能化可见光通信系统的实现还需要更多的机器学习算法的研究。通过各方面有针对性的研究,可见光通信将实现更快的发展,并将会在 6G 中大放异彩。

## 参考文献

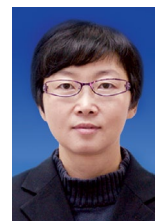
- [1] YANG P, XIAO Y, XIAO M, et al. 6G Wireless Communications: Vision and Potential Technologies[J]. IEEE Network, 2019, 33(4): 70–75. DOI:10.1109/mnet.2019.1800418
- [2] ZHANG Z Q, XIAO Y, MA Z, et al. 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 28–41. DOI:10.1109/mvt.2019.2921208
- [3] BURCHARDT H, SERAFIMOVSKI N, TSONEV D, et al. VLC: Beyond Point-to-Point Communication[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(7): 98–105. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6852089
- [4] 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): 1–7. DOI:10.1109/jphot.2015.2489927
- [5] QIAO L, LU X Y, LIANG S Y, et al. Performance Analysis of Space Multiplexing by Superposed Signal in Multi-dimensional VLC System[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 19762. DOI:10.1364/oe.26.019762
- [6] CHI N. LED-Based Visible Light Communications[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018: 13–38. DOI:10.1007/978-3-662-56660-2\_2
- [7] 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): 1. DOI:10.1117/1.oe.58.5.056117
- [8] 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
- [9] LI J H, FADIL A, OU H Y, et al. Enhancement of the Modulation Bandwidth for Surface Plasmon Coupled LEDs for Visible Light Communication[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. Washington D.C.: OSA, 2016. DOI:10.1364/cleo\_si.2016.stu3r.2
- [10] SUN Z K, TENG D D, LIU L L, et al. A Power-Type Single GaN-Based Blue LED with Improved Linearity for 3 Gb/s Free-Space VLC without Pre-equalization[J]. IEEE Pho-

- tonics Journal, 2016, 8(3): 1–8. DOI:10.1109/jphot.2016.2564927
- [11] 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. DOI:10.1364/prj.7.001019
- [12] 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
- [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. DOI:10.1088/2040-8978/17/10/105805
- [14] LI J H, XU Y F, SHI J Y, et al. A 2 × 2 Imaging MIMO System Based on LED Visible Light Communications Employing Space Balanced Coding and Integrated PIN Array Reception[J]. Optics Communications, 2016, 367: 214–218. DOI:10.1016/j.optcom.2016.01.041
- [15] TUT T, BIYIKLI N, KIMUKIN I, et al. High Bandwidth-Efficiency Solar-Blind AlGaIn Schottky Photodiodes with Low Dark Current[J]. Solid-State Electronics, 2005, 49(1): 117–122. DOI:10.1016/j.sse.2004.07.009
- [16] GUO Y L, LIU C, TANAKA H, et al. Air-Stable and Solution-Processable Perovskite Photodetectors for Solar-Blind UV and Visible Light[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2015, 6(3): 535–539. DOI:10.1021/jz502717g
- [17] VEREVKIN A A, ZHANG J, SLYSZ W, et al. Superconducting Single-Photon Detectors for GHz-Rate Free-Space Quantum Communications[J]. Free-Space Laser Communication and Laser Imaging II, 2002, (4821): 447–454
- [18] VERMA V B, KORZH B, BUSSIERES F, et al. High-Efficiency Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors Fabricated from MoSi Thin-Films[J]. Optics Express, 2015, 23: 33792
- [19] SLICHTER D H, VERMA V B, LEIBFRIED D, et al. UV-Sensitive Superconducting Nanowire Single Photon Detectors for Integration in an Ion Trap[J]. Optics Express, 2017, 25(8): 8705. DOI:10.1364/oe.25.008705
- [20] DONG Y R, SHI M, YANG X L, et al. Nanopatterned Luminescent Concentrators for Visible Light Communications[J]. Optics Express, 2017, 25(18): 21926. DOI:10.1364/oe.25.021926
- [21] YANG X, SHI M, YU Y, et al. Enhancing Communication Bandwidths of Organic Color Converters Using Nanopatterned Hyperbolic Metamaterials[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(10): 1862–1867
- [22] HUANG X X, CHEN S Y, WANG Z X, et al. 2.0-Gb/s Visible Light Link Based on Adaptive Bit Allocation OFDM of a Single Phosphorescent White LED[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(5): 1–8. DOI:10.1109/jphot.2015.2480541
- [23] WANG Y, LU Z Q, MA M L, et al. Compact Broadband Directional Couplers Using Subwavelength Gratings[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(3): 1–8. DOI:10.1109/jphot.2016.2574335
- [24] ZHANG M J, SHI M, WANG F M, et al. 4.05-Gb/s RGB LED-Based VLC System Utilizing PS-Manchester Coded Nyquist PAM-8 Mod-



- ulation and Hybrid Time-Frequency Domain Equalization[C]//Optical Fiber Communication Conference. Washington D.C., USA: OSA, 2017. DOI:10.1364/ofc.2017.w2a.42
- [25] CHI N, ZHAO J Q, WANG Z X. Bandwidth-Efficient Visible Light Communication System Based on Faster-than-Nyquist Pre-Coded CAP Modulation[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(8): 080601. DOI:10.3788/col201715.080601
- [26] 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. DOI:10.1109/lpt.2015.2445781
- [27] ZHOU Y J, SHI J Y, WANG Z X, et al. Maximization of Visible Light Communication Capacity Employing Quasi-Linear Preequalization with Peak Power Limitation[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016: 1-8. DOI:10.1155/2016/6902152
- [28] 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): 1-7. DOI:10.1109/jphot.2015.2489927
- [29] ZHU X, WANG F M, SHI M, et al. 10.72Gb/s Visible Light Communication System Based on Single Packaged RGBYC LED Utilizing QAM-DMT Modulation with Hardware Pre-Equalization[C]//Optical Fiber Communication Conference. Washington D.C., USA: OSA, 2018. DOI:10.1364/ofc.2018.m3k.3
- [30] SHI M, WANG C F, LI G Q, et al. A 5Gb/s  $\times 2$  MIMO Real-Time Visible Light Communication System Based on Silicon Substrate LEDs[C]//2019 Global LIFI Congress (GLC). Paris, France: IEEE, 2019. DOI:10.1109/glc.2019.8864120
- [31] FEI C, HONG X J, ZHANG G W, et al. 166 Gbps Data Rate for Underwater Wireless Optical Transmission with Single Laser Diode Achieved with Discrete Multi-Tone and Post Nonlinear Equalization[J]. Optics Express, 2018, 26(26): 34060. DOI:10.1364/oe.26.034060
- [32] LI C Y, LU H H, TSAI W S, et al. A 5 M/25 Gbps Underwater Wireless Optical Communication System[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(3): 1-9. DOI:10.1109/jphot.2018.2842762
- [33] 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. DOI:10.1364/ao.58.000383
- [34] HU F C, LI G Q, ZOU P, et al. 20.09-Gbit/s Underwater WDM-VLC Transmission Based on a Single Si/GaAs-Substrate Multichromatic LED Array Chip[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020. Washington D.C., USA: OSA, 2020. DOI:10.1364/ofc.2020.m3i.4
- [35] CHEN M, ZOU P, ZHANG L, et al. Demonstration of a 2.34 Gbit/s Real-Time Silicon-Substrate Blue LED-Based Underwater VLC System[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(1): 1-11. DOI:10.1109/jphot.2019.2958969
- [36] 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. DOI:10.1109/tcomm.2019.2891542
- [37] 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. DOI:10.1364/oe.26.026700
- [38] 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. DOI:10.1364/oe.27.022532
- [39] 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]. Optical Letter. 2014, (39):2576-2579
- [40] 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. DOI:10.1109/lpt.2014.2364955
- [41] SHI J Y, ZHOU Y J, CHI N, et al. Gigabit LED-Based Visible Light Transparent Transmission from Free-Apace to a 100-m Ultra-Large Effective Area Pure Silica Fiber[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2018, 60(1): 13-18. DOI:10.1002/mop.30914
- [42] JOHNSON L J, GREEN R J, LEESON M S. Hybrid Underwater Optical/Acoustic Link Design[C]//2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Graz, Austria: IEEE, 2014. DOI:10.1109/icton.2014.6876491

## 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, 主要研究高速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, 多项技术入选国家标准和 IEEE 标准提案。



贾俊连, 复旦大学通信系在读博士生; 研究方向为高速可见光通信。