



DOI: 10.12086/oe.2020.190734

水下无线光通信链路构成与性能优化进展

张雨凡¹, 李鑫^{1,2}, 吕伟超^{1,2}, 陈家旺², 郑旻辉³, 徐敬^{1,2*}¹浙江大学海洋学院光通信实验室, 浙江 舟山 316021;²海洋观测成像试验区浙江省重点实验室, 浙江 舟山 316021;³自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012

摘要: 水下无线光通信(UWOC)可为水下平台提供高速灵活的通信选择。本文介绍了 UWOC 的基本链路构成, 并指出 UWOC 系统的优化方案。吸收、散射和湍流都会影响 UWOC 的性能, 深入研究信道特性可以指导发射器、接收器和相关信号处理技术的设计。UWOC 性能还能够通过复用技术、单光子探测技术和对准系统等进行优化。功能全面的测试平台可以为 UWOC 系统提供必要的测试环境, 为海试与工业化应用奠定基础。本文期望能为 UWOC 相关研究者带来帮助。

关键词: UWOC; 信道建模; 光复用技术; 单光子探测; 对准**中图分类号:** TN929.1**文献标志码:** A**引用格式:** 张雨凡, 李鑫, 吕伟超, 等. 水下无线光通信链路构成与性能优化进展[J]. 光电工程, 2020, 47(9): 190734

Link structure of underwater wireless optical communication and progress on performance optimization

Zhang Yufan¹, Li Xin^{1,2}, Lv Weichao^{1,2}, Chen Jiawang², Zheng Minhui³, Xu Jing^{1,2*}¹Optical Communications Laboratory, Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang 316021, China;²Key Laboratory of Ocean Observation-Imaging Testbed of Zhejiang Province, Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang 316021, China;³Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou, Zhejiang 310012, China

Abstract: Underwater wireless optical communication (UWOC) can provide a high-speed and flexible communication link for underwater platforms. This paper introduces the basic structure of a UWOC link and points out the optimization schemes for a UWOC system. Absorption, scattering, and turbulence will affect the performance of a UWOC system. A comprehensive study of channel characteristics can guide the design of transmitters, receivers, and related signal processing technologies. The performance of UWOC can also be optimized by multiplexing technologies, single-photon detection technologies, and alignment systems. A comprehensive test platform could provide a necessary test environment for further sea trials and the practical applications of UWOC. The paper is expected to serve as a guideline for researchers related to UWOC.

收稿日期: 2019-12-16; 收到修改稿日期: 2020-03-02

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0302403); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA22030208)

作者简介: 张雨凡(1998-), 男, 博士研究生, 主要从事水下无线光通信的研究。E-mail: 3160102403@zju.edu.cn

通信作者: 徐敬(1982-), 男, 博士, 教授, 主要从事水下无线光通信、深海观测技术的研究。E-mail: jxu-optics@zju.edu.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

Keywords: UWOC; channel modelling; optical multiplexing technology; single photon detection; alignment

Citation: Zhang Y F, Li X, Lv W C, et al. Link structure of underwater wireless optical communication and progress on performance optimization[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(9): 190734

1 引言

地球的海洋覆盖率接近 71%，海洋储藏着丰富的生物资源、矿产资源。海洋的广阔空间与丰富资源决定了它的科学价值与战略地位，人类也从未停止对海洋的探索。水下潜器的发展将改变人类对 95% 的海底一无所知的现状，其中自主式水下潜器 (autonomous underwater vehicle, AUV) 在打捞、勘探、检修等领域发挥着重要作用，而有效的通信手段是 AUV 执行长期自主任务与集群作业的关键技术之一^[1]。未来，随着水下运载器的大量部署、水下传感网络的密集化以及水下传感器节点的剧增，水下数据无线传输的需求将海量增长，高带宽、低延时的无线通信技术显得尤为重要。人类的水下探索迫切需要一种高速、可靠、灵活的水下无线通信 (underwater wireless communication, UWC) 系统。

传统的水下无线通信中最常用的是水声通信 (underwater acoustic communication, UAC)^[2]，但声波的传播速度较慢、频率较低，能利用的带宽有限，难以支持高速数据传输。此外，随信号频率提高而增加的衰减、多径传播^[3]以及潜在的生物危害性^[4]等因素在一定程度上限制了 UAC 的应用。出于提高传输速率的目的，射频 (radio frequency, RF) UWC 被进一步研究。然而 RF 通信系统的稳定性需要复杂笨重的设备以保证发射、接收的质量与电磁屏蔽效果，这使得系统灵活性降低，且射频信号在水中的传播距离非常有限。近年来，水下无线光通信 (underwater wireless optical communication, UWOC) 作为一种新型通信技术，以带宽高、容量大、抗干扰能力强、保密性好等优势，已成为世界大国竞相发展的重要通信技术。

本文第二部分将进一步说明 UWOC 技术的优点与在提升传输距离与速率上的研究进展。第三部分将介绍包括发射端、信道以及接收端的 UWOC 基本通信链路。第四部分针对提升速率、增加链路距离、链路对准等问题分析解决方案以进一步提升系统性能，并对 UWOC 的测试环境与实用化进行简要介绍。最后一部分将总结全文，并对 UWOC 技术的发展提出了展望。

2 研究进展

UWOC 是一种以光波为信息载体的通信方式，在高速灵活的水下通信中有巨大应用潜力。UWOC 的传输速率可达 Gb/s 量级以上，同时光波抗电磁干扰的特点减轻了水下潜器设计中的载荷负担。如图 1 所示，UWOC 可以在 AUV、海上平台及水下无线传感器网络等应用中发挥重要作用。UWOC 的缺点之一是光波在水中传输时的吸收与散射十分严重，光能量损耗较大，限制了系统的最大工作距离^[5-6]。此外，传输过程中的散射会改变光束的方向，导致脉冲时间拓展，引发码间串扰 (inter-symbol interference, ISI)，降低系统的容错性能，这种情况在浑水中尤其明显^[7]。在这样的背景下，UWOC 的速率与传输距离是衡量系统性能的重要指标。

潜力与挑战并存的 UWOC 引起了众多研究者的兴趣。美国在 UWOC 领域的研究起步较早。1976 年，Karp 借助多重散射模型研究了水下端与机载端之间的光学信道特性，认为以一定的速率进行双向通信是可实现的^[8]。随后，Snow 等人进一步分析了水下短距离高速激光通信的可行性^[9]，并且在 1992 年实现了 50 Mb/s 速率的通信系统^[10]。2008 年，Hansen 借助变频技术将水下光通信链路速率提升到了 1 Gb/s^[11]。2014 年，美国加州大学与海军研究署联合研发了一种双曲超材料光源可使 UWOC 速率提高近 2 个数量级，相关成果发表在期刊 *Nature Nanotechnology*^[12]。随着更高性能发射器、更灵敏探测器的出现以及更高效信号处理技术的开发与使用，UWOC 的传输速率与传输距离飞速增长。图 2 展示了近年来在 UWOC 领域的部分研究成果^[13-24]，从图中可以看出，UWOC 的速度距离乘积呈现不断增大的趋势，一些研究也以传输距离或传输速率中的一项为核心指标设计出符合不同通信要求的系统。2016 年，阿卜杜拉国王科技大学 (King Abdullah University of Science and Technology, KAUST) 实现了 20 m, 1.5 Gb/s 的水下通信链路^[13]。2017 年，台北科技大学将水下通信链路的速度距离乘积拓展到了 160 Gbps·m，这项突破得益于他们在激光器上使用的光注入与光电反馈技术^[18]。2018 年，浙江大学在频

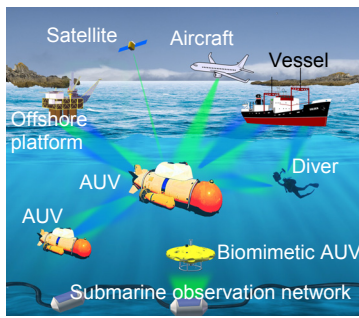


图 1 水下光通信应用场景

Fig. 1 The demand of wireless communication in human underwater activities

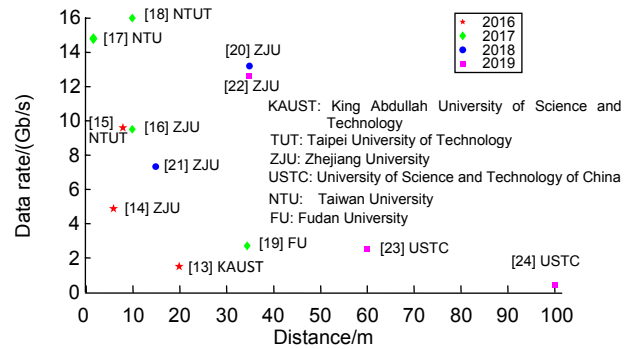


图 2 近年来水下无线光通信部分进展

Fig. 2 Research progress on UWOC in recent years

域线性均衡的基础上,使用时域均衡补偿了非线性损伤,最大速率距离乘积达到 $462 \text{ Gbps}\cdot\text{m}^{[20]}$ 。2019年,中国科技大学展示了水下 100 m 通信链路,信号处理技术与激光器控制参数的优化为长距离传输提供了保证^[24]。在工业上,英国 Sonardyne 公司的 BlueComm 系列产品可支持视频传输与 AUV 控制,工作深度可达 $4000 \text{ m}^{[25]}$ 。

3 基本通信链路

3.1 发射端

UWOC 系统的基本原理框图如图 3 所示,在发射端,信源信号经编码、调制映射等步骤生成已调信号,再将已调信号加载到光源上,然后经准直光学系统产生一定发散角的光束在海水信道中传输。该光束可以具有极小的发散角以增加传输距离,在近距离应用场合也可以使用具有较大的发散角甚至全向发散光束以降低系统跟瞄和对准的难度。

发光二极管(Light-emitting diode, LED)与激光二极管(laser diode, LD)是光通信发射器中常用的光源。LED 成本低,功耗低,系统设计简单。在传输距离较短和数据速率要求不高的应用中,使用 LED 作为 UWOC 系统光源是有利的^[26-27]。使用单个低成本的 LED,复旦大学的研究小组在 1.2 m 纯净水中实现了 2.175 Gb/s 的速率^[28]。微型 LED 能够优化调制带宽^[29],成熟的制造工艺使微型 LED 阵列成为一种可能的新

型光源。LD 比 LED 有更良好的带宽特性,并且其发散角小,功率也更高。激光器结构的改良也能够提升系统的性能,如垂直腔面发射二极管(vertical cavity surface emitting laser, VCSEL),二极管泵浦激光器^[30]等。注入锁定技术的应用有利于获得窄线宽和大功率的单模激光输出。文献[31]使用二级注入锁定的 VCSEL 实现了水下 5 m ,传输速率 25 Gb/s 的非归零码开关键控(non-return-to-zero on-off keying, NRZ-OOK)系统。然而,激光的光束特性使得系统对发射器与接收器有较高的对准要求,且激光器受温度影响也较大。

调制技术的选择对于任何通信系统都非常关键,合适的调制技术能够极大地提升 UWOC 系统的带宽利用率、光功率利用率和传输速率。目前在 UWOC 系统中最广泛使用的调制是强度调制 OOK。此外,脉冲幅度调制(pulse amplitude modulation, PAM)^[32-33],脉冲位置调制(pulse position modulation, PPM)^[34-36],数字脉冲间隔调制(digital pulse interval modulation, DPIM)^[37]等都被应用于 UWOC。

在发射端采用信道编码技术可以增强信号的抗干扰能力,使得可见光信号经过长距离的水下信道衰减以后仍能以极低的信噪比(signal to noise ratio, SNR)被成功接收,大大改善通信系统的传输性能^[38]。常用的差错控制编码有里德-所罗门(Reed-Solomon, RS)码、低密度奇偶校验码(low-density parity-check, LDPC)码以及 Turbo 码。北卡罗莱纳州立大学的 Cox 等人使用

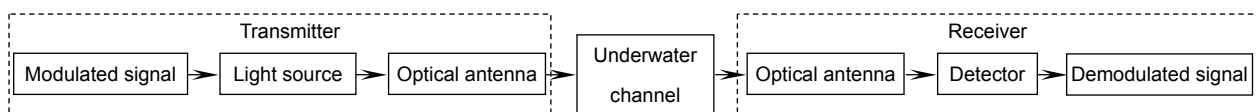


图 3 水下无线光通信系统的基本框图

Fig. 3 The block diagram of underwater wireless optical communication system

(255, 129)RS 码将归零码开关键控 (return-to-zero on-off keying, RZ-OOK)调制的 500 kb/s 系统在 10^{-4} 误码率下的 SNR 提高了 8 dB^[39]。中国科学院上海光学精密机械研究所通过仿真与模拟验证了多种规格的 RS 码与 LDPC 码在不同信噪比下的表现,发现 1/2 码率的 RS 码在长距离时表现最优,但 LDPC 码的综合表现更好^[35]。法国的 Mattoussi 课题组的研究也表明 LDPC 码在物理层有相当明显的优势^[40]。

3.2 接收端

入射的光束经过信道后被汇聚到接收端的探测器上,探测器将检测到的光信号转换成电信号,最后通过解调、译码等恢复出原始数据信号。目前应用最为广泛的光电探测器是 PIN(positive-intrinsic-negative)二极管和雪崩二极管(avalanche photodiode, APD)^[5]。PIN 二极管成本低,能够满足一部分 UWOC 系统的要求,但 PIN 二极管的输出电流很小,灵敏度相对不高。APD 利用雪崩效应保证了 UWOC 系统有较高灵敏度^[41],此外还有工作在盖革模式下的单光子探测雪崩二极管(single photon avalanche diode, SPAD)^[42]。但由于雪崩效应本身作为一个随机过程会引入附加噪声,需要确定合适的反向偏压以达到最佳增益值。另外,SPAD 存在死区时间,此时对任何信号都无响应^[43],因此导致了非线性的光强响应。

采用均衡技术可以在一定程度上补偿信道、发射端与接收端器件引入的不良特性,降低 ISI 的影响,增大可使用的带宽范围。实际上均衡技术既可以用在接收端也可以用在发射端,中国科学技术大学^[44]和中山大学的两个研究组^[45]使用预均衡增加 LED 带宽,在 UWOC 链路的传输上都起到了很好的效果。研究证明,均衡对缓解由电光调制、非线性放大引入的系统容量非线性损伤^[20-21]以及热梯度引起的信号串扰^[46]都有较好的作用。

3.3 信道

光在水中传输时,海水及溶解质、叶绿素、悬浮粒子等造成的吸收、散射、光束漂移、光强起伏等现象,带来严重的链路损耗、多径效应、时域展宽等,进而导致接收光信号信噪比降低,并产生 ISI,对光通信链路保持和通信质量都有着严重的干扰。因此,研究光在水中的传输表现,即研究水下光学信道特性是设计 UWOC 系统的基础。海水的光学特性可分为固有光学特性(inherent optical properties, IOP)与表观光学特性(apparent optical properties, AOP)^[47],其中对信

息传输媒介影响最大的是 IOP。光在水下传播过程中受水体吸收与散射的影响,由此引入 IOP 中的吸收系数 $a(\lambda)$ 与散射系数 $b(\lambda)$ ^[5]。综合考虑吸收与散射可得衰减系数:

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (1)$$

根据比尔-朗伯定律,可以得到光传输距离 z 后的功率变化:

$$I = I_0 \exp[-c(\lambda)z] \quad (2)$$

几种常见水质的吸收、散射、衰减系数如表 1 所示^[48]。

表 1 不同种类水体的典型参数

Water types	a	b	c
Clear water	0.114	0.037	0.151
Coastal water	0.179	0.219	0.398
Harbor water	0.366	1.824	2.190

$\beta(\theta, \varphi, \lambda)$ 为体散射函数(volume scattering function, VSF),它反映了光散射之后的新传播方向在空间上的强度分布,其中散射系数 $b(\lambda)$ 可由 VSF 求得:

$$b(\lambda) = \iint \beta(\theta, \varphi, \lambda) d\theta d\varphi \quad (3)$$

$\beta(\theta, \varphi, \lambda)$ 与 $b(\lambda)$ 之比为散射相函数,用来描述散射后新传播方向的概率分布。

对于静态信道的研究,采用解析方法和蒙特卡罗模拟方法。解析法常借助辐射传递方程(radiative transfer equation, RTE),它用辐射强度来描述光强度在随机分布的粒子群中的传播,并计算到达接收端的光强分布^[49-50]。但这类基于 RTE 的计算通常相当复杂,且对边界条件要求很高,在求解析解的过程中需要做出一些假设以简化。在这种情况下,通过蒙特卡罗方法得到数值解成为了当前 UWOC 研究中更普遍的方法。蒙特卡罗方法模拟光子在水中受吸收、散射影响后的传输路径和能量变化,通过数百万次的光子追踪得到满足边界条件的光子时空分布。图 4 展示了使用蒙特卡罗方法模拟的激光光源在不同水体中传播不同距离后接收端的光斑能量分布。在该方法中,散射相函数模型的优劣对仿真结果有很大的影响。印度的 Sahu 比较了单项 HG 模型、二项 HG 模型^[51-52]与 SS 模型^[53]的仿真效果,在水类、视场、光圈等参数变化的研究中肯定了 SS 相位函数的稳定性与准确性^[54]。针对浑浊水体中的脉冲响应,清华大学的团队使用双 Gamma 函数为长距离高速率的 UWOC 系统提供了均

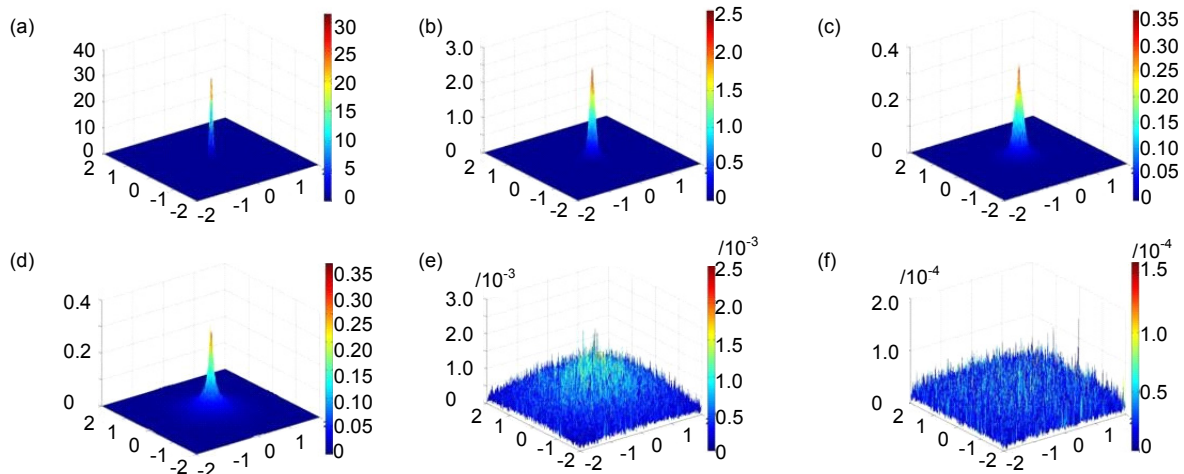


图 4 激光在不同水体中传播不同距离后接收端能量分布。

(a) 4 m 沿海水域; (b) 8 m 沿海水域; (c) 12 m 沿海水域; (d) 4 m 港口水域; (e) 8 m 港口水域; (f) 12 m 港口水域
Fig. 4 The received optical power distribution of a laser beam after passing through a (a) 4 m, (b) 8 m, (c) 12 m coastal water channel; (d) 4 m, (e) 8 m, (f) 12 m harbor water channel

衡技术相关的指导性建议^[7]。现有的信道特性研究主要集中在吸收和多重散射对光束传播的影响^[55]，但温度或盐度变化引起的湍流影响也不能被忽视。研究者们使用对数-正态分布、Weibull 分布、广义 Gamma 分布等模型从不同角度分析湍流^[56-59]。但水体，尤其是海水，成分和内部运动规律都十分复杂，且光波在水下的衰减系数随深度与离岸距离的改变而变化显著，增加了研究的难度。此外，跨空水界面 UWOC 和非视距 UWOC 的信道特性也需要进一步深入研究。

4 系统性能优化

4.1 复用技术

近年来，频谱效率更高的正交频分复用 (orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM) 技术逐渐受到更多研究人员的青睐。比如 KAUST 的 Oubei 的课题组基于 16-QAM (quadrature amplitude

modulation)-OFDM 实现了水下 5.4 m 的信息传输，传输速率可达 4.8 Gb/s^[60]。浙江大学借助比特分配和功率分配进一步改善了 QAM-OFDM 系统的性能，实现了 6.18 (bit/s)/Hz 的频谱利用效率^[61]，同时提出在 OFDM 的多个子载波中可以使用参数自适应调整的方法以实现更好的传输效果。在比特功率分配技术中，多采用等概率的星座图调制为不同信噪比的子载波分配不同的调制函数，而浙江大学的团队将星座图概率密度整形技术用于 UWOC，并且实现了接近香农极限的传输速率^[22]。

考虑到海水对光的散射，在一些特定情况下处于海水“透明窗口”的蓝绿波段^[62-64]并非总是最优选择。浙江大学的团队通过蒙特卡罗仿真研究了红光在水中的传输特性，仿真结果如图 5 所示^[14]，证明了在浑浊度高的水中红光在衰减系数和信道带宽上与短波长光相比有更优异的表现。关于红光的研究为波分复用

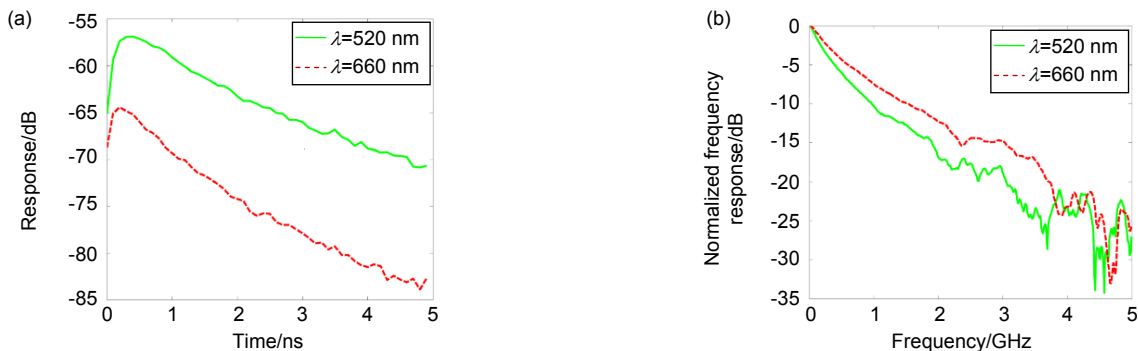


图 5 蒙特卡罗方法仿真的两种波长光在 8 m 长港口海水中的 (a) 脉冲响应和 (b) 频率响应

Fig. 5 (a) Impulse response and (b) frequency response in 8 m harbor water with different wavelengths based on Monte Carlo simulation

(wavelength division multiplexing, WDM) UWOC 系统奠定了基础, 目前的研究主要基于红-绿-蓝(red-green-blue, RGB)WDM。浙江大学使用三色 LD 结合 QAM-OFDM 技术搭建了 WDM-UWOC 系统, 成功实现了水下 10 m 信道中 9.51 Gb/s 的信号速率^[16]。复旦大学与南昌大学的团队自主设计了基于氮化镓的共阳极 LED 组, 在红-绿-蓝之间增加青光与黄光(red-green-blue-cyan-yellow, RGBCY), 最终他们的 RGBCY-WDM 系统在 1.2 m 水下达到了 14.6 Gb/s 的速率^[27]。

轨道角动量(Orbital angular momentum, OAM)模式是一种空分复用方法, 在传统调制自由度被占用的情况下, 可以额外拓展系统容量。美国克莱姆森大学在研究 OAM 模式下的 NRZ-OOK 调制时不仅实现了可用的通信链路, 而且研究了浑浊水体对 OAM 数据传输的影响^[65]。

4.2 光子计数探测

光子计数探测技术以其超高的探测灵敏度在应对水下信道衰减强烈的问题上有很好的前景, 对于传输距离的提升有积极的作用。解放军信息工程大学使用 SPAD 作为水下单光子探测器进行了相关研究^[66-68], 其中他们提出的考虑死区时间影响的计数脉冲检测算

法在长距离高速应用中与传统算法相比优势显著^[67]。一些 UWOC 系统也选择使用了 SPAD 阵列化后的硅光电倍增管(silicon photomultiplier, SiPM, 按原理又被称为 multi-pixel photon counter, MPPC, 下文中简称采用后者)作为接收器来缓解死区时间的影响。

MPPC 在探测上达到了“量变引起质变”的效果, 一方面, 阵列平面放宽了链路对准的要求^[32]; 另一方面, 根据统计规律, MPPC 减少了随机过程和死区时间带来的影响, 实现了更线性的光强响应^[69]。法国的 Hamza 等人分析了 MPPC 的噪声与光子计数特性, 初步证明了 MPPC 用于 UWOC 的可行性^[70], 他们随后还阐明了 MPPC 的带宽对系统性能的影响^[71]。浙江大学的团队使用 MPPC 实现了水下 46 m 的超高灵敏 UWOC 系统^[69,72-73], 实验装置如图 6(a)、6(b)所示, 不同 L-PPM 信号下的误码率/误时隙率与 MPPC 接收到的光功率分别如图 6(c)、6(d)所示, 最低光接收功率低于 4 pW^[69,72-73]。此外, 中国科学院在光子计数通信领域也进行了很多研究。中国科学院西安光学精密机械研究所提出了以比特时间内电脉冲数目为依据的改进型光子计数方法, 减小了光子计数通信中背景光噪声的干扰^[74]。中国科学院上海光学精密机械研究所设计的光子计数接收器系统在 35.88 个衰减长度后可实现 3.32 位/光子的接收性能^[35]。

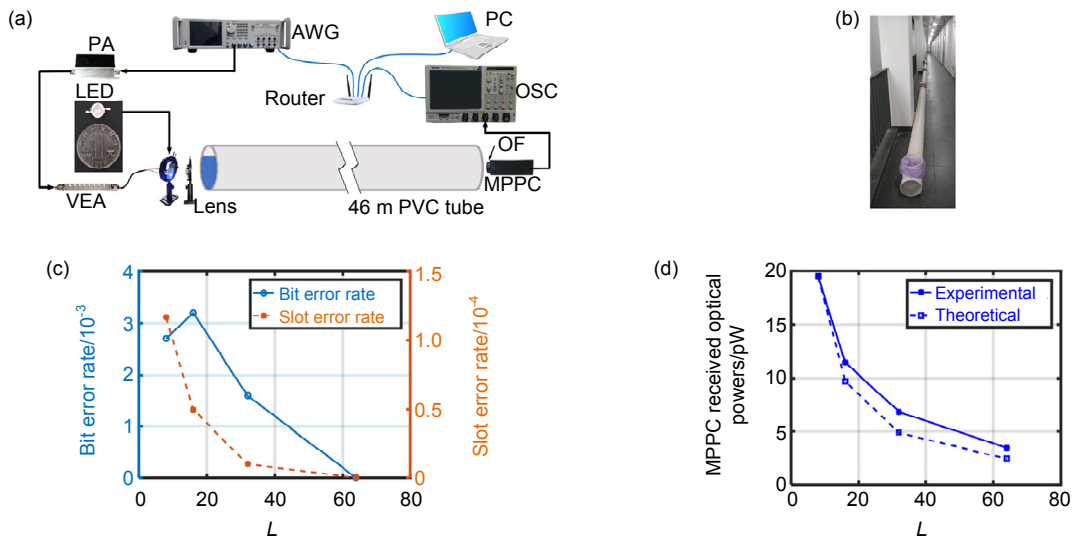


图 6 (a) 基于 MPPC 的 UWOC 系统实验装置图。

AWG: 任意波形发生器; PA: 功率放大器; VEA: 可变电衰减器; OF: 450 nm 滤光片; OSC: 示波器;

(b) 46 m PVC 管; (c) 不同 L 时的 BER 与 SER; (d) 不同 L 时接收到的光功率

Fig. 6 (a) Experiment setup of a MPPC based UWOC system. AWG: arbitrary waveform generator;

PA: power amplifier; VEA: variable electrical attenuator; OF: 450 nm optical filter; OSC: oscilloscope; (b) The 46 m PVC tube;

(c) BER and SER versus the order L of PPM; (d) The received optical powers versus the order L of PPM

4.3 链路对准

潜器受到水流的影响很难保持姿态的稳定,这使得发射/接收器件的对准情况难以得到保障。而模型仿真已使研究者认识到链路对准对于 UWOC 系统正常工作的重要意义。清华大学分析了使用激光光源未对准时链路的性能,结果显示散射在一定程度上可以优化对准情况,因此接收器在一定程度内的位置偏离是允许的^[75]。他们通过进一步研究发现,更浑浊的水,更长的链路距离在一定程度上能够降低对 UWOC 系统对准的要求^[76]。

改进发射端与接收端是解决对准问题的另一种思路。来自清华大学的团队提出了一种 LED 与 LD 混合使用的 UWOC 系统,利用 LED 与 LD 不同的光束特性分别进行粗对准与精确对准,以此降低了光学对准的难度^[77]。华中科技大学在链路中添加了自动对准系统,通过两套压电转向镜与光斑位置探测器进行快速对准,增强了链路稳定性^[78]。使用具有大接收面积的太阳能板作为 UWOC 接收端,也能在一定程度上降低对准难度^[79],适用于水下平台间的动态通信,且由于太阳能电池本身的特性,其具有缓解水下供能压力的潜力。在文献^[79]中浙江大学的团队实验验证了基于太阳能电池板的 UWOC 系统的可行性,以及其不需要透镜、易于对准的优点。非晶硅薄膜太阳能电池具有更高的光吸收系数,在供能紧张、信号光微弱的水下场景将成为光电探测器的有力竞争者。KAUST^[80]使用非晶硅薄膜太阳能电池在 2.4 m 浑水、强背景光条件下有效地接收了 908.2 kb/s 的 OFDM 信号,证明了接收器的鲁棒性。此外,多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)技术采用多个接收端来增大接收端有效接收面积,也被认为是解决链路中断、降低对准难度的有效方案。国内的清华大学^[81-82],国外的伊朗沙里夫理工大学的相关课题组^[83-85]在理论上对 MIMO 系统在不同水类型、收发器配置等条件下的 SNR、BER 性能方面做了大量的研究,结果表明,空间分集可以显著提高系统性能,特别是在强湍流情况下^[85]。

4.4 实用化

作为一项前沿技术,UWOC 的最终应用场景为实际的海水或湖水中。在 UWOC 的研究初期,研究人员一般在实验室中模拟海水环境进行性能分析,但海试仍然是最终检测通信样机性能最直接也是最有效的手段。在理论仿真、实验室验证完成后,有必要进行

UWOC 通信样机制作,并经过密封/耐压测试后在真实的水域中进行稳定性与适应性的测试。然而实地进行海试需要耗费大量的时间与财力,复杂的环境也不利于实验人员快速定位问题所在。先进的测试平台可以较好地缓解这一矛盾,如图 7 所示的位于浙江大学海洋学院的波流水池(70 m×40 m×1.5 m),可以实现潮流、潮位、波浪及泥沙等多因子同步耦合模拟。经过从实验室到测试平台的性能检测后,再进行实际海试可以大大节约成本并提升海试质量^[86-87]。



图 7 测试波流水池

Fig. 7 Test basin

在广阔的海洋中,单个 UWOC 通信链路的传输距离是相当有限的。因此,建立水下无线光网络(underwater wireless optical network, UWON)来实现水下平台间的光互联,以及点对点的长距离多跳传输是必要的。目前国内外也已经开展了很多 UWON 相关的研究工作^[88-92]。此外,由于塑料光纤(plastic optical fiber, POF)具有同海水近似的通信“窗口”与光纤通信近似的鲁棒性^[93-94],可以使用 POF 延长 UWOC 的通信距离,在复杂水下环境中提高 UWOC 的覆盖率和灵活性。

5 总结

UWOC 在高速灵活水下通信应用上的潜力使得近年来相关的研究不断涌现,传输速率和传输距离的提升始终对 UWOC 系统至关重要。对于构建整个 UWOC 系统来说,深刻理解水下光学信道特性是 UWOC 研究的首要工作,对于应对水下光传输中的挑战、评估 UWOC 性能也非常必要。对于水下光学信道中由吸收、散射带来的链路损耗,设计带宽性能好、功率强而稳定的发射器,灵敏度高、抗干扰能力强的接收器,是实现长距离 UWOC 的基本策略。结合光学信道特性,设计合适的调制格式可以提高频谱效率和功率效率,进而提高通信速率。而对于由海水散射

带来的时域扩展、UWOC 系统器件带宽受限及非线性特性等因素造成的性能失真,则需要编码、均衡等一系列信号处理技术来优化。此外,光复用技术对速率的提升,单光子探测技术对链路距离的扩展都值得重视。与利用散射的积极效应相比,输入与输出的合理配置在解决光学对准问题上将发挥更大的作用,自适应光学也有助于解决这一难题。而利用先进的测试平台可以为分析实际海水中常见的散射、湍流、波浪等问题提供帮助,为 UWOC 的实用化做准备。在这些基础上,UWOC 与其他通信方式结合,有助于形成大范围的海陆空一体化通信网络。此外,UWOC 潜在的安全性问题和组网问题也值得研究人员足够的关注。

参考文献

- [1] Vedachalam N, Ramesh R, Jyothi V B N, et al. Autonomous underwater vehicles-challenging developments and technological maturity towards strategic swarm robotics systems[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2019, **37**(5): 525–538.
- [2] Saeed N, Celik A, Al-Naffouri T Y, et al. Underwater optical wireless communications, networking, and localization: a survey[J]. *Ad Hoc Networks*, 2019, **94**: 101935.
- [3] Stojanovic M, Preisig J. Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, **47**(1): 84–89.
- [4] Au W W, Nachtigall P E, Pawloski J L. Acoustic effects of the ATOC signal (75 Hz, 195 dB) on dolphins and whales[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1997, **101**(5): 2973–2977.
- [5] Zeng Z Q, Fu S, Zhang H H, et al. A survey of underwater optical wireless communications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, **19**(1): 204–238.
- [6] Strand M P. Imaging model for underwater range-gated imaging systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, **1537**: 151–160.
- [7] 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.
- [8] Karp S. Optical communications between underwater and above surface (Satellite) terminals[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1976, **24**(1): 66–81.
- [9] Longacre J R, Freeman D E, Snow J B. High-data-rate underwater laser communications[J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, **1302**: 433–439.
- [10] Snow J B, Flatley J P, Freeman D E, et al. Underwater propagation of high-data-rate laser communications pulses[J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, **1750**: 419–427.
- [11] Hanson F, Radic S. High bandwidth underwater optical communication[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(2): 277–283.
- [12] Lu D L, Kan J J, Fullerton E E, et al. Enhancing spontaneous emission rates of molecules using nanopatterned multilayer hyperbolic metamaterials[J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, **9**(1): 48–53.
- [13] 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.
- [14] Xu J, Song Y H, Yu X Y, et al. Underwater wireless transmission of high-speed QAM-OFDM signals using a compact red-light laser[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(8): 8097–8109.
- [15] Lu H H, Li C Y, Lin H H, et al. An 8 m/9.6 Gbps underwater wireless optical communication system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, **8**(5): 7906107.
- [16] Kong M W, Lv W C, Ali T, et al. 10-m 9.51-Gb/s RGB laser diodes-based WDM underwater wireless optical communication[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(17): 20829–20834.
- [17] Huang Y F, Tsai C T, Chi Y C, et al. Filtered multicarrier OFDM encoding on blue laser diode for 14.8-Gbps seawater transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, **36**(9): 1739–1745.
- [18] Li C Y, Lu H H, Tsai W S, et al. 16 Gb/s PAM4 UWOC system based on 488-nm LD with light injection and optoelectronic feedback techniques[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(10): 11598–11605.
- [19] Liu X Y, Yi S Y, Zhou X L, et al. 34.5 m underwater optical wireless communication with 2.70 Gbps data rate based on a green laser diode with NRZ-OOK modulation[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(22): 27937–27947.
- [20] Fei C, Hong X J, Zhang G W, et al. 16.6 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): 34060–34069.
- [21] Fei C, Zhang J W, Zhang G W, et al. Demonstration of 15-M 7.33-Gb/s 450-nm underwater wireless optical discrete multitone transmission using post nonlinear equalization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, **36**(3): 728–734.
- [22] Hong X J, Fei C, Zhang G W, et al. Discrete multitone transmission for underwater optical wireless communication system using probabilistic constellation shaping to approach channel capacity limit[J]. *Optics Letters*, 2019, **44**(3): 558–561.
- [23] Lu C H, Wang J M, Li S B, et al. 60m/2.5Gbps underwater optical wireless communication with NRZ-OOK modulation and digital nonlinear equalization[C]//*Proceedings of 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics*, San Jose, CA, USA, 2019: 1–2.
- [24] 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.
- [25] Bluecomm 100-wireless underwater optical communication[EB/OL]. <https://www.sonardyne.com/product/bluecomm-underwater-optical-communication-system/>.
- [26] Baykal Y. Scintillations of LED sources in oceanic turbulence[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(31): 8860–8863.
- [27] Shi J Y, Zhu X, Wang F M, et al. Net data rate of 14.6 Gbit/s underwater VLC utilizing silicon substrate common-anode five primary colors LED[C]//*Proceedings of 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, San Diego, CA, USA, 2019: 1–3.
- [28] Wang F M, Liu Y F, Jiang F Y, et al. High speed underwater visible light communication system based on LED employing maximum ratio combination with multi-PIN reception[J]. *Optics Communications*, 2018, **425**: 106–112.
- [29] Tian P F, Liu X Y, Yi S Y, et al. High-speed underwater optical wireless communication using a blue GaN-based micro-LED[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(2): 1193–1201.
- [30] Xu J, Kong M W, Lin A B, et al. Directly modulated green-light diode-pumped solid-state laser for underwater wireless optical communication[J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(9): 1664–1667.

- [31] 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): 7904909.
- [32] Kong M W, Chen Y F, Sarwar R, *et al.* Underwater wireless optical communication using an arrayed transmitter/receiver and optical superimposition-based PAM-4 signal[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(3): 3087–3097.
- [33] Zhuang B, Li C, Wu N, *et al.* First demonstration of 400Mb/s PAM4 signal transmission over 10-meter underwater channel using a blue LED and a digital linear pre-equalizer[C]//*Proceedings of 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics*, San Jose, CA, USA, 2017: 1–2.
- [34] Sui M H, Zhou Z G. The modified PPM modulation for underwater wireless optical communication[C]//*Proceedings of 2009 International Conference on Communication Software and Networks*, Macau, China, 2009: 173–177.
- [35] Hu S, Mi L, Zhou T H, *et al.* 35.88 attenuation lengths and 3.32 bits/photon underwater optical wireless communication based on photon-counting receiver with 256-PPM[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(17): 21685–21699.
- [36] Du J S. Research on underwater optical communication based on LDPC and PPM[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts And Telecommunications, 2017.
杜劲松. 基于 LDPC 编码与 PPM 调制的水下光通信研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.
- [37] Mi X L, Dong Y H. Polarized digital pulse interval modulation for underwater wireless optical communications[C]//*Proceedings of OCEANS 2016 - Shanghai*, Shanghai, China, 2016: 1–4.
- [38] Xiao S. Researches on joint source channel coding in wireless channel[D]. Xi'an: Xidian University, 2004.
肖嵩. 无线信道中的联合信源信道编码研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2004.
- [39] Cox W C, Simpson J A, Domizioli C P, *et al.* An underwater optical communication system implementing Reed-Solomon channel coding[C]//*Proceedings of OCEANS 2008*, Quebec City, QC, Canada, 2008: 1–6.
- [40] Mattoussi F, Khalighi M A, Bourennane S. Improving the performance of underwater wireless optical communication links by channel coding[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(9): 2115–2120.
- [41] Campbell J C. Recent advances in telecommunications avalanche photodiodes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(1): 109–121.
- [42] Cova S, Ghioni M, Lacaita A, *et al.* Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection[J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(12): 1956–1976.
- [43] Zhang Z J, Zhao Y, Zhang J D, *et al.* Ranging accuracy improvement of time-correlated signal-photon counting lidar[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, **10605**: 106050C.
- [44] Li C, Wang B K, Wang P L, *et al.* Generation and transmission of 745Mb/s ofdm signal using a single commercial blue LED and an analog post-equalizer for underwater optical wireless communications[C]//*Proceedings of 2016 Asia Communications and Photonics Conference*, Wuhan, China, 2016: 1–3.
- [45] Zhang Z Y, Lai Y J, Lv J L, *et al.* Over 700 MHz –3 dB bandwidth UOWC system based on blue HV-LED with T-bridge pre-equalizer[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, **11**(3): 7903812.
- [46] Ren Y X, Li L, Wang Z, *et al.* Orbital angular momentum-based space division multiplexing for high-capacity underwater optical communications[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 33306.
- [47] Mobley C D. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*[M]. New York: Academic Press, 1994.
- [48] Petzold T J. *Volume Scattering Functions for Selected Ocean Waters*[M]. San Diego: Scripps Institution of Oceanography, 1972.
- [49] 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.
- [50] Jaruwatanadilok S. Underwater wireless optical communication channel modeling and performance evaluation using vector radiative transfer theory[J]. *IEEE Journal on Selected areas in Communications*, 2008, **26**(9): 1620–1627.
- [51] Gabriel C, Khalighi M A, Bourennane S, *et al.* Monte-carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, **5**(1): 1–12.
- [52] Haltrin V I. One-parameter two-term Henyey-Greenstein phase function for light scattering in seawater[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(6): 1022–1028.
- [53] Sahu S K, Shanmugam P. Semi-analytical modeling and parameterization of particulates-in-water phase function for forward angles[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(17): 22291–22307.
- [54] Sahu S K, Shanmugam P. A theoretical study on the impact of particle scattering on the channel characteristics of underwater optical communication system[J]. *Optics Communications*, 2018, **408**: 3–14.
- [55] Vali Z, Gholami A, Ghassemloo Z, *et al.* Experimental study of the turbulence effect on underwater optical wireless communications[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(28): 8314–8319.
- [56] Ooi B S, Sun X B, Alkhazragi O, *et al.* Visible diode lasers for high bitrate underwater wireless optical communications[C]//*Proceedings of Optical Fiber Communication Conference 2019*, San Diego, CA, USA, 2019.
- [57] Yi X, Li Z, Liu Z J. Underwater optical communication performance for laser beam propagation through weak oceanic turbulence[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(6): 1273–1278.
- [58] Oubei H M, Zedini E, ElAfandy R T, *et al.* Efficient weibull channel model for salinity induced turbulent underwater wireless optical communications[C]//*Proceedings of 2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference*, Singapore, Singapore, 2017: 1–2.
- [59] Oubei H M, Zedini E, ElAfandy R T, *et al.* Simple statistical channel model for weak temperature-induced turbulence in underwater wireless optical communication systems[J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(13): 2455–2458.
- [60] Oubei H M, Duran J R, Janjua B, *et al.* 4.8 Gbit/s 16-QAM-OFDM transmission based on compact 450-nm laser for underwater wireless optical communication[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(18): 23302–23309.
- [61] Xu J, Lin A B, Yu X Y, *et al.* Underwater laser communication using an OFDM-modulated 520-nm laser diode[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(20): 2133–2136.
- [62] Sullivan S A. Experimental study of the absorption in distilled water, artificial sea water, and heavy water in the visible region of the spectrum[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1963, **53**(8): 962–968.
- [63] Gilbert G D, Stoner T R, Jernigan J L. Underwater experiments on the polarization, coherence, and scattering properties of a pulsed blue-green laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 1966, **7**: 8–14.
- [64] Duntley S Q. Light in the sea[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1963, **53**(2): 214–233.

- [65] Baghdady J, Miller K, Morgan K, *et al.* Multi-gigabit/s underwater optical communication link using orbital angular momentum multiplexing[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(9): 9794–9805.
- [66] Wang C. Research on the key technology of singlephoton detection in underwater visible light communications[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2018.
王超. 水下可见光通信单光子检测关键技术研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2018.
- [67] Wang C, Yu H Y, Zhu Y J, *et al.* Experimental study on SPAD-based VLC systems with an LED status indicator[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(23): 28783–28793.
- [68] 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.
- [69] Wang J L, Yang X Q, Lv W C, *et al.* Underwater wireless optical communication based on multi-pixel photon counter and OFDM modulation[J]. *Optics Communications*, 2019, **451**: 181–185.
- [70] Hamza T, Khalighi M A, Bourennane S, *et al.* On the suitability of employing silicon photomultipliers for underwater wireless optical communication links[C]//*Proceedings of the 2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, Prague, Czech Republic, 2016: 1–5.
- [71] Khalighi M A, Hamza T, Bourennane S, *et al.* Underwater wireless optical communications using silicon photo-multipliers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **9**(4): 7905310.
- [72] Shen J N, Wang J L, Yu C Y, *et al.* Single LED-based 46-m underwater wireless optical communication enabled by a multi-pixel photon counter with digital output[J]. *Optics Communications*, 2019, **438**: 78–82.
- [73] Shen J N, Wang J L, Chen X, *et al.* Towards power-efficient long-reach underwater wireless optical communication using a multi-pixel photon counter[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(18): 23565–23571.
- [74] Han B, Zhao W, Wang W, *et al.* Modified photon counting communication method for underwater application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(8): 0806004.
韩彪, 赵卫, 汪伟, 等. 面向水下应用的改进型光子计数通信方法[J]. *光学学报*, 2016, **36**(8): 0806004.
- [75] Tang S J, Dong Y H, Zhang X D. On link misalignment for underwater wireless optical communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, **16**(10): 1688–1690.
- [76] Zhang H H, Dong Y H. Link misalignment for underwater wireless optical communications[C]//*Proceedings of 2015 Advances in Wireless and Optical Communications*, Riga, Latvia, 2015: 215–218.
- [77] Huang X, Yang F, Song J. Hybrid LD and LED-based underwater optical communication: state-of-the-art, opportunities, challenges, and trends[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, **17**(10): 100002.
- [78] Cai C K, Zhao Y F, Zhang J Y, *et al.* Experimental demonstration of an underwater wireless optical link employing orbital angular momentum (OAM) modes with fast auto-alignment system[C]//*Proceedings of Optical Fiber Communication Conference 2019*, San Diego, CA, USA, 2019: 1–3.
- [79] Kong M W, Sun B, Sarwar R, *et al.* Underwater wireless optical communication using a lens-free solar panel receiver[J]. *Optics Communications*, 2018, **426**: 94–98.
- [80] Kong M W, Lin J M, Kang C H, *et al.* Toward self-powered and reliable visible light communication using amorphous silicon thin-film solar cells[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(24): 34542–34551.
- [81] Zhang H H, Dong Y H, Hui L K. On capacity of downlink underwater wireless optical MIMO systems with random sea surface[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, **19**(12): 2166–2169.
- [82] Zhang H H, Dong Y H. Impulse response modeling for general underwater wireless optical MIMO links[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, **54**(2): 56–61.
- [83] Jamali M V, Salehi J A. On the BER of multiple-input multiple-output underwater wireless optical communication systems[C]//*Proceedings of the 2015 4th International Workshop on Optical Wireless Communications*, Istanbul, Turkey, 2015: 26–30.
- [84] Jamali M V, Nabavi P, Salehi J A. MIMO underwater visible light communications: Comprehensive channel study, performance analysis, and multiple-symbol detection[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, **67**(9): 8223–8237.
- [85] Jamali M V, Salehi J A, Akhoundi F. Performance studies of underwater wireless optical communication systems with spatial diversity: MIMO scheme[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, **65**(3): 1176–1192.
- [86] Cossu G, Sturniolo A, Messa A, *et al.* Sea-trial of optical ethernet modems for underwater wireless communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, **36**(23): 5371–5380.
- [87] Sawa T, Nishimura N, Tojo K, *et al.* Practical performance and prospect of underwater optical wireless communication:—results of optical characteristic measurement at visible light band under water and communication tests with the prototype modem in the sea[J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences*, 2019, **E102-A**(1): 156–167.
- [88] Akhoundi F, Salehi J A, Tashakori A. Cellular underwater wireless optical CDMA network: performance analysis and implementation concepts[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, **63**(3): 882–891.
- [89] Vavoulas A, Sandalidis H G, Varoutas D. Underwater optical wireless networks: ak-connectivity analysis[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2014, **39**(4): 801–809.
- [90] Jamali M V, Akhoundi F, Salehi J A. Performance characterization of relay-assisted wireless optical CDMA networks in turbulent underwater channel[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, **15**(6): 4104–4116.
- [91] Jamali M V, Chizari A, Salehi J A. Performance analysis of multi-hop underwater wireless optical communication systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, **29**(5): 462–465.
- [92] Celik A, Saeed N, Al-Naffouri T Y, *et al.* Modeling and performance analysis of multihop underwater optical wireless sensor networks[C]//*Proceedings of 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Barcelona, Spain, 2018: 1–6.
- [93] Xu J, Sun B, Lyu W C, *et al.* Underwater fiber-wireless communication with a passive front end[J]. *Optics Communications*, 2017, **402**: 260–264.
- [94] Xu J, Sun B, Kong M W, *et al.* Underwater wireless optical communication using a blue-light leaky feeder[J]. *Optics Communications*, 2017, **397**: 51–54.

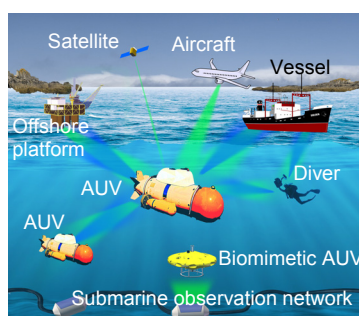
Link structure of underwater wireless optical communication and progress on performance optimization

Zhang Yufan¹, Li Xin^{1,2}, Lv Weichao^{1,2}, Chen Jiawang², Zheng Minhui³, Xu Jing^{1,2*}

¹Optical Communications Laboratory, Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang 316021, China;

²Key Laboratory of Ocean Observation-Imaging Testbed of Zhejiang Province, Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang 316021, China;

³Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou, Zhejiang 310012, China



The demand of wireless communication in human underwater activities

Overview: Ocean exploration urgently needs a more flexible and stable way of communication without cables. Underwater wireless optical communication (UWOC) owns strong competitiveness with the features of large capacity, strong anti-interference ability, and good confidentiality. With such advantages, UWOC has become an important scientific theme attracting worldwide attention. This paper introduces the recent research progress and basic link structures of UWOC, including transmitter, receiver, and a challenging channel. Light emitting diode (LED) and laser diode (LD) are two kinds of light sources commonly used in the UWOC system. LEDs, with a large divergence angle and low cost, are widely used in short-range UWOC. On the other hand, LDs characterized by highly coherent, directional output and larger bandwidth could realize a longer transmission distance at a higher data rate. For the modulation formats, on-off keying (OOK) is widely used in the UWOC systems. Other modulation formats are also used to improve the performance of the system. Channel coding like Reed-Solomon (RS) code, low density parity check (LDPC) code can maintain a stable communication link. At the receiver of UWOC, the most widely used optical detectors are positive-intrinsic-negative (PIN) diode and avalanche photodiode (APD). In addition, single photon avalanche diode (SPAD) and multi-pixel photon counter (MPPC) attract special attention due to ultra-high sensitivity for long-reach UWOC systems. The absorption, scattering, and turbulence in water lead to serious interference and degradation to the performance of UWOC. Therefore, a comprehensive study of the UWOC channel is essential for the design of a UWOC system. For UWOC channel modeling, numerical methods with lower computational complexity, are commonly used. This paper also explores system optimization schemes for UWOC. Multiplexing technologies, such as orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), wavelength division multiplexing (WDM), and orbital angular momentum (OAM), can enhance the performance of UWOC by making full use of different optical degrees of freedom. The coverage of the UWOC link can be extended by using single-photon detectors. The underwater wireless optical network enables the connection of massive underwater vehicles, submarines, and sensors in a wider area. UWOC could also be combined with optical fiber communication to realize a longer transmission distance and a more flexible network. Test platforms are also useful for practical UWOC applications. In the future, UWOC is envisioned to play an increasingly important role in ocean exploration. This review is expected to be helpful to the researchers in this field.

Citation: Zhang Y F, Li X, Lv W C, *et al.* Link structure of underwater wireless optical communication and progress on performance optimization[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(9): 190734

Supported by National Key R&D Program of China (2016YFC0302403) and Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA22030208)

* E-mail: jxu-optics@zju.edu.cn