

## 海洋光学系统中的时空方法

张雨凡<sup>1</sup>, 徐 敬<sup>1,2\*</sup>

(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)

**摘要:** 海洋光学系统在海洋探索、开发和监测中起到了越来越重要的作用。水下无线光通信、水下激光雷达是两种迅速发展且有良好应用前景的海洋光学系统。水下无线光通信凭借高速率与低延迟的特点在中短距离应用中成为理想的通信选择; 水下激光雷达在获取地理信息、目标探测等应用中也是常用的高精度、高效率的观测方法。然而, 海水信道的复杂光学特性为海洋光学系统性能的进一步提升带来了挑战。在海水信道中, 不仅吸收与散射作用较强, 而且信道中可能有湍流、气泡等动态变化的干扰因素。为应对这些挑战, 一方面可通过时间或空间方法提高信噪比; 另一方面, 时空信息转换的方法有利于提升系统的性能。文中对以上解决方案进行综述, 并指出海洋光学系统的发展趋势。

**关键词:** 海洋光学; 无线光通信; 激光雷达

**中图分类号:** P733.3   **文献标志码:** A   **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0203003

## Temporal and spatial methods in ocean optical systems

Zhang Yufan<sup>1</sup>, Xu Jing<sup>1,2\*</sup>

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

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

**Abstract:** Ocean optical systems have played an increasingly important role in ocean exploration, development and monitoring. Underwater wireless optical communication and underwater lidar are two types of ocean optical systems that are rapidly developing and have good application prospects. Underwater wireless optical communication is an ideal communication option for short and medium range applications due to high speed and low latency. Underwater lidar is also a highly precise and efficient observation method in applications like deriving geographic information and target detection. However, the complex optical characteristics of seawater channels have brought challenges to the further improvement of the performance of ocean optical systems. In seawater channels, not only strong absorption and scattering, but also dynamic interference factors such as turbulence and bubbles exist in the channel. In order to deal with these challenges, on one hand, signal to noise ratio can be increased with temporal or spatial methods. On the other hand, the conversion between temporal and spatial domains is beneficial to

收稿日期: 2019-10-05; 修订日期: 2019-11-03

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1401202, 2017YFC0306601); 国家自然科学基金(61971378, 61671409); 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, 本科生, 主要从事水下无线光通信、水下激光雷达方面的研究。Email: 3160102403@zju.edu.cn

通讯作者: 徐敬(1982-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事水下无线光通信、深海观测技术方面的研究。

Email: jxu-optics@zju.edu.cn

achieving better system performance. This article reviews solutions above and the development trend of ocean optical systems is pointed out.

**Key words:** ocean optics; optical wireless communication; lidar

## 0 引言

人类文明的起源与海洋有着密切的联系,而海洋在现代社会的发展中也占据着越来越重要的地位。海洋观测技术与水下通信技术是海洋发展中的两项关键技术。海洋观测技术的应用增加了人类对海洋的了解,为海洋学的其他分支提供技术支撑。水下通信技术保障了信息在潜器间或潜器与海底基站间迅速可靠地传递。虽然水下信道不利于顺畅完成观测与通信,但它与水下信息的获取与传递过程是不可分割的。卫星遥感技术可在全球范围内测量海洋颜色,但难以获取海洋信息的垂直分布<sup>[1]</sup>。安装光缆可以在水下建立起稳固的信道,但一定程度上牺牲了灵活性与安装便利性<sup>[2]</sup>。因此,水下无线通信系统与观测系统在“海洋强国”的发展道路上有重要的意义。在水中具有低衰减特性的声波被广泛使用在海洋开发中,在长距离应用中逐渐成为一项可靠成熟的选择<sup>[3]</sup>。但声波在空气-海水界面的高反射率、低带宽等特性也带来了一些应用上的限制<sup>[2,4]</sup>。在这样的背景下,海洋光学系统的价值逐渐突显出来。

激光雷达 (Light Detection and Ranging, LiDAR) 与水下无线光通信 (Underwater Wireless Optical Communication, UWOC) 是两种典型的海洋光学系统。LiDAR 在目标探测、生态保护、海水参数测量等方面已经有了成功的应用<sup>[4-8]</sup>。LiDAR 设备不受高反射率界面影响,可以布局在从水下到海面,从大气到空间的大纵深范围内<sup>[4,9-11]</sup>。UWOC 以 Gb/s 量级的传输速率在高速通信中具有巨大的优势,在抗电磁干扰、通信安全以及灵活性等方面也有优良的表现<sup>[2,12]</sup>。目前的研究已经充分证明了 UWOC 系统在百米乃至数百米内水下无线通信中的潜力与价值<sup>[13-15]</sup>。这两类光学系统的卓越表现与光波传播速度快、支持高带宽等特性密切相关。但水下信道对光传输的影响同样为光学系统带来负面的影响。在水中,散射与吸收引起的功率损耗比空气信道中更大,这增加了

对发射端功率或接收端灵敏度的要求。散射会导致接收信号在时间上的延迟和展宽,降低观测的精度或导致通信的误码率提高<sup>[12,16]</sup>。此外,水中随时间、空间动态变化的湍流、气泡等因素也影响着系统工作的稳定性与可靠性<sup>[17]</sup>。因此,水下光学系统的设计与水下光时空特性的研究联系紧密<sup>[18]</sup>,许多提升系统性能的方法都是从时域或空间域出发的。

LiDAR 与 UWOC 具有相似的系统组成,即都包括发射端、信道与接收端。虽然由于功能与目的不同,两者的收发器件空间配置、信号处理过程都有差异,但一些解决方案的思想是有一致性的。文中以 LiDAR 与 UWOC 两种典型的水下光学系统为例,综述了两种系统实现方案中的时域和空间域方法。两种系统的方法互相有借鉴意义,对于其他类型的水下光学系统的设计也有一定的参考价值。

## 1 时域方法

在 LiDAR 技术中,三角法、相位法和飞行时间法是水下测距可选择的方案。三角法通过几何计算获得距离信息,在短距离内有较好的精度。但在较远处,目标距离的增加带来的角度变化率减小,精度也随之急剧下降<sup>[19]</sup>。相位法通过测量高频调制的光信号往返的相位变化,根据光波长与介质折射率计算出传播距离<sup>[20]</sup>。由于散射光在传播过程中会损失高频成分,载波调制已被证实具有良好的散射抑制能力<sup>[21]</sup>,因此相位法可能在中长距离测量中有更好的表现。但相位测距需要高功率连续激光源,在安全性与功耗上存在一些隐患<sup>[9]</sup>。飞行时间法是更为常用的测距方法。飞行时间法原理简单,且得益于光的高传播速度,测量过程延时低,但高精度的测量对时间测量有相当高的要求,0.1 ns 的时间误差就会带来 cm 级的误差。在仪器带宽及采样率相同的条件下,时刻鉴别方法的优劣对测量精度有直接影响。传统的前沿鉴别法以设定的阈值作为鉴别条件,但不考虑信号幅值随距离变化的阈值设定方法不能适应水

下工作。南京理工大学利用仿真比较了峰值鉴别法与恒比定时法两种精度更高的方法的鉴别效果,结果显示恒比定时法在长距离应用中具有更高的精度<sup>[22]</sup>。恒比定时法原理如图 1 所示,可以通过原信号的衰减信号与延迟信号幅值相等作为时刻鉴定的标准。恒比定时法可以通过调节触发比取得更好的抗时间漂移能力。

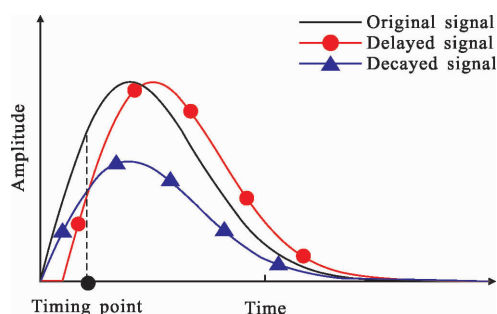


图 1 恒比定时法原理图

Fig.1 Schematic diagram of constant fraction discriminator

在时刻鉴别过程中另一项重要的工作是排除后向散射的干扰。后向散射信号在特征上与目标信号类似,但在时间上更提前,强度上也更高。距离选通技术原理如图 2 所示,利用仅在回波信号返回的附近时段内有效工作的探测器件有效地抑制了散射信号的干扰<sup>[23]</sup>。20 世纪 90 年代,美国海军使用选通时间低至 120 ps 的器件对简单物体实现了三维成像<sup>[24]</sup>。2004 年,新加坡南洋理工大学在浑浊水中进行的选通成像实验展示了选择清晰成像距离的可行性<sup>[25]</sup>。2005 年,丹麦技术大学分析了脉冲时间与选通时间的相互关系,并实现了高精度的 3D 成像。虽然他们分析时借助的矩形脉冲模型与实际的脉冲信号存在差异,但简易的方法与普适性的结论在其他应用中仍有参考价值<sup>[26]</sup>。2019 年,海军工程大学提出通过在时域上分配高重复频率激光器的脉冲,可以获得更大的探测范围<sup>[27]</sup>。与其他距离选通系统相同,保证选通切片内的高信噪比是设计的基本思路,全距离选通依赖合理的脉冲分配策略来实现这一点。探测器的延迟时间与选通时间是距离选通技术的关键之一。一方面,时间控制的精度影响了探测结果的精度;另一方面,选通时间过短反而会损失有效光子,过长则会降低散射抑制能力。根据一些仿真与实验结果,距离选通技术可实现的探测距离可以达到六

七个衰减长度<sup>[23,28]</sup>。

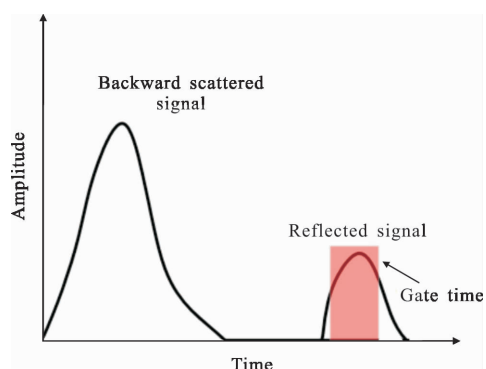


图 2 距离选通原理图

Fig.2 Schematic diagram of range gated

在 UWOC 中,信道引起的时间色散以及设备带宽限制会引起码间串扰,危害通信质量。均衡技术有效地补偿了干扰因素带来的影响,降低误码率。时域均衡算法已被应用于 UWOC 系统中以缓解码间串扰。中国科技大学使用时域预均衡方法弥补了蓝光发光二极管(Light Emitting Diode, LED)调制带宽有限的缺点,并建立了传输速率 400 Mbps 的水下 10 m 通信链路<sup>[29]</sup>。使用频域均衡处理线性项,时域均衡处理非线性项的方法在可见光通信领域已经有了应用<sup>[30-31]</sup>。在 UWOC 领域,浙江大学使用时域均衡器去除信号中的非线性项,与只使用线性均衡器相比,接收端的信噪比提升了 2 dB<sup>[32]</sup>。此外,使用递归最小二乘法等自适应算法的时域均衡有利于系统在复杂环境下稳定工作<sup>[2]</sup>。

从以上应用中可以看出,在光学链路中进行时域操作是非常直接有效的方案。增强时域方法的抗干扰能力与自适应能力是目前的发展趋势。

## 2 空间域方法

多重散射光会偏离直接返回的光束的传播方向并造成光束空间上的扩展。在 LiDAR 技术中,利用狭窄视场的接收器选择性地接收回波信号是一种有效的空间区分方法。为了获得大的系统有效视场和更好的散射抑制效果,光源常使用与接收器空间分离的线阵扫描激光。接收器在工作时始终保持对目标光斑的追踪,因此这种方法也被称为同步扫描<sup>[33]</sup>。同步扫描被较早地应用在水下测距或成像系统中,但收发器之间较大的距离会使装置难以设计得紧凑

小巧。扫描技术虽然从点扫描发展到线扫描,但在广阔的海域中速度仍略显不足<sup>[21]</sup>。最近,美国克拉克森大学设计了一种基于散射信号与有效反射信号间相干特性差异的空间滤波器<sup>[34]</sup>。他们使用的轴锥镜能偏转反射信号而几乎不影响散射信号,借助接收端前的物理掩模即可实现信号的空间区分。尽管散射抑制建立在较为理想的假设上,但从实验结果来看,这种全光空间滤波器有巨大的潜力。

与 LiDAR 系统不同,在 UWOC 系统中收发器件是难以保持同步的,水流、平台抖动等因素可能会导致链路被破坏。因此,UWOC 系统的空间对准研究对增强系统鲁棒性有积极的意义。在理论上,散射特性一定程度上降低了空间对准的要求<sup>[35]</sup>,但在更高精度要求的应用中接收器与发射器的控制与改装是必要的。大接收面积的探测器、大发散角的光源可以起到简化链路建立过程的作用。太阳能电池板接收角度大并可作为自主供能器件,是一类具有良好前景的探测器<sup>[36]</sup>。非晶硅薄膜太阳能板具有高吸收系数,沙特阿拉伯阿卜杜拉国王科技大学使用以此为基础设计的原理样机在 2.4 m 浑浊水下信道中实现了 908.2 kb/s 的传输速率,体现了该类器件对高衰减水下环境的适应性<sup>[37]</sup>。由于较大的光敏面使得极间电容较大,光电池频率特性不理想,目前以太阳能电池板为接收器的链路可实现的传输速率较低。清华大学根据不同发射器件的特点,提出将传输速率有限而发散角大、易于对准的 LED 与支持高速传输而对准要求高的激光二极管(Laser Diode, LD)相结合并根据传输需求分配任务的方案,有助于建立低成本效率、高时间效率的传输网络<sup>[38]</sup>。

用于动态对准的捕获、对准与跟踪(Acquisition, Pointing and Tracking, APT)技术也不断有新的研究成果。2016年,密歇根州立大学设计了根据信号强度控制旋转底座的动态对准系统,将数据丢失率从 56.2%降低到 9.9%<sup>[39]</sup>。使用这种方法,在单一旋转轴外拓展额外的可调节自由度可以使这项研究可用的场景更广泛。2019年,华中科技大学根据位置传感器指导压电驱动转向镜进行两次快速对准。压电驱动频率可达 2 kHz,在每秒 30 帧的图像观察中发现系统可以使光束中心位置的变化幅度由 0.7 mm 缩小到 0.2 mm<sup>[40]</sup>。微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)具有体积小、智能化的优

点,可控制光束偏转实现链路对准。2013年,奥地利维也纳工业大学在粗对焦条件下使用 MEMS 扫描 XY 方向各 1.47 m 的范围,完成对准后恢复对焦状态进行通信<sup>[41]</sup>。2019年,德克萨斯 A&M 大学以强度最大值为参考指标,设计了电磁驱动的 MEMS 扫描镜,实现了 2.1°范围内的链路对准<sup>[42]</sup>。这些对准系统一般通过强度的极值或位置分布作为对准的指标,而机器视觉技术可以获取目标位置的变化情况。以机器视觉技术指导对准装置的调整,有可能实现更智能的系统控制。设法减少湍流和高速移动场景中的误差是水下 APT 技术的重要发展方向。

除了以上方法,多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)配置利用了空间资源,增强了系统在光束指向上的容错性<sup>[43]</sup>,也可以避免水下生物遮挡光束导致整个链路失效的情况发生<sup>[44]</sup>。MIMO 配置的另一个优点是对单个发射器件的功率要求低,这也意味着在发射器件功率有限的情况下, MIMO 系统可以实现更长的传输距离。清华大学、伊朗沙里夫理工大学的仿真分析证明了空间分集缓解衰落效应, MIMO 系统在湍流环境下能够提升性能<sup>[43-45]</sup>。2019年,在之前对太阳能电池板与 MIMO 系统的研究基础上<sup>[37,46]</sup>,浙江大学提出了如图 3 所示的分集接收系统。系统接收端采用了 2×2 的太阳能接收板阵列,并使用最大比合并(Maximum Ratio Combining, MRC)算法处理分集信号。与使用相同总面积的单个太阳能电池板相比,使用 MRC 算法的分集装置可支持的传输速率最大增加了约 40%<sup>[47]</sup>。

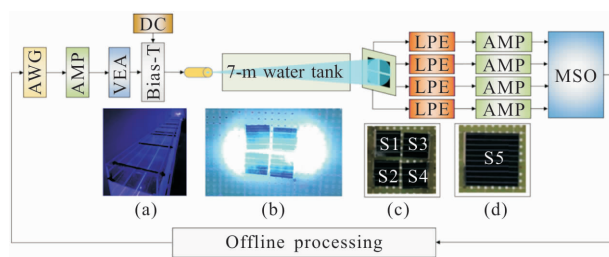


图 3 分集接收通信系统的实验装置。(a)7 m 水箱;(b)接收到的光斑;(c)太阳能电池板阵列;(d)单个太阳能电池板

Fig.3 Experimental setup of the diversity reception communication system. (a) 7-m water tank; (b) received spot; (c) solar panel array; (d) single solar panel

海洋环境中具有较强的空间扰动,为水下光学系统的稳定工作带来了不利影响。保持收发器件的

同步状态是空间域方法的重要思想。LiDAR 系统的同步意义在于抑制散射光; UWOC 系统的同步则是链路工作的基本要求。

### 3 考虑信号时空特性的探测器

此节将介绍两种在设计时考虑信号时空特性的光电探测器, 条纹管和硅光电倍增管 (Silicon Photomultiplier, SiPM)。

条纹管不仅能够获得二维对比度图像, 而且能够获得距离信息, 是应用前景良好的 3D 成像探测器<sup>[48]</sup>。条纹管主要由狭缝、光电阴极、偏转系统与荧光屏等部分组成。通过光电阴极和加载斜坡电压的偏转板, 光信号的时间延迟转化为电子空间分布的变化, 最终在荧光屏上体现为垂直于狭缝方向的不同位置的条纹<sup>[49]</sup>。从 20 世纪 90 年代末起, 国外开始研究水下条纹管成像激光雷达 (Streak Tube Imaging Lidar, STIL)。美国海军与 Areté 公司合作开发的样机在水下目标识别等多领域的实验中充分展现出 STIL 大视场、高分辨率以及设备无运动部件的优点<sup>[50]</sup>。随后, Areté 公司还研发了多狭缝的条纹管探测器, 可进行多种偏振态或多种波长的探测, 具有显著的可拓展性与多功能性<sup>[51]</sup>。国内研究条纹管的单位有哈尔滨工业大学和中国科学院西安光学精密机械研究所 (下简称西光所) 等。2013 年, 哈尔滨工业大学将对对比度调制原理应用于条纹管图像去噪, 在提升接近 10 dB 信噪比的同时保持了边缘信息的完好<sup>[52]</sup>。2017 年, 哈尔滨工业大学实现了水下探测距离 22 m, 空间分辨率 0.3 cm 的 STIL 系统<sup>[53]</sup>。2015 年, 西光机所设计了一款体积小而阴极有效面积占比较大的条纹管, 为减小平台载荷负担提供了设备基础<sup>[54]</sup>。

SiPM 由工作在盖革模式的单光子雪崩二极管 (Single Photon Avalanche Diode, SPAD) 阵列化排布而成, 因此也被称为多像素光子计数器 (Multi-Pixel Photon Counter, MPPC)。SPAD 本身具有支持单光子检测的高灵敏度, 但死区时间限制了固定时间内检测到的光子数上限, 在接收过程中可能会导致部分信息的丢失<sup>[55]</sup>。SiPM 根据接收到信号的 SPAD 数目获取强度信息, 减弱了死区时间内光电响应非线性的影响<sup>[56]</sup>。阵列化的设计同时使得探测器具有较大的接收面积, 有利于链路的建立<sup>[57]</sup>。2016 年到 2017 年,

法国艾克斯马赛大学通过实验与仿真对比了 SiPM 与雪崩二极管、光电倍增管的性能, 初步展示了 SiPM 应用于水下光通信的可行性, 特别考虑了短距离时信号强度高引起的非线性失真问题<sup>[58-60]</sup>。2018 年到 2019 年, 浙江大学使用 SiPM 作为接收器先后实现了使用 LD 与 LED 传输 5 MHz 时隙频率的脉冲位置调制 (Pulse Position Modulation, PPM) 信号, 水下通信链路距离为 46 m<sup>[56,61]</sup>。使用 LED 的链路接收端结果如图 4 所示, 接收到的 PPM 信号单个脉冲光子数不足 100 个<sup>[61]</sup>。除了在 UWOC 中使用, SiPM 在水下三维测深等 LiDAR 应用中同样具有潜力。光电技术研究所分析了在三维测深中使用 SiPM 的优势, 并根据其电子特性与应用需求设计了高速、高带宽的前置放大电路<sup>[62]</sup>。

以上两种探测器利用时空信息的转化在水下光学应用中表现出了优良的性能。条纹管把根据距离信息获取的时间信息利用偏转的方式重新还原为空间信息, 避免了对时间的直接测量, 提高了探测的分辨率。SiPM 通过检测信号的空间分布弥补单个 SPAD 器件不良的时间特性, 在保持高灵敏度的同时也有利于空间对准。

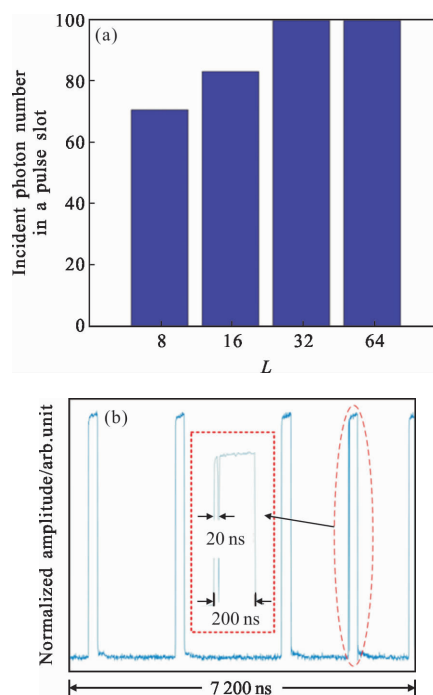


图 4 (a)不同  $L$  时, 收到每个  $L$ -PPM 脉冲时隙中包含入射光子数直方图; (b) 捕获到的 PPM 脉冲时隙信号  
Fig.4 (a) Histogram of incident photon number in each pulse slot for different  $L$ -PPM with different  $L$ ; (b) captured PPM pulse slots

## 4 展望

现代社会人们对海洋的认识愈发深入,对探索海洋的需求也越迫切。水下光学系统不仅受到吸收与散射的强烈作用,而且湍流、波浪等环境因素限制了系统的稳定性与适应能力。从早期的水体光学参数测量实验,到设计复杂的水下光学系统并使其成功下水工作,收发器件与信号处理技术的发展起到了巨大的作用。利用时空特性的先验信息,合理地选择收发器件配置以及信号处理算法对提高水下光学系统的信噪比有重要意义。基于时域或空间域的方法在 UWOC 与 LiDAR 系统中已经充分地展现了它们应对散射干扰、不良时间响应等挑战的优势与潜力,对于其他类型的水下光学系统也有重要的参考价值。虽然不同水下光学系统有不同的功能目的与器件结构,但信道始终是各种类型系统的不可分割的重要组成部分。研究光在水中传输的时空特性在今后水下光学系统开发中将依然占据着重要的地位。当前对于如何应对湍流的研究还比较有限,在已有方法的基础上如何进一步增强系统在湍流环境下的稳定性非常必要。此外,基于时域与频域的联系,目前已有研究从频域出发优化系统,能否将时-频-空互相结合是非常有趣的研究方向。

### 参考文献:

- [1] Churnside J H. Review of profiling oceanographic lidar[J]. *Optical Engineering*, 2013, 53(5): 051405.
- [2] Xu J. Underwater wireless optical communication: why, what, and how?[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(10): 100007.
- [3] Qu F, Wang Z, Yang L, et al. A journey toward modeling and resolving doppler in underwater acoustic communications [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(2): 49-55.
- [4] Liu D, Xu P, Zhou Y, et al. Lidar remote sensing of seawater optical properties: experiment and monte carlo simulation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(11): 9489-9498.
- [5] Abualhin K. Mapping of underwater seabed morphology of the gaza strip coastal zone using remote sensing technique [J]. *Earth Sciences Research Journal*, 2016, 20(2): 1-7.
- [6] Kerfoot W C, Hobmeier M M, Green S A, et al. Coastal ecosystem investigations with LiDAR (Light Detection and Ranging) and bottom reflectance: lake superior reef threatened by migrating tailings [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(9): 1076.
- [7] Su D, Yang F, Ma Y, et al. Classification of coral reefs in the south china sea by combining Airborne LiDAR bathymetry bottom waveforms and bathymetric features [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 57(2): 815-828.
- [8] Alem N, Pellen F, Le Jeune B. New microwave modulation LIDAR scheme for naval mine detection[C]//Electro-Optical Remote Sensing XI. International Society for Optics and Photonics, 2017: 1043403.
- [9] Filisetti A, Marouchos A, Martini A, et al. Developments and applications of underwater LiDAR systems in support of ocean science [C]//OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston. IEEE, 2018: 1-10.
- [10] Liu Bingyi, Li Ruiqi, Yang Qian, et al. Estimation of global detection depth of spaceborne oceanographic lidar in blue-green spectral region [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 128-133. (in Chinese)
- [11] Ottaviani M, Foster R, Gilerson A, et al. Airborne and shipborne polarimetric measurements over open ocean and coastal waters: intercomparisons and implications for spaceborne observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 206: 375-390.
- [12] Zeng Z, Fu S, Zhang H, et al. A survey of underwater optical wireless communications [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 19(1): 204-238.
- [13] Wang J, Lu C, Li S, 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.
- [14] Hong X, Fei C, Zhang G, 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.
- [15] Liu X, Yi S, Zhou X, 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.
- [16] Strand M P. Imaging model for underwater range-gated imaging systems [C]//Underwater Imaging, Photography, and Visibility. International Society for Optics and Photonics, 1991: 151-160.
- [17] Ooi B S, Sun X, Alkhazragi O, et al. Visible diode lasers

- for high bitrate underwater wireless optical communications [C]//Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2019: M3I. 1.
- [18] 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.
- [19] Massot-Campos M, Oliver-Codina G. Optical sensors and methods for underwater 3D reconstruction[J]. *Sensors*, 2015, 15(12): 31525–31557.
- [20] Song Hong, Zhang Yunfei, Wu Chaopeng, et al. Calibration method of underwater phase laser ranging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0406008. (in Chinese)
- [21] Mullen L J, Contarino V M. Hybrid lidar-radar: seeing through the scatter [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2000, 1(3): 42–48.
- [22] Zha B-T, Yuan H-I, Tan Y-Y. Ranging precision for underwater laser proximity pulsed laser target detection [J]. *Optics Communications*, 2019, 431: 81–87.
- [23] Cao Fengmei, Jin Weiqi, Huang Youwei, et al. Review of underwater opto-electrical imaging technology and equipment (I) –Underwater laser range-gated Imaging technology [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(2): 63–69. (in Chinese)
- [24] McLean E, Burris H, Strand M. Short-pulse range-gated optical imaging in turbid water[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(21): 4343–4351.
- [25] He D-M, Seet G G. Divergent-beam lidar imaging in turbid water [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 41(1): 217–231.
- [26] Busck J. Underwater 3-D optical imaging with a gated viewing laser radar [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(11): 116001.
- [27] Wang Yinfei, Zhang Xiaohui, Zhong Wei, et al. Contrast Signal-to-noise model of underwater full range-gated imaging radar based on high-repetition-rate pulse laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7):21–28.(in Chinese)
- [28] Jin D, Ji C, Chu X, et al. Simulation analysis of signal-to-noise ratio of the underwater range gating imaging system [C]//Fifth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Application. International Society for Optics and Photonics, 2019: 1102357.
- [29] Zhuang B, Li C, Wu N, et al. First demonstration of 400 Mb/s PAM4 signal transmission over 10-meter underwater channel using a blue LED and a digital linear pre-equalizer [C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). IEEE, 2017: 1–2.
- [30] Li J, Huang Z, Liu X, et al. Hybrid time-frequency domain equalization for LED nonlinearity mitigation in OFDM-based VLC systems[J]. *Optics Express*, 2015, 23(1): 611–619.
- [31] Li X, Chen H, Li S, et al. Volterra-based nonlinear equalization for nonlinearity mitigation in organic VLC[C]//2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). IEEE, 2017: 616–621.
- [32] Fei C, Hong X, Zhang G, 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.
- [33] Moore K D, Jaffe J S, Ochoa B L. Development of a new underwater bathymetric laser imaging system: L-bath [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, 17(8): 1106–1117.
- [34] Jantzi A, Rumbaugh L, Jemison W. Spatial coherence filtering for scatter rejection in underwater laser systems[C]//Ocean Sensing and Monitoring XI. International Society for Optics and Photonics, 2019: 1101406.
- [35] Tang S, Dong Y, Zhang X. On link misalignment for underwater wireless optical communications [J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 10(16): 1688–1690.
- [36] Kong M, Sun B, Sarwar R, et al. Underwater wireless optical communication using a lens-free solar panel receiver [J]. *Optics Communications*, 2018, 426: 94–98.
- [37] Kong M, Lin J, 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.
- [38] 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.
- [39] Al-Rubaiai M, Tan X. Design and development of an LED-based optical communication system with active alignment control[C]//2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2016: 160–165.
- [40] Cai C, Zhao Y, Zhang J, et al. Experimental demonstration of an underwater wireless optical link employing orbital angular momentum (OAM) modes with fast auto-alignment system[C]//Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2019: M3I. 4.
- [41] Brandl P, Schidl S, Polzer A, et al. Optical wireless communication with adaptive focus and MEMS-based beam

- steering [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(15): 1428–1431.
- [42] Duan X, Song D, Zou J. Steering Co-centered and Co-directional optical and acoustic beams with a water-immersible MEMS scanning mirror for underwater ranging and communication [C]//2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2019: 6582–6587.
- [43] Zhang H, Dong Y, Hui L. On capacity of downlink underwater wireless optical MIMO systems with random sea surface [J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(12): 2166–2169.
- [44] Jamali M V, Salehi J A, Akhondi F. Performance studies of underwater wireless optical communication systems with spatial diversity: MIMO scheme [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 65(3): 1176–1192.
- [45] 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.
- [46] Song Y, Lu W, Sun B, et al. Experimental demonstration of MIMO-OFDM underwater wireless optical communication [J]. *Optics Communications*, 2017, 403: 205–210.
- [47] Chen X, Lyu W, Yu C, et al. Diversity-reception UWOC system using solar panel array and maximum ratio combining [J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 34284–34297.
- [48] Nevis A J, Hilton R J, Taylor Jr J S, et al. Advantages of three-dimensional electro-optic imaging sensors [C]//Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VIII. International Society for Optics and Photonics, 2003: 225–237.
- [49] Sun Jianfeng, Gao Jian, Wei Jingsong, et al. Research development of under-water detection imaging based on streak tube imaging lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 811–814. (in Chinese)
- [50] McLean J W. High-resolution 3D underwater imaging [C]//Airborne and in-Water Underwater Imaging. International Society for Optics and Photonics, 1999: 10–19.
- [51] Gleckler A D. Multiple-slit streak tube imaging lidar (MS-STIL) applications [C]//Laser Radar Technology and Applications V. International Society for Optics and Photonics, 2000: 266–278.
- [52] Ge Mingda, Sun Jianfeng, Wang Tianjiao, et al. Denoising methods for streak tube imaging lidar range imagebased on contrast-modulation method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1448–1452. (in Chinese)
- [53] Cui Z, Tian Z, Zhang Y, et al. Research on the underwater target imaging based on the streak tube laser lidar [C]//Young Scientists Forum 2017. International Society for Optics and Photonics, 2018: 107103G.
- [54] Hui D, Tian J, Lu Y, et al. Streak tube with large work area and small size used in lidar detection system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 318–324. (in Chinese)
- [55] 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.
- [56] Shen J, Wang J, 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.
- [57] Kong M, Chen Y, 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.
- [58] Hamza T, Khalighi M-A, Bourennane S, et al. On the suitability of employing silicon photomultipliers for underwater wireless optical communication links [C]//2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP). IEEE, 2016: 1–5.
- [59] Khalighi M-A, Hamza T, Bourennane S, et al. Underwater wireless optical communications using silicon photomultipliers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(4): 1–10.
- [60] Léon P, Roland F, Brignone L, et al. A new underwater optical modem based on highly sensitive Silicon Photomultipliers[C]//OCEANS 2017–Aberdeen. IEEE, 2017: 1–6.
- [61] Shen J, Wang J, Yu C, 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.
- [62] Nie Ruijie, Xu Zhiyong, Zhang Qiheng, et al. Model of electrical characteristics of SiPM array and optimization of front-end design for three-dimensional depth sounder [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(8): 1661–1668. (in Chinese)