

激光与光电子学进展

水下激光通信系统研究进展

曾凤娇^{1,2,3}, 杨康建^{1,2,3}, 晏旭^{1,2,3}, 赵孟孟^{1,2,3}, 杨平^{1,2*}, 文良华^{1,2,3,4**}

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院大学, 北京 100049;

⁴宜宾学院物理与电子工程学院, 四川 宜宾 644600

摘要 由于各国愈发重视海洋安全和领土安全问题, 水下激光通信发挥着越来越重要的作用。在复杂的海洋环境中实现信息高速和安全的传输是水下激光通信亟待研究的课题。梳理了国内外水下激光通信系统的发展历程, 总结了系统的技术优势, 给出了通信原理, 分析了影响系统性能的关键技术。最后指出未来的水下激光通信系统将具有更高的通信速率、更低的误码率、更远的通信距离、更大的容量、更小的功耗和更小的体积等优点, 并从点对点通信发展到组网式通信。

关键词 光通信; 水下激光通信; 通信速率; 误码率; 通信距离

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0300002

Research Progress on Underwater Laser Communication Systems

Zeng Fengjiao^{1,2,3}, Yang Kangjian^{1,2,3}, Yan Xu^{1,2,3}, Zhao Mengmeng^{1,2,3}, Yang Ping^{1,2*},
Wen Lianghua^{1,2,3,4**}

¹Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴School of Physics and Electronic Engineering, Yibin University, Yibin, Sichuan 644600, China

Abstract As all countries pay more and more attention to marine security and territorial issues, underwater laser communication plays a more and more important role. The realization of high-speed transmission and confidentiality of information in a complex marine environment is an urgent subject for underwater laser communication. This paper sorts out the development history of underwater laser communication systems at home and abroad, summarizes their technical advantages, gives their communications principles, analyzes the key technologies influencing the system's performance. Finally, the future underwater laser communication systems will not only possess high communication rate, low bit-error rate, long transmission distance, large capacity, low power consumption, and small size, but also develop from point-to-point communication to network-type communication.

Key words optical communications; underwater laser communication; communication rate; bit error rate; transmission distance

OCIS codes 060.4510; 060.2605

收稿日期: 2020-04-07; 修回日期: 2020-04-08; 录用日期: 2020-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(J19K004)

*E-mail: pingyang2516@163.com; **E-mail: wenlh415@163.com

1 引言

随着时代的发展,开发并利用地球蕴藏的丰富资源已成为世界各国发展经济的重要内容。一方面,海洋占据着地球表面约 71% 的面积,有着极其宝贵的资源,经济效益是海洋探索的重大原因;另一方面,海洋作为国家的边境线,其涉及的领土安全问题也日益凸显。在未来的经济比拼和军备竞赛^[1-3]中,谁充分利用好了海洋,谁就抢占了先机。水下无线通信技术被广泛应用于深海资源勘探^[4]、海底异常情况监测、水下成像^[5]、传感器监测^[6]、海洋战争^[7]、水下自主机器人^[8-9]和空天地海一体化发展^[10]等方面。

水下无线通信技术通常采用射频通信、声波通信及可见光通信。由三者在水下的传输性能^[11-13]可以看出:1)海水具有良好的导电性,依靠电磁波通信的射频信号在海水中传播会产生严重的趋附效应,导致传输距离非常短,且电磁波频率越高,衰减越厉害,穿透的深度也越浅,射频信号传输显然不能很好地满足实际应用的需要;2)相较于射频通信,声波通信的传输距离远且可靠性高,是目前广泛采用的水下通信方式,但其受多径效应和起伏效应等的影响,损耗严重,加之声波通信属于窄带通信,传输速率低,在水中传输有较大时延;3)可见光通信正好可以弥补射频通信传输距离非常短的缺陷,克服声波通信传输速率低和损耗严重等缺点,具有很大的发展潜力。

正是基于可见光通信的独特优势,面对未来大容量、高速率、低时延和抗干扰的水下通信需求,水下可见光通信成为有力军。水下光通信是指利用波长在蓝光与绿光之间的光作为水中传输通信的载体,不使用光纤等传输介质,主要分为水下发光二极管(Light Emitting Diode, LED)通信和水下激光通信:前者属于非相干光,带宽范围窄,要实现高速率就需要较高的调制频率,主要适用于短距离传输^[14-15];后者属于相干光,可实现 GHz 的调制带宽,传输距离较远。总结来看^[16-20],水下激光通信的优势主要表现在几个方面。1)传输速率高。由于激光通信使用高频率的信息传输,速率可从传统声学通信速率的 bit/s 量级增加到 Mbit/s 量级,甚至到 1000 Mbit/s 量级。2)信息容量大。激光通信的光波频率高(蓝光约为 625 THz),比射频的带宽宽 $10^3 \sim 10^5$,有利于大容量链路系统的组建,可满足未

来高清图像信号和多路视频语音的水下传输等需求。目前实验室水下高码率光通信研究一般集中在 GHz 量级左右。3)抗干扰性强。激光通信具有良好的水中电子对抗性,且受海水温度、浓度等的影响不大,通信系统的抗干扰性较强。4)安全保密度高。光波方向性强,束散角非常小。通信信号一旦被截断,接收端就无法捕获信号,用户能及时发现通信链路的中断。此特性使得通信系统的安全性和保密性得到保障。5)水下激光通信具有隐蔽性好等超长波无法比拟的优点,能实现体积小、重量轻和功耗低的通信系统。

在通信系统中,由于海水的散射(包括瑞利散射和米氏散射等)、吸收(包括水分子吸收和无机溶解质吸收等)及损耗等光学特性,激光的波段选择尤为重要。

本文梳理了国内外水下激光通信的发展状况,简要阐述了水下激光通信的原理,分析了几种关键技术,并简要展望了下一步的发展趋势。

2 发展状况

2.1 国外发展状况

1963 年, Duntley^[21]发现,波长为 470~525 nm 的蓝绿激光可以最为有效地降低海水的光波吸收率。这表明在可见光中存在低损耗窗口,其传播损耗仅为其他光波的 1%^[22],能够有效提高激光的传播效率,为水下激光通信提供了可能。1995 年,美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)基于 LED 研究了可见光通信系统,最终完成了距离为 20 m 的 10 Mbit/s 无线信号传输^[23]。但是,此系统是在黑暗清澈的水中进行实验。从 1980 年起,美国分别在大暴雨、海水浑浊等恶劣条件下进行了海上大型蓝绿激光对潜通信实验,结果表明,蓝绿激光通信能正常进行^[24]。2004 年, Tivey 等^[25]提出了图 1 所示的水下无线通信实物,验证了低功耗的廉价设备具有水下光学传输数据的能力,可在小于 5 m 的范围内构建相对简单且低冲击的通信设备。通过 5 m 内的测试发现,虽然理论上蓝光在水下的传输损耗要比红光或红外波长小,但红光在经过微小颗粒和小气泡时产生的散射比蓝光弱得多^[14,26],因此在 5 m 内的短距离数据传输中,红光 LED 的传输可靠性和极限传输距离均优于蓝光。

在 2010 年,WHOI 研究团队开发出了一种与现有声学系统相辅相成的光通信系统,该系统通过光

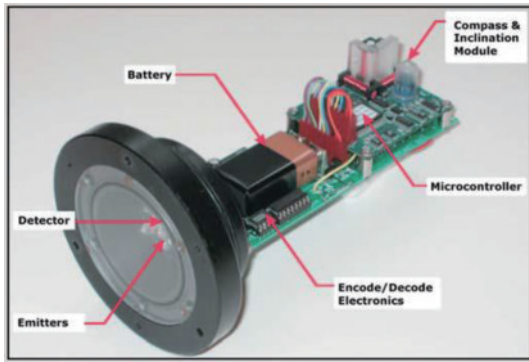


图 1 测试中使用的测试光通信板^[25]

Fig. 1 Test optical communication board used in experiment^[25]

缆从海底释放出无数带有系绳的低功耗接收器^[27],可以在 100 m 范围内实现 10~20 Mbit/s 的数据传输速率^[28];且发射机和接收机的电池电量相对较低,系统性价比高。图 2 为 WHOI 提出的水下无线光通信网。



图 2 WHOI 的水下无线光通信网^[27]

Fig. 2 Undersea optical communication network of WHOI^[27]

近年来,国外在水下激光通信方面的研究成果显著。2015年,日本山梨大学采用 405 nm 波长的激光光源,在 4.8 m 清水中进行实验,最终实现了 9.1×10^{-4} 的误码率和 1.45 Gbit/s 的数据传输速率^[28]。2015年,Campagnaro 等^[29]研究发现,采用的声学 and 光学水下多模式混合网络使得吞吐量在大多数情况下仍能获得较大数值。需要注意的是,此实验分别是在清澈的海域和相对浑浊的沿海海域两种情况下进行的。2015年,Oubei 等^[30]使用 520 nm 的激光光源和开关键控不归零 (On-Off Keying Non-Return-to-Zero, OOK-NRZ) 调制技术率实现了水下 7 m 的高速率激光通信系统,该系统在 2.3 Gbit/s 传输速率下的误码率为 2.23×10^{-4} ,该值远低于前向纠错码的无差错传输阈值。

2016年,美国克莱姆森大学和南加利福尼亚大学先后利用 OOK-OAM 调制技术完成了水下激光通信实验。前者模拟海水环境,通过使用 445 nm 波长的激光二极管光源,完成了高速水下数据无线传输,且当距离为 2.96 m 时,系统的数据传输速率为 3 Gbit/s,误码率仅为 2.073×10^{-4} 。后者使用 1064 nm 激光器生成了 532 倍频激光,在 1.2 m 距离的清水中实现了速率高达 40 Gbit/s 的数据传输^[28]。这两种 OOK-OAM 调制的水下激光通信研究均是在良好的清晰海域中展开的,然而 OOK-OAM 调制对信道特性的变化较为敏感,受制于 1/2 信号幅度的最佳判决门限,系统会随信道特性的变化而产生显著变化。此外,OOK-OAM 调制技术的抗干扰能力欠佳。2016年,Shen 等^[31]提出了一种紧凑的低功耗水下无线光通信系统,该系统基于 450 nm 的 LD 光源,在 80 mA 驱动电流和 51.3 mW 光功率下工作,其在 12 m 通信距离下具有 2 Gbit/s 的数据传输速率并在 20 m 通信距离下具有 1.5 Gbit/s 的数据传输速率,系统误比特率 (Bit Error Rate, BER) 分别为 2.8×10^{-5} 和 3.0×10^{-3} ,很好地实现前向纠错 (Forward Error Correction, FEC)。2017年3月,美国发布了“模块化光学通信”(OCOMMS) 载荷项目计划^[32],预期通信速率 >1 kbit/s,工作深度为 30~75 m,这无疑是在加紧水下激光通信的研究步伐。未来,水下激光通信将成为军事技术的有力后备力量。

2.2 国内发展状况

美国在 20 世纪 90 年代中期就基本完成了水下蓝绿激光通信关键性技术的论证^[33],国内在水下激光通信方面的研究始于 1960 年。中国科学院西安光学精密机械研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所和清华大学等单位进行了大量研究^[34]。1990年,国内针对机载激光对潜通信^[35],正式开展了大气和海水的激光通信研究。1999年,华中科技大学在南海开展了机载蓝绿激光对潜通信实验,论证了 150 m 水下激光通信的可行性^[36]。2002年,何宁等^[37]考虑到海水对光的散射效应会引起传输延迟,提出在通信系统中采用多路分集接收和自适应滤波,并分别在三个不同的海区进行实验,结果证明该方式可实现 50 m 海深通信。2013年,黎静^[17]建立了单光子、光脉冲和载波调制光脉冲的蒙特卡罗仿真算法模型,将载波调制信号输入模型并采用高斯函数调制,得到了三类海水水质参数条件下载波

调制通信距离的上限: 远洋海水 140 m, 近海海水 75 m, 海湾海水 19 m。该研究分析了三类海水水质, 使用的是世界上公认的海水散射相函数的数学模型, 需要考虑偏差因子对研究的影响。2017 年, 温端强^[38]设计并验证了一个基于数字脉冲间隔调制 (Digital Pulse Interval Modulation, DPIM) 技术的水下激光高速通信系统, 该系统成本低、功耗小且实用价值高, 在保证误码率不超出一定范围的前提下, 可实现 1 Mbit/s 的高速率和 50 m 的端到端通信距离。2018 年, Kong 等^[39]在水下无线光通信系统中使用了阵列发射器和接收器, 采用了基于光学叠加的 4 幅度脉冲调制 (PAM-4) 技术。该实验在 2 m 自来水通道上, 分别实现了 6.144 Mbit/s、

8.192 Mbit/s 及 12.288 Mbit/s 的传输速率。2018 年, Li 等^[40]首次采用 680 nm 左右的垂直腔面发射激光器, 在 6 m 传输距离下实现了 5.2 Gbit/s 的高传输速率。2019 年, Hong 等^[41]在水下无线光通信系统中首次采用基于概率整形的 256 正交幅度调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM)-正交频分复用 (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM) 技术进行传输, 实现了 35 m 的水下链路通信, 净数据传输速率达到 12.64 Gbit/s, 并且与广泛使用的比特功率加载方案相比, 该实验的容量提升了 27.8%。图 3 为该实验的系统模型, 其中 UWOC 表示水下无线光通信。

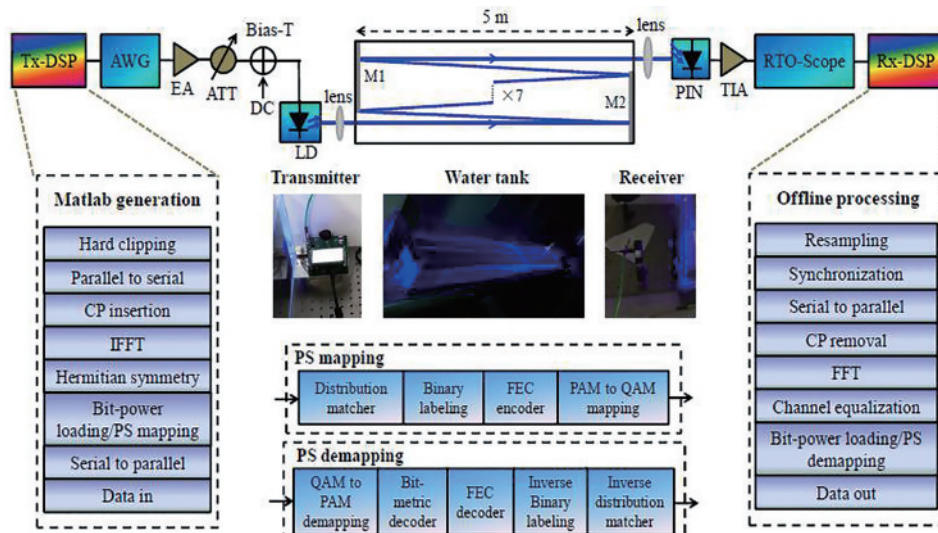


图 3 UWOC 系统的实验搭建

Fig. 3 Experimental setup of UWOC system

2019 年, 徐正元团队在基于 450 nm 激光器的通信系统中, 通过使用非归零开关控 (Non-Return-to-Zero On-Off Keying, NRZ-OOK) 调制和数字非线性均衡技术, 实现了 60 m 的水下传输距离, BER 达到 3.5×10^{-3} , 传输速率达到 2.5 Gbit/s^[42]。该团队又在基于单模 520 nm 光纤激光器的水下通信系统中, 成功实现了 100 m 的自来水通道传输, 传输速率为 500 Mbit/s^[43]。

3 关键技术

水下激光通信系统的模型如图 4 所示, 信源先经过信源编码器按一定的规律进行编码, 然后转换成数字化脉冲电信号, 并经过光学系统被加在激光载波上。激光发射强度随电信号的变化而变化, 并经过海水信道传输到接收端。接收端的光电探测

器等光学系统将检测到的激光信号转为电信号, 并传递给信息处理电路进行解码和解调, 进而恢复原始信号。

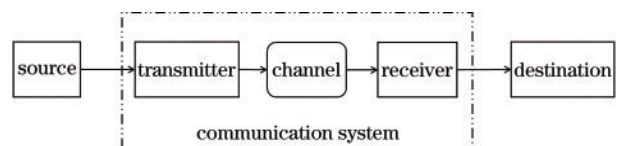


图 4 通信系统模型

Fig. 4 Communication system model

3.1 发送端

发射端输入信息并负责电光信号的转换, 包含调制电路、高稳频激光器、光源驱动电路及发射光学系统等, 使激光光束准直, 减小发散角, 将能量会集到预定方向上, 实现激光信号的稳定可靠发射。

3.1.1 光源

光源的选择会影响接收器件的选择和传输距离等。典型光通信系统的信源大多为半导体 LED 光源和半导体激光二极管(Laser Diode, LD)光源。

LED 光源基于注入有源区的载流子自发辐射复合发光,发光功率与注入电流成正比,具有线性好、成本低、功率高、转换效率高、耗能低及工作寿命长等优点,比 LD 光源具有更低的电阻热效应。从 1995 年 WHOI 的可见光实验开始,LED 光源一直被作为信源使用。2018 年,王培林团队在水下激光通信系统中,设计并演示了一个基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)的实时 25 Mbit/s 双极 NRZ-OOK 调制收发器,其中采用的就是 448 nm 商用蓝光 LED 光源^[44]。但是 LED 光源的功率小(约为 -20 dBm),光谱较宽,发散角大,适用于短距离传输。基于 LED 的 UOWC 系统在纯海水中大多具有 Mbit/s 的数据速率,其中传输距离受辐射角度和光强度分布的限制^[45]。2019 年,王涛等^[46]为了减小水下 LED 通信阵列的发射机出射角,采用基于全内反射(Total Internal Reflection, TIR)透镜的二次配光方法,进行了水下通信测试。测试结果表明,与不采用 TIR 透镜相比,传输距离提升了 9.3 m。为了实现更长的传输距离和更高的数据速率,基于激光二极管的 UOWC 系统得到广泛研究。

LD 光源基于光的受激自辐射,具有毫瓦量级的发光功率和较好的准直性能,谱线宽度窄,可实现 GHz 的调制,适用于长距离传输。2013 年, Watson 等^[47]使用 422 nm 的 LD 光源进行了可见光通信,在采用晶体管外壳(Transistor Outline, TO)封装设备的情况下,调制带宽高达 1.4 GHz,以高达 2.5 Gbit/s 的数据传输速率实现了无错误的数据传输。2018 年, Liu 等^[48]利用红、绿、蓝三色 LD 光源,研究了波分复用(WDM)的高速水下无线光通信和高效水下固态照明,实现了 9.7 Gbit/s 的高速水下通信,并根据特定距离调整了照明参数。但 LD 光源的缺点在于成本相对较高,寿命较短,对温度的依赖大。在一些基于 LD 光源的 UWOC 应用中,会使用光扩散器来降低系统指向要求。也有学者研究了基于混合 LD 和 LED 光源的 UWOC 系统,其中 LED 光源用于粗对准,而 LD 光源用于高精度定位,以减小光学对准的难度^[49]。

3.1.2 调制技术

要取得好的传输质量,除了需要依据光学特性对光源器件进行选型外,还应当考虑其调制性能。目前,光通信系统多是采用强度调制/直接检测(Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD)系统或相干调制方案,常用的调制方式分为 OOK 调制、脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM)、脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)、DPIM、二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制、正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制、QAM 及 OFDM 调制技术^[50]。

由于收发器成本和实现复杂性问题,一般系统采用的是强度调制/直接检测(Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD)调制方案。在 IM/DD 调制方案中,为了对搭载在光载波强度上的源数据进行调制,通过待发送的消息信号或外部调制器来改变光源的驱动电流。Gabriel 等^[51]对比了水下无线通信中的 OOK 调制、PPM、DPIM 和其他的 IM/DD 等调制方式,发现无论是在基于光电二极管的 UWOC 系统还是在基于雪崩二极管的 UWOC 系统中,8 阶 PPM 方式均取得了最优的通信距离,分别为 32 m 和 57 m,且 PPM 方式可以降低激光器的平均发射功率。

将 OOK 调制、PPM、PWM 和 DPIM 几种 IM/DD 调制方式进行对比,可以看到^[33, 52-53]: 1)OOK 调制方式操作最简单,技术成熟,占用带宽小,具有较高的调制速率,但能量效率和频谱效率较低,需要加入基于信道衰落估计的动态阈值(DT)技术以实现最佳检测; 2)PPM 的能效高于 OOK,且不需加入 DT,但牺牲了带宽利用率,解调器更复杂,并要求严格的时序同步; 3)PWM 与 PPM 的作用机制相似,即都需要时隙和符号同步,有较高的能效和较强的抗符号间干扰能力,但平均功率大; 4)DPIM 的能效高于 PPM 和 PWM,不需要符号同步,符号长度可变,效率更高,但解调器变得更复杂,误差扩散的影响显著。IM/DD 调制方案只需要确定功率存在与否,不需要相位信息。而相干调制方案会对光载波的振幅、偏振或相位信息进行编码。由于其工作原理是将信号电平提高到电路的噪声电平,相干解调方案的灵敏度会高于 IM/DD。Cochenour 等^[54]在混浊水下无线光链路通信中对 BPSK 调制、QPSK 调制和 QAM 三种相干调制方式

进行了研究,评估了在不同浑浊度水域里不同相干调制方法的链路性能。Alipour等^[55]对非归零-差分相移键控(NRZ-Differential Phase Shift Keying, NRZ-DPSK)和归零-差分相移键控(RZ-DPSK)进行了仿真分析,在不同水质下,两种调制方式下的系统具有相同性能表现,但NRZ-DPSK更适用于高速率、远距离的UWOC系统。相干解调会使系统受益于更高的频谱效率和更好的背景噪声抑制性能,但系统的复杂度和成本也相应增大^[56];系统发射端会始终传输符号“1”和“0”,消耗的功率较大。相干解调未被广泛应用于UWOC系统中。

3.2 接收端

UWOC系统的接收端由光学接收系统、滤波器和光电探测器等^[37]构成,利用激光载波解调信号,并将其经放大器(按需)送入判决电路进行判决再生,具有宽视场、高增益和高信噪比(SNR)等优点。接收端的视场或接收角应当足够大以捕获到下行链路光束中的大部分能量。

3.2.1 光电探测器

光电探测器负责光电转换,影响着系统的灵敏

度,通常有P-I-N型光电二极管(Positive-Intrinsic-Negative Photodiode, PIN-PD)、雪崩二极管(Avalanche Photodiode, APD)和光电倍增管(PMT)。PIN-PD与APD都是基于半导体PN结的光电效应:前者的结构设计可以减小结区电容,提高响应度;后者因雪崩效应而会产生内部增益。2016年,Wang等^[57]设计了一种长距离水下可见光通信系统,使用单光子雪崩二极管来提高检测灵敏度,并提出了基于单光子雪崩二极管的检测算法。其仿真结果表明,在纯海水环境中,通信距离可扩展至500 m。2018年,李超团队在研究可变背景光对基于APD的OWC系统性能的影响时,发现随着背景光功率的增加,APD的散粒噪声可忽略不计,但带宽的减小和系统增益的衰减会导致信噪比的降低^[58]。APD需要较高的反向电路电压,会增加电路设计的困难,因此在光通信系统里接收端较多采用PIN-PD。另外,虽然PMT是灵敏度极高且响应快的探测器件,但它的工作电路复杂,抗震性差。总结了PIN-PD、APD和PMT的优缺点及使用场景,如表1所示。

表1 PIN、APD和PMT的对比
Table 1 Comparison among PIN, APD and PMT

Detector	Advantage	Disadvantage	Scene for use
PIN-PD	Fast response speed, lower cost, good resistance to ambient light and unity gain	Thermal noise and difficult trade-off between response speed and quantum efficiency	Short-wavelength scene
APD	Long response time, higher internal gain than that of PIN-PD, and high quantum efficiency	High bias voltage, complex control circuit, sensitivity to environmental noise, and shot noise limitation	Long-wave receivers, long-distance transmission and high-rate systems
PMT	High sensitivity, high frequency response, high gain, low noise and large collection area	Large size, large power consumption, bad overexposure tolerance, vulnerability in shock and vibration, and high cost	Static link

3.2.2 信道均衡

在长距离的高速水下激光通信中,由于海水强大的吸收和散射过程,激光脉冲随着通信距离的增加和水清晰度的降低而出现拉伸效应^[59]。由于最大通信带宽受到激光脉冲拉伸效应的影响,改善通信速率会增加符号间的干扰(ISI)。因此,为了消除符号间的干扰,在接收端信号判决前加上均衡器。信道均衡也分时分域均衡和频域均衡。根据均衡准则,常用的均衡器有迫零检测(Zero Forcing, ZF)、最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)和最小二乘(LS)等^[60]。Hu等^[61]使用维特比(Viterbi)均衡来估计最大似然接受序列,选择最小误差路径

来减小符号间的干扰,仿真结果证明,维特比均衡(Viterbi Equalization, VE)是高速长距离水下激光通信系统的有力选择。Fei等^[62]在450 nm的水下激光通信系统里采用了后非线性均衡技术,其是简化的Volterra均衡器,减小了UWOC系统的非线性损伤,与线性均衡技术相比,系统的信噪比提升了约2 dB。对于快速变化的信道来说,在接收端采用合适的均衡器仍是较大的挑战。

3.3 水下信道

3.3.1 海水特性

海水是一个特别复杂且不稳定的系统。海水中的悬浮粒子、溶解物质、海洋生物物质^[63]及湍流

引起的激光束失调^[64]等都会影响激光在水中的传输特性。这里主要考虑海水衰减、散射效应和吸收效应。目前,实验仿真常采用 Beer-Lambert 定律、辐射传递方程和蒙特卡罗模拟方法等进行海水特性分析^[65-66]。其中,蒙特卡罗方法作为一种基于计算机模拟真实实验的统计方法,能通过初始条件、光子传播和光子接收等^[67]对水下传输进行模拟,针对水下光场的特殊问题较好地估计时延特性。2013年, Gabriel 等^[68]使用蒙特卡罗法模拟了光子在水中从发射器向接收器传播的轨迹,并研究了 UWOC 系统的信道表征。该实验针对不同的水类型、链路距离和发射机/接收机特性,对信道的时延色散进行了量化,结果表明,对应于沿海、干净海水和纯海水,传输距离分别为 27, 46, 100 m。2019年, Han 等^[69]在使用电光晶体进行间接调制以生成水下信号的实验中,采用蒙特卡罗法进行研究,分析了晶体的平坦度对调制信号的消光比和系统性能的影响。

在 UWOC 系统中,链路性能的湍流效应研究也是较大的挑战,不少学者对系统建模与仿真进行了大量工作。Vali 等^[70]分析了传输链路的跨度、发射高斯光束的发散角、接收器的孔径和视场(FOV)四个因素对湍流条件下水下可见光通信链路的影响。Fu 等^[71]研究了中强度湍流下平均孔径对 UWOC 系统平均误码率的影响。Yi 等^[72]研究了弱湍流条件下水下激光通信系统的性能,指出大口径接收器可显著减弱闪烁效应,从而显著提升系统性能,且球形波的改善效果优于平面波。

3.3.2 信道编码

由于海水具有严重的散射效应和吸收效应,传输的光信号会显著衰减,这会直接影响系统的误码率,进而大大降低系统的通信性能。因此,为了减少水下衰减并在较低信噪比下仍保持较低的误码率,里所码(Reed-Solomon Codes, RS 码)、并行级联卷积码(PCCC, 又称 Turbo 码)和低密度奇偶校验码(Low-Density Parity Check Codes, LDPC 码)等前向纠错码(Forward Error Correction, FEC 码)信道编码技术被应用于水下激光通信系统中,以牺牲部分效率带宽为代价来提高信息传输的可靠性、链路范围和功率利用率。

RS 码是一种多进制线性循环纠错码(BCH 码),属于代数几何码,具有很强的纠错能力。Turbo 码是研究者在 1993 年首次提出的一种级联

码,巧妙地结合了卷积码和随机交织器,实现了随机编码思想,逼近了香农极限,纠错能力卓越,且译码的复杂度不高。然而,这两种编码方式的不足之处在于时延大。1996年,由于计算机的高速发展,LDPC 码重新获得了人们的关注。LDPC 码也能够逼近香农极限,复杂度低,具有高译码能力和灵活的译码方式。李海燕等^[73]通过仿真实验,证明了激光对潜通信系统基本都能正常工作,且在 PPM 下观察了 RS 码、Turbo 码和 LDPC 码的性能。较之 RS 码和 Turbo 码,LDPC 码凭借着更成体系的优化方法、更强的纠错能力和更低的时延,逐渐被更多的研究人员采用。如在水下激光通信系统中,研究者将 LDPC 码和 PPM 进行联合应用^[74-75],探讨了不同参数下光通信系统的性能。

4 结束语

水下激光通信使得水下无缆机器人、潜艇和水下机器人等能进行信息交互,被广泛应用于水下环境监测、水质分析和水下距离测量等。未来对水下激光通信的需求应当是高速率、低时延、大容量、高保密和强抗干扰等。然而,要实现这样的通信系统,就需要对存在的问题加以改善。

UWOC 系统会从点对点通信发展到组网式通信。无论是点对点通信还是组网式通信,UWOC 系统都需考虑光束的捕获、对准、跟踪(Acquisition Pointing Tracking, APT)。指向和对准是维持光收发器之间持续可靠的链路的关键。采用智能发射器、接收器等能在一定程度上解决对窄光束的跟踪问题,但在组网式通信里还需进一步考虑中继通信方案,充分利用视距传输(Light Of Sight, LOS)和非视距传输(Non Light Of Sight, NLOS)。此外,在包含水下潜艇间、陆基系统、天基系统和空基系统的组网式通信中,需进一步研究合适且高效的网络协议。目前的研究大多集中在信道调制、建模和编码上,主要集中在物理层面上,未来应当在网络协议方面进行更多探索。

为了设计和实现大容量、可靠和高速的水下激光通信系统,要在硬件设计与制备上进行更多探索。目前大多借助 FPGA 来对数据进行高速信号处理^[76-77]。但对于通信中的大数据业务,FPGA 的浮点支持能力较弱,下一步应在硬件设计上考虑多平台和整个系统的传输机制。此外,应多考虑激光通信的保密性和稳定性在芯片级加密上的应用。

还应考虑海深压力对仪器的影响,完善设计,使仪器具有良好的耐压性。

不断完善模拟方法,增强海水的模拟度。目前国内研究基本上是在清水或清晰海域进行的,为了适应未来复杂海域中的水下激光通信,需要考虑海水中各因子对激光通信的影响。目前的仿真主要是基于蒙特卡罗仿真,需要不断更新物理模型,以更加准确地模拟真实的海洋环境。海洋环境又分深海、近海和海面,针对不同深度的海洋环境搭建不同的仿真模型是非常有必要的。另外,还要考虑光束扩展引起的激光在水下传输的损耗。因此,迫切需要具有合理复杂性的现实模型。

水下激光通信涉及化学、生物和物理等领域,多学科、多领域的交叉研究并结合机器学习等,有利于水下激光通信拓宽发展空间,进而实现实用化。

参 考 文 献

- [1] Hagen P E, Storkersen N, Vestgard K, et al. The HUGIN 1000 autonomous underwater vehicle for military applications[C]//Oceans 2003, September 22-26, 2003, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 2003: 1141-1145.
- [2] Singh H B, Pal R. Submarine communications[J]. Defence Science Journal, 1993, 43(1): 43-51.
- [3] Xu Y H. Development experience and future trend of U. S. Navy's unmanned underwater vehicle[J]. Military Digest, 2018(5): 21-23.
徐依航. 美国海军无人潜航器发展经验及未来趋势[J]. 军事文摘, 2018(5): 21-23.
- [4] Sujit P B, Sousa J, Pereira F L. UAV and AUVs coordination for ocean exploration [C]//Oceans 2009-Europe, May 11-14, 2009, Bremen, Germany. New York: IEEE, 2009: 1-7.
- [5] Xiang W D, Yang P, Wang S, et al. Underwater image enhancement based on red channel weighted compensation and gamma correction model [J]. Opto-Electronic Advances, 2018, 1(10): 180024.
- [6] Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Challenges for efficient communication in underwater acoustic sensor networks[J]. ACM SIGBED Review, 2004, 1(2): 3-8.
- [7] Sui M H. The key technology research on underwater wireless optical communication systems [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
隋美红. 水下光学无线通信系统的关键技术研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [8] Paull L, Huang G Q, Seto M, et al. Communication-constrained multi-AUV cooperative SLAM [C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 26-30, 2015, Seattle, WA, USA. New York: IEEE, 2015: 509-516.
- [9] Kim J, Joe H, Yu S C, et al. Time-delay controller design for position control of autonomous underwater vehicle under disturbances [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 1052-1061.
- [10] Zhang Y F, Li X, Lü W C, et al. Link structure of underwater wireless optical communication and progress on performance optimization [J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(9): 190734.
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.
- [11] Wang Y F, Liu W L, Ding N, et al. Review on underwater wireless optical communication [J]. Instrumentation Technology, 2018(7): 48-51.
王燕飞, 刘文利, 丁楠, 等. 水下无线光通信简介 [J]. 仪表技术, 2018(7): 48-51.
- [12] Chi N, Chen H. Progress and prospect of high-speed visible light communication [J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(3): 190687.
迟楠, 陈慧. 高速可见光通信的前沿研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(3): 190687.
- [13] Ghassemlooy Z, Uysal M, Khalighi M A, et al. An overview of optical wireless communications [M]//Uysal M, Capsoni C, Ghassemlooy Z, et al. Optical Wireless Communications. Cham: Springer, 2016: 1-23.
- [14] He L P. The research and application of technology on underwater wireless redundant communication [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
何丽萍. 水下非接触式信号双向冗余传输技术研究及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [15] Chi N, Wang C F, Li W P, et al. Research progress of underwater visible light communication technology based on blue/green LED [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2019, 58(5): 537-548.
迟楠, 王超凡, 李韦萍, 等. 基于蓝绿光 LED 的水下可见光通信技术研究进展[J]. 复旦学报(自然科学版), 2019, 58(5): 537-548.
- [16] Hanson F, Radic S. High bandwidth underwater

- optical communication[J]. Applied Optics, 2008, 47(2): 277-283.
- [17] Li J. Research on modulated-carrier underwater wireless laser communications based on analytic Monte Carlo methods [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. 黎静. 基于解析蒙特卡洛方法的载波调制水下激光通信研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [18] Wu J. Research and implementation of underwater wireless optical communication system [D]. Xiamen: Xiamen University, 2014. 吴健. 水下无线光通信系统的研究和实现[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.
- [19] Xu J. Underwater wireless optical communication: why, what, and how? [J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(10): 100007.
- [20] Ma C B, Wang Y H, Ao J, et al. Research and implementation of underwater short-distance high-speed laser communication system [J]. Optical Communication Technology, 2016, 40(4): 52-55. 马春波, 王永辉, 敖珺, 等. 水下短距离高速激光通信系统的研究与实现[J]. 光通信技术, 2016, 40(4): 52-55.
- [21] Duntley S Q. Light in the sea [J]. Journal of the Optical Society of America, 1963, 53(2): 214-233.
- [22] Shimura S, Ichimura S E. Selective transmission of light in the ocean waters and its relation to phytoplankton photosynthesis [J]. Journal of Oceanography, 1973, 29(6): 257-266.
- [23] Bales J W. High bandwidth low power short-range optical communication in underwater [J]. Proceedings of Unmanned Unthethered Submersible Technology, 1995, 9:406-415.
- [24] Wiener T, Karp S. The role of blue/green laser systems in strategic submarine communications [J]. IEEE Transactions on Communications, 1980, 28(9): 1602-1607.
- [25] Tivey M, Fucile P, Sichel E. A low power, low cost, underwater optical communication system [J]. Ridge 2000 Events, 2004, 2(1): 1-32.
- [26] Xu Q Y. Blue-green lidar ocean survey [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 徐啟阳. 蓝绿激光雷达海洋探测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [27] MediaPhotonics. Undersea optical communication [EB/OL]. (2010-02-26) [2020-04-01]. <https://www.photonics.com/Article.aspx? AID=41211>.
- [28] Shen P, Yang L, Chen Y S. Characteristics and development status of underwater laser communication technology [J]. China Plant Engineering, 2018(4): 214-215. 沈鹏, 杨磊, 陈云赛. 水下激光通信技术的特点及发展现状[J]. 中国设备工程, 2018(4): 214-215.
- [29] Campagnaro F, Favaro F, Guerra F, et al. Simulation of multimodal optical and acoustic communications in underwater networks [C]// OCEANS 2015, May 18-21, 2015, Genoa, Italy. New York: IEEE, 2015: 15473725.
- [30] Oubei H M, Li C P, Park K H, et al. 2.3 Gbit/s underwater wireless optical communications using directly modulated 520 nm laser diode [J]. Optics Express, 2015, 23(16): 20743-20748.
- [31] 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.
- [32] Yang K, Du D. Research on the development of foreign submarine communication technology [J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(2): 153-157. 杨坤, 杜度. 国外对潜通信技术发展研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(2): 153-157.
- [33] Li H S, Yue J, Jin J C, et al. Review of the underwater communication technology using blue-green laser [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2015, 36(5): 16-22. 李宏升, 岳军, 金久才, 等. 蓝绿激光水下通信技术综述[J]. 遥测遥控, 2015, 36(5): 16-22.
- [34] Zhang J, Cai W Y, Wen D Q. Research on technology of underwater high speed laser communication system and networking [J]. Application of Electronic Technique, 2017, 43(9): 53-56, 60. 张军, 蔡文郁, 温端强. 水下高速激光通信系统及组网技术研究[J]. 电子技术应用, 2017, 43(9): 53-56, 60.
- [35] Hu X. Simulation and experimental study on underwater transmission characteristics of blue-green laser [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016. 胡鑫. 蓝绿激光水下传输特性仿真及实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [36] Ye W. Research on blue green laser underwater communication technology [J]. Telecom World, 2018(1): 1-2. 叶叻. 蓝绿激光水下通信技术研究[J]. 通讯世界, 2018(1): 1-2.

- [37] He N, Li H L, Zhang D K, et al. The multiple diversity reception of signal under water in laser communication[J]. *Laser & Infrared*, 2002, 32(4): 228-229.
何宁, 李海玲, 张德琨, 等. 水下激光通信中信号的分集接收[J]. *激光与红外*, 2002, 32(4): 228-229.
- [38] Wen D Q. Research of underwater high speed blue-green laser communication system and networking technology [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2017.
温端强. 水下高速蓝绿激光通信系统及组网技术研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2017.
- [39] 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.
- [40] Li C, Tsai W. A UWOC system based on a 6 m/5.2 Gbps 680 nm vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Laser Physics*, 2018, 28(2): 025202.
- [41] Hong X J, Fei C, Zhang G W, et al. Probabilistically shaped 256-QAM-OFDM transmission in underwater wireless optical communication system [C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 3-7, 2019, San Diego, California, USA. New York: IEEE, 2019: 18618779.
- [42] Lu C H, Wang J M, Li S B, et al. 60 m/2.5 Gbps underwater optical wireless communication with NRZ-OOK modulation and digital nonlinear equalization [C]//CLEO: Science and Innovations 2019, May 5-10, 2019, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2019: SM2G.6.
- [43] 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.
- [44] Wang P L, Li C, Xu Z Y. A cost-efficient real-time 25 Mb/s system for LED-UOWC: design, channel coding, FPGA implementation, and characterization [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(13): 2627-2637.
- [45] 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.
- [46] Wang T, Han B, Shi K, et al. Underwater LED communication based on secondary light distribution with total internal reflection lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0806001.
王涛, 韩彪, 史魁, 等. 基于全内反射透镜二次配光的水下 LED 通信研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0806001.
- [47] Watson S, Tan M M, Najda S P, et al. Visible light communications using a directly modulated 422 nm GaN laser diode [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(19): 3792-3794.
- [48] Liu X Y, Yi S Y, Zhou X L, et al. Laser-based white-light source for high-speed underwater wireless optical communication and high-efficiency underwater solid-state lighting [J]. *Optics Express*, 2018, 26(15): 19259-19274.
- [49] 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.
- [50] Kong M W. Design and experimental study of underwater wireless optical communication systems [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
孔美巍. 水下无线光通信系统的设计与实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [51] Gabriel C, Khalighi M A, Bourennane S, et al. Investigation of suitable modulation techniques for underwater wireless optical communication [C]//2012 International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW), October 22-22, 2012, Pisa, Italy. New York: IEEE, 2012: 13116994.
- [52] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication [J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 1518-1547.
- [53] Fan Y Y, Green R J. Comparison of pulse position modulation and pulse width modulation for application in optical communications [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(6): 065001.
- [54] Cochenour B, Mullen L, Laux A. Phase coherent digital communications for wireless optical links in turbid underwater environments [C]//Oceans 2007, September 29 - October 4, 2007, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE, 2007: 9854052.
- [55] Alipour A, Mir A. On the performance of blue-green waves propagation through underwater optical wireless communication system [J]. *Photonic Network Communications*, 2018, 36(3): 309-315.
- [56] Khalighi M A, Murat. Survey on free space optical communication: a communication theory perspective [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(4): 2231-2258.

- [57] 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): 1-11.
- [58] Chen D M, Li C, Xu Z Y, et al. Experimental characterization of variable background light to APD-based OWC system performance [C]//2018 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), July 29 - August 3, 2018, Hong Kong, China. New York: IEEE, 2018: 18635017.
- [59] Wang F, Yang Y, Duan Z L, et al. Characteristic analysis of underwater laser signal transmission channel based on visible light [J]. *Optical Communication Technology*, 2016, 40(3): 26-28.
王菲, 杨祎, 段作梁, 等. 基于可见光的水下激光传输信道的特性分析[J]. *光通信技术*, 2016, 40(3): 26-28.
- [60] Tse D, Viswanath P. *Fundamentals of wireless communication* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [61] Hu S Q, Mi L, Zhou T, et al. Viterbi equalization for long-distance, high-speed underwater laser communication [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(7): 076101.
- [62] Fei C, Hong X, 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.
- [63] 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.
- [64] Li C, Lu H, Huang Y C, et al. 50 Gb/s PAM4 underwater wireless optical communication systems across the water-air-water interface [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(10): 100004.
- [65] Guan Y J, He F T, Yang Y, et al. Channel characteristics analysis of ocean underwater laser communication based on Monte Carlo [J]. *Optical Communication Technology*, 2016, 40(12): 52-54.
关云静, 贺锋涛, 杨祎, 等. 基于蒙特卡洛海洋水下激光通信信道特性分析[J]. *光通信技术*, 2016, 40(12): 52-54.
- [66] Zhou L J, Zhou D, Zeng W B. Simulation analysis of undersea wireless optical communication system based on flat-topped beam [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 070603.
周龙杰, 周东, 曾文兵. 基于平顶光束的水下无线光通信系统的仿真分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 070603.
- [67] Li T S, Yang R K, Huang Y H, et al. Simulation and analysis of time delay characteristics of underwater laser pulse [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 110102.
李天松, 阳荣凯, 黄艳虎, 等. 水下激光脉冲时延特性的仿真分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(11): 110102.
- [68] Gabriel C, Khalighi M A, Bourennane S, et al. Monte-Carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(1): 1-12.
- [69] Han B, Wang W, Zheng Y Q, et al. Influence of electro-optical crystal flatness on indirect modulation signal for underwater blue-green laser communication [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11068: 1106823.
- [70] Vali Z, Gholami A, Ghassemlooy Z, et al. System parameters effect on the turbulent underwater optical wireless communications link [J]. *Optik*, 2019, 198: 163153.
- [71] Fu Y Q, Huang C T, Du Y Z. Effect of aperture averaging on mean bit error rate for UWOC system over moderate to strong oceanic turbulence [J]. *Optics Communications*, 2019, 451: 6-12.
- [72] 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.
- [73] Li H Y, He Y J, Ren J C. Research on error-correcting code performance in laser communication with submarine simulative system [J]. *Optical Communication Technology*, 2010, 34(11): 49-51.
李海燕, 何友金, 任建存. 激光对潜通信仿真系统中纠错码性能研究[J]. *光通信技术*, 2010, 34(11): 49-51.
- [74] Mi L, Hu S Q, Zhou T H, et al. Long distance underwater laser communication system based on low-density parity check codes and pulse-position modulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(10): 1006002.
米乐, 胡思奇, 周田华, 等. 基于低密度奇偶校验码和脉冲位置调制的水下长距离光通信系统设计[J]. *中国激光*, 2018, 45(10): 1006002.
- [75] 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.

- [76] Shang Y W. Research on underwater real-time wireless communication technology based on blue-green laser[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecom, 2019.

尚雅文. 基于蓝绿激光的水下实时无线通信技术研

究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.

- [77] Chen Q H, Kong X Y, Liu C Y. An encrypted communication device of underwater blue-green laser based on FPGA [J]. Computer and Modernization, 2017(2): 53-56.

陈青华, 孔祥祎, 刘崇屹. 基于FPGA加密的水下蓝绿激光安全通信装置[J]. 计算机与现代化, 2017(2): 53-56.