

【引用格式】刘鹏展, 王林宁, 胡芳仁, 等. 水下光通信技术的研究与展望[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(4): 329-334.

水下光通信技术的研究与展望

刘鹏展¹, 王林宁², 胡芳仁¹, 王永进^{2,*}

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023;

2. 南京邮电大学 彼得·格林贝格尔研究中心, 江苏 南京 210023)

摘要 水下光通信(Underwater Optical Wireless Communication, UOWC)是一种新型的水下通信技术, 具有保密性好、可靠性高等优点, 对于构建全光立体通信网络以及 6G 空天海地一体化全方位通信有重要的意义。分析了水下光通信相较于其他传统水下通信方式的优点, 对水下光通信发展历程与进展进行了综述, 对比了水下光通信 2 种主流光源: 激光光源和 LED 光源。针对现阶段水下光通信面临的难题, 提出了一种完善的水下光通信系统框图, 并研制出相应的硬件系统, 完成了水下通信调试。水下光通信是一种切实可行的新型通信方式, 兼具灵活、保密、高速率等特点, 在未来的 6G 时代中将会得到进一步的发展和应用。

关键词 水下光通信; 6G; 全方位通信; 全双工可见光通信系统

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2022)04-0329-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.04.008

Research and Prospect of Underwater Optical Communication Technology

LIU Pengzhan¹, WANG Linning², HU Fangren¹, WANG Yongjin^{2,*}

(1. College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronic (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Jiangsu 210023, China;

2. Peter Grünberg Research Centre, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Jiangsu 210023, China)

Abstract Underwater optical wireless communication (UOWC) is a new type of underwater communication technology, which has the advantages of good confidentiality and high reliability. It is of great significance for the construction of all-optical three-dimensional communication network and 6G space-earth-sea integrated all-round communication. This paper analyzes the advantages of underwater optical communication compared with other traditional underwater communication methods, summarizes the development history and progress of underwater optical communication, and compares two mainstream light sources of underwater optical communication: laser light source and LED light source. Aiming at the problems of underwater optical communication at present, a perfect block diagram of underwater optical communication system is proposed, the corresponding hardware system is developed, and the underwater communication debugging is completed. Underwater optical communication is a new practical communication mode, which has the characteristics of flexibility, confidentiality and high speed. It will be further developed and applied in the 6G era in the future.

Key words underwater optical wireless communication; 6G; omnidirectional communication; full duplex visible light communication system

收稿日期: 2022-06-15

作者简介: 刘鹏展(1998-), 男, 硕士生, 主要从事水下蓝光通信及其关键器件研究。

*通信作者: 王永进(1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事氮化镓光子集成及无线光通信研究。

基金项目: 国家“111计划”学科创新引智基地专项(D17018)。

0 引言

随着通信技术的快速发展,第五代移动通信(5G)的商业模式大规模普及的同时也使为数不多的频谱带宽几乎消耗殆尽,6G 技术的发展势必要寻求新的频谱途径。5G 信号因其自身技术的限制和频谱的不足难以满足空天海地一体化的新型全场景覆盖通信网络的需要,6G 技术为了弥补这些不足,实现一体化的新型通信网络需要寻找新的无线通信方式来补充传统单一的无线通信模式。

可见光通信相较于现有的通信技术,其最大的优点是频谱无需授权,有着极大的使用自由度。可见光通信拥有高频段的频谱(400~800 THz),适用于高速通信技术,且其安全性和保密性有着独特的优势。可见光通信没有传统电磁通信所带来的电磁污染和射频辐射,也不会受到电磁干扰。这些优势使得可见光通信技术成为了近年来各国争相研究的对象。

本文将首先介绍光通信技术的发展,着重介绍水下可见光通信技术的发展以及可见光通信的应用场景与所面临的挑战。然后基于现阶段的研究提出一种成熟的水下可见光通信系统。

1 传统水下通信方式简析

随着人类通信技术的发展,距离空天海地一体化的全方位通信目标的实现也越来越近,但水下通信依旧是现在难以解决的难题。在现有的通信网络中,应用于海洋、水下场景的智能装备主要使用射频信号、声波等无线技术,或使用有线网络进行通信。

1.1 水下有线通信

水下有线通信多用于 2 个大规模水上平台与平台之间,通过铺设水下光缆的方式进行通信,如连接各国的大规模水下光缆网络。有线通信可以保证高速的数据传输,每秒可以传 100 Gbit 以上,但水下光缆本身的安全性很难得到很好的保障且被损坏后很难修补^[1]。水下有线通信笨重,成本高,无法满足未来 6G 时代水下通信的需求。

1.2 水下射频信号通信

海水对射频信号有非常强的屏蔽作用,射频信

号穿透海水的能与频率直接相关,只有低频率的射频信号如甚低频(3~30 kHz)才能在海水中进行有限的传播^[2]。潜艇等水下设备通常使用超低频和甚低频进行有限的通信,通信速率只有 300 b/s 左右。射频信号在水中传输时的趋肤效应,传输距离受限,仅仅适用于近距离的水下通信。因此,无法完成未来远距离、高速率的水下信息传输任务。

1.3 水下声波通信

声波较早用于水下探测和水下通信,但由于声波的隐蔽性较弱,主动式声呐设备的声波很容易被对方捕捉而暴露目标,所以水下军事设备不会主动使用声呐进行通信。水声通信的频带带宽被限制在 20 kHz 以内,且由于多径传播会导致延迟增加,产生数据的相互干扰,大大降低了通信速率,传输速率只有几十 kb/s^[3]。这些严重的延迟和串扰影响显然无法满足日益增长的水下通信需求。

2 UOWC 技术发展介绍

由于传统的水下通信技术无法满足未来 6G 时代高速率、远距离通信的需求,水下可见光通信可以弥补射频通信水下传输距离短的难题,能够克服声波通信速率低、损耗严重等缺点,具有广阔的发展潜力,成为现在水下通信的研究热点^[4]。

图 1 是水下光通信的在未来军事领域的典型应用图,由光来构建新型的立体通信网络。该网络相较于传统信息网络拥有保密性强、稳定性高等优点,不易被敌方破解。海底光缆中继站可以直接与潜艇进行交流沟通,提高了水下潜航设备的通信能力。还可以通过放置浮标作为中继的方式,提高通信距离,达到完善通信网络的目的^[5]。

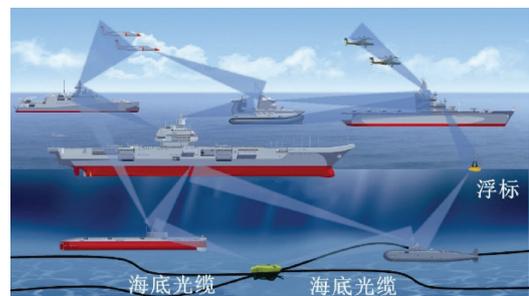


图 1 水下光通信典型应用示意图

Fig. 1 Typical application diagram of underwater optical communication

光波的带宽很宽,由于温度波动、散射、色散等影响,加之光学频段严重吸水和悬浮粒子的强散射,这使得水下光通信仅限于短距离。但水下 EM 光谱的蓝绿色波长有一个相对较低的衰减光学窗口,早在 1966 年,University of California, Santa Barbara 的 GILBERT、JERNIGAN 等人就进行了蓝绿激光水下的偏振、散射和相干特性的相应实验,成功证明了水下蓝绿光通信的可能性^[6]。

水下可见光通信通过光源来分类,主要分为水下蓝绿激光通信与基于蓝绿光 LED 的水下可见光通信。激光器功率大,激光作为水下光通信的媒介可以实现高速率和远距离的传输,但存在相干闪烁等问题,且通信必须要精确对准,实用性差,在实际的应用之中有很大的困难。而基于蓝绿 LED 的水下光通信,采用非相干光,集照明与通信于一体,无需严格对准,大大增加了水下光通信的便利性和可行性。

2.1 水下激光通信的发展

水下激光的发展最先发展于军事领域。20 世纪 80 年代,美国开始进行蓝绿激光对潜战略的研究,并于 1981 年首次使用机载激光器与位于水下 300 m 深度的潜艇进行了通信实验。2001 年美国研制出了激光二极管后,激光通信的发展迈出了飞跃性的一步。2015 年,King Abdullah University of Science and Technology 的研究团队使用 450 nm 的激光通过正交频分复用进行调制在 5.4 m 的距离上成功实现了高达 4.8 Gbit/s 的数据速率,且其误码率仅有 2.6×10^{-3} ,完全满足前向纠错的标准^[7]。2017 年,浙江大学光通信实验室使用频谱高效的正品频分复用技术,在 10 m 长度的水下通道实现了 9.51 Gb/s 的基于红绿蓝三色光的聚合数据传输,且误码率完全符合前向纠错的标准^[8]。这些都表明如今的水下激光通信确实可以达到极高的通信速率,但传输距离上还有待提升。同样是 2017 年,复旦大学研究团队提出构建了一种基于绿光激光二极管的水下光通信系统,使用 NRZ-OOK 对其进行调制,已经实现了 34.5 m 的且速率在 2.7 Gbps 的数据传输,该系统预计最大可传输 62.7 m,速率也可达 1 Gbps^[9]。

2.2 水下蓝绿光 LED 通信的发展

蓝绿光水下 LED 的光通信起步相对较晚。2014 年度诺贝尔物理学奖表彰了物理学家在发明高效节能的蓝光 LED 光源方面的贡献。他们在高质量的氮化镓晶体上制造出了蓝光 LED,此 LED 器件具有高的开关响应速度,而正是这种极高的开关响应速度,使得基于 LED 器件的光通信技术成为可能。在 1993 年,中村修二成功将蓝光 LED 的亮度大幅度提升,至此蓝光 LED 走上了人类的照明的舞台,也开启了蓝绿光水下 LED 通信的大门。

1995 年,国外学者对基于 LED 的水下光通信进行了理论分析,当时 20 m 的距离可以进行 10 Mbps 的通信,30 m 的距离可以进行 1 Mbps 的通信^[10]。2006 年,针对海底观测测试了一种基于 LED 的通信链路,建立了 5 m 距离的 10 Mbps 通信速率的短程水下光通信链路^[11]。后随着调制技术、高速通信信道的研究,美国 Yale University 研究团队于 2010 年开发了名为 AquaOptical II 的水下光通信系统。该系统使用 470 nm 的大功率 LED 阵列器件并使用离散脉冲间隔调制,成功实现了 50 m 距离的 2.28 Mbit/s 的通信,是基于 LED 的水下光通信的突破性的进展^[12]。

光通信的光源除了 LED 光源与激光光源,紫外光通信是一种新型的通信手段,是主要利用紫外光在大气中的散射来进行信息传输的通信模式,具有比现有通信更强的抗干扰能力,且保密性和可靠性好。由于其非视距性,在军事方面潜力巨大,目前的紫外光通信系统主要应用于军事领域。我国的紫外通信起步较晚,尚处于研究阶段,国外于 21 世纪初已经有相关国家、机构研制,美国的深紫外通信已经达到了实用阶段。

因为紫外光的特殊性在水下通信方面,可以作为水下光通信的补充,增加其保密性,也可在一些必要的短距离上进行可见光通信的弥补。2018 年,King Abdullah University of Science and Technology 研究团队利用激光器的 375 nm 紫外光线,验证了在自然环境中的浑浊度等因素对通信的影响,证实了紫外光在自然的水下环境中传播的可能性^[13]。

3 面向 6G 可见光通信系统

现阶段大多数水下光通信的研究多是基于仿真设计、信号处理方面的研究^[14]，而未形成闭环硬件系统，距离工程实际应用存在差距。本文介绍了一种基于蓝光 LED 的水下光通信系统。图 2 为水下光通信系统的示意框图。该系统为全双工通信系统，由对称的收发端系统构成，主要分为发射和接收 2 条链路。在发射端，IP 摄像头、多路网络传感器等设备作为信源通过交换机汇总至

FPGA 网口通信模块，经由 FPGA 跨时钟域处理、编码调制等功能模块，输出至 LED 发射驱动电路，在这里经过功率器件等其他放大器件的放大，将处理后的信号搭载至 LED 发射器件两端，后再由光学系统发射出去。调制光信号通过水下信道，接收端将光学系统聚焦的光信号送入微弱信号处理电路，完成光电转换功能。将转换后的电信号送入 FPGA 信号处理模块，经由解调、解码等处理后，在接收端可以进行音视频、传感器参数等数据的读取。

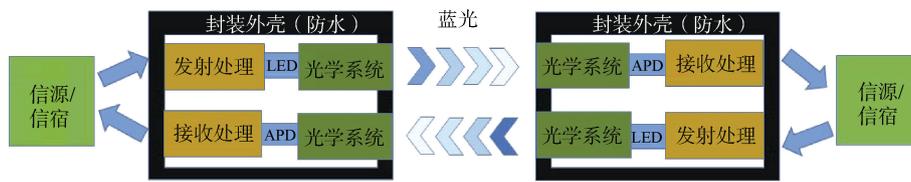


图 2 水下可见光通信系统框图

Fig. 2 Block diagram of underwater visible light communication system

面向水下高速无线通信的实际需求，高速、大功率氮化镓 LED 器件是解决水下无线光通信系统“传得远、传得快”瓶颈难题的关键器件。由于氮化镓材料和空气存在大的折射率差异，LED 器件的发射光大部分被约束在器件内部。同时，外延氮化物的厚膜效应会使器件内部存在很多波导模式，使发射光耦合进波导模式，最后被损耗掉。为提高器件的出光效率，传统 LED 通常采用表面粗化技术，在器件表面引入纳米结构，改变界面态，破坏由材料折射率差异造成的全反射，使更多发射光逃逸器件。2009 年，飞利浦公司采用激光剥离和电子束曝光技术，减薄外延氮化物薄膜厚度，研制出集成光子晶体结构、厚度 700 nm、发光波长 450 nm 的垂直结构 LED，减少了器件内波导模式的数量，提高了器件的出光效率^[15-16]。

南京邮电大学王永进团队提出亚波长理想 LED 模型，图 3 是器件的示意图。根据布拉格方程，当传输波长远远大于器件厚度时，波长效应出现，光线或其他任何东西都会直接无损地通过材料。因此，当 LED 器件中心发光波长大于器件厚度时，器件内部的波导模式能够被抑制消除，集成底部金属电极反光镜，发射光逸出器件，实现接近

完美的 LED 出光结构。由于器件厚度大幅减小，电阻效应出现，降低了电子传输产生的热效应，减小了生产缺陷引起的光、电损耗，提升了器件的注入效率和响应速率。此外，亚波长理想 LED 能够抑制侧向光传输，降低片内光电子集成芯片带来的光串扰。他们通过金属键合工艺，将原始晶圆和硅晶圆键合在一起，通过抛光减薄技术，去除原始晶圆衬底，随后通过无掩膜刻蚀技术进行外延氮化物薄膜减薄，研制出厚度 225 nm、发光波长 411 nm 的垂直结构 LED，实验证明了亚波长理想 LED 模

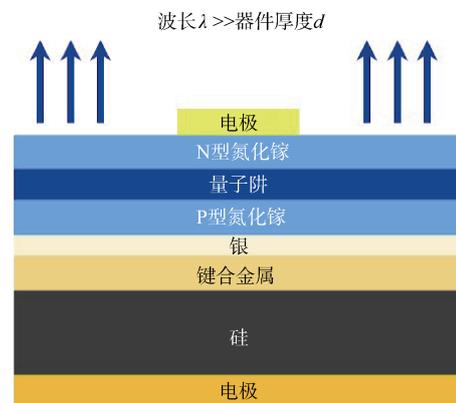


图 3 亚波长理想蓝光 LED 器件示意图

Fig. 3 Schematic diagram of subwavelength ideal blue LED device

型^[17]。在此工作的基础上, 研制出出光面积 1 mm × 1 mm 的垂直结构 LED 器件, 器件厚度 580 nm, 发光中心波长 427.8 nm, 在比特加载 DMT 调制下实现通信速率 608 Mbps 的无线光通信^[18], 为研制面向水下无线光通信的大功率、高效率、高响应 LED 器件提供了一条可行的技术路线。

图 4 (a) 为研制的水下无线光通信系统实物图。系统采用蓝光 LED 作为光发射器件, 器件的发光谱如图 4 (b) 所示, 中心发光波长为 450 nm, 半高宽为 22 nm。

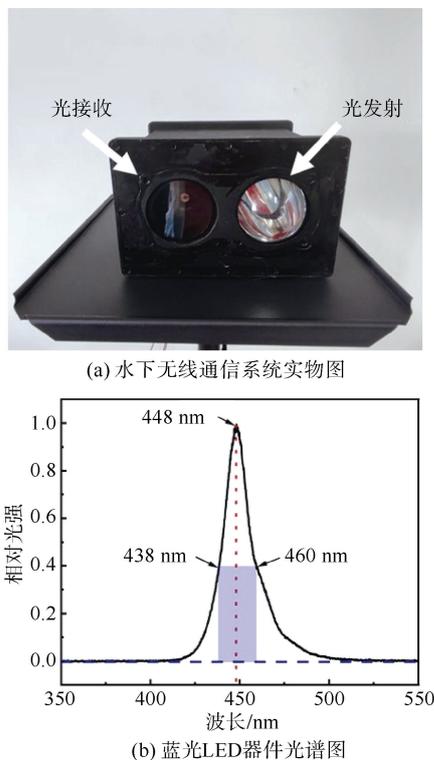


图 4 水下蓝光通信系统

Fig. 4 Underwater blue light communication system

图 5 为该水下蓝光通信系统的水下实验图。该系统在水下环境光传输损耗不大于 0.4 dB/m 的情况下, 水下最大通信距离不小于 50 m, 单向通信速率不小于 2 Mbps, 双向信息交换速率不低于 4 Mbps, 支持音视频和多路传感数据的水下双向无线蓝光通信。

本文针对水下可见光通信研制出成熟的硬件系统, 并且在可靠性、实用性等方面都得到了印证。然而, 水下光通信依然面临着诸多待解决的难题,

例如高阶调制方式, 更高调制速率、更高出光效率的光源的应用等。

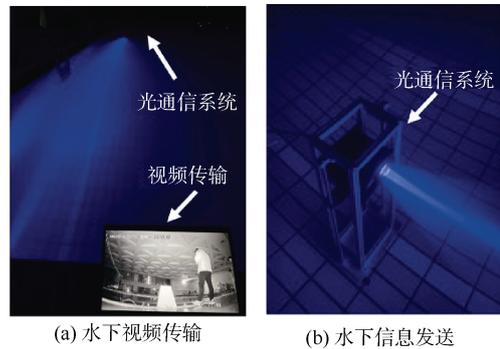


图 5 水下蓝光通信系统水下实验图

Fig. 5 Underwater experiment diagram of underwater blue light communication system

未来水下光通信的发展将主要从信道、光源、调制解调等方面进行发展, 以确保水下光通信能够实现高速、远距离的通信。

在调制方式与信号处理算法等方面, 复旦大学迟楠教授研究团队, 提出了 AI 赋能的可见光通信技术和多种调制方式, 将信号数据处理与 AI 技术相结合并加以新型的适配调制方式, 大大改进了发射端和接收端的数据信号处理能力, 为未来实际应用场景下复杂的高速水下光通信设备的调制解调提供理论支撑。

另一方面, 虽然使用激光作为光源能够提供更长的通信距离, 但通信条件苛刻, 不仅需要严格对准, 海水的湍流、紊流等都会造成光斑偏移, 从而造成通信链路不稳定、断链等影响。而 LED 作为光源, 发光性能上远不及激光, 在 LED 方面, 南京邮电大学团队提出了亚波长理想结构的 LED 器件, 提升器件的出光效率、调制速率, 是 LED 光源的突破性进展。未来的 LED 光源在亚波长垂直结构 LED 的基础上提升器件发光性能, 将会是光源领域的重点研究方向。

未来的 6G 时代, 水下光通信与声波、射频信号、有线通信等进行结合, 一定能克服现有的信道不稳定, 传播速率较低的问题, 成为水下通信的最优解。未来水下光通信技术在海上可以将水上船舶设备、水下设备与水下的油井、风力发电机等大型设备相连接, 构筑海上一体化的全光通信网络, 实现

在海上环境的高速通信。同时与陆地上面的通信进行融合,实现有光即可通信,构建一种更为自由、覆盖更广的通信网络。

4 结束语

本文从传统水下通信方式出发,对比分析了水下光通信的优点和应用前景。详细介绍了水下光通信技术的发展,分析了现有技术的不足,研制了一套水下蓝光通信系统。通过对比传统水下通信方式和水下可见光通信,证实了水下光通信的保密性、可靠性,证明了水下光通信的现实可应用性。相信经过未来的发展,水下光通信技术的高速性、稳定性、保密性等优点一定能在6G空天海地一体化的全方位通信网络中发挥重要作用。

参考文献

- [1] 晏庆, 张晓, 范路芳. 海底光缆通信系统安全威胁分析及应对策略[J]. 数字技术与应用, 2021, 39 (5): 25-27.
- [2] FREITAS P. Evaluation of Wi-Fi underwater networks in freshwater[D]. Porto: Faculdade Engenharia Univ, 2014.
- [3] ZHENG Y R. Channel estimation and phase-correction for robust underwater acoustic communications[C]// MILCOM 2007-IEEE Military Communications Conference. US: IEEE, 2007.
- [4] KHAN I U, IQBAL B, SONG Z L, et al. Full-duplex underwater optical communication systems: A review[C]// 2021 International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technologies (IBCAST). US: IEEE, 2021.
- [5] ODEYEMI K O, OWOLAWI P A, OLAKANMI O O. Performance analysis of reconfigurable intelligent surface assisted underwater optical communication system[J]. Progress In Electromagnetics Research M, 2020, 98: 101-111.
- [6] GILBERT G D, STONER T R, JERNIGAN J L. Underwater experiments on the polarization, coherence, and scattering properties of a pulsed blue-green laser[C]// Underwater Photo Optics I. US: SPIE, 1966.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] BALES J W. High bandwidth low power short-range optical communication in underwater[J]. Unmanned Unthethered Submergible Technology, 1995, 9: 406-415.
- [11] FARR N, CHAVE A, FREITAG L, et al. Optical modem technology for seafloor observatories [C]// Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE. US: IEEE, 2005.
- [12] DONIEC M, RUS D. BiDirectional optical communication with AquaOptical II[C]// 2010 IEEE International Conference on Communication Systems. US: IEEE, 2010.
- [13] SUN X B, CAI W Q, ALKHAZRAGI O, et al. 375-nm ultraviolet-laser based non-line-of-sight underwater optical communication[J]. Optics Express, 2018, 26 (10): 12870-12877.
- [14] SPAGNOLO G S, COZZELLA L, LECCESE F. Underwater optical wireless communications: Overview[J]. Sensors, 2020, 20 (8): 2261.
- [15] WIERER J J, DAVID A, MEGENS M M. III-nitride photonic-crystal light-emitting diodes with high extraction efficiency[J]. Nature Photonics, 2009, 3 (3): 163-169.
- [16] NODA S, FUJITA M. Photonic crystal efficiency boost[J]. Nature Photonics, 2009, 3 (3): 129-130.
- [17] WANG Y J, NI S Y, WANG S, et al. A 225-nm-thick vertical-structure light-emitting diode inhibiting confined waveguide mode[J]. Applied Physics Express, 2019, 12 (4): 046503.
- [18] LU H Y, JIANG M, CHENG J L. Deep learning aided robust joint channel classification, channel estimation, and signal detection for underwater optical communication[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 69 (4): 2290-2303.

(责任编辑: 曹晓霖)