

引用本文: 杨尚君, 梁静远, 柯熙政. 水下无线光通信模型及其实验研究进展[J]. 光通信技术, 2024, 48(6): 1-5.

水下无线光通信模型及其实验研究进展

杨尚君^{1,2}, 梁静远³, 柯熙政^{3,4*}

(1. 河南工业大学 粮食信息处理与控制教育部重点实验室, 郑州 450001; 2. 河南工业大学 信息科学与工程学院, 郑州 450001;
3. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048; 4. 西安文理学院 信息工程学院, 西安 710065)

摘要: 为了分析水下无线光通信技术在海洋湍流中的传输行为, 基于水下非视距(NLOS)传输模型、水下信道模型和相关实验, 对水下无线光通信技术进行了全面总结, 并分析了蓝绿光在3种不同NLOS传输模型下的传输特性。结合先前的实验结果, 阐述了光在水下传输过程中吸收散射及湍流效应对水下折射率结构常数和概率分布的影响机理。同时, 对水下光通信实验进行了总结, 通过研制的光学系统验证了不同传输速率和不同距离下的水下光通信性能, 并对水下无线光通信未来的发展方向进行了展望。

关键词: 水下无线光通信; 蓝绿光; 非视距; 信道模型; 湍流

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)06-0001-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.06.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Underwater wireless optical communication model and its experimental research progress

YANG Shangjun^{1,2}, LIANG Jingyuan³, KE Xizheng^{3,4*}

(1. Key Laboratory of Grain Information Processing and Control, Ministry of Education, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 3. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 4. School of Information Engineering, Xi'an University, Xi'an 710065, China)

Abstract: To analyze the transmission behavior of underwater wireless optical communication technology in ocean turbulence, a comprehensive summary of underwater wireless optical communication technology is conducted based on the non-line-of-sight (NLOS) transmission model, underwater channel model, and related experiments. The transmission characteristics of blue and green light in three different NLOS transmission models are analyzed. Combining the previous experimental results, the mechanism by which light absorption, scattering, and turbulence effects affect the underwater refractive index structure constant and probability distribution is elucidated. At the same time, the underwater optical communication experiment is summarized, and the underwater optical communication performance at different transmission rates and distances is verified by the optical system developed. The future development direction of underwater wireless optical communication is also prospected.

Key words: underwater wireless optical communication, blue and green light, non line-of-sight, channel model, turbulence

收稿日期: 2024-08-27。

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 61377080)资助; 陕西省重点产业创新项目(批准号: 2017ZDCXL-GY-06-01)资助; 河南工业大学博士启动基金项目(批准号: 31401616)资助; 河南工业大学创新基金支持计划专项(批准号: 2022ZKCJ13)资助。

作者简介: 杨尚君(1991—), 男, 河南开封人, 博士, 讲师, 现就职于河南工业大学信息科学与工程学院通信工程系, 主要从事无线光通信、自适应光学方面的研究工作, 负责校级项目1项。

***通信作者:** 柯熙政(1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为无线光通信。



0 引言

水下无线通信可以采用声波、电磁波和光波作为数据传输的载体。其中, 水下光通信因其传输速率快、信息承载能力强、信道容量大以及收发天线尺寸小等优势而受到重视。特别地, 蓝绿光通信技术(波长为450~550 nm的蓝绿光)被认为是未来水下无线通信的一个重要发展方向^[1]。

在水下无线光通信领域, 海洋湍流对光信号的传输构成了挑战^[2-3]。当激光器和光电探测器均保持静止且通信链路无障碍物阻挡时, 可以采用视线(LOS)方

杨尚君,梁静远,柯熙政:水下无线光通信模型及其实验研究进展

式实现通信。然而,如果直视链路被障碍物遮挡,则可以通过非视线(NLOS)方式实现通信^[4]。相较于 LOS 传输,NLOS 传输提供了更大的灵活性,允许设备在复杂水下环境中实现更广泛的空间分布,通过散射和反射机制支持多接收器同时接收信号,适合于群体监测和数据收集任务。自从 ARNON S 等人^[5]首次提出利用海空界面的背向反射来实现点对多点的 NLOS 水下光通信后,该领域取得了显著进展。例如:PRIYALAKSHMI B 等人^[6]研究了基于多输入多输出-正交频分复用技术的垂直 NLOS 水下光通信系统的信道估计和纠错方法;FANG C 等人^[7]探讨了光束折射、反射及太阳光照射对 NLOS 链路特性的影响,并使用 Pierson 波模型分析了多输入多输出条件下 NLOS 水下链路的传输性能^[8]。尽管如此,目前大多数关于水下光通信 NLOS 信道特性的研究都未充分考虑到斜程传输的影响。因此,本文介绍 3 种 NLOS 传输模型、水下无线光通信系统模型以及相关的实验研究情况,旨在分析其在海洋湍流中的传输行为,探讨海洋湍流特征参数对高斯光束闪烁指数的影响。

1 NLOS 传输模型

在水下蓝绿光通信中,光信号采用 NLOS 传输方式时,无需精确对准,这使得它能够灵活适应各种水下环境。NLOS 传输包括反射、散射和衍射 3 种模式,这些模式支持光信号在海水中进行水平、垂直和斜程传输。由于海水的温度、盐度、密度和流速存在差异,导致光信号在不同条件下的衰减程度有所不同。蓝绿光在海水中传输时,根据光源的发射仰角和光电探测器的接收仰角的不同,可以分为 a、b、c 三类。以水平 NLOS 传输为例,光源与光电探测器均置于 680 m 深的海水,并且发送光功率设定为 1 W 时,这三类典型的配置方式如图 1 所示。其中, φ_1 、 φ_2 、 θ_1 、 θ_2 、 R 分别为激光器的光束发散角、光电探测器的接收视场角、激光器的

的发射仰角、光电探测器的接收仰角、激光器和光电探测器的间隔距离。

在 a 类方式的 NLOS 传输模型中,扩大接收视场角可以显著增强系统的接收光功率^[9-11]。例如,在 24.5°N、23.8°W 海域,叶绿素浓度为 0.25 mg/m³ 的情况下,对 450 nm 的蓝光和 520 nm 的绿光进行水平 NLOS 传输实验,实验结果显示绿光的接收光功率比蓝光高出了 330 多倍。这一结果表明,在相同的传输方式、通信距离和发射光功率条件下,使用绿光可以显著提升系统的接收光功率。

在 b 类方式的 NLOS 传输模型中,减少光的发射仰角也能有效提高系统的接收光功率。在上述相同的海洋环境中,对 450 nm 的蓝光和 520 nm 的绿光进行水平 NLOS 传输实验,实验结果显示绿光的接收光功率比蓝光高出 16 倍以上。这再次证明,在相同条件下,绿光的应用可以大幅提高系统的接收光功率。

在 c 类方式的 NLOS 传输模型中,与 a 类和 b 类方式相比,该设计不仅扩大了信号的覆盖范围,还有效减少了后向散射的影响,因此 c 类方式展现出了更优的通信性能。在相同的传输方式、通信距离和发射光功率条件下,采用 c 类方式可以有效地提升系统的接收光功率。

关于水下蓝绿光通信的垂直和斜程 NLOS 传输,可以通过分析水平和垂直传输时发射端与接收端所在的不同空间位置来确定相应的计算方法^[12-13]。研究结果显示,在相同的传输方式和通信距离下,光电探测器接收到的光功率随着发射仰角和接收仰角的增加而降低,但随着接收视场角的增大而增大。当光以 b 类和 c 类方式进行 NLOS 传输时,接收端的接收光功率和误码率主要受有效散射体在海水中的深度影响,即深度越大,海水的衰减作用越小,接收光功率越大,误码率越低。在所有其它条件相同的情况下,450 nm 的蓝光接收光功率通常低于 520 nm 的绿光。

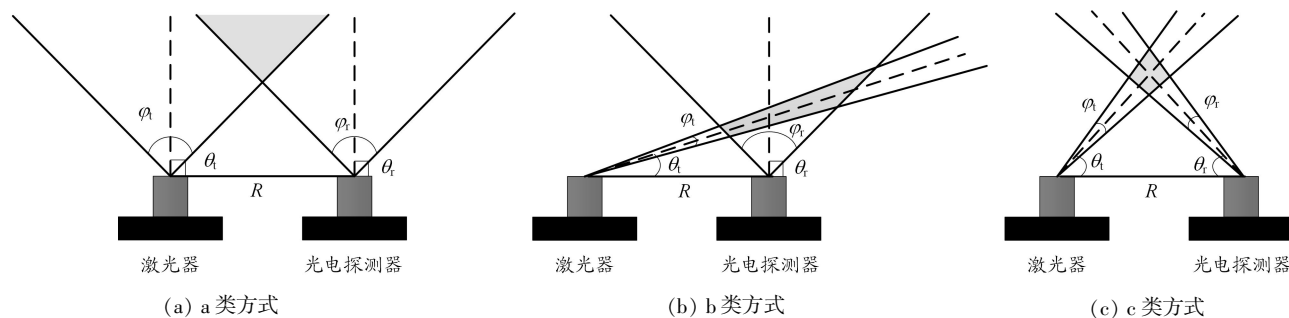


图 1 NLOS 传输典型配置方式

2 水下无线光信道模型

2.1 光在水下传输的吸收散射及湍流效应

水下无线光信道的研究可以分为吸收散射效应和湍流效应两大方向。

在吸收散射效应方面,JARUWATANADILOK S^[14]运用数值蒙特卡洛模拟技术,将散射效应量化为距离和比特率的函数,并探讨了水下环境中光的偏振行为,强调了当光经历更多散射时,交叉偏振分量的重要性。COCHENOUR B M 等人^[15]则专注于颗粒物散射对短距离高带宽水下光通信链路性能的影响,建立了考虑前向散射光角度依赖性的理论模型,并通过实验证明了该模型的有效性,评估了空间传播对水下光链路信噪比和指向跟踪要求的影响。此外,ZHANG J L 等人^[16]将多相屏模型整合进 Monte Carlo 模拟框架,实现了湍流效应、吸收和散射效应的统一建模,深入研究了这些因素对水下信道的影响。

在水下湍流效应研究方面,LU L 等人^[17]成功推导出平面波和球面波在海洋湍流中传播时波结构函数与空间相干函数的精确解析表达式,为后续研究提供了强有力的分析工具,并构建了坚实的理论基础。HUANG Y 等人^[18]利用扩展的 Huygens-Fresnel 原理和海水折射率的空间功率谱,得出了高斯-谢尔模型涡旋光束在海洋湍流中传输的交叉谱密度和平均光强的解析表达式。CUI Z 等人^[19]提出了一种会聚束阵列方案,旨在减少未对准收发器间海洋湍流引起的光强度波动。杨伟等人^[20]通过分析功率谱随频率的变化及其与标准光谱的对比,验证了他们提出的具有指数型外尺度特征的 Nikishov 谱修正模型的有效性,特别是在弱湍流条件下,海洋湍流的外尺度对准直高斯光束的光束扩展、质心漂移特性有显著影响,而对光强波动的影响相对较小。

水下湍流会导致接收光信号的光强出现随机波动。大气领域中基于 Rytov 近似条件下的对数正态分布弱湍流模型和 Andrews 提出的适用于强湍流的 Gamma-Gamma 分布模型,同样适用于描述水下湍流环境。JAMALI M V 等人^[21]研究了不同气泡对光强波动分布的影响,并提出了结合指数函数和对数函数的混合指数-对数分布函数。OUBEI H M 等人^[22]提出了一种韦布尔分布模型,该模型在盐度变化引起的湍流环境中与实验数据高度吻合。ZEDINI E 等人^[23]综合考虑了盐度变化、温度变化以及气泡的作用,开发了一种混合指数-广义伽马函数分布模型。季秀阳等人^[24]基于统一的 Mälaga 模型,推导了水下无线光通信系统在

不同湍流条件下的平均误码率、平均信道容量和中断概率表达式。

2.2 水下折射率结构常数

水下折射率结构常数 C_n^2 是衡量光学湍流强度的一个重要参数。BAYKAL Y^[25]通过对 Rytov 理论的改进,使用海洋湍流参数来表征大气折射率结构常数,这使得可以通过等效结构常数,并利用已有的大气湍流解决方案来解决海洋湍流问题。文献[26-27]通过闪烁法在陕西浐河、灞河和烟台第一海水浴场进行了水下折射率结构常数的测量,具体测量结果见文献[26]中的图 4-2。研究表明,水速的增加会直接导致湍流强度的加大。而且,在海水环境中测得的 C_n^2 值的范围要比在河水中测得的大得多,这表明海洋湍流比河水湍流更为强烈。外部干扰,例如渔船航行引起的海水波动,也可能会显著增强湍流特性。

2.3 概率分布

通过光电探测器在一定时间内测量光强值,并分析这些值的分布特性,可以揭示该时间段内信道的特征模型。柯熙政^[28]之前提出了一种使用双高斯函数来描述夜间车联网可见光通信中的噪声模型的方法。在此基础上,本文对不同水域内的光强信息进行了统计分布特征分析。不同水域测得的概率分布见文献[26]中的图 4-4。测量结果显示,基于光强闪烁的水下无线光信道模型遵循正态分布规律。随着水速的增加和外界人为活动(如船只通行)的干扰,水下折射率的随机波动加剧,导致接收到的光信号稳定性下降。然而,水流的方向对概率密度函数的变化影响不大,这意味着在水下水平传输时,湍流强度与水流方向的关系不大。

3 水下光通信实验

3.1 水下蓝绿光通信系统

近年来,随着水下无线光通信研究的蓬勃发展,KAUSHAL H 等人^[29]对这一领域的最新进展进行了全面的回顾,探讨了特有的信道特性、调制方案、编码技术以及各种噪声源。ZENG Z 等人^[30]对信道特性、调制与编码技术在实际水下光通信中的应用进行了全面的综述。OUBEI H M 等人^[31]详细介绍了水下无线光通信系统的关键组件,包括发射机和接收机技术,并研究了在简单衰减和湍流(如气泡、盐度和温度不均匀性)影响下的水下光信道模型,同时概述了未来研究面临的挑战。FEI C 等人^[32]则从先进的调制方法角度,综述了基于发光二极管(LED)和激光器的水下无线光通信的最新研究进展。

杨尚君,梁静远,柯熙政:水下无线光通信模型及其实验研究进展

水下无线光通信领域的研究重点在于探索多样化的调制与编码策略,目标是通过技术创新提高系统的数据传输效率和扩大有效传输范围。研究人员利用各种仿真模型来模拟和分析水下光通信系统的性能,特别关注数据传输速率和最远通信距离等关键指标。通过对仿真结果的深入分析,并与实际工程样机的表现进行对比验证,不仅加深了对水下无线光通信机制的理解,也为优化系统设计、提升通信性能提供了重要的基础。

3.2 光学系统的设计

西安理工大学在水下无线光通信的光学系统设计方面取得了显著的研究进展^[33]。在发射端,研究团队使用点光源来模拟 LED 光源的输出,通过 LightTools 光学仿真软件,运用光线追迹法对组合式聚光模块进行建模与优化,力求达到光学系统的最佳设计效果。在接收端,则基于复眼透镜^[34]的设计理念,开发了一种双层复眼透镜结构,旨在更有效地汇聚光束至探测器表面,进而减少由于边缘透镜聚焦不佳而造成的光能损失,确保在水下远距离光通信条件下能够高效地检测到微弱信号。

3.3 实验测量

文献[34]将上述设计的发射光学系统和接收光学系统应用于自主研发的水下光通信系统中。在发射端,电路分别驱动蓝光 LED 和绿光 LED,以比较不同波长下的传输性能;接收端采用的是 Thorlabs PDA10A2 型光电探测器。实验设置传输距离分别为 1、2、5 m,调制速率为 2、10 MHz,并采用开关键控(OOK)调制方式。通过示波器收集的瞬时波形分别如文献[34]中的图 5-16、图 5-18 所示。由于水下信道的散射效应以及 LED 调制过程中产生的失真,接收波形出现了一定程度的畸变。同时,水下信道的衰减特性也导致接收波形有所衰减。因此,为了提高水下光通信性能,可以考虑增加发射功率、提升接收信号质量、降低水质浑浊度等方法。

4 结束语

在蓝绿光 LED 水下无线光通信中,当光信号进行近距离传输时,光信号的衰减是主要影响因素;而在远距离传输条件下,散射则成为光信号衰减的主要原因。因此,为了确保有效的水下光通信信道链路建立,LOS 传输成为了信道的主要传输方式。未来水下光通信的发展将采用多发多收等先进的调制技术来提升通信性能,同时借助超结构和超表面等微纳设计与加

工技术优化光学系统和器件,以提高发射和接收效率。此外,NLOS 传输技术的应用将有效缓解水下光通信中对准难题,从而进一步增强系统的灵活性与可靠性。

参考文献:

- [1] WANG T, WANG B, LIU L Q, et al. 15 Mbps underwater wireless optical communications based on acousto-optic modulator and NRZ-OOK modulation[J]. Optics and Laser Technology, 2022, 150: 107943-1-107943-7.
- [2] LIU D J, WANG G Q, WANG Y C. Average intensity and coherence properties of a partially coherent Lorentz-Gauss beam propagating through oceanic turbulence[J]. Optics and Laser Technology, 2018, 98: 309-317.
- [3] ZAHRA V, ASGHAR G, ZABIH G, et al. Modeling turbulence in underwater wireless optical communications based on Monte Carlo simulation[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2017, 34(7): 1187-1193.
- [4] SAIT M, SUN X B, ALKHAZRAJI O, et al. The effect of turbulence on NLOS underwater wireless optical communication channels[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(10): 100013-1-100013-8.
- [5] ARNON S, KEDAR D. Non-line-of-sight underwater optical wireless communication network[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2009, 26(3): 530-539.
- [6] PRIYALAKSHMI B, MAHALAKSHMI K. Channel estimation and error correction for UWOC system with vertical non-line-of-sight channel[J]. Wireless Networks, 2020, 26(7): 4985-4997.
- [7] FANG C, LI S, WANG K. Accurate underwater optical wireless communication model with both line-of-sight and non-line-of-sight channels[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 16(4): 7358312-1-7358312-12.
- [8] FANG C, LI S, WANG K, et al. Investigation of non-line-of-sight underwater optical wireless communications with wavy surface[J]. Optics Express, 2022, 32(4): 12-16.
- [9] LU L, JI X, BAYKAL Y. Wave structure function and spatial coherence radius of plane and spherical waves propagating through oceanic turbulence[J]. Optics Express, 2014, 22(22): 12-16.
- [10] CUI Z, YUE P, XIANG Y, et al. Effect of convergent beam array on reducing scintillation in underwater wireless optical communications with pointing errors[J]. Optics Express, 2021, 29(7): 9846-9860.
- [11] 柯熙政. 紫外光自组织网络理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [12] 李刚. 蓝绿光在海水中的传输特性分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [13] KE X Z, LI G. Characterization of blue-green light non-line-of-sight transmission in seawater[J]. Optics and Photonics Journal, 2022, 12: 234-252.
- [14] 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.
- [15] 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, 2009, 33(4): 513-521.
- [16] ZHANG J L, KOU L L, YANG Y, et al. Monte-Carlo-based optical wireless underwater channel modeling with oceanic turbulence[J]. Optics

Communications, 2020, 475: 126214-1-126214-5.

[17] LU L, JI X, LI X, et al. Influence of oceanic turbulence on propagation characteristics of gaussian array beams[J]. Optik, 2014, 125(24): 458-476.

[18] HUANG Y, ZHANG B, GAO Z, et al. Evolution behavior of Gaussian Schell-model vortex beams propagating through oceanic turbulence[J]. Optics Express, 2014, 22(15): 17723-17734.

[19] CUI Z, YUE P, XIANG Y, et al. Effect of convergent beam array on reducing scintillation in underwater wireless optical communications with pointing errors[J]. Optics Express, 2021, 29(7): 9846-9860.

[20] 杨祎, 聂欢, 王晓波, 等. 海洋湍流外尺度对高斯光束传输特性的影响[J]. 光子学报, 2023, 52(4): 114-126.

[21] JAMALI M V, KHORRAMSHAHI P, TASHAKORI A, et al. Statistical distribution of intensity fluctuations for underwater wireless optical channels in the presence of air bubbles[C]. IEEE. Proceedings of 2016 Iran Workshop on Communication and Information Theory (IWCIT). New York: IEEE, 2016: 1-6.

[22] OUBEI H M, ZEDINI E, ELAFANDY R T, et al. Efficient Weibull channel model for salinity induced turbulent underwater wireless optical communications[C]. IEEE. Proceedings of 2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC). New York: IEEE, 2017: 1-2.

[23] ZEDINI E, OUBEI H M, KAMMOUN A, et al. Unified statistical channel model for turbulence-induced fading in underwater wireless optical communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(4): 2893-2907.

[24] 季秀阳, 殷洪玺, 景连友, 等. 基于强波动理论的强湍流信道水下无线光通信系统性能分析[J]. 光学学报, 2022, 42(18): 9-16.

[25] 包晶. 水下无线光信道模型实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.

[26] KE X Z, BAO J, LIANG J Y. Experimental study of underwater wireless optical channel model [J]. Optical Engineering, 2023, 62(12): 124103-1-124103-18.

[27] BAYKAL Y. Expressing oceanic turbulence parameters by atmospheric turbulence structure constant [J]. Applied Optics, 2016, 55(6): 1228-1231.

[28] 柯熙政, 秦欢欢, 杨尚君, 等. 车联网可见光通信系统夜间背景光噪声模型 [J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 986-990.

[29] KAUSHAL H, KADDOUM G. Underwater optical wireless communication [J]. IEEE Access, 2016, 4(1): 1518-1547.

[30] 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.

[31] OUBEI H M, SHEN C, KAMMOUN A, et al. Light based underwater wireless communications[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(8S2): 671-689.

[32] FEI C, HONG X, DU J, et al. High-speed underwater wireless optical communications: from a perspective of advanced modulation formats [J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(10): 1-10.

[33] KE X Z, YANG S J, SUN Y, et al. Underwater blue-green LED communication using a double-layered, curved compound-eye optical system [J]. Optics Express, 2022, 30(11): 18599-18616.

[34] 孙宇. 水下蓝绿光通信系统实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.