

球面 T-MISO-UWOC 系统研究

靳清清, 岳京歌, 孙宏森, 蒲俊宇, 刘 凯, 余先伦*

(重庆三峡学院 电子与信息工程学院, 重庆 404020)

摘要: 为了提升倾斜多输入单输出水下无线光通信(T-MISO-UWOC)系统的通信质量并降低误码率(BER), 提出了一种球面 T-MISO-UWOC(ST-MISO-UWOC)系统模型。通过理论分析与数值仿真, 研究了 ST-MISO-UWOC 系统与传统 T-MISO-UWOC 系统在误码率、接收光功率和 Q 因子等关键性能指标上的差异。仿真结果表明: 在信噪比为 20 dB、传输距离为 1.5 m、数据速率为 12 Gb/s 的条件下, ST-MISO-UWOC 系统的误码率低至 3.09×10^{-12} , 较传统系统的 8.08×10^{-7} 降低了 5 个数量级; 同时, ST-MISO-UWOC 系统的最佳判决时刻稳定性显著提升, 接收光功率更高, 且在高速率和长距离传输中表现出更强的适应性。

关键词: 水下无线光通信; 激光阵列; 多输入单输出; 误码率; 接收光功率

中图分类号: TN929.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)04-0077-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.04.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on spherical T-MISO-UWOC system

JIN Qingqing, YUE Jingge, SUN Hongsen, PU Junyu, LIU Kai, YU Xianlun*

(College of Electronics and Information Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404020, China)

Abstract: To improve the communication quality and reduce the bit error rate(BER) of tilted multiple-input single-output underwater wireless optical communication(T-MISO-UWOC) systems, a spherical T-MISO-UWOC(ST-MISO-UWOC) system model was proposed. Through theoretical analysis and numerical simulations, the differences between the ST-MISO-UWOC system and the conventional T-MISO-UWOC system in key performance metrics such as BER, received optical power, and Q -factor were investigated. Simulation results show that under a signal-to-noise ratio(SNR) of 20 dB, a transmission distance of 1.5 m, and a data rate of 12 Gb/s, the BER of the ST-MISO-UWOC system is as low as 3.09×10^{-12} , which is five orders of magnitude lower than that of the conventional system (8.08×10^{-7}). Additionally, the ST-MISO-UWOC system exhibits significantly improved stability in optimal decision timing, higher received optical power, and stronger adaptability in high-speed and long-distance transmissions.

Key words: underwater wireless optical communication, laser array, multi-input single-output, bit error rate, received optical power

0 引言

水下通信与组网是海洋勘探、开发、保护和国防建设中不可或缺的关键技术。当前水下通信主要面临以下挑战: 潜艇采用的长波通信速率极低且可靠性

差; 水声通信受限于载波频率, 数据速率一般不超过 100 kb/s, 且存在长时延、多径效应和多普勒频移等问题^[1-2]。这些限制使得传统通信方式难以满足图像、视频等高速实时业务传输需求。

水下无线光通信(UWOC)作为一种新兴通信技术^[3], 具有以下显著优势: 传输速率高(可达 Mb/s 量级)、通信容量大、带宽资源丰富、传播时延小、功耗低。这些特点使其特别适用于中短距离高速数据传输场景, 在实时成像、视频传输和高吞吐量传感器网络等领域展现出广阔应用前景^[4]。

1963 年, DUNTLEY S Q^[5]研究发现海水在 450~550 nm 波长范围内表现出较低的衰减特性, 揭示了蓝绿光在水下的透射窗口。这一发现为 UWOC 发展奠定

收稿日期: 2024-11-04。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3901405)资助; 国家自然科学基金项目(U2030116)资助; 三峡库区地质环境监测与灾害预警重庆市重点实验室开放基金项目(YB2020C0301)资助。

作者简介: 靳清清(1999—), 男, 硕士研究生, 现就读于重庆三峡学院电子与信息工程学院电磁场与微波技术专业, 主要从事水下无线光通信方面的研究工作。

* **通信作者:** 余先伦(1967—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为光纤通信、激光技术和光子晶体光纤。



靳清清,岳京歌,孙宏森,等: 球面 T-MISO-UWOC 系统研究

了重要基础。然而,水下环境中的光吸收、散射和湍流效应会导致接收端信号严重劣化。为此,学者们提出了采用空间分集结构来提升通信质量的方法^[6]。2008年,JARUWATANADILOK S^[7]采用4个蓝色LED平面阵列实现了全双工水下可见光通信系统。2016年,DONG Y等人^[8]提出均匀圆形阵列光源结构以减弱水体湍流影响。2018年,KONG M等人^[9]采用阵列发射器和接收器,结合四电平脉冲幅度调制(PAM-4)技术,在2 m长自来水通道中实现12.288 Mb/s传输速率。2019年,YUE Y等人^[10]开发了倾斜多输入单输出(MISO)-UWOC系统。2021年,CUI Z等人^[11]在此基础上提出汇聚MISO-UWOC系统。2024年,WADUGE T G等人^[12]研究了平面光电二极管阵列对移动水下光通信接收功率的影响。

然而,现有研究大多采用平面阵列光源,其固有缺点是各路光信号到达接收端时会产生时间延迟,影响通信质量。针对这一问题,本文提出一种球面倾斜多输入单输出水下无线光通信(ST-MISO-UWOC)系统,旨在提升倾斜MISO-UWOC(T-MISO-UWOC)系统的通信性能。

1 ST-MISO-UWOC 系统模型

本文提出的ST-MISO-UWOC系统模型图如图1所示。

阵列发射机由5个相同激光源组成,中心光源与接收机距离为 R ,其余4个激光源均指向接收机中心且具有相同的指向角 θ 。接收机平面与 XOY 平面平行,其中心坐标为 $P(0,0,R)$ 。所有激光源均分布在以 P 为球心、半径为 R 的球面上;中心激光源指向接收平面中心,指向角为 0° ;其余4个激光源对称分布于以 Z 轴为法线的球面圆上。

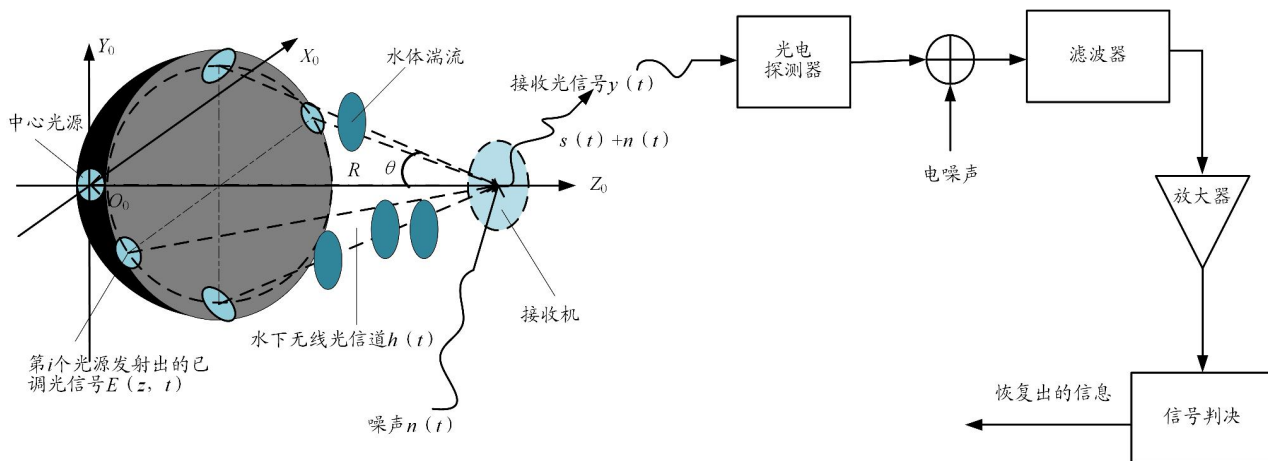


图1 ST-MISO-UWOC系统模型

图1中,各激光源发射的已调光信号电场表示为 $E(z,t)$ 。5束光信号通过水下无线光信道 $h(t)$ 传输至接收机,其合成信号记为 $s(t)$ 。在系统模型中,背景光噪声与设备噪声统一建模为 $n(t)$,接收光信号 $y(t)$ 为 $s(t)$ 与 $n(t)$ 的线性叠加。该信号经光电探测器转换为输出电流 $i_p(t)$,再通过滤波器处理得到 $i_t(t)$,最终经信号判决模块完成信息恢复。

2 系统传输特性分析

在图1中,激光源发射出的光信号的电场为

$$E(z,t) = A_c m(t) \cos \left[\omega \left(t - \frac{z}{v_{\text{water}}} \right) \right] \quad (1)$$

其中, A_c 是载波的幅度, $m(t)$ 是调制信号, ω 是载波光的角度频率, v_{water} 是光在水中的传播速度, t 是时间, z 是信号传输的距离。

水下环境存在湍流效应,本文采用双Gamma-Gamma分布表征水体中强湍流对光信号的衰减特性,基于蒙特卡洛仿真方法获取水下无线光信道的脉冲响应,并利用双伽马函数完成拟合建模^[13]。在接收端,光信号受到背景辐射噪声与接收机热噪声的共同影响,此类噪声可建模为加性高斯白噪声(AWGN)^[14-15]。

由于本文所涉及的指向角均小于 5° ,其引起的指向损耗可忽略不计,因此接收光信号可表示为

$$y(t) = 5A_c m(t) \cos \left[\omega \left(t - \frac{R}{v_{\text{water}}} \right) \right] * h(t) + n(t) \quad (2)$$

其中,*表示卷积运算。

合成光信号 $s(t)$ 可表示为

$$s(t) = 5A_c m(t) \cos \left[\omega \left(t - \frac{R}{v_{\text{water}}} \right) \right] * h(t) \quad (3)$$

信号功率 $P(t)$ 可表示为

$$P(t) = s(t)^2 \quad (4)$$

输出电流为

$$i(t) = \alpha P(t) + i_n(t) \quad (5)$$

其中, α 为光/电转换效率。

Q 因子^[16]可以通过下式计算:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (6)$$

其中, μ_1 和 σ_1 分别为高电平接收信号的信号幅度和噪声标准差, μ_0 和 σ_0 分别为低电平接收信号的信号幅度和噪声标准差。

在本系统中, 误码率 (BER)^[17] 的计算公式为

$$B = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad (7)$$

3 系统模型仿真结果与分析

考虑到实际水下光通信系统中水质、光源、发射机和接收机的参数, 以及发射机和接收机的空间位置, 系统模型仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 系统模型仿真参数

参数类型	参数取值
中心激光源与接收机的距离/m	1.2、1.4、1.6、1.8、2
水体衰减系数/ m^{-1}	0.398
序列长度	1 024
序列类型	0、1 伪随机序列
单灯发射功率/mW	50
光束发散角/mrad	2
波长/nm	532
发射效率	0.9
接收效率	0.9
雪崩光电二极管	热噪声、散弹噪声
暗电流/nA	10
雪崩光电二极管响应度/(A/W)	1
滤波器截止频率/bit rate	0.75
调制方式	NRZ-OOK
LD 透镜直径/cm	5
接收机直径/cm	20

注: NRZ-OOK 表示非归零开关键控。

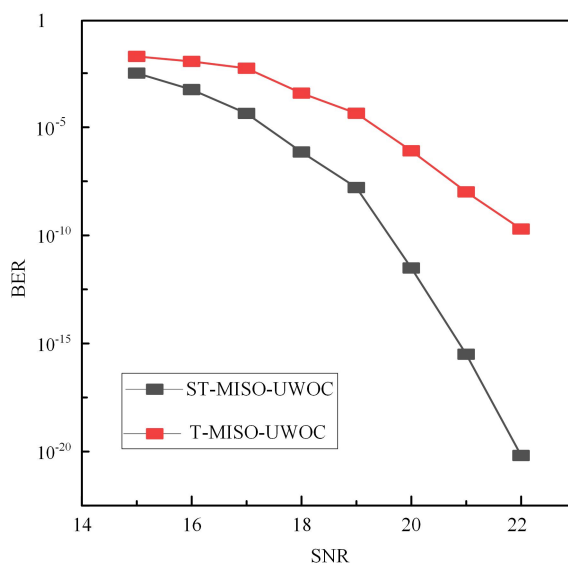
3.1 BER 特性与判决时刻稳定性

当 R 为 1.5 m、数据速率为 12 Gb/s 时, 仿真得到 T-MISO-UWOC 系统模型和 ST-MISO-UWOC 系统模型的 BER 和最佳判决时刻随信噪比 (SNR) 变化的结果, 如图 2 所示。

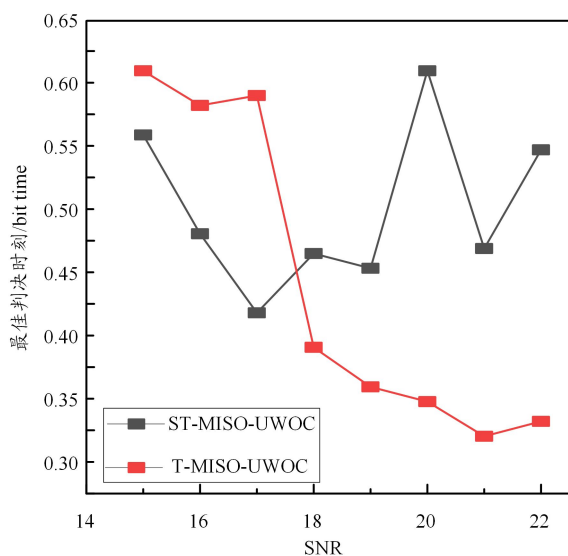
在图 2(a) 中, 当 SNR 为 15~22 dB 时, 2 种系统模型的 BER 均随 SNR 增大呈下降趋势, 其中 ST-MISO-

UWOC 系统的 BER 下降更为显著。当 SNR 为 20 dB 时, ST-MISO-UWOC 系统的 BER 为 3.09×10^{-12} , 较 T-MISO-UWOC 系统的 8.08×10^{-7} 降低了 5 个数量级。这一结果证实, 在相同 SNR 条件下, ST-MISO-UWOC 系统具有更优的误码性能。

在图 2(b) 中, ST-MISO-UWOC 系统的最佳判决时刻稳定在 0.5 bit time 附近, 均方差仅为 0.004; 而 T-MISO-UWOC 系统的判决时刻存在显著波动, 均值偏移至 0.441 bit time, 均方差达 0.016。这表明 ST-MISO-UWOC 系统的时序稳定性优于传统模型, 其判决时刻受光噪声影响较小, 能够有效抑制误码扩散, 保障系统在复杂水下环境中的通信可靠性。



(a) BER 变化



(b) 最佳判决时刻

图 2 2 种系统模型 BER 和最佳判决时刻随 SNR 变化曲线图

靳清清,岳京歌,孙宏森,等: 球面 T-MISO-UWOC 系统研究

3.2 数据速率适应性

在传输距离 $R=1.5$ m、SNR 为 20 dB 的条件下,2 种系统的 BER 随数据速率的变化关系如图 3 所示。当数据速率从 8 Gb/s 增至 12 Gb/s 时,2 种系统的 BER 均随之上升,但 ST-MISO-UWOC 系统的 BER 始终低于 T-MISO-UWOC 系统 5~7 个数量级。这一特性表明,在相同 BER 要求下,ST-MISO-UWOC 系统可支持更高的数据传输速率,更适用于高速水下光通信场景。

3.3 接收光功率与传输距离的关系

当数据速率为 12 Gb/s 时,仿真得到 T-MISO-UWOC 系统模型和 ST-MISO-UWOC 系统模型的接收光功率随传输距离 R 变化的结果如图 4 所示。可以看出,随着 R 的增大,T-MISO-UWOC 和 ST-MISO-UWOC 系统的接收光功率均呈下降趋势,但在相同传输距离时,ST-MISO-UWOC 系统始终保持更高的接收

光功率。这一特性表明,若要求相同的接收光功率水平,ST-MISO-UWOC 系统能够实现更远的有效传输距离,进一步验证了其在长距离水下光通信中的优势。

4 结束语

本文提出了一种 ST-MISO-UWOC 系统模型,通过数值仿真对比分析了 ST-MISO-UWOC 与 T-MISO-UWOC 系统模型在不同条件下的 BER、接收光功率等关键性能指标。仿真结果表明,在相同信噪比条件下,ST-MISO-UWOC 系统展现出更优越的误码性能。当 SNR 为 20 dB 时,ST-MISO-UWOC 系统的 BER 达到 3.09×10^{-12} ,较 T-MISO-UWOC 系统的 8.08×10^{-7} 降低了 5 个数量级。此外,在动态水下光噪声环境中,ST-MISO-UWOC 系统的最佳判决时刻具有更好的稳定性,表现出更强的抗噪声能力;在同等传输距离条件下,ST-MISO-UWOC 能获得更高的接收光功率。实验数据证实,采用球面激光阵列设计的 ST-MISO-UWOC 系统可显著提升 UWOC 质量,有效降低系统 BER 并延长通信距离。

参考文献:

- [1] SABBAGH A G. Long-range underwater optical wireless communication systems in turbulent conditions [J]. Optics Express, 2023, 31 (13): 21311–21329.
- [2] ZHU S, CHEN X, LIU X, et al. Recent progress in and perspectives of underwater wireless optical communication[J]. Progress in Quantum Electronics, 2020, 73: 100274-1–100274-28.
- [3] ZHOU H, ZHANG M, WANG X, et al. Design and implementation of more than 50 m real-time underwater wireless optical communication system [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(12): 3654–3668.
- [4] ZHOU Z, YIN H, YAO Y. Wireless optical communication performance simulation and full-duplex communication experimental system with different seawater environment[C]//IEEE. Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. DaLian: IEEE, 2019: 1–4.
- [5] DUNTLEY S Q. Light in the sea [J]. JOSA, 1963, 53(2): 214–233.
- [6] YAO Y, YIN H, JI X, et al. Design of mQAM-OFDM underwater wireless optical communication system based on LED array[C]// IEEE. Proceedings of 2022 3rd Information Communication Technologies Conference. NanJing: IEEE, 2022: 45–50.
- [7] 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.
- [8] DONG Y, LIU J. On BER performance of underwater wireless optical MISO links under weak turbulence[C]// IEEE. Proceedings of Oceans 2016-Shanghai. Shanghai: IEEE, 2016: 1–4.

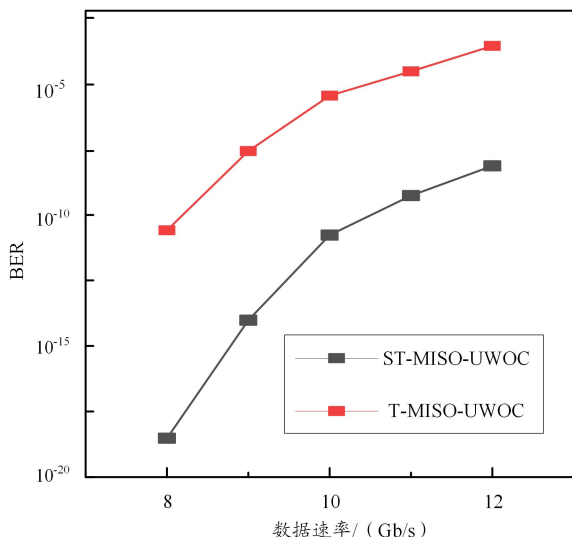


图 3 2 种系统模型 BER 随数据速率变化的曲线图

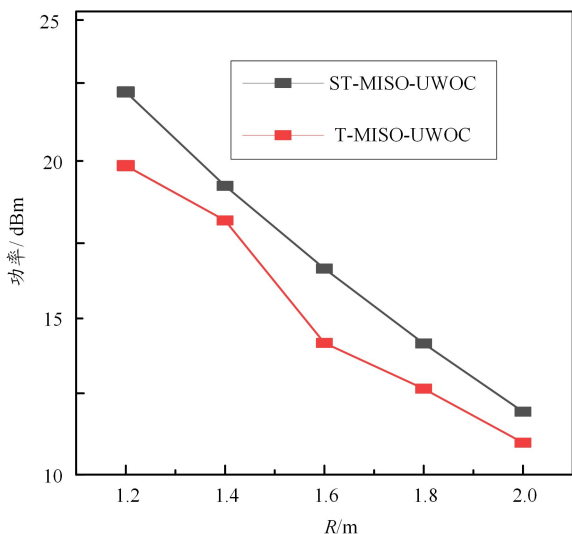


图 4 2 种系统模型接收光功率随距离 R 变化的曲线图

- [9] 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.
- [10] YUE P, HU J, YI X, et al. Wave optics simulation investigation of multiple-input and aperture-averaging for optical wave propagation in turbulent ocean[J]. *Optics Communications*, 2019, 452: 327–333.
- [11] CUI Z, YUE P, YI X, 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.
- [12] WADUGE W T, SEET B C, VOPEL K. Geometric implications of photodiode arrays on received power distribution in mobile underwater optical wireless communication[J]. *Sensors*, 2024, 24(11): 3490–3512.
- [13] ELFIKKY A, BOGHDADY A I, MUMTAZ S, et al. Underwater visible light communication: recent advancements and channel modeling[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2024, 56(10): 1617-1–1617-45.
- [14] REINHARDT C, KUGA Y, JARUWATANADILOK S, et al. Improving bit-error-rate performance of the free-space optical communications system with channel estimation based on radiative transfer theory[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(9): 1591–1598.
- [15] REINHARDT C N, JARUWATANADILOK S, KUGA Y, et al. Investigation of multilevel amplitude modulation for a dual-wavelength free-space optical communications system using realistic channel estimation and minimum mean-squared-error linear equalization[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(29): 5378–5389.
- [16] BURDAH S, SAMIJAYANI O N, SYAHRIAR A, et al. Performance analysis of Q factor optical communication in free space optics and single mode fiber[J]. *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2019, 6(3): 167–175.
- [17] ADHIKARY A, HOSSAIN M B, ZAMAN K T, et al. Performance analysis of Q-factor on wavelengths and bit rates using optical solitons with dispersion management[J]. *Journal of Optics*, 2020, 49: 533–542.