

引用本文:张林,王大帅,张鹏,等.水下无线光通信抗湍流调制技术[J].光通信技术,2024,48(6):11-15.

水下无线光通信抗湍流调制技术

张林¹,王大帅^{2*},张鹏²,杨珂琛¹,王乐¹,赵婷³

(1.长春理工大学 电子信息工程学院,长春 130022;

2.长春理工大学 光电工程学院,长春 130022;3.大陆汽车电子(长春)有限公司 净月分公司,长春 130000)

摘要:针对水下无线光通信中由于湍流影响导致的光强闪烁及接收端光功率抖动问题,提出了一种基于广义伽马分布(GGD)模型的水下无线光通信准相干通信方法。该方法通过调节光源电流来实现光的强度调制,并使用调制信号对正弦载波的频率进行调制。通过仿真分析,研究了不同强度的水下湍流对光强信号频率的影响,并验证了准相干通信方法在抵抗湍流方面的能力。仿真结果表明:该方法能够在不同的湍流强度条件下有效地抑制光功率的波动,显著降低误码率;在强湍流环境中,误码率可以降至 5.25×10^{-5} 。

关键词:光强闪烁;抗湍流;广义伽马分布;准相干通信方法;频率

中图分类号:TN91 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2024)06-0011-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.06.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Anti turbulence modulation technology for underwater wireless optical communication

ZHANG Lin¹, WANG Dashuai^{2*}, ZHANG Peng², YANG Kechen¹, WANG Le¹, ZHAO Ting³

(1. School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

3. Moonlake Plant, Continental Automotive Changchun Co., Ltd., Changchun 130000, China)

Abstract: A quasi coherent communication method for underwater wireless optical communication based on the generalized Gamma distribution (GGD) model is proposed to address the issues of light intensity flicker and power jitter at the receiving end caused by turbulence in underwater wireless optical communication. This method achieves intensity modulation of light by adjusting the current of the light source, and modulates the frequency of the sine wave carrier using the modulation signal. Through simulation analysis, the influence of different intensities of underwater turbulence on the frequency of light intensity signals is studied, and the ability of quasi coherent communication methods to resist turbulence is verified. The simulation results show that this method can effectively suppress the fluctuation of optical power and significantly reduce the bit error rate under different turbulence intensity conditions. In strong turbulent environments, the bit error rate can be reduced to 5.25×10^{-5} .

Key words: light intensity flicker, anti-turbulence, generalized Gamma distribution, quasi-coherent communication method, frequency

0 引言

水下无线光通信(UWOC)是当前研究的热点之一。

收稿日期:2024-01-18。

基金项目:吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20230837KJ)资助。

作者简介:张林(1997—),女,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向是水下无线光通信技术,包括大功率、高速率LED/LD驱动技术、调制技术、水下信道研究、编码技术研究。参与吉林省教育厅科学技术研究项目1项。

* **通信作者:**王大帅(1983—),男,副研究员,主要从事空间光通信技术方面的研究工作。



然而,当光束穿过水下的湍流时,其强度会发生闪烁现象,导致接收端信号强度出现剧烈波动,这对通信性能造成了显著影响。

在考虑 UWOC 中湍流带来的不利影响时,王阳等人^[1]基于对数正态分布,在不同湍流强度条件下,分析了光孤子、矩形及高斯脉冲光束的通信误码率(BER)。仿真结果显示,当信噪比为 5 dB 时,随着湍流强度的变化,光孤子脉冲的 BER 比高斯型和矩形脉冲的 BER 低至少 3 个数量级,这验证了光孤子脉冲在水下通信

张林,王大师,张鹏,等:水下无线光通信抗湍流调制技术

中的优势。陈航等人^[2]采用了轨道角动量(OAM)中的准艾里超几何高斯(QAHyGG)涡旋光束进行水下传输,利用光束的自聚焦特性来减轻湍流的影响。仿真结果显示,QAHyGG 涡旋光束在不同的信道条件下能够实现较高的接收功率和较低的串扰概率。UPPALA-PATI A 等人^[3]对采用 M 阶正交幅度调制(QAM)处理伽马-伽马分布湍流的 UWOC 系统进行了深入分析,该系统专门用于水下光学无线传感器网络。研究结果表明,当 BER 降至 10^{-4} 时,4QAM 相较于 16QAM 可以获得 3 dB 的平均信噪比增益,而相对于 64QAM,则能获得 7 dB 的增益。NATH N 等人^[4]基于开关键控(OOK)调制,结合单输入多输出(SIMO)空间分集技术,在 Matlab 中进行了仿真。研究发现,当指数广义伽马分布(GGD)中的参数 ω (温度、盐度波动与功率谱变化的比例)等于 1 时,在纯水中,若 BER 为 10^{-2} ,1×2 SIMO 系统相比于单输入单输出(SISO)系统的性能提升了 15 dB。LI X 等人^[5]在 Matlab 平台上,利用超声光通信领域中的单光子雪崩二极管信号累加技术,在 GGD 模型下,通过将闪烁指数设定为 0.31,成功实现了系统 BER 低至 7.5×10^{-7} 的优异性能。LI X 等人^[6]将偏振编码技术应用到了水下 OAM 光通信系统中。仿真结果显示,该技术能够在恶劣的海洋湍流环境中有效降低系统的 BER,并延长通信距离。ZHANG Q 等人^[7]提出了一种在多层级联 UWOC 海洋湍流通道中采用广义传输激光选择(GTLS)的垂直 Gamma-Gamma 系统。仿真结果表明,采用 GTLS 系统的性能优于未使用 GTLS 的系统。上述研究虽然都是基于湍流通道进行的,但目前这些成果仅通过仿真获得,尚未经过实验验证。

在实验研究方面,LIU W 等人^[8]研究了在水下弱湍流通道上使用 OOK 调制的 UWOC 系统。当系统传输距离达到 60 m 时,BER 约为 10^{-2} 。KONG M 等人^[9]提出了一种用于水下监控的 2K 实时数字视频系统,该系统采用了 458 nm 发光二极管作为光源。视频流经由一个包含视频编码和 OOK 调制的发送器电路处理后传输。此系统在多种环境条件下进行了测试,包括长为 1.5 m 的纯净水通道和气泡流速为 1.53 mL/s 的湍流纯净水通道,实现了 2.5 Mb/s 的通信速率,且接收到的数据 BER 仅为 5.31×10^{-4} 。然而,针对不同湍流环境中光强度信号的通信实现方式,现有的文献鲜有具体报道或深入分析。

因此,本文基于 GGD 模型,提出一种新的 UWOC 准相干通信方法。

1 UWOC 准相干通信方法

1.1 信道模型

OUBEI H M 等人^[10]提出使用 GGD 函数作为新的水下光信道描述函数。研究表明,GGD 在拟合实验测量数据方面均优于韦伯分布、伽马分布和指数分布。

GGD 可以表示由弱到强不同强度的湍流,其累计分布函数和概率密度函数(PDF)^[11]如式(1)、式(2)所示。

$$F(I; a, b, c) = \frac{\Gamma(a, (I/b)^c)}{\Gamma(a)} \quad (1)$$

$$f(I; a, b, c) = \frac{cI^{ac-1}}{b^{ac}} \times \frac{\exp\left(-\left(\frac{I}{b}\right)^c\right)}{\Gamma(a)} \quad (2)$$

其中, b 代表尺度参数, a 和 c 代表形状参数, $a, b, c > 0$ 。 t 代表一个积分变量,表示一个连续的实数值。 I 表示接收光强度, $I > 0$ 。伽马函数 Γ 如式(3)所示。

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (3)$$

GGD 可以通过特定参数的选择转换成多种常用的概率分布函数。例如,当形状参数 $a=1$ 时,GGD 退化为韦伯分布;而当 $a=1$ 且 $b=1$ 时,则进一步简化为指数分布。

闪烁指数 σ_I^2 是水下湍流中湍流光波动强度的度量,一般认为闪烁指数越大,波动越剧烈。根据文献[12],当 σ_I^2 小于 0.75 时为弱湍流, σ_I^2 等于 0.75~1 时为中等强度湍流, σ_I^2 大于 1 时为强湍流。 $\sigma_I^{(2)}$ 表示为

$$\sigma_I^{(2)} = \frac{E[I^2] - E^2[I]}{E^2[I]} \quad (4)$$

其中, $E[\cdot]$ 表示平均值。为了确保在湍流导致的衰落过程中不会出现能量损失或增益,通常对衰落系数进行归一化处理($E[I]=1$)。则 GGD 下的 $\sigma_I^{(2)}$ 表示为

$$\sigma_I^{(2)} = \frac{\Gamma(a)\Gamma\left(a+\frac{2}{c}\right)}{\Gamma^2\left(a+\frac{1}{c}\right)} - 1 \quad (5)$$

1.2 方法原理

在无线光通信中,采用相干通信技术可以有效提升系统对抗大气湍流的能力。然而,在 UWOC 领域,通常使用蓝绿光波段进行数据传输。由于目前尚缺乏适用于蓝绿光波段的调制器来实现光束的频率调制,因此水下光通信难以直接应用相干通信技术来减轻湍流的影响。

本文提出的准相干通信方法,首先通过调节光源(例如激光或 LED)的电流,实现对光强度的调制,从而形成一个正弦波载波。接着,利用调制信号对正弦载波的频率进行进一步调制,以实现信息的传输。在接收端,光电探测器首先将准相干调制的光信号转换为电信号,然后,通过锁相环或其它同步技术估计载波的频率,从而实现对准相干信号的解调。

2 仿真结果与分析

本文通过仿真或实验测量不同湍流强度下系统的 BER、强度等性能指标,利用 Matlab 对 GGD 通道模型进行仿真,以验证所提方法的有效性。GGD 的参数值如表 1 所示^[14-15]。

表 1 GGD 信道参数

a	b	c	σ_I^2
1.62	0.764 3	1.44	0.304 3(弱湍流)
1.621 3	1.017 3	0.844 4	0.871 1(中湍流)
1.395 1	0.630 2	0.84	1.024 2(强湍流)

不同参数选值下,GGD 表征的水下湍流 PDF 如图 1 所示。可以看出。随着 σ_I^2 的增加,其 PDF 的归一化强度也增加,并且达到峰值的时间有所提前,这表明 σ_I^2 越大,水下湍流强度就越强。

根据闪烁指数的计算结果,3 种不同的 PDF 表征了 3 种不同强度的水下湍流。这些结果将成为下一步研究光强信号在水下湍流中传输的基础。

本文通过研究光强信号在不同湍流强度下的频率特性变化后发现,在相同的湍流强度条件下,信号在通过 GGD 信道前后的光强信号频率特性保持一致。即使随着湍流强度的增加,信号通过湍流信道后的频率特性也未见改变。此外,本文还对 3 种不同湍

流强度的情况下,信号在进入和离开 GGD 信道时的频率特性进行了对比分析,结果显示这些频率特性几乎完全吻合。这说明水下湍流对光强信号的频率特性影响甚微。因此,可以在水下湍流环境中通过频率调制的方式来提高信号的抗湍流能力,从而改善系统的通信性能。

基于上述结论,本文采用频率调制实现水下抗湍流效果。首先,在 Matlab 中对信号进行了频率调制,并通过 GGD 信道传输后采用非相干解调方法恢复原始信号。在 GGD 信道下频率调制信号与未调制信号的强度变化对比情况如图 2 所示。可以看出,在相同的湍流强度下,未经频率调制的信号通过 GGD 信道后,其强度波动比经过频率调制的信号更明显,并且更容易出现失真现象。通过仿真计算可知,在弱湍流条件下,未调制信号的强度波动大约为 1.797 V,而调制后的信号强度波动则为 1.687 9 V;在中等湍流条件下,这 2 个值分别为 1.899 4 V 和 1.798 6 V;在强湍流条件下,它们分别是 1.999 6 V 和 2.0 V。因此,随着湍流强度的增强,无论是否经过调制,信号的强度波动都会变得更加剧烈。但是,频率调制信号的强度波动始终低于相应的未调制信号。

GGD 信道下的光强信号频率调制过程如图 3 所示。可以看出,已调信号会随着输入信号的特征频率而变化。通过对比输入信号和恢复信号可知,无论在哪个时间点,解调恢复后的信号都能与原始输入信号完美匹配。这表明经过频率调制的信号在非相干解调过程中,即使是在不同的湍流强度下,也能不失真地恢复出原始输入信号。这一结果进一步验证了频率调制技术在水下湍流环境中的适用性。因此,在 UWOC 系统中,可以通过使用频率调制来消除由水下湍流引起的接收端光功率抖动问题。

本文分析对比了水下湍流中,采用不同方法的

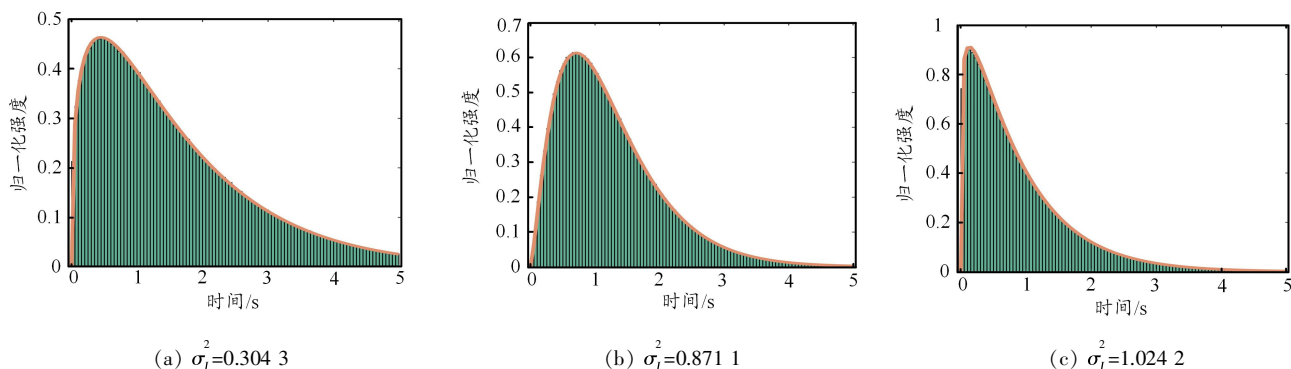


图 1 不同湍流强度时,GGD 表征的水下湍流 PDF

张林,王大帅,张鹏,等: 水下无线光通信抗湍流调制技术

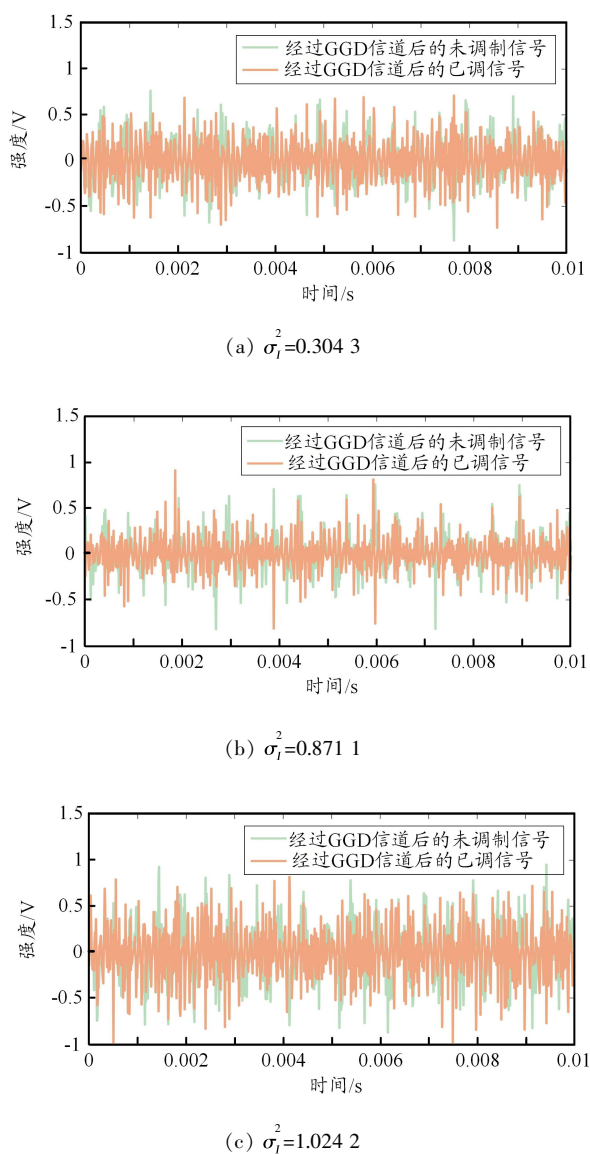


图2 不同湍流强度时,经GGD信道后的频率调制信号与未调制信号变化对比情况

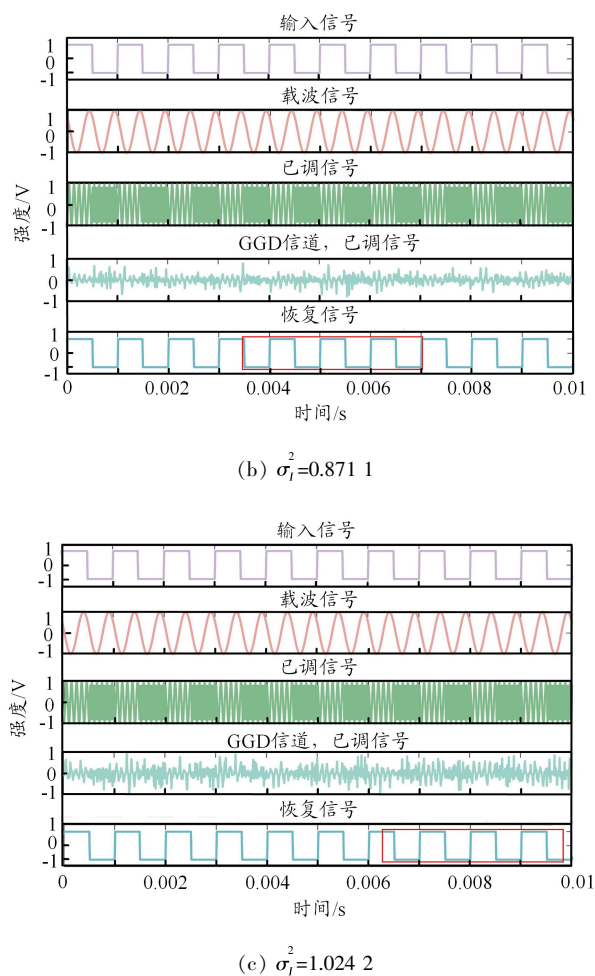
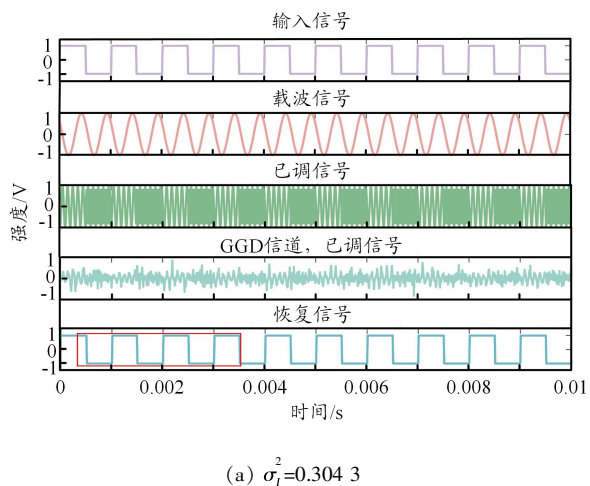


图3 不同湍流强度时, GGD 信道下的光强信号频率调制过程

BER 性能,如图 4 所示。可以看出,随着湍流强度的增加,2 种方法的 BER 随之增加;在同一种湍流强度下,准相干通信方法的 BER 远低于 FEC Limit (3.8×10^{-3}),而采用直接传输的方法时,超过一半的数据都会发生失真。在湍流强度为 1.024 2 的强湍流情况下,直接传输方法完全误码,而准相干通信方法的 BER 为 5.25×10^{-5} 。因此,在强湍流的水下环境中,采用准相干通信

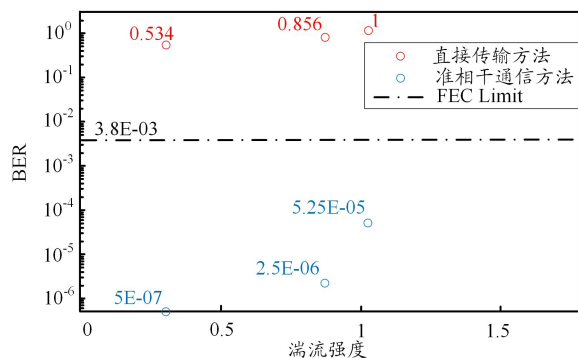


图4 水下湍流中,采用不同方法的 BER 性能

方法能够提升系统的通信性能,有助于改善信号在水下湍流条件下的传输效果。

3 结束语

为了解决水下湍流导致接收端光功率波动的问题,本文基于 GGD 模型探讨了不同强度水下湍流对光信号频率特性的影响,并提出了一种准相干通信方法。仿真分析结果表明,在各种湍流强度条件下,水下湍流对光信号的频率特性影响不大;而采用准相干通信技术后,能够确保原始信号的无失真重建。特别是在强湍流水下环境中,该方法展现出了极低的 BER (5.25×10^{-5}) 性能。这些仿真结果充分证明了提出的准相干通信方法在缓解信道湍流影响、应对信号强度变化方面的显著效果,凸显了其作为处理湍流信道中信号波动问题的有效策略的巨大潜力,尤其适用于对实时控制要求较高的水下应用场景。本研究为未来的实时水下操作与控制提供了重要的技术参考。

参考文献:

- [1] 王阳,张鹏,李晓燕,等. 海洋弱湍流条件下光孤子脉冲通信性能[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 192–199.
- [2] CHEN H, ZHANG P, HE S, et al. Average capacity of an underwater wireless communication link with the quasi-airy hypergeometric-Gaussian vortex beam based on a modified channel model[J]. Optics Express, 2023, 31(15): 24067–24084.
- [3] UPPALAPATI A, NAIK R P, KRISHNAN P. Analysis of M-QAM modulated underwater wireless optical communication system for reconfigurable UOWSNs employed in river meets ocean scenario[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 15244–15252.
- [4] NATH N, ANEES S. Performance analysis of SIMO-UWOC system[C]//IEEE. Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS). New Delhi: IEEE, 2020: 1–4.
- [5] LI X, TONG S, ZHOU Y, et al. BER performance of nonzero dead time SPAD-based UWOC with signal accumulation over generalized gamma turbulence channels[J]. Optics Communications, 2022, 520: 128516–128524.
- [6] LI X, SUN L, HUANG J, et al. Channel polarization scheme for ocean turbulence channels in underwater visible light communication[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(2): 341–353.
- [7] ZHANG Q, YUE D, XU X. Generalized transmit laser selection for vertical underwater wireless optical communications over Gamma-Gamma turbulence channels[J]. Optics Express, 2023, 31(23): 37943–37958.
- [8] LIU W, XU Z, YANG L. SIMO detection schemes for underwater optical wireless communication under turbulence[J]. Photonics Research, 2015, 3(3): 48–53.
- [9] KONG M, GUO Y, ALKHAZRAJI O, et al. Real-time optical-wireless video surveillance system for high visual-fidelity underwater monitoring[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(2): 1–9.
- [10] OUBEI H M, ZEDINI E, ELAFANDY R T, et al. Simple statistical channel model for weak temperature-induced turbulence in underwater wireless optical communication systems[J]. Optics Letters, 2017, 42(13): 2455–2458.
- [11] PARR V B, WEBSTER J T. A method for discriminating between failure density functions used in reliability predictions[J]. Technometrics, 1965, 7(1): 1–10.
- [12] KIASALEH K. Performance of APD-based, PPM free-space optical communication systems in atmospheric turbulence[J]. IEEE transactions on communications, 2005, 53(9): 1455–1461.
- [13] NARVÁ CASTAÑEDA E. Elliptical vortex beams through turbulent atmosphere[D]. Dayton: University of Dayton, 2020.
- [14] DAS S, RAHMAN Z, ZAFARUDDIN S M. Optical wireless transmissions over multi-layer underwater channels with generalized gamma fading [C]//IEEE. Proceedings of 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring). Helsinki: IEEE, 2022: 1–6.
- [15] LI X, TONG S, ZHOU Y, et al. BER performance of nonzero dead time SPAD-based UWOC with signal accumulation over generalized gamma turbulence channels[J]. Optics Communications, 2022, 520: 128516–128524.