

基于 Gamma-Gamma 湍流信道下的卷积码性能研究

史为铠, 韩朝霞, 马占红*

(宁夏大学 电子与电气工程学院, 银川 750021)

摘要: 为了研究不同码型的卷积码在水下湍流信道中的误码率(BER)性能, 采用接受-拒绝采样模拟湍流信道乘性干扰, 并选择二进制相移键控(BPSK)调制方式, 建立 Gamma-Gamma 湍流信道通信系统仿真模型。仿真结果表明: 在不同强度的湍流信道中, 采用卷积码编码均能提升系统的 BER 性能; 卷积码的码率越小, 系统 BER 性能提升越显著; 随着信噪比(SNR)增大, 记忆深度越长, 系统 BER 下降速度越快; 采用软译码比采用硬译码时增益至少提升 2.82 dB; 卷积码的解码不仅受当前信息的影响, 还与之前的码元信息有关。

关键词: 水下光通信; 卷积码; Gamma-Gamma 信道; 误码率

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)03-0079-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.03.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the performance of convolutional code based on Gamma-Gamma turbulent channel

SHI Weikai, HAN Zhaoxia, MA Zhanhong*

(School of Electronic and Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to investigate the bit error rate (BER) performance of convolutional codes with different code rates in underwater turbulent channels, this paper employs accept-reject sampling to simulate multiplicative interference in turbulent channels. Binary phase shift keying (BPSK) modulation is chosen, and a simulation model of a Gamma-Gamma turbulent channel communication system is established. The simulation results indicate that convolutional coding can improve the BER performance of the system in turbulent channels with different intensities. The smaller the code rate of convolutional code is, the more significant the improvement of system BER performance will be. As the signal-to-noise ratio (SNR) increases, the faster the system BER decreases when the memory depth is longer. Using soft decoding can improve the gain by at least 2.82 dB compared to using hard decoding. The decoding of convolutional codes is not only affected by the current information, but also related to the previous symbol information.

Key words: underwater wireless optical communication, convolutional code, Gamma-Gamma channel, bit error rate

0 引言

水下无线光通信(UWOC)具有容量大、速率高、功耗低和维护便利等优势, 已成为水下通信领域的研究热点之一^[1-3]。水下信号传输过程中经常受到湍流的干扰, 包括介质对光信号的吸收、散射和湍流扰动等因

素。这些因素可能引起光信号的光强闪烁和功率衰减^[4], 进而导致接收到的光信号严重失真, 通信系统的误码率(BER)升高。引入信道编码是一种有效提高通信系统 BER 性能的手段^[5], 通过信道编码和译码检错纠错能力, 达到降低系统 BER 的目的。卷积码作为一种具有检错和纠错能力的信道编码, 在通信领域中得到了广泛的应用。DHALI WAL S 等人^[6]对码率为 1/4、1/3、1/2、2/3 和记忆深度为 3~8 的卷积码在加性高斯白噪声(AWGN)信道中的 BER 性能进行了比较分析。SINGH P 等人^[7]研究了码率为 1/2 的卷积码在 Log-Normal 湍流模型下的性能。XU F 等人^[8]对记忆深度为 4、生成多项式为 (15, 17) 的卷积码, 在弱、强湍流信道下的 BER 等性能进行了研究。YANG L 等人^[9]研究了经卷积码编

收稿日期: 2023-08-30。

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(批准号: 2022AAC03050)资助; 宁夏重点研发项目(批准号: 2021BEB04040)资助。

作者简介: 史为铠(1999—), 男, 甘肃金昌人, 硕士研究生, 现就读于宁夏大学电子与电气工程学院电子信息专业, 主要研究方向为可见光通信、信号处理、信道编码、信道检测及均衡处理。

* 通信作者: 马占红(1992—), 博士, 准聘副教授, 主要研究方向为光通信技术及应用、半导体物理与器件。



码后的无线光通信系统,在通断键控(OOK)调制方式下提升 K 分布湍流信道的性能。然而,不同强度湍流环境对卷积码性能的影响,以及在不同湍流环境下应如何选取码型还有待研究。因此,本文以 Gamma-Gamma 模型为湍流信道,采用二进制相移键控(BPSK)调制方式,选取不同码率和记忆深度的卷积码,研究不同强度的水下光通信湍流环境对不同卷积码造成的 BER 性能影响。

1 建立 Gamma-Gamma 湍流信道仿真模型

常用的湍流信道模型如 Log-Normal 模型主要适用于湍流影响较弱的区域^[10-12];K 分布^[13-14]和负指数分布模型^[15]主要适用于链路长度为几千米、湍流影响较强的区域。而 Gamma-Gamma 模型能够很好地符合光强在弱、中和强起伏区域的统计特性^[16-17]。

由于乘性噪声的分布符合 Gamma-Gamma 概率密度函数 $p(I)$,因此,本文采用接受-拒绝采样获得乘性噪声^[18-23],具体过程如下:首先,选择一个辅助函数 $g(I)$ 和一个常数 M ,令其满足 $Mg(I) \geq p(I)$ 。然后,从 $g(I)$ 中进行采样,得到样本 I_1 ,再对区间 $[0, Mg(I_1)]$ 进行均匀采样,得到样本 q_1 ,如果满足 $q_1 \leq p(I_1)$,则接受此采样点;若不满足,则进行重新采样。采样完毕后得到一组分布近似满足 $p(I)$ 的随机数据,将此数据作为满足此 $p(I)$ 条件下的信道乘性噪声。

在湍流信道^[24]下,BPSK 调制、解调的平均 BER 可表示为

$$P_{\text{BPSK}} = \int_0^{\infty} P_{\text{e-BPSK}} p(I) dI \quad (1)$$

其中, $P_{\text{e-BPSK}}$ 为一般情况下 BPSK 调制、解调的平均 BER,其表达为

$$P_{\text{e-BPSK}} = \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{x}) \quad (2)$$

其中, x 为信道的信噪比(SNR)。 $p(I)$ 的表达式为

$$p(I) = \frac{2(AB)^{(A+B)/2}}{\Gamma(A)\Gamma(B)} I^{(A+B)/2-1} K_{A-B}(2\sqrt{ABI}) \quad (3)$$

其中, I 是归一化接收强度 ($I > 0$); A 和 B 分别是大、小尺度散射系数,它们都与所处湍流环境强度有关; $K_n(\cdot)$ 是第二类 n 阶修正 Bessel 函数, $\Gamma(\cdot)$ 是 Gamma 函数。

将式(2)、式(3)代入式(1)可得

$$P_{\text{BPSK}} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{S}) \frac{2(AB)^{(A+B)/2}}{\Gamma(A)\Gamma(B)} I^{(A+B)/2-1} K_{A-B}(2\sqrt{ABI}) dI \quad (4)$$

2 仿真及性能分析

本文仿真所采用的 UWOC 系统为单输入/单输出(SISO)系统,如图 1 所示。发射端包含信源产生模块、卷积码编码模块、BPSK 调制模块和光信号发射机;接收端则包括光信号接收机、BPSK 解调模块和维特比译码模块和接收信号模块。

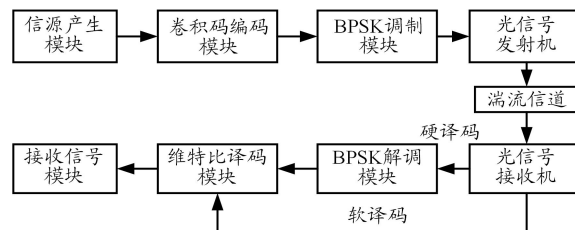


图 1 UWOC 系统示意图

在进行仿真时,信源产生模块首先生成原始信号,经卷积码编码模块进行信道编码,再通过 BPSK 调制模型进行调制,之后被送入光信号发射机进行发射。随后,这些信号在 Gamma-Gamma 湍流信道中传输,并被光信号接收机接收。接收到的信号被送入 BPSK 解调模块进行解调,再通过维特比译码模块进行译码并得到接收信号。最后,将接收信号与原始信号进行对比,以计算出信号 BER。

为满足不同湍流强度,本文选取不同对数强度方差 σ_I^2 下的概率密度分布作为弱、中和强湍流信道下噪声采样的依据。选取参数值如表 1 所示。

表 1 不同湍流类型参数值

湍流类型	σ_I^2	漩涡有效数 A	漩涡有效数 B
强湍流	5.6	4.7	1.2
中湍流	1.6	4.0	1.9
弱湍流	0.2	11.6	10.1

本文对(2,1,3)卷积码、(2,1,7)卷积码、(3,1,6)卷积码和(4,1,6)卷积码(下文简称(2,1,3)码、(2,1,7)码、(3,1,6)码和(4,1,6)码)进行了比较。未编码时,采用硬判决方式进行判决;编码后,则分别采用维特比软译码和维特比硬译码(下文分别简称软译码、硬译码)方法进行判决。仿真中使用的湍流信道为 Gamma-Gamma 湍流信道。仿真系统参数如表 2 所示。

2.1 卷积码编码性能

不同信道下未经编码的 BPSK 调制信号的 BER 如图 2 所示。可以看出,未经编码的 BPSK 调制信号在不同信道下的 BER 表现出显著差异。在 AWGN 信道中,当 SNR 为 10 dB 时,未经编码的调制信号的 BER 已降

表 2 系统参数

参数	数值/方式
波长/nm	850
大气折射率结构常数/ m^{-20}	10^{-15}
调制方式	BPSK
对数强度方差	0.2、1.6、5.6
码率	1/2、1/3、1/4
记忆深度	3、6、7

至 10^{-5} 以下。然而,在弱湍流信道中,系统需要 SNR 达到 20 dB 以上才能使 BER 降至 10^{-5} 以下。中湍流信道和强湍流信道对系统 BER 性能的影响更为严重。在中湍流信道中,SNR 需要达到 60 dB 才能使 BER 下降到 10^{-5} 以下;而在强湍流信道中,即使 SNR 达到 80 dB, BER 仍然未能下降到 10^{-5} 。由此可见,为了在中至强湍流信道下获得较低的 BER,所需的 SNR 会显著增加。

进一步分析图 2 可知,强湍流信道对系统的 BER 性能影响最为显著。强湍流信道经过卷积码编码后的

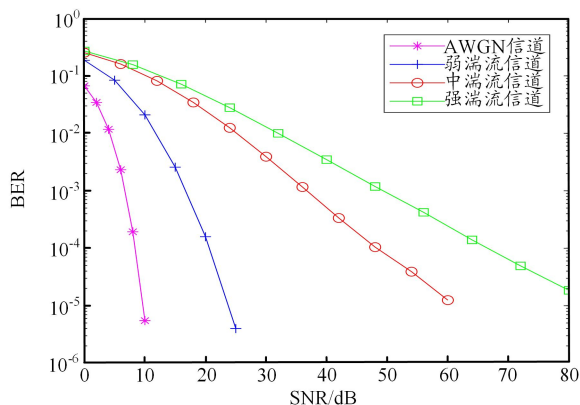


图 2 不同信道下未经编码的 BPSK 调制信号的 BER

系统 BER 如图 3 所示。可以看出,经过卷积码编码的 BPSK 调制信号在系统 BER 方面有了显著的降低,并且码率越小,性能提升越显著;随着 SNR 增大,记忆深度越长,系统 BER 下降速度越快。

2.2 卷积码在不同强度湍流信道下的 BER

在不同强度的湍流信道下,(2,1,3) 码的 BER 表现如图 4 所示。在硬译码方式下,当系统 BER 达到 10^{-4} 时,(2,1,3)码在弱湍流信道下的 SNR 为 13.52 dB。然而,在中湍流和强湍流信道下,卷积码在 BER 性能上的提升变得不明显。具体而言,在 SNR 为 10 dB 时,中湍流中的系统 BER 为 9.38×10^{-2} ,强湍流中的系统 BER 为 1.51×10^{-1} 。而当 SNR 提升至 25 dB 时,中湍流信道中的系统 BER 已经下降到 10^{-4} 以下,但在强湍流信道中则仍然大于 10^{-4} 。相比之下,在软译码方式下,当系统 BER 为 10^{-4} 时,(2,1,3)码在弱、中、强湍流信道中的 SNR 分别为 10.18、16.42、19.87 dB。这一结果表明,湍流信道的强度越强,若要达到相同的 BER,所

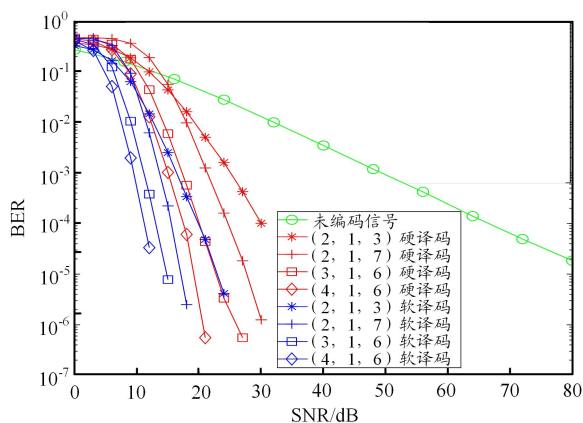
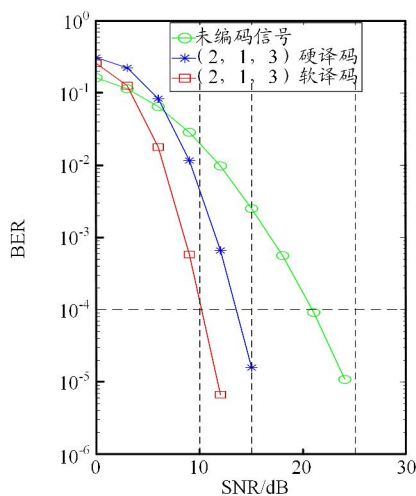
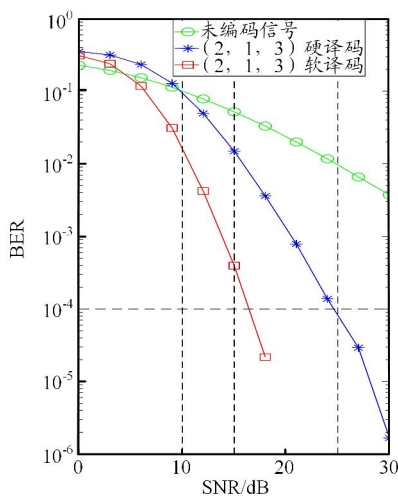


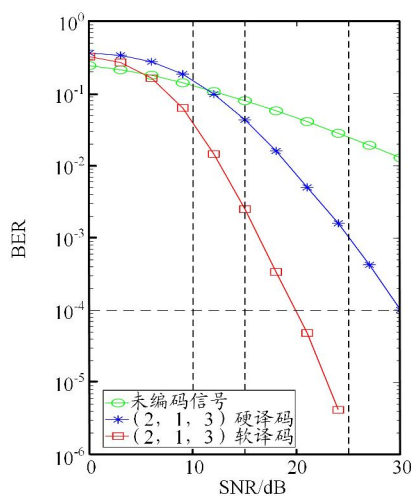
图 3 强湍流信道下卷积码编码后系统 BER



(a) 弱湍流信道



(b) 中湍流信道



(c) 强湍流信道

图 4 (2,1,3)码在不同强度湍流信道下的 BER

需要的 SNR 越大。同时,对于不同的译码方式,当 SNR 相同时,3 种湍流信道中,使用软译码方式的系统 BER 性能普遍优于使用硬译码方式的性能。

2.3 不同强度湍流信道中软、硬译码增益差的变化

不同强度湍流信道中软译码和硬译码增益差值的变化如图 5 所示。系统 BER 为 10^{-4} 时,软、硬译码间的增益差值如表 3 所示。可以看出,随着湍流信道强度的增强,系统在软、硬译码下的增益差值也随之变大;同时,对于码率越大的卷积码,其不同译码方式的增益差值越大。

2.4 不同卷积码编码后的系统 BER 变化

不同卷积码编码后的系统 BER 变化如图 6 所示。可以看出,SNR 较低时,在 3 种信道中,(2,1,3)码的 BER 性能均优于(2,1,7)码;在中湍流和强湍流信道

中,(2,1,3)码的 BER 性能甚至优于码率较小的(3,1,6)码和(4,1,6)码。这是因为卷积码的解码不仅受当前信息的影响,还与之前的码元信息有关,记忆深度越长,关联的码元数量越多。因此,在湍流信道中选择适当记忆深度的卷积码,不仅有助于在噪声较大时防止 BER 性能下降,还能在 SNR 较低时改善系统的 BER 性能。

表 3 不同下卷积码在 BER 为 10^{-4} 时软、硬译码间的增益差

σ_I^2	软、硬译码间的增益差值/dB			
	(2,1,3)码	(2,1,7)码	(3,1,6)码	(4,1,6)码
0.2	3.34	3.55	2.97	2.82
1.6	8.19	7.47	5.75	5.52
5.6	10.32	9.02	7.01	6.28

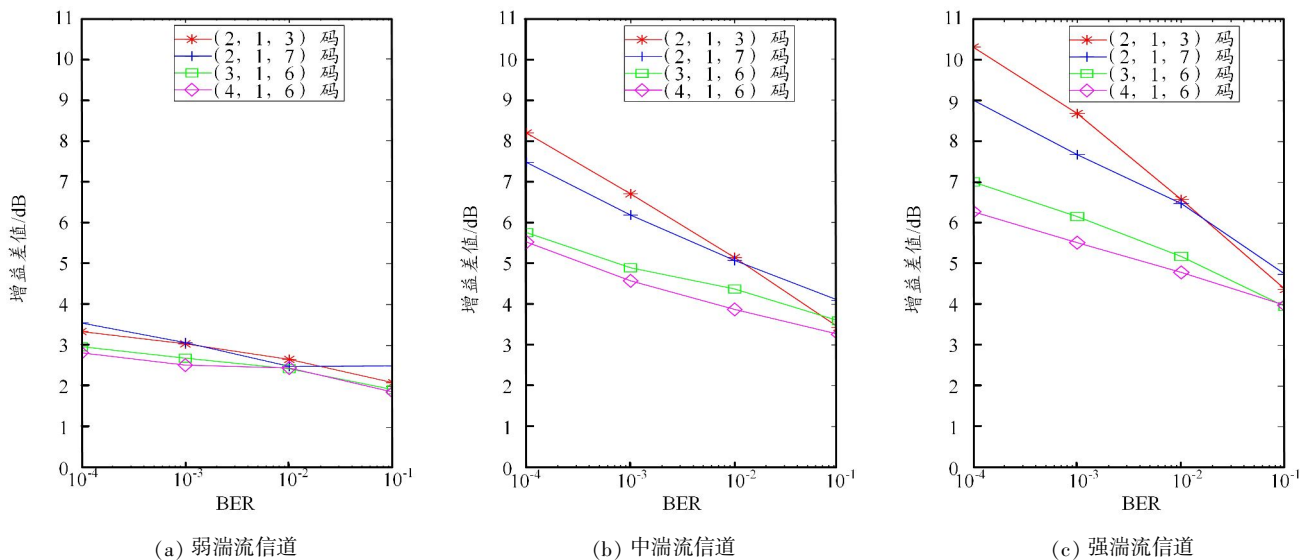


图 5 不同强度湍流信道中软译码和硬译码增益差的变化

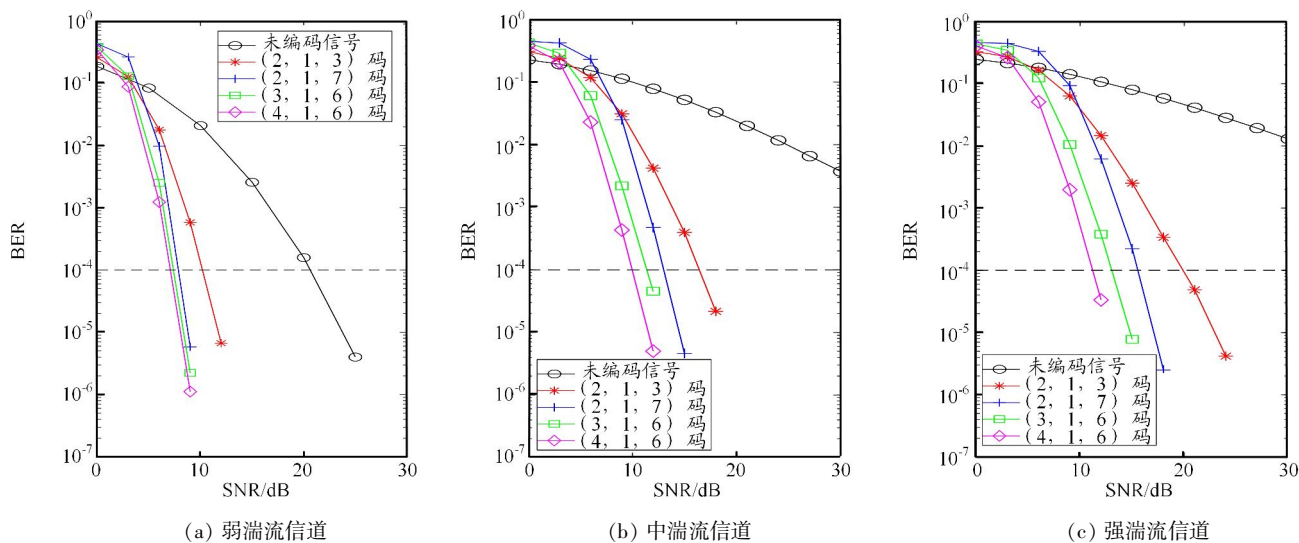


图 6 不同卷积码编码后的系统 BER 变化示意图

3 结束语

本文深入分析了不同码型的卷积码在 Gamma-Gamma 湍流信道(包括弱、中、强 3 种强度)中的性能表现。研究发现, 当使用卷积码对原始信号进行编码后, 能显著降低系统 BER。此外, 本文还对比了软译码和硬译码这 2 种译码方式下的系统 BER 性能。仿真结果显示, 在相同强度的湍流信道下, 软译码方式下的系统 BER 性能优于硬译码方式; 在选择软译码方式进行译码时, 采用低码率、记忆深度适当长的卷积码, 能够更显著地改善系统 BER 性能。

参考文献:

[1] ROMDHANE I, KADDOUM G. A reinforcement-learning-based beam adaptation for underwater optical wireless communications [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(20): 20270–20281.

[2] WANG K, SONG T, WANG Y, et al. Evolution of short-range optical wireless communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(4): 1019–1040.

[3] KAUSHAL H, KADDOUM G. Underwater optical wireless communication[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1518–1547.

[4] BAYKAL Y, ATA Y, GOKCE M C. Underwater turbulence, its effects on optical wireless communication and imaging: a review [J]. Electronics Newsweekly, 2022(6): 538–538.

[5] 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.

[6] DHALIWAL S, SINGH N, KAUR G. Performance analysis of convolutional code over different code rates and constraint length in wireless communication [C]//IEEE. Proceedings of 2017 International conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC). Pal-ladam: IEEE, 2017: 464–468.

[7] SINGH P, CHAITANYA K, DIXIT A, et al. Study of performance enhancement in underwater optical wireless communication system[C]//IEEE. Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems(ANTS). New Delhi: IEEE, 2020: 1–6.

[8] XU F, KHALIGHI A, CAUSSE P, et al. Channel coding and time-diversity for optical wireless links[J]. Optics Express, 2009, 17(2): 872–887.

[9] YANG L, CHENG J, HOLZMAN J F. Performance of convolutional coded OOK IM/DD systems over strong turbulence channels [C]//IEEE. Proceedings of 2013 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). San Diego: IEEE, 2013: 35–39.

[10] XU X, LI Y, HUANG P, et al. BER performance of UWOC with APD receiver in wide range oceanic turbulence [J]. IEEE Access, 2022, 10: 25203–25218.

[11] KARP S, GAGLIARDI R M, MORAN S E, et al. Optical channels: fibers, clouds, water, and the atmosphere [M]. New York: Springer Science & Business Media, 1988.

[12] JIANG H, QIU H, HE N, et al. Performance of spatial diversity DCO-OFDM in a weak turbulence underwater visible light communication channel[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(8): 2271–2277.

[13] TSIFTIS T A, SANDALIDIS H G, KARAGIANNIDIS G K, et al. Optical wireless links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(2): 951–957.

[14] ZHU M, HU S, YANG K, et al. GMSK demodulation combining 1D-CNN and bi-LSTM network over strong solar wind turbulence channel[J]. Radio Science, 2023, 58(1): e2022RS007438-1–e2022RS007438-15.

[15] POPOOLA W O, GHASSEMLOOY Z, AHMADI V. Performance of sub-carrier modulated free-space optical communication link in negative exponential atmospheric turbulence environment[J]. International Journal of Autonomous & Adaptive Communications Systems, 2017, 1(1): 342–355.

[16] NISTAZAKIS H E, TSIFTIS T A, TOMBRAS G S. Performance analysis of free-space optical communication systems over atmospheric turbulence channels[J]. IET Communications, 2009, 3(8): 1402–1409.

[17] ATA Y, KIASALEH K. Analysis of optical wireless communication links in turbulent underwater channels with wide range of water parameters [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(5): 6363–6374.

[18] ROBERT C P, CASELLA G, CASELLA G. Monte Carlo statistical methods[M]. New York: Springer, 1999.

[19] 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.

[20] JAMALI M V, MIRANI A, PARSAY A, et al. Statistical studies of fading in underwater wireless optical channels in the presence of air bubble, temperature, and salinity random variations[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(10): 4706–4723.

[21] LIU D, SIMEONE O. Wireless federated langevin monte carlo: repurposing channel noise for bayesian sampling and privacy [EB/OL]. [2023–08–30]. <https://arxiv.org/abs/2108.07644>.

[22] SHARIFZADEH M, AHMADIRAD F. Performance analysis of underwater wireless optical communication systems over a wide range of optical turbulence[J]. Optics Communications, 2018(3): 165–160.

[23] LI Y, LI M, POO Y, et al. Performance analysis of OOK, BPSK, QPSK modulation schemes in uplink of ground-to-satellite laser communication system under atmospheric fluctuation [J]. Optics Communications, 2014, 317: 57–61.

[24] POPOOLA W O, GHASSEMLOOY Z. BPSK subcarrier intensity modulated free-space optical communications in atmospheric turbulence[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(8): 967–973.