

水下无线光通信动态阈值判决技术研究及性能分析

王争辉¹, 高冠军^{1*}, 张家梁¹, 李哲²

(1. 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876; 2. 中国电子科技集团公司 第三十四研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对海洋湍流信道环境下固定阈值判决方案导致水下无线光通信系统性能恶化的问题, 提出了一种动态阈值判决方案。该方案基于水下湍流信道慢衰落特性, 在发送端将数据以帧为单位进行发送, 接收端则根据接收帧前导码的幅度每帧更新一次判决阈值。采用蒙特卡洛法和 Gamma-Gamma 信道模型对水下无线光通信系统进行仿真, 仿真结果表明: 在弱湍流信道环境下, 当系统误码率为 10^{-6} 时, 动态阈值判决方案比固定阈值判决方案的误码性能提升 5.4 dB; 在中、强湍流信道环境下, 动态阈值判决方案能够有效抑制误码率门限现象的产生。

关键词: 水下无线光通信; 动态阈值判决; 海洋湍流; Gamma-Gamma 信道模型

中图分类号: TN929 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)02-0007-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.02.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research and performance analysis of dynamic threshold decision technology in underwater wireless optical communication

WANG Zhenghui¹, GAO Guanjuan^{1*}, ZHANG Jialiang¹, LI Zhe²

(1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Aiming at the problem that the fixed threshold decision scheme leads to the deterioration of the performance of the underwater wireless optical communication system in the turbulent channel environment, a dynamic threshold decision scheme is proposed. Based on the slow fading characteristic of the underwater turbulent channel, the data is sent by frame at the sending end, and the decision threshold is updated every frame at the receiving end according to the amplitude of the leading code of the receiving frame. This paper uses the Monte Carlo method and the Gamma-Gamma turbulence channel model to simulate the underwater wireless optical communication system. The simulation results show that in the case of weak turbulence channel environment and when the system bit error rate is 10^{-6} , the dynamic threshold decision scheme improves the bit error performance by 5.4 dB compared with the fixed threshold decision scheme. In the case of medium and strong turbulence channel environment, the dynamic threshold decision scheme can effectively suppress the occurrence of bit error rate threshold phenomenon.

Key words: underwater wireless optical communication, dynamic threshold decision, ocean turbulence, Gamma-Gamma channel model

0 引言

随着人们对海洋资源开发的不断深入, 传统的声

收稿日期: 2023-12-12。

基金项目: 国家自然科学基金项目(62371064)资助; 北京市自然科学基金项目(4232050)资助; 北京邮电大学博士创新项目(CX2022213)资助。

作者简介: 王争辉(1998—), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 现就读于北京邮电大学电子工程学院电子科学与技术专业, 主要研究方向为水下可见光通信、信道编解码、时钟同步、FPGA 通信算法。

*** 通信作者:** 高冠军(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为光纤及水下无线光通信系统与网络。



学通信技术难以满足水下高速数据传输的需求。水下无线光通信技术^[1-3]的出现为解决这一难题提供了新的途径。凭借其高带宽、低时延、高安全性和丰富的频谱资源等优点, 这项技术已成为近年来学术研究的热点。目前, 该技术主要采用强度调制-直接检测(IM-DD)的方案。然而, 光信号在水下信道传输时会遭遇吸收、散射、湍流和噪声等多种不利因素的干扰, 这些因素会导致光信号功率的衰减和随机抖动, 进而产生严重的码型畸变。因此, IM-DD 中固定阈值判决的方法可能使接收机无法准确恢复原始信息, 进而严重影响通信性能^[4]。于是, 如何根据湍流强度自动调整判决阈

值成为提升水下无线光通信系统性能的重要研究方向。传统的基于导频序列辅助的自适应阈值技术需要在传输数据的同时传输单音导频来实时计算信道状态信息(CSI),该方案虽然有较好的误码性能,但需要复杂的滤波处理来抑制导频对数据的串扰,增加了接收机的设计复杂度,而且影响信道利用率。而基于最小均方误差滤波算法(LMS)、卡尔曼滤波算法的自适应阈值技术需要对接收信号进行实时处理以获取信号和湍流的统计特征^[5],通过最大似然估计方案得到符号的最优判决结果,该方案虽然能够有效抑制湍流噪声的影响,但计算复杂度高,在实时系统中难以实现。于是,本文基于水下湍流信道慢衰落特性^[6-9],针对采用IM-DD方案的水下无线光通信系统,提出一种动态阈值判决方案。该方案计算复杂度极低,在实时系统中实现简单,无需计算信道状态信息,而且帧头的插入引起的开销极小。

1 系统接收信号模型

本文采用非归零键控(OOK-NRZ)调制方案的单输入/单输出水下无线光通信系统作为研究模型。光脉冲在经过水下湍流信道传输并到达接收端,假设该水下湍流信道是一个具有乘性时变增益和加性高斯白噪声的离散无记忆信道。在信道平稳遍历的情况下,接收端的光电探测器单位面积上的接收光强被归一化为 I ,此时接收端的信号强度可以表示为

$$i_t = RI + I_b + n \quad (1)$$

其中, R 为光电探测器的转换效率, I_b 为环境光噪声; n 为光电探测器的电流噪声,其服从正态分布,即 $n \sim N(0, \delta^2)$, δ^2 为加性高斯白噪声的方差。

2 湍流信道下最佳判决阈值分析

近年来,为了精确研究湍流对水下无线光通信系统性能的影响,研究人员提出了多种水下湍流信道模型。其中,Log-Normal分布模型多用于对弱湍流信道进行建模,不能很好地表征中、强湍流下的信道状况,但其具有简单性,在水下湍流信道建模分析中得到广泛应用^[7]。Gamma-Gamma分布模型能较为准确地表征光强在弱、中、强湍流条件下的分布特性^[8],多用于产生不同强度的湍流噪声。因此,在忽略环境光噪声影响的情况下,本文先采用Log-Normal模型对湍流信道下的最佳判决阈值进行分析,再采用Gamma-Gamma分布模型来产生弱、中、强3种湍流噪声对水下无线光通信系统进行仿真。

在接收端已经完成码元同步的情况下,假设接收端已知由湍流引起信道衰落的分布特性,但不知道信道衰落的瞬时强度。当发送符号“0”时,接收信号只受到光电探测器加性高斯白噪声的影响。因此,接收符号的条件概率密度函数为

$$P(i_t/0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta^2}} \exp\left(-\frac{i_t^2}{2\delta^2}\right) \quad (2)$$

当发送符号“1”时,接收信号会受到光电探测器加性高斯白噪声和水下湍流信道的影响。此时,接收符号的条件概率密度函数为

$$P(i_t/1) = \int_0^\infty P(i_t/1, I) f(I) dI = \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta^2}} \exp\left(-\frac{(i_t - RI)^2}{2\delta^2}\right) f(I) dI \quad (3)$$

其中, $f(I)$ 是归一化接收强度 I 的概率密度函数,其表达式为

$$f(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta_l^2} I} \exp\left\{-\frac{[\ln(I/I_0) + 0.5\delta_l^2]^2}{2\delta_l^2}\right\} \quad (4)$$

其中, $I = I_0 \exp(I)$, I_0 为无湍流时接收端的信号光强,假定其均值为1; I 为湍流引起的对数振幅起伏,其服从正态分布,即 $I \sim N(-\delta_l^2/2, \delta_l^2)$, δ_l^2 为对数光强起伏方差。

在已知发送符号先验概率的情况下,如果发送符号“0”与发送符号“1”的概率相等,则由式(2)和式(3)得到似然比表达式^[9]为

$$\Lambda(r) = \frac{P(i_t/1)}{P(i_t/0)} = \int_0^\infty f(I) \exp\left[-\frac{(i_t - RI)^2}{2\delta^2} - \frac{i_t^2}{2\delta^2}\right] dI \quad (5)$$

式(5)中,将光电探测器的转换效率 R 归一化为1,令 $\Lambda(r)=1$,解出 i_t 即为最佳阈值。由于式(5)不能直接求解,本文采用计算机搜索的方案,得出了最佳接收阈值与对数光强起伏标准差的关系,如图1所示。可以

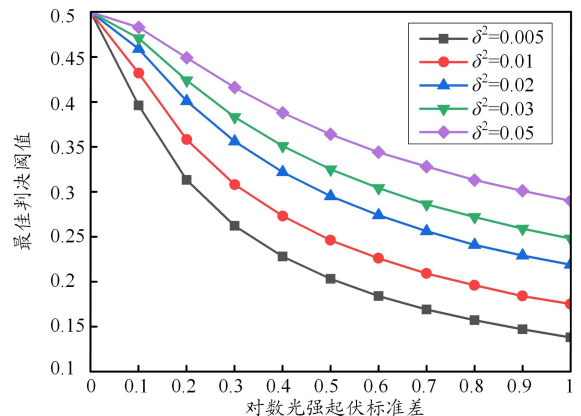


图1 最佳判决阈值与对数光强起伏标准差的关系

看出,对数光强起伏标准差为0时,最佳判决阈值为0.5,这与无湍流情况下开关键控(OOK)调制方案的最佳判决阈值一致;随着对数光强起伏标准差的逐步增大,判决阈值相应减小。

水下信道中存在湍流时,信道的衰减系数随着湍流强度的改变而改变,最佳判决阈值也将随机变化,若采用固定阈值判决将会导致大量符号的错误判决。因此,要想取得最佳的通信性能,判决阈值必须能够跟随湍流强度的变化进行动态调整,以减少错误判决符号的数量。

3 动态阈值判决方案

本文提出一种动态阈值判决方案。在发送端,先将数据进行分段,并为每段数据添加一段前导码序列,以形成一个完整的数据帧。每个数据帧的传输时间远小于信道的衰落时间,从而能够将每帧的判决阈值视为常数。每帧数据部分的判决阈值可根据前导码的幅度计算得出。固定阈值判决方案与动态阈值判决方案对比情况如图2所示。可以看出,当水下信道遇到湍流引起的深衰落时,接收信号幅度整体低于固定判决阈值,将会导致大量符号的错误判决,使通信性能严重恶化。若采用动态逐帧判决的方案,判决阈值

会根据前导码的幅度自动调整。当遇到湍流引起的深衰落时,能够减少符号的错误判决,有效缓解湍流带来的不利影响。

4 仿真模型介绍

本文搭建了水下无线光通信系统仿真模型如图3所示,通过仿真来分析水下湍流信道环境下不同判决方案对水下无线光通信系统的性能影响。发送端由伪随机二进制序列(PRBS)生成模块、组帧模块、OOK调制模块组成;接收端由OOK解调模块、帧解析模块、动态阈值判决模块和固定阈值判决模块组成;水下湍流信道由服从Gamma-Gamma分布的乘性噪声、加性高斯白噪声和基于海水吸收散射效应的固定衰减三部分组成。为了模拟不同强度的湍流信道,本文设定了弱湍流($\delta_l^2=0.05$)、中等湍流($\delta_l^2=1$)和强湍流($\delta_l^2=3$)3种情况,并采用接受拒绝采样法生成服从Gamma-Gamma分布的湍流噪声^[10]。

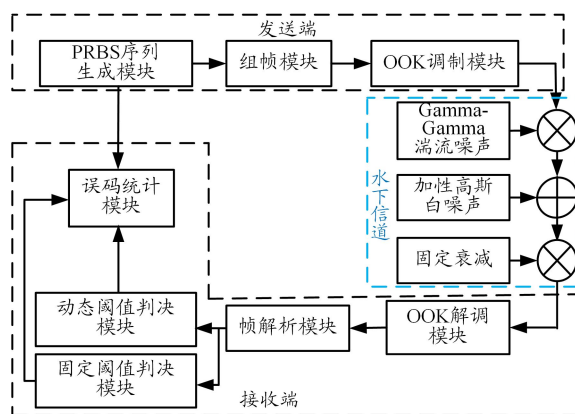


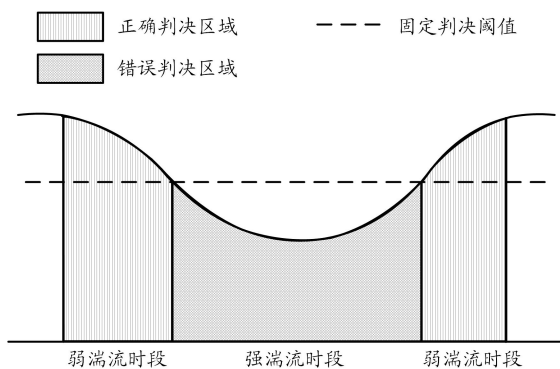
图3 水下无线光通信系统仿真模型

帧结构设计如图4所示。每帧前导码部分填充长度为16比特“0”和“1”交替的序列,数据部分填充长度为2047比特的PRBS11。动态阈值的计算方法为取16比特前导码的幅度平均值,例如,理想情况下,当接收到的前导码序列为“0101010101010101”时,其动态阈值为 $(0+1+0+1+0+1+0+1+0+1+0+1+0+1+0+1)/16=0.5$ 。

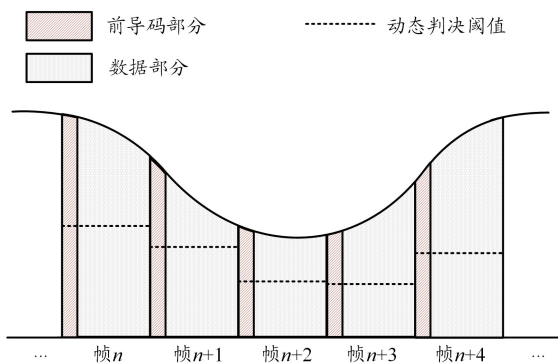


图4 帧结构设计

本文采用Matlab软件进行仿真,设置数据量为 10^9 比特,每传输 10^5 个比特更新一次湍流噪声。在仿真过程中,PRBS序列生成模块生成PRBS11,并在组



(a) 固定阈值判决方案



(b) 动态阈值判决方案

图2 2种阈值判决方案对比

王争辉,高冠军,张家梁,等:水下无线光通信动态阈值判决技术研究及性能分析

帧模块中加入前导码序列。经过 OOK 调制后,信号被输出到水下信道。水下信道中包含湍流噪声、加性高斯白噪声和固定衰减,这些因素影响了信号的质量。然后,对信号进行幅度归一化处理,再将处理后的信号送入帧解析模块,通过帧解析模块分离出每帧的前导码部分和数据部分。帧解析后的数据分为 2 路:一路将前导码和数据部分同时输入到动态阈值判决模块,该模块根据前导码幅度平均值计算出动态阈值并进行判决;另一路将数据部分输入到固定阈值判决模块进行固定阈值判决。最后,误码统计模块分别统计出 2 种判决方案的误码率。

5 仿真结果及分析

本文采用蒙特卡洛法对大量比特的传输进行仿真,分别统计出动态阈值判决方案与固定阈值判决方案的误码率,并与加性高斯白噪声信道下 OOK 的理论误码率做对比,得出弱湍流、中等湍流、强湍流下的误码性能曲线分别如图 5、图 6、图 7 所示。

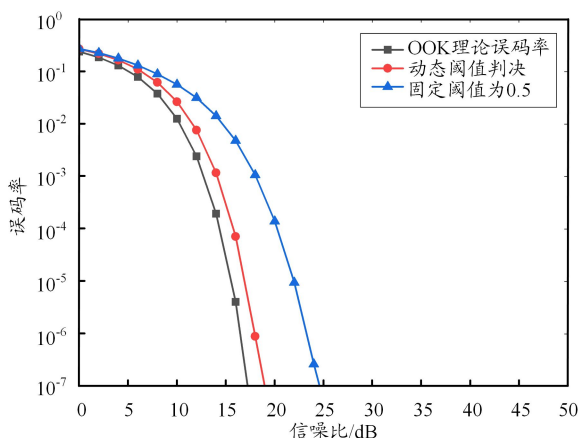


图 5 弱湍流信道下不同判决方案误码率性能对比

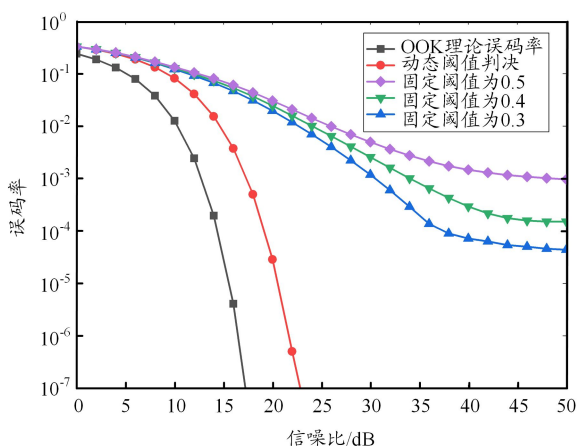


图 6 中等湍流信道下不同判决方案误码率性能对比

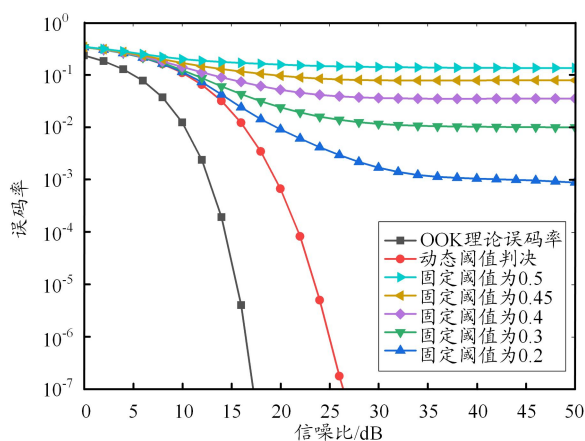


图 7 强湍流信道下不同判决方案误码率性能对比

由图 5 可知,在弱湍流条件下,当判决阈值设为 0.5、信噪比大于 23 dB 时,固定阈值判决方案的误码率低于 10^{-6} ,这是由于湍流引起的光强起伏较小,对“1”码的幅度衰落较弱。当误码率为 10^{-6} 时,固定阈值判决方案与 OOK 理论误码率之间的信噪比差异约为 7 dB,这是由于湍流造成的随机误码影响了固定阈值判决方案的性能;动态阈值判决方案与 OOK 理论误码率极为接近,仅有约 1.6 dB 的信噪比差异。因此,与固定阈值判决方案相比,动态阈值判决方案在信噪比性能上有了 5.4 dB 的提升。

由图 6 可知,在中等湍流条件下,随着信噪比的增加,固定阈值判决方案的误码率下降缓慢,当下调固定阈值到 0.3 时,误码率仍大于 10^{-4} ;而当信噪比大于 35 dB 时,误码率不随信噪比的增加而下降,出现误码率门限现象。此时,湍流对光信号的传输会造成较大的影响,严重削弱“1”码的幅度。因此,在这种情况下采用固定阈值判决方案会导致大量符号的错误判决。当信噪比低于 10 dB 时,动态阈值判决方案与固定阈值判决方案的信噪比性能几乎一致。但随着信噪比的增加,动态阈值判决方案的误码率下降显著,没有出现误码率门限现象。当误码率为 10^{-6} 时,动态阈值判决方案的信噪比仅为 22 dB,与 OOK 理论误码率之间仅约有 5.3 dB 的信噪比性能差异。

由图 7 可知,在强湍流条件下,当固定阈值为 0.5 时,固定阈值判决方案的误码率大于 10^{-1} ,系统不能正常工作。通过不断下调判决阈值,误码率下降极为有限。当固定阈值为 0.2 时,误码率仍大于 10^{-3} ,而且在信噪比大于 20 dB 时出现误码率门限现象。与固定阈值判决方案相比,动态阈值判决方案性能优势明显。当信噪比大于 15 dB 时,随着信噪比的增加动态阈值判决方案能快速取得极低的误码率。当误码率为 10^{-6}

时,信噪比仅为 25 dB,这是由于动态阈值判决方案每帧都会更新判决阈值,对信道湍流的变化进行跟踪,从而减少符号的错误判决;此时,动态阈值判决方案与 OOK 理论误码率之间仅有约 8.6 dB 的信噪比性能差异。

6 结束语

本文分析了水下湍流信道环境下 OOK 调制方案的最佳判决阈值与湍流强度的关系,根据水下湍流信道慢衰落的本质,提出了一种动态阈值判决方案。该方案以帧为单位传输数据,并每帧更新一次判决阈值。仿真了在弱、中、强 3 种湍流信道环境下动态阈值判决方案与固定阈值判决方案的误码性能。仿真结果表明:在弱湍流信道环境下,当误码率为 10^{-6} 时,动态阈值判决方案的信噪比性能相比固定阈值判决方案高出 5.4 dB;在中、强湍流信道环境下,随着信噪比的增加,采用固定阈值判决方案会产生误码率门限现象,而动态阈值判决方案则能有效提升水下无线光通信系统的信噪比性能,抑制误码率门限的产生。本文所提方案具有计算复杂度低、易于在实时通信系统中实现的特点,在水下无线光通信系统中有重要的工程应用价值。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] ALI M F, JAYAKODY D N K, LI Y. Recent trends in underwater visible light communication (UVLC) systems[J]. IEEE Access, 2022, 10: 22169–22225.

[4] ALIPOUR A, MIR A. On the performance of blue-green waves propagation through underwater optical wireless communication system[J]. Photonic Network Communications, 2018, 36: 309–315.

[5] 梁静远,陈明惠,王惠琴,等. 无线光通信自适应阈值检测技术研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7): 1–16.

[6] 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.

[7] SHARIFZADEH M, AHMADIRAD M. Performance analysis of underwater wireless optical communication systems over a wide range of optical turbulence[J]. Optics Communications, 2018, 427: 609–616.

[8] 贺锋涛,王妮,张建磊,等. 各向异性海洋湍流对外差式 DPSK 无线光通信系统的性能研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58 (19): 109–117.

[9] ZHU X, KAHN J M. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels [J]. IEEE Transactions on communications, 2002, 50(8): 1293–1300.

[10] NGUYEN N, OKTEN G. The acceptance-rejection method for low-discrepancy sequences [J]. Monte Carlo Methods and Applications, 2016, 22 (2): 133–148.