

## 激光与光电子学进展

## 基于极化码的铅直水下可见光通信纠错编码

林旭城<sup>1,2</sup>, 方俊彬<sup>1,2\*</sup>, 陈哲<sup>1,2</sup><sup>1</sup>暨南大学理工学院光电工程系, 广东 广州 510632;<sup>2</sup>广东省可见光通信工程技术研究中心, 广东 广州 510632

**摘要** 基于发光二极管的水下可见光通信技术是一种照明通信两用的水下无线通信方式,有效解决了水声通信时延大、带宽小、能耗大等诸多缺点。由于海水中各种介质对光的传播造成衰减,降低了接收信噪比,影响通信质量。同时,海水铅直方向介质质量浓度随深度增加而变化,导致光传播吸收和散射系数不是恒定的,影响到纠错编码的参数设置。本文在 Matlab 平台上使用蒙特卡罗法对海水信道进行了建模仿真,并根据仿真信噪比设计并提出了一种基于极化码的纠错编码方案,以调整编码参数,保证不同信道环境下数据传输的可靠性。仿真结果表明,对于不同的接收信噪比,所提方案都能够调节编码码率以实现无误码传输。因此,所提方案能够根据实际的信道环境来调整编码参数,保证了通信过程的可靠性。

**关键词** 大气光学与海洋光学; 水下可见光通信; 信道建模; 蒙特卡罗法; 极化码; 纠错编码

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2101002

## Error-Correcting Coding for Vertical Underwater Visible Light Communication Based on Polar Codes

Lin Xucheng<sup>1,2</sup>, Fang Junbin<sup>1,2\*</sup>, Chen Zhe<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Optoelectronic Engineering, College of Science and Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China;

<sup>2</sup>Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center on Visible Light Communication, Guangzhou 510632, Guangdong, China

**Abstract** Underwater visible light communication (UVLC) technology based on a light-emitting diode is a type of underwater wireless communication approach that simultaneously realizes the functions of illumination and communication. UVLC can effectively solve many disadvantages of underwater acoustic communication, such as large delay, small bandwidth, and high energy consumption. However, it reduces the signal-to-noise ratio (SNR) of the receiving plane due to the attenuation of light propagation caused via various media in seawater, degrading the communication quality of the system. Additionally, the concentration of the underwater medium changes as the depth varies, causing the change in the light propagation absorption and scattering coefficient, which affects the parameter setting of the error-correcting coding. In this paper, we use the Monte Carlo approach to implement vertical UVLC channel modeling by operating on the Matlab simulation platform to obtain SNR that contributes to the design of an error-correcting coding scheme based on the polar codes, ensuring that the data transmission is reliable at different channel conditions by adjusting coding parameters. The simulation result shows that the proposed scheme can achieve error-free transmission at different SNRs by adjusting the code rate. Therefore, the proposed scheme can ensure the reliability of the UVLC system by adjusting the coding parameters obtained from the actual channel environment.

**Key words** atmospheric optics and ocean optics; underwater visible light communication; channel modeling; Monte Carlo approach; polar codes; error correcting coding

## 1 引言

水下可见光通信(UVLC)技术能够解决有线通信

技术便捷性差以及成本高的问题; UVLC相比红外等无线光通信有更长的通信距离;同时,UVLC也解决了水声通信和无线电磁波通信传输速率小的问题,能够

收稿日期: 2021-09-07; 修回日期: 2021-10-04; 录用日期: 2021-10-27

通信作者: junbinfang@foxmail.com

支持短距离内高速实时通信的应用场景<sup>[1-2]</sup>。然而,水下噪声以及衰减系数较大,造成接收信噪比较低,降低了通信性能。同时,海水铅直方向衰减系数的变化也改变了信噪比的分布,影响纠错编码方案的性能。因此,必须根据实际信道环境设计一种纠错编码方案以解决信道误码的问题。

早期的 UVLC 信道建模主要是对水平信道的研究,认为海水中的介质质量浓度是不变的<sup>[3-5]</sup>。这些研究并未考虑铅直方向介质质量浓度变化对光传播的影响,这种模型只适用于小范围内的水平方向信道。一些学者也对海水铅直信道建模进行了研究,2013年,Johnson等<sup>[6]</sup>给出不同水域海水铅直方向的叶绿素质量浓度的高斯分布模型以及其他物质质量浓度与叶绿素质量浓度的关系,可计算海水中任意深度的衰减系数。2018年,Anous等<sup>[7]</sup>将海水等效分成相同厚度的  $N$  层,推导出路径损耗表达式以及接收功率表达式。Elamassie等<sup>[8]</sup>将水下铅直信道等效为多级衰落信道,每一级用不相同的 Gamma 函数表示。尽管如此,这些学者没有研究铅直信道与水平信道接收光信号分布的差别,未能提供进一步的参考。

现有针对可见光通信(VLC)技术纠错编码方案的研究主要是针对于室内 VLC 场景。常见的 VLC 信道编码方案有里德-所罗门(RS)码、低密度奇偶校验(LDPC)码、Turbo码等。这些传统编码方案普遍需要行程限制(RLL)码、凿孔、加扰等额外的辅助技术实现闪烁抑制与调光功能,导致系统结构复杂并且传输效率低等问题<sup>[9-11]</sup>。文献[12-14]研究了极化码在 VLC 信道编码的应用,并且取得了良好的纠错性能,所需要的编码辅助也更少<sup>[12-14]</sup>。同时,文献[14]提出的无闪烁极化码调光方案,在不需要其他编码辅助情况下能够抑制闪烁,具有较高的传输效率以及编码增益<sup>[14]</sup>。

综上所述,本文提出一种适用于开关键控(OOK)调制的铅直式 UVLC 极化码纠错编码方案。分析了水下信道的光传播特性,采用相函数描述光子在水下的传播行为,并且利用蒙特卡罗法在 Matlab 软件平台上模拟光子的传播路径,得出铅直信道与水平信道的仿真结果。根据信道仿真结果可以计算出信噪比的分布以得到信道误码率,从而调整编码参数,在不同的信道环境下也能够实现 UVLC 的无误码传输。本文所提方案能够灵活调节光源在海水的深度以及通信距离,参数设置简单方便,满足实际通信场景的需求。仿真结果表明,该方案能够满足铅直式 UVLC 场景可靠性的需求。

## 2 铅直式 UVLC 仿真方案

### 2.1 铅直式水下信道仿真

#### 2.1.1 水下信道光传播特性

海水中光信号的衰减主要是各种物质对光的吸收和散射造成的,本节将详细叙述光信号传播的衰减模

型。光在海水中受到的吸收作用主要由水分子、叶绿素以及黄色物质(富里酸和腐殖酸)等造成的,海水中不同深度光的吸收系数<sup>[6]</sup>为

$$a(\lambda, z) = a_w(\lambda) + a_f^0 C_f(z) \exp(-k_f \lambda) + a_h^0 C_h(z) \exp(-k_h \lambda) + a_c^0(\lambda, z) (C_c(z))^{0.602}, \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为光的波长; $a_w$ 为纯净水的吸收系数; $a_f^0$ 为富里酸的特殊吸收系数; $a_h^0$ 为腐殖酸特殊吸收系数; $a_c^0$ 为叶绿素的特殊吸收系数; $C_f(z)$ 为富里酸质量浓度; $C_h(z)$ 为腐殖酸质量浓度; $C_c(z)$ 为叶绿素质量浓度; $k_f$ 为富里酸的指数系数; $k_h$ 为腐殖酸的指数系数<sup>[6]</sup>。上述参数的具体表达式可参考文献[6]。叶绿素质量浓度在海水铅直方向上呈高斯分布,其表达式<sup>[15]</sup>为

$$C_c(z) = B_0 + S \times z + \frac{h}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(z - z_{\max})^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2)$$

式中: $B_0$ 为海水表面的叶绿素质量浓度; $S$ 为叶绿素质量浓度的垂直梯度; $h$ 为总叶绿素; $z_{\max}$ 为叶绿素质量浓度峰值对应的海水深度; $\sigma$ 为叶绿素质量浓度表达式的标准差。

光在海水中传播也会与海水中的微粒发生碰撞而改变其直线轨迹,该过程称为散射作用。光在海水中主要受到海水、叶绿素、小颗粒以及大颗粒物的散射作用,海水不同深度光的散射系数<sup>[6]</sup>为

$$b(\lambda, z) = b_w(\lambda) + b_c(\lambda, z) + b_s^0(\lambda) C_s(z) + b_l^0(\lambda) C_l(z), \quad (3)$$

式中: $b_w(\lambda)$ 为纯海水散射系数; $b_c(\lambda, z)$ 为叶绿素散射系数; $b_s^0(\lambda)$ 为小颗粒物散射系数; $b_l^0(\lambda)$ 为大颗粒物散射系数; $C_s(z)$ 为小颗粒物质量浓度; $C_l(z)$ 为大颗粒物质量浓度。

需要说明的是式(1)~(3)带“ $\lambda$ ”的表示该参数与波长有关系,带“ $z$ ”的则表示该参数受海水深度的影响。同时, $C_f(z)$ 、 $C_h(z)$ 、 $C_s(z)$ 以及 $C_l(z)$ 的质量浓度与叶绿素质量浓度 $C_c(z)$ 相关,其表达式分别为

$$C_f(z) = 1.74098 C_c(z) \exp[0.12327 C_c(z)], \quad (4)$$

$$C_h(z) = 0.19334 C_c(z) \exp[0.12343 C_c(z)], \quad (5)$$

$$C_s(z) = 0.01739 C_c(z) \exp[0.11631 C_c(z)], \quad (6)$$

$$C_l(z) = 0.76284 C_c(z) \exp[0.03092 C_c(z)], \quad (7)$$

其他参数的具体表达式可参考文献[6]。海水的衰减作用是吸收作用和散射作用的总和,所以铅直方向海水的衰减系数表达式为

$$c(\lambda, z) = a(\lambda, z) + b(\lambda, z). \quad (8)$$

#### 2.1.2 水下铅直信道蒙特卡罗法仿真流程

如图1所示,本文考虑的是单输入单输出 UVLC 系统(SISO-UVLC),这种视线传输(LOS)链路的接收光功率比较高。图中,发射器为 LED 光源,接收器位于光源正下方,光源位于海平面之下, $d_0$ 为 LED 到

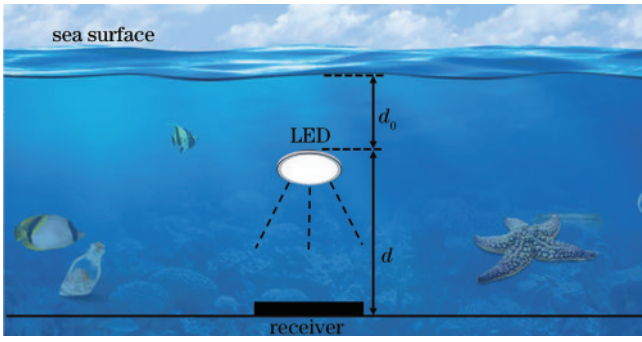


图1 UVLC的LOS链路  
Fig. 1 LOS link of UVLC

海水表面的距离,  $d$  为通信距离。该系统具有较大的灵活性, 灯源的深度可调节, 在实际应用场景中, 整个系统一般也是浸没于海水中。

在水下信道建模方法中, 比尔定律(Beer's law)不考虑散射光被接收的情况, 只适用于纯海水环境; 矢量辐射模型和光束扩展模型则因计算量巨大, 导致仿真时间太长; 本文采用的蒙特卡罗方法基于相函数来描述光子的散射路径, 计算简单, 可仿真参数多<sup>[2]</sup>。蒙特卡罗方法一般采用大样本进行数值统计实验, 样本数

越多, 结果更准确, 但需要的时间也更长。水下信道仿真原理如下: 将光束等价于若干光子组成, 依次追踪各个光子的运动轨迹, 最后统计所有光子的运动情况计算出光功率等分布情况<sup>[2]</sup>。光子运动轨迹如图2所示。

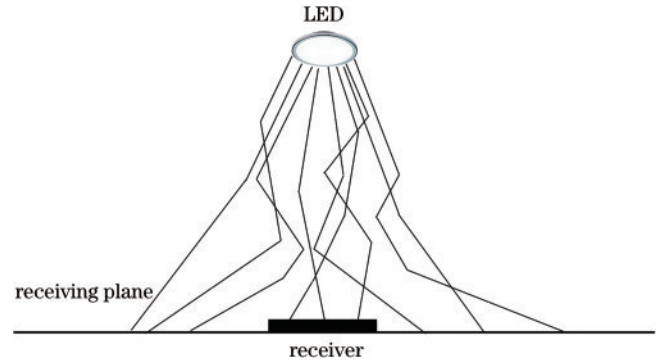


图2 光子运动轨迹示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of photon motion trail

蒙特卡罗法仿真的流程图如图3所示, 首先确定系统的初始参数; 然后模拟光子运动轨迹; 更新光子的参数并判断其是否达到接收平面, 若未达到则继续运动; 待所有光子运动结束后仿真结束。

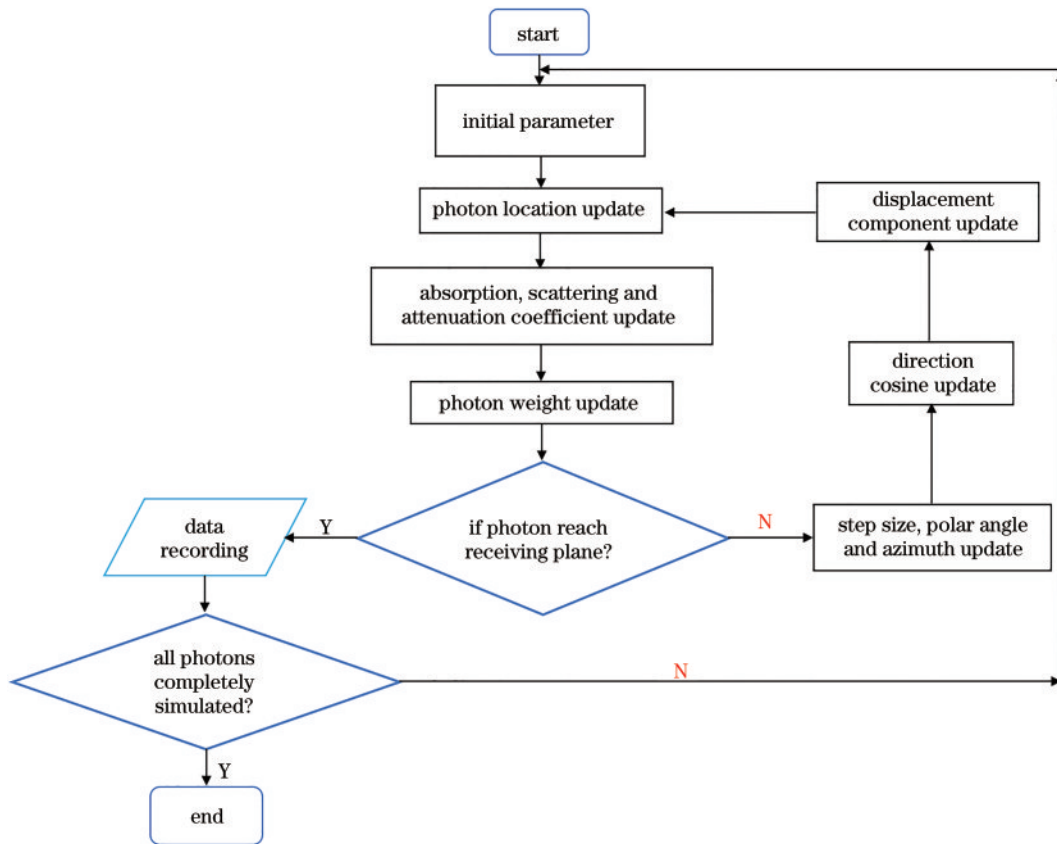


图3 蒙特卡罗法仿真水下光信道流程图  
Fig. 3 Flow chart of underwater channel simulation using Monte Carlo approach

具体的仿真流程如下:

- 1) 发射光子, 设定初始参数  
参与仿真的光子样本数为 50 万个, 通信链路距离

范围为 0~15 m, 光源位置分别为 0、5、10 m。定义海水铅直方向为  $z$  轴, 接收器(接收平面中心)位于发射器的正下方。初始衰减系数由光源的深度确定, 光子

初始位置为光源所在深度,光子初始方向余弦值  $(u_x, u_y, u_z)$  分别为  $\cos(\theta_x)$ 、 $\cos(\theta_y)$ 、 $\cos(\theta_z)$ <sup>[2]</sup>。若将直角坐标转换为极坐标,则初始方向可表示为  $\sin\theta^* \cos\phi$ 、 $\sin\theta^* \sin\phi$  和  $\cos\theta$ ,其中  $\phi$  为方位角。

### 2) 更新光子运动步长

光子每次运动时会随机运动一段距离,称为光子运动步长,用  $r$  来表示,如下所示:

$$r = \frac{\ln \xi}{c}, \quad (9)$$

式中:  $\xi$  为随机数;  $c$  为衰减系数。

### 3) 光子位置和能量权重的更新

光子每次运动后其空间位置也发生了变化,需要更新其位置。光子的三维位移分量  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  和  $\Delta z$  分别为  $r^*u_x$ 、 $r^*u_y$  和  $r^*u_z$ 。光子运动前后的权重关系式为:

$W_{\text{post}} = W_{\text{pre}} \times \omega$ ,  $W_{\text{post}}$ 、 $W_{\text{pre}}$  以及  $\omega$  ( $\omega = \frac{b}{c}$ ) 分别为散射后权重、散射前权重以及散射反照率<sup>[2]</sup>。

### 4) 更新光子运动方向

光子第 2 次及以后的运动也需要更新运动方向,方位角  $\phi$  为  $[0, 2\pi]$  内的任意一个值,极角  $\theta$  由相函数确定,本文用到的相函数为 Henyey-Greenstein (HG) 函数<sup>[2]</sup>。当极角以及方位角确定后,便可计算下一次运动的新运动方向  $(u_x^*, u_y^*, u_z^*)$ ,极角和新运动方向公式可参考文献<sup>[2]</sup>和<sup>[16]</sup>。

### 5) 光子追踪终止与接收统计

如果光子到达接收平面,则应停止对该光子的追踪,无论其是否被探测器接收。同时默认穿过接收平面的光子到达接收平面,被反射回来的光子能量权重可忽略不计。所有光子仿真后的能量权重和为  $\Sigma W_{\text{post}}$ ,其与初始光子能量权重和的比值即为仿真前后光功率的比值。

## 2.2 铅直式 UVLC 纠错编码方案

### 2.2.1 极化码原理

土耳其毕尔肯大学 Arkan 教授<sup>[17]</sup>于 2009 年提出了一种新型的信道编码方法,也就是极化码 (polar codes)。极化码是第一个被理论证明能够达到香农极限的线性分组码构造方法。极化码编码与译码复杂度较低,并且纠错性能良好。

极化码的原理是通过信道极化操作使得其中一部分比特信道的信道容量趋向于 1 (误码率趋于 0),而剩下的比特信道的信道容量趋向于 0 (误码率趋于 0.5)。信道极化是对一个给定的二进制对称离散无记忆信道 (B-DMC) 进行独立复制,然后根据递归原理再映射成全新的  $N$  个合并信道,即为  $\{W_N^{(i)}; 1 \leq i \leq N\}$ <sup>[17]</sup>。信道极化分为信道合并和信道分裂两个过程。信道合并通过递归方式对  $N$  个独立的信道  $W$  进行合并得到一个新的向量信道  $W^N: X^N \rightarrow Y^N$ ,其中  $N = 2^n$ ,  $n \geq 0$ 。第 1 级 ( $n=1$ ) 递归操作是对 2 个  $W^1$  进行联合,从而得到一

个二维向量信道  $W_2: X^2 \rightarrow Y^2$ ,  $W_2$  的转移概率<sup>[17-18]</sup>为  $W_2(y_1, y_2 | u_1, u_2) = W(y_1 | u_1 \oplus u_2) W(y_2 | u_2)$ 。 (10)

信道分裂是信道合并的逆过程,即将  $W_N$  拆分成  $N$  个信道误码率不同的比特坐标信道 (coordinate channels),即  $W_N^{(i)}: X \rightarrow Y^N \times X^{i-1}$ ,  $1 \leq i \leq N$ ,其信道转移概率<sup>[17]</sup>为

$$W_N^{(i)}(y_1^N, u_1^{i-1} | u_i) = \sum_{u_{i+1}^N \in X^{N-i}} \frac{1}{2^{N-i}} W_N(y_1^N | u_1^N), \quad (11)$$

式中,  $W_N^{(i)}$  的输入和输出分别为  $u_i$  和  $(y_1^N, u_1^{i-1})$ ,而  $W_N^{(i)}(y_1^N, u_1^{i-1} | u_i)$  表示  $u_i$  必须由  $y_1^N$  以及计算出来的  $u_1^{i-1}$  共同确定得到。极化码的具体编码和译码规则可参考文献<sup>[17]</sup>和<sup>[18]</sup>。

对称容量 (symmetric capacity) 和巴氏参数 (Bhattacharyya parameter) 是 B-DMC 中两个重要的参数,其表达式<sup>[17-18]</sup>分别为

$$I(W) = \sum_{y \in Y} \sum_{x \in X} \frac{1}{2} W(y|x) \log \left[ \frac{W(y|x)}{\frac{1}{2} W(y|0) + \frac{1}{2} W(y|1)} \right], \quad (12)$$

$$Z(W) = \sum_{y \in Y} \sqrt{W(y|0)W(y|1)}, \quad (13)$$

式中:  $I(W)$  是信道  $W$  在等概率输入时实现可靠传输的最大速率;  $Z(W)$  则是信道  $W$  在只传输一次 0 或 1 时的最大似然 (ML) 判决错误概率的上限,用来度量信道的可靠性。

经过信道极化后,不同比特信道的巴氏参数为

$$Z(W_N^{(i)}) = \sum_{y_1^N \in Y^N} \sum_{u_1^{i-1} \in X^{i-1}} \sqrt{W_N^{(i)}(y_1^N, u_1^{i-1} | 0) W_N^{(i)}(y_1^N, u_1^{i-1} | 1)}. \quad (14)$$

定义比特信道集合  $A$  和  $A^c$  分别为集合  $\{1, \dots, N\}$  的  $K$  个比特与  $N-K$  个比特子集,若对于任意的  $i \in A, j \in A^c$  都有  $Z(W_N^{(i)}) \leq Z(W_N^{(j)})$ ,则称  $(N, K, A, u_{A^c})$  为信道  $W$  对应的极化码构造过程。其中,集合  $A$  对应的  $K$  个比特信道用来传输信息比特,  $A^c$  则用来传输休眠比特<sup>[17]</sup>。定义极化码的误块率 (block error probability) 为  $P_e(N, K, A, u_{A^c})$ ,采用连续抵消 (SC) 译码算法对应的误块率表达式为

$$P_e(N, K, A, u_{A^c}) \triangleq \sum_{u_{A^c} \in X^{N-K}} \frac{1}{2^K} \sum_{y_1^N \in Y^N, u_i(y_1^N) \neq u_i^*} W_N(y_1^N | u_1^N), \quad (15)$$

其上界由  $K$  以及信道转移概率决定,对于全部可选的  $K$  可得平均误块率  $P_e(N, K, A)$  为<sup>[17]</sup>

$$P_e(N, K, A) \triangleq \sum_{u_{A^c} \in X^{N-K}} \frac{1}{2^{N-K}} P_e(N, K, A, u_{A^c}), \quad (16)$$

由于存在编码结构组合  $(N, K, A)$  满足下面的不等式关系:

$$P_e(N, K, A) \leq \sum_{i \in A} Z(W_N^{(i)}) = 2^{-N^\beta}, \quad (17)$$

式中,  $\beta$  为目标误码率即可认为接近无误码的值。结合信道转移概率、目标误码率以及码长则可推导出  $K$ , 从而得到编码码率  $R(R=K/N)$ 。具体的公式推演过程以及描述可参考文献 [17]。

### 2.2.2 基于极化码的纠错编码方案设计

根据信道仿真得到的信噪比可计算出 OOK 调制模式对应的信道误码率<sup>[19]</sup>为

$$P_{\text{chn}} = Q(\sqrt{\gamma}) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\right), \quad (18)$$

式中:  $P_{\text{chn}}$  为信道误码率;  $\gamma$  为信噪比;  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  为互补误差函数。

根据信道误码率便可得到信道转移概率为  $1 - P_{\text{chn}}$ , 然后结合式 (14) 计算出信道极化后不同比特信道的巴氏参数, 将其从小到大进行累加直至第  $K+1$  个巴氏参数的和  $\sum_1^{K+1} Z(W_N^{(i)}) > P_e(N, K, A)$  为止, 可得无误码传输的编码码率  $(R=K/N)$ , 即满足式 (17) 的最

大  $K$  值。在编码时, 巴氏参数趋向于 0 的比特信道优先用于传输待发送的信息 (信息比特), 巴氏参数介于 0 和 1 之间的比特信道则根据式 (17) 的判断条件选取可用来传输信息比特的比特信道, 而剩下的比特信道将全部用来传输休眠比特 (不包含任何信息)。极化码编码结构如图 4 所示。



图 4 极化码编码结构

Fig. 4 Polar codes-based coding structure

本节给出了  $P_{\text{chn}}$  为 0.02 和 0.1 的巴氏参数分布图, 如图 5 所示。与图 5(a) 相比,  $P_{\text{chn}}$  为 0.1 时, 巴氏参数趋于 0 的比特信道减少, 介于 0 和 1 之间以及趋于 1 的比特信道数量增加, 满足阈值条件的可选择比特信道减少很多; 由于码长  $N$  通常是固定的, 由式 (14)~(17) 可知信道误码率增加将导致  $K$  减小, 从而降低编码码率, 影响通信速率。

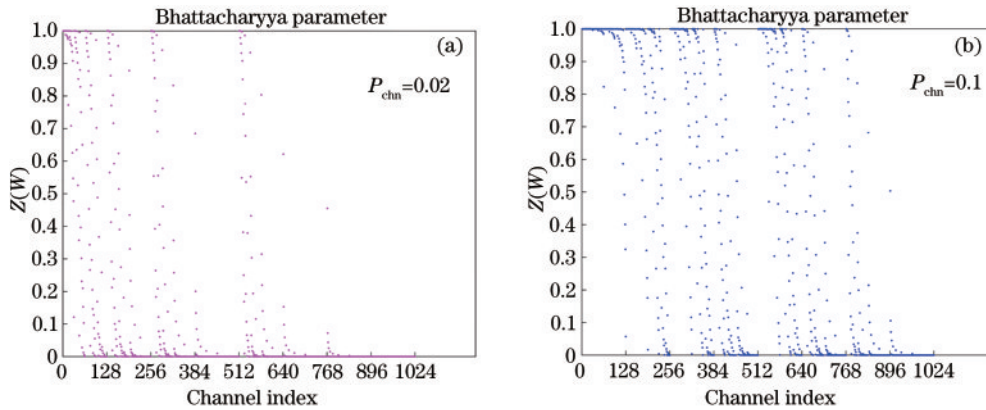


图 5 信道极化后不同比特信道巴氏参数分布图

Fig. 5 Distribution of different Bhattacharyya parameters for channel polarization

基于此, 本文提出了一种适用于 OOK 调制的铅直式 UVLC 极化码纠错编码方案。该编码结构如图 6 所示, 编码器的输入是  $K$  bits 的数据序列  $m$ , 经过编码器进行极化编码后生成长度为  $N$  bits 的编码序列  $x$ , 然后

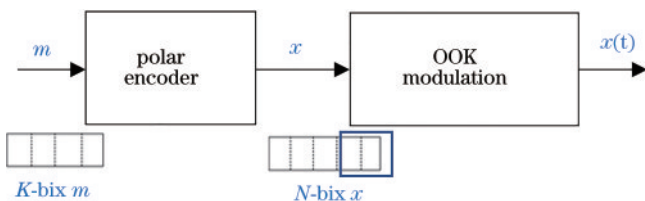


图 6 极化码纠错编码方案框架

Fig. 6 Structure of proposed polar codes-based error correcting coding scheme

再经过调制器进行调制后便可进行数据发送。本文所提方案也不需要其他的辅助编码技术, 就能够有效降低通信系统的硬件复杂度。对于不同参数的信道环境, 需要的纠错能力要求不同, 极化码编码方案能够根据信道误码率而选择适当的编码码率以保证无误码传输。

## 3 仿真结果与分析

### 3.1 信道仿真结果与分析

图 7 为海水中铅直方向叶绿素质量浓度的分布示例图, 初始质量浓度值为  $3 \text{ mg/m}^3$ , 当海水深度大于 7 m 时, 叶绿素质量浓度急剧上升, 在深度为 10 m 时质量浓度达到峰值, 之后质量浓度快速下降, 在 15 m 时

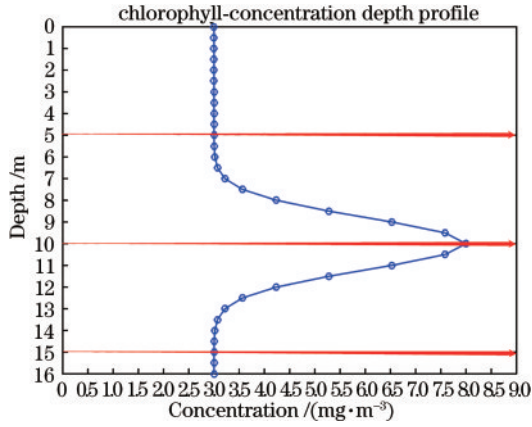


图7 海水铅直信道叶绿素质量浓度分布图

Fig. 7 Distribution of chlorophyll concentration in vertical channel of seawater

质量浓度降至  $3 \text{ mg/m}^3$ 。根据海水叶绿素质量浓度分布特性将铅直方向分成 3 个深度区间： $0\sim 5 \text{ m}$ 、 $5\sim 10 \text{ m}$ 、 $10\sim 15 \text{ m}$ 。不同的深度区间，对应的仿真光功率也将有所区别。由式(4)~(7)可知，其他 4 种物质的质量浓度可由叶绿素质量浓度计算得到，所以只需确定叶绿素质量浓度值，则可确定海水其他介质的质量浓度。为了方便描述，在本节仅用叶绿素质量浓度值来表示介质质量浓度。

本文仿真所用绿素质量浓度为  $1\sim 10 \text{ mg/m}^3$ ，我国近海以及河口区域的叶绿素质量浓度一般在该区间内<sup>[20]</sup>。仿真中部分固定参数设置如下：接收器有效接收面积为  $25 \text{ cm}^2$ ，系统有效光功率为  $4 \text{ W}$ ，通信距离为  $5 \text{ m}$ ，光源最大发射角度为  $40^\circ$ ；叶绿素质量浓度梯度  $S$  可忽略不计；纠错编码方案采用的码长为  $N=1024 \text{ bit}$ ，测试帧数为 10000 帧。

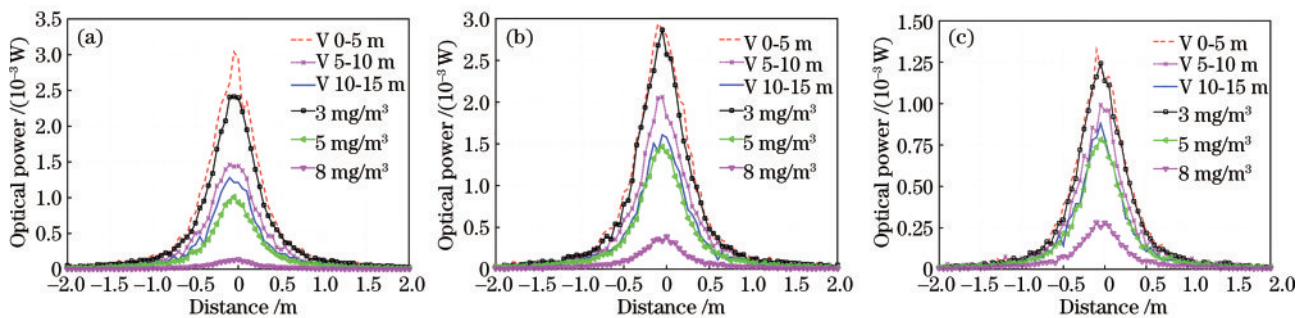


图8 不同波长下，铅直信道与水平信道仿真光功率对比 [ $B_0=3 \text{ mg/m}^3$ ,  $C_{\text{chl}}(z_{\text{max}})=8 \text{ mg/m}^3$ ]。 (a) 500 nm; (b) 550 nm; (c) 600 nm

Fig. 8 Comparison of optical power between vertical channel and horizontal channel at different wavelengths [ $B_0=3 \text{ mg/m}^3$ ,  $C_{\text{chl}}(z_{\text{max}})=8 \text{ mg/m}^3$ ]. (a) 500 nm; (b) 550 nm; (c) 600 nm

图 9 是峰值质量浓度为  $5 \text{ mg/m}^3$  的光功率仿真结果对比，可以看出  $0\sim 5 \text{ m}$  铅直信道的光功率分布和  $3 \text{ mg/m}^3$  水平信道的仿真结果接近； $5\sim 10 \text{ m}$  与  $10\sim 15 \text{ m}$  铅直信道的光功率分布基本一致，这两个区间的功率分别为  $1.7 \times 10^{-3} \text{ W}$  (500 nm) 和  $1.1 \times 10^{-3} \text{ W}$  (600 nm)，约为  $3 \text{ mg/m}^3$  水平信道仿真光功率的 75%。

表 1 为铅直方向叶绿素质量浓度仿真的参数，其中， $B_0$  为海水表面叶绿素质量浓度的值， $S$  为叶绿素质量浓度的梯度值， $h$  为总叶绿素， $z_{\text{max}}$  为质量浓度峰值对应的深度， $C_{\text{chl}}(z_{\text{max}})$  为叶绿素质量浓度峰值。两组质量浓度参数主要是峰值质量浓度不同，分别为  $8 \text{ mg/m}^3$  和  $5 \text{ mg/m}^3$ 。

表1 铅直信道仿真各参数值

Table 1 Parameter values for vertical channel simulation

$B_0 / (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	$h / (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	$z_{\text{max}} / \text{m}$	$C_{\text{chl}}(z_{\text{max}}) / \text{m}$
3	15	10	8
3	15	10	5

本文分别测试了 500、550、600 nm 这 3 种波长对应的接收端光信号分布情况，并将铅直信道的仿真光功率与不同质量浓度的水平信道仿真结果进行对比。其中，图 8~11 中横坐标表示与接收平面中心之间的距离；“V 0-5 m”表示铅直信道以及通信区间为  $0\sim 5 \text{ m}$ ；“ $3 \text{ mg/m}^3$ ”则表示叶绿素质量浓度为  $3 \text{ mg/m}^3$  以及通信距离为  $5 \text{ m}$  的水平直信道；其他的图例解释可参照上述描述。

从图 8 可以看出：距离为  $0\sim 0.75 \text{ m}$  时，光功率急剧下降。波长相同时，随着质量浓度增加，水平信道的仿真光功率逐渐减小。500、550 nm 两种波长对应的光功率值相差不大，600 nm 波长的仿真光功率值最小，为其他波长仿真光功率值的 50% 左右。 $0\sim 5 \text{ m}$  铅直信道光功率分布情况和  $3 \text{ mg/m}^3$  水平信道的仿真结果几乎一致； $5\sim 10 \text{ m}$  以及  $10\sim 15 \text{ m}$  铅直信道光功率分布结果与  $5 \text{ mg/m}^3$  水平信道的仿真结果较为接近，为  $3 \text{ mg/m}^3$  水平信道仿真光功率的 50%。

由于第 2 组整体叶绿素质量浓度较小，其仿真测试得到的光信号的损耗也较小，所以  $5\sim 10 \text{ m}$  和  $10\sim 15 \text{ m}$  这两个区间的仿真光功率比第一组大。

### 3.2 编码结果与分析

本节测试了  $10\sim 15 \text{ m}$  铅直信道与  $3 \text{ mg/m}^3$  水平信道在 500 nm 与 600 nm 这两个波长对应的信道误码率

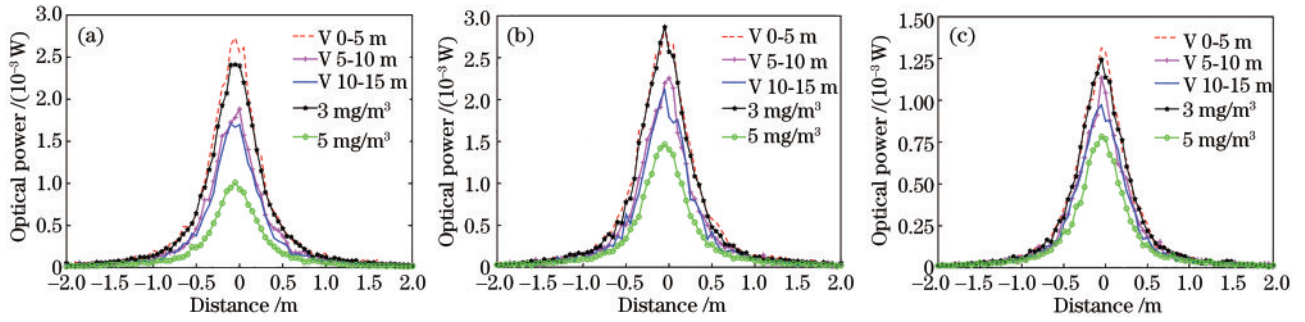


图 9 不同波长下,铅直信道与水平信道仿真光功率对比 $[B_0=3 \text{ mg/m}^3, C_{\text{chl}}(z_{\text{max}})=5 \text{ mg/m}^3]$ 。(a) 500 nm; (b) 550 nm; (c) 600 nm

Fig. 9 Comparison of optical power between vertical channel and horizontal channel at different wavelengths

$[B_0=3 \text{ mg/m}^3, C_{\text{chl}}(z_{\text{max}})=5 \text{ mg/m}^3]$ . (a) 500 nm; (b) 550 nm; (c) 600 nm

以及能够达到的传输效率(传输效率为编码码率 × 100%)。图 10 是叶绿素峰值质量浓度为  $8 \text{ mg/m}^3$  对应的信道误码率与编码码率分布图。可以看出,距离超过 0.5 m 时,信道误码率快速上升;铅直信道对应的信道误码率明显大于水平信道;波长 600 nm 对应的信道误码率上升的趋势更明显。由于铅直信道的信道误码率较

大,两种波长中,铅直信道对应的平均传输效率较低,约为水平信道的 70%;无论是铅直或者水平信道,波长为 500 nm 对应的传输效率比 600 nm 对应的传输效率提高 0.2~0.35 倍不等。从本质上看,正是由于铅直信道的衰减更严重,降低了信噪比,导致信道误码率较高,最终表现为编码码率(传输效率)明显低于水平信道。

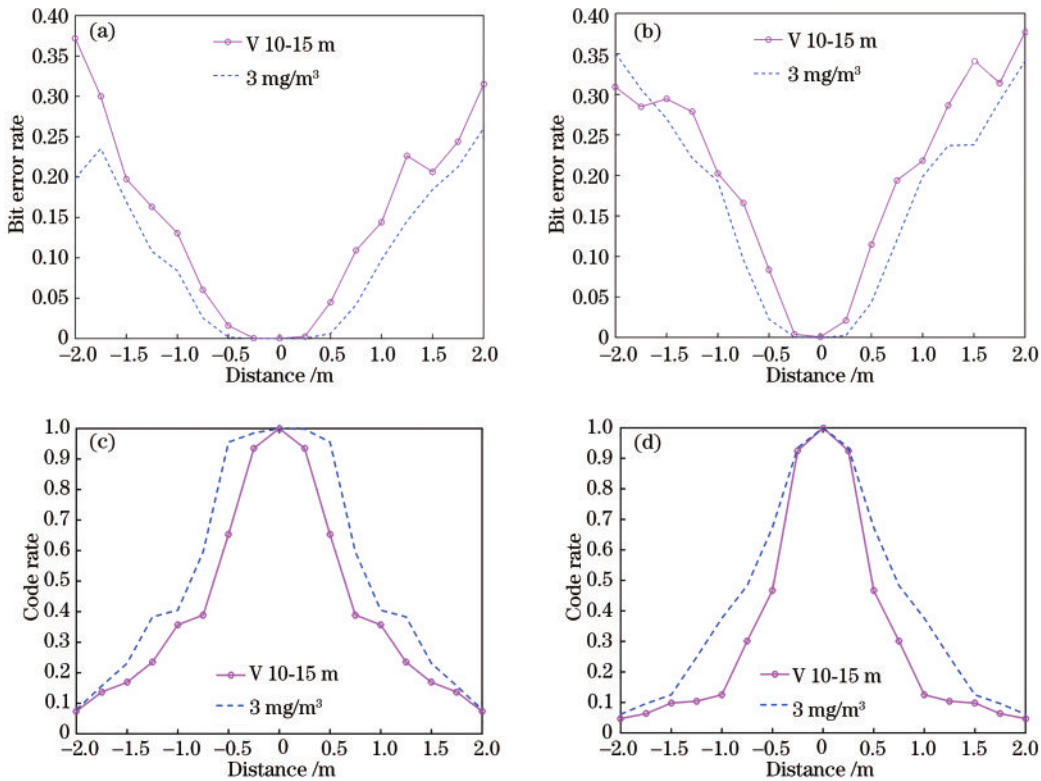


图 10 波长 500 nm 和 600 nm 铅直信道与水平信道的信道误码率以及编码码率对比 $[B_0=3 \text{ mg/m}^3, C_{\text{chl}}(z_{\text{max}})=8 \text{ mg/m}^3]$ 。

(a)、(b)信道误码率;(c)、(d)编码码率

Fig. 10 Comparison of bit error rate and code rate between vertical channel and horizontal channel at wavelengths of 500 nm and

600 nm  $[B_0=3 \text{ mg/m}^3, C_{\text{chl}}(z_{\text{max}})=8 \text{ mg/m}^3]$ . (a), (b) Bit error rate; (c), (d) code rate

图 11 是叶绿素峰值质量浓度为  $5 \text{ mg/m}^3$  对应的信道误码率与编码码率分布图。第 2 组测试铅直信道的叶绿素峰值质量浓度较低,对应的水下信道总体衰减程度较小,所以信噪比较高,信道误码率有所降低,间

接提高了编码码率(传输效率)。由编码结果可知铅直信道对应的传输效率有明显提高,铅直信道对应的平均传输效率约为水平信道的 80%。

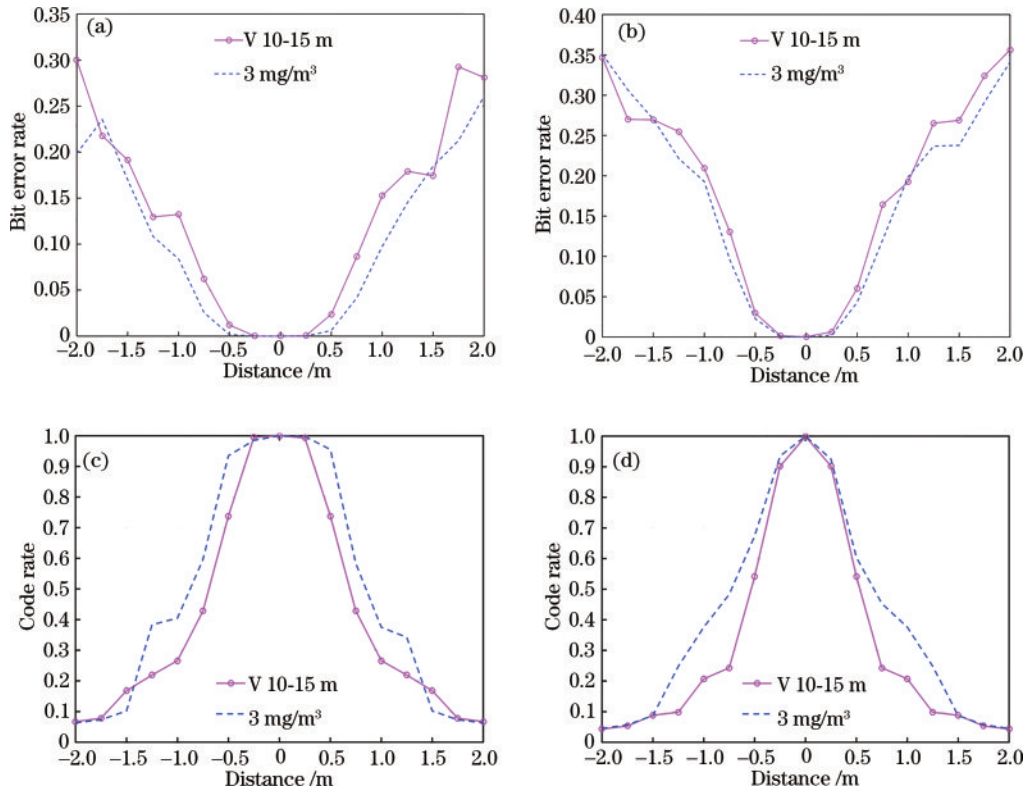


图 11 波长 500 nm 和 600 nm 铅直信道与水平信道的信道误码率以及编码码率对比 [ $B_0=3 \text{ mg/m}^3$ ,  $C_{\text{chl}}(z_{\text{max}})=5 \text{ mg/m}^3$ ]。

(a)、(b)信道误码率;(c)、(d)编码码率

Fig. 11 Comparison of bit error rate and code rate between vertical channel and horizontal channel at wavelengths of 500 nm and 600 nm [ $B_0=3 \text{ mg/m}^3$ ,  $C_{\text{chl}}(z_{\text{max}})=5 \text{ mg/m}^3$ ]. (a), (b) Bit error rate; (c), (d) code rate

从编码结果可知,波长相同时,铅直信道对应的平均叶绿素质量浓度较大,得到的光功率值较小,降低了信噪比(信道误码率增加),导致传输效率明显小于水平信道的传输效率。铅直信道与水平信道的无误码传输效率相差较大,若是采用与水平信道相同的编码参数,则铅直信道对应的纠错后误码率将会很大,严重影响通信质量,甚至无法进行通信。因此,铅直信道环境必须根据实际信道参数调节编码码率才能保证无误码传输。而本文所提方案,能够根据实际信道环境计算出准确的信道衰减系数,编码参数调节方便,在复杂信道环境下也能实现可靠通信。

目前,可见光通信纠错编码的研究主要集中在室内可见光通信场景。无论是水下还是室内信道环境,主要的区别是接收端信噪比(SNR)不同,导致信道误码率有所区别。不同编码方案的性能对比主要是看其达到近似无误码传输的误比特率(BER 小于  $10^{-5}$ )所需要的 SNR,即 SNR 差值(编码增益)。本文所提方案在近似无误码传输时分别与 RS 码和 LDPC 码相比能够获得 1.4 dB 和 4.2 dB 的编码增益<sup>[12-14]</sup>。文献[21]和[22]也证明了极化码编码方案对比 RS 码和 LDPC 码所需的 SNR 更低,能够获得较高的编码增益,当采用更高效的编码/译码算法时,还能够进一步提高编码增益<sup>[21-22]</sup>。

## 4 结 论

UVLC 纠错编码技术能够保证通信的可靠性,而水下信道的分析为编码方案提供了重要的参数依据。本文从理论上分析了铅直式水下信道的衰减情况,并且在仿真平台上进行信道建模,然后设计一种极化码纠错编码方案,该方案能够根据信道仿真结果调整编码参数以实现无误码传输。文中对比了铅直信道与水平信道的仿真光功率分布情况,当叶绿素质量浓度峰值为  $8 \text{ mg/m}^3$  时,铅直信道的仿真光功率是水平信道的 50%,铅直信道的传输效率(编码码率)约为水平信道的 70%;当叶绿素质量浓度峰值为  $5 \text{ mg/m}^3$  时,铅直信道的仿真光功率是水平信道的 75%,铅直信道的传输效率(编码码率)约为水平信道的 80%;所以,叶绿素含量的高低决定了编码方案传输码率的高低,对通信的速率有着重大影响。该研究表明,对于铅直式 UVLC(常见通信场景),其信道环境与水平信道(水平方向)差别较大,需要分析铅直信道的信道衰减情况,才能设置正确的编码参数以提高通信过程的可靠性。如果铅直信道采用与水平信道相同的编码参数,则铅直信道对应的纠错后误码率将会很大(远大于  $10^{-3}$ ),导致通信无法进行。因此,在铅直链路中,必须考虑介质质量浓度的变化,尤其是变化幅度较大时,对纠错编



码结果的影响很大,必须根据实际 SNR 来调整编码码率,否则将会严重降低通信系统的可靠性。进一步的工作将考虑湍流、温度以及盐度变化带来的影响,让所提方案的适用范围更广。

## 参 考 文 献

- [1] Abdallah A A. An investigation of short range electromagnetic wave communication for underwater environmental monitoring utilising a sensor network platform[D]. Liverpool: Liverpool John Moores University, 2014.
- [2] 余翔宇. 水下无线光通信系统的信道特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.  
Yu X Y. A study on channel characteristics for underwater wireless optical communication[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [3] Gabriel C, Khalighi M A, Bourennane S, et al. Monte-Carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(1): 1-12.
- [4] Qadar R, Kasi M K, Ayub S, et al. An adaptive approach for estimation of an underwater optical channel using Monte Carlo[C]//OCEANS 2017-Aberdeen, June 19-22, 2017, Aberdeen, UK. New York: IEEE Press, 2017.
- [5] 李天松, 阳荣凯, 高翔, 等. 水下无线激光传输脉冲响应建模[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1101001.  
Li T S, Yang R K, Gao X, et al. Impulse response modeling for underwater wireless laser transmission[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1101001.
- [6] Johnson L J, Green R J, Leeson M S. Underwater optical wireless communications: depth dependent variations in attenuation[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(33): 7867-7873.
- [7] Anous N, Abdallah M, Uysal M, et al. Performance evaluation of LOS and NLOS vertical inhomogeneous links in underwater visible light communications[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 22408-22420.
- [8] Elmassie M, Uysal M. Vertical underwater VLC links over cascaded gamma-gamma turbulence channels with pointing errors[C]//2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), June 3-6, 2019, Sochi, Russia. New York: IEEE Press, 2019.
- [9] Rajagopal S, Roberts R D, Lim S K. IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(3): 72-82.
- [10] Kim S. Adaptive FEC codes suitable for variable dimming values in visible light communication[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(9): 967-969.
- [11] Lee S H, Kwon J K. Turbo code-based error correction scheme for dimmable visible light communication systems [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(17): 1463-1465.
- [12] Wang H, Kim S. Decoding of polar codes for intersymbol interference in visible-light communication [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(12): 1111-1114.
- [13] Jain N, Banerjee A. On visible light communication using soft cancellation decoder for polar codes[C]//2020 National Conference on Communications (NCC), February 21-23, 2020, Kharagpur, India. New York: IEEE Press, 2020.
- [14] Fang J B, Che Z, Jiang Z L, et al. An efficient flicker-free FEC coding scheme for dimmable visible light communication based on polar codes[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 16840997.
- [15] Kameda T, Matsumura S. Chlorophyll biomass off Sanriku, northwestern pacific, estimated by ocean color and temperature scanner (OCTS) and a vertical distribution model[J]. *Journal of Oceanography*, 1998, 54(5): 509-516.
- [16] 刘鹏. 基于极化码的 UVLC 物理层安全编码技术研究[D]. 广州: 暨南大学, 2020.  
Liu P. Study on polar codes-based physical layer security coding technology for underwater visible light communication[D]. Guangzhou: Jinan University, 2020.
- [17] Arikan E. Channel polarization: a method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, 55(7): 3051-3073.
- [18] Tal I, Vardy A. How to construct polar codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2013, 59(10): 6562-6582.
- [19] Gupta A, Garg P. Statistics of SNR for an indoor VLC system and its applications in system performance[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(9): 1898-1901.
- [20] Sun J, Lin B L, Li K M, et al. A modelling study of residence time and exposure time in the Pearl River Estuary, China[J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2014, 8(3): 281-291.
- [21] Wang H, Kim S. Design of polar codes for run-length limited codes in visible light communications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(1): 27-30.
- [22] Wang H, Kim S. Dimming control systems with polar codes in visible light communication[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(19): 1651-1654.