

文章编号: 1001-3806(2021)05-0662-08

## 基于级联交织码的水下 LED 光通信误码性能分析

张奕, 杨祎\*, 阴亚芳, 贺锋涛, 张建磊  
(西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121)

**摘要:** 为了提升系统误比特率,减小基线漂移以及海水信道的吸收散射等特性对光信号产生的影响,采用了基于水下发光二极管(LED)光通信系统的低密度奇偶校验码(LDPC)-里所(RS)级联交织码方案,在模拟水下LED光通信实验系统的情况下,分析码字方案中RS码、LDPC码以及交织参量对系统误比特率性能的影响,得到了级联交织码方案的优化参量,并进行了实验模拟验证。结果表明,优化后的级联交织码系统与未编码系统、RS码系统、LDPC码系统相比分别可获得3.8dB, 2dB, 1.2dB的增益,可有效提高系统的误比特率性能。该研究为提高水下无线光通信系统的可靠性提供了参考。

**关键词:** 光通信;基线漂移;级联码;交织

**中图分类号:** TN929.1 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2021.05.021

### Analysis of error code performance of underwater LED optical communication based on cascaded interleaving code

ZHANG Yi, YANG Yi, YIN Yafang, HE Fengtao, ZHANG Jianlei

(College of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

**Abstract:** In order to improve the bit error rate of the system, reduce the baseline drift and the absorption scattering of the seawater channel and other characteristics on the optical signal, a low density parity check (LDPC)-Reed Solomon (RS) cascaded interleaving code scheme based on the underwater light-emitting diode (LED) optical communication system was adopted. Under the simulated underwater LED optical communication experimental system, the effects of RS code, LDPC code, and interleaved parameters on the bit-error rate performance of the system were analyzed in the code scheme, and the optimized parameters of the cascaded interleaving code scheme were obtained and verified by the experimental simulation. The results show that the gain of 3.8dB, 2dB, and 1.2dB can be obtained with the optimized cascaded interleaving code system, compared with the uncoded system, RS code system, and LDPC code system, respectively, which can effectively improve the bit error rate performance of the system. This study provides a reference for improving the reliability of the underwater wireless optical communication system.

**Key words:** optical communication; baseline drift; cascaded code; interleave

## 引言

水下发光二极管(light-emitting diode, LED)光通信因其发散角大、通信时不需要严格对准、成本低等众多优势<sup>[1-4]</sup>,未来将成为水下通信网络的重要技术之

一。在水下LED光通信系统中,常使用的调制方式为开关键控(on-off keying, OOK)调制,系统为基带传输<sup>[5]</sup>。单极性的数字码流中会包含一定直流分量,而链路中存在具有高通特性的交流耦合网络会将其滤除,导致信号发生基线漂移。当传输序列中存在不均匀的连“0”、连“1”信号时,基线漂移现象会更严重,若直接进行信号判决将会产生较大误码。同时,在复杂的海水环境中,由于水体具有的吸收散射特性,导致信号受到较大的衰减和干扰,进一步恶化系统误码性能。为了提升系统的误比特率(bit error rate, BER),可以引入纠错编码技术。

纠错编码是一种通过增加冗余来提高系统抗干扰

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61805199);陕西省技术创新引导专项基金资助项目(2020TG-001);西安邮电大学研究生教育教学改革项目(YJGJ201905)

作者简介:张奕(1995-),女,硕士研究生,主要从事LDPC码在水下无线光通信中的应用等方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: yangyi@xupt.edu.cn

收稿日期:2020-09-08;收到修改稿日期:2020-10-22

能力的技术<sup>[6]</sup>,用来保证通信系统传输的可靠性。但面对复杂的水下环境,一些干扰或者衰落等都会引起信号的突发错误或随机错误,使用单一的纠错编码技术已经很难满足通信的可靠要求;同时随着码字长度的增加,虽然译码的正确率变大,但相应的复杂性和计算量也会不断增加。针对这类问题,为了满足可靠通信的条件下同时降低译码复杂度,FORNEY等人提出了级联码的概念<sup>[7]</sup>,通过组合两种或多种较短码字来获得长码,从而提高纠错能力。DONG等人在多径效应干扰下发现,使用里所(Reed Solomon, RS)-Turbo码方案可有效降低系统误比特率<sup>[8]</sup>。MA等人提出了一种可变码长的串行卷积码级联编译码方法<sup>[9]</sup>,可以满足大气激光可靠通信的要求。CAO等人针对误码扩散的问题<sup>[10]</sup>,提出一种喷泉码与奇偶校验码级联的级联码方案,发现加大传输距离后级联码仍有一定的编码增益优势。由此可见,级联码对于提高码字纠错能力具有出色的表现,但目前基于级联码的水下无线光通信系统性能的相关报道还较少,所以本文中引入级联码来分析水下LED光通信系统的误码性能。

在系统设计的过程中,码字方案的选择至关重要。目前常用的信道编码有喷泉码、RS码、Turbo码以及低密度奇偶校验码(low density parity check, LDPC)等方案。RS码是一种处理集中错误能力较强的码字方案,但其可纠错的个数有限<sup>[11-12]</sup>;LDPC码是一种处理随机错误能力较强的码字方案,可将其应用于无线光通信系统中,用来提高系统的传输距离<sup>[13-14]</sup>,但处理集中错误的的能力较差。所以本文中设计了基于水下LED光通信系统的LDPC-RS级联交织码方案,充分融合两种码的优势,并加入改进的块交织器技术,考虑基线漂移以及吸收散射等特性,分析不同参量下水下LED光通信系统的误比特率性能,确定出级联交织码的优化参量,最后进行水下通信实验模拟验证了级联交织码的优异性能。

## 1 水下LED光通信系统理论

### 1.1 大功率LED调制信号特性

水下大功率LED光通信系统中的光信号为单极性正脉冲,码字序列中会包含直流分量,在传输过程中,由于被调制的信号中存在不均匀的连“0”或连“1”伪随机码,导致直流分量的幅值产生一定的变化。当码字序列经过具有高通特性的交流耦合网络时,其中包含的直流分量会被滤除,导致输出脉冲出现基线浮动。为了更好地分析大功率LED调制信号特性,需要

建立基线漂移的理论模型。调制信号可表示为<sup>[15]</sup>:

$$\mathbf{x}(t) = \sum_q \mathbf{A}_q \mathbf{p}(t - qT) \quad (1)$$

式中, $\mathbf{A}_q$ 表示输入的信息序列数据( $q$ 为输入信息序列数据的总个数), $t$ 为时间, $T$ 是发送数据的间隔, $\mathbf{p}(t)$ 是发射系统的脉冲信号。

本文中使用的系统接收端交流耦合网络为一个1阶高通滤波器,其频率响应函数 $Z(j\omega)$ 可表示为:

$$Z(j\omega) = \frac{j\omega}{j\omega + 1/\tau} \quad (2)$$

式中, $j$ 为虚数单位, $\omega$ 表示频率, $\tau$ 为时间常数,决定了高通滤波器的截止频率。

计算得到1阶高通滤波器的脉冲信号 $\mathbf{v}(t)$ 为:

$$\mathbf{v}(t) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), & (0 < t < T) \\ \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\left[1 - \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right)\right], & (t \geq T) \end{cases} \quad (3)$$

将(3)式代入(1)式,得到发送信号经过交流耦合网络之后的信号 $\mathbf{v}_s(t)$ 为:

$$\mathbf{v}_s(t) = \sum_q \mathbf{A}_q \mathbf{v}(t - qT) \quad (4)$$

计算采样后的发送序列经过交流耦合网络之后的信号 $\mathbf{v}_s(uT)$ 为:

$$\mathbf{v}_s(uT) = \mathbf{a}_u + \{\mathbf{b}_{u-1} - [1 - \exp(-T/\tau)] \times (\mathbf{a}_{u-1} + \mathbf{b}_{u-1})\} \quad (5)$$

式中,信号由两部分组成,第一部分表示希望接收到的信号 $\mathbf{a}_u$ ,第二部分表示经过交流耦合网络后所带来的基线漂移部分,其中 $\mathbf{b}_{u-1}$ 表示上一时刻的基线漂移量, $u$ 表示某一时刻的采样点。根据(5)式可以利用MATLAB对接收端交流耦合后的时域信号进行仿真。

图1是接收端交流耦合后的时域信号仿真图。其中实线部分表示原始发送信号,虚线、点线、点划线部分分别表示经过不同截止频率下的交流耦合网络后的接收信号。通过分析可知,交流耦合网络的截止频率越高,接收信号的基线漂移现象越严重。

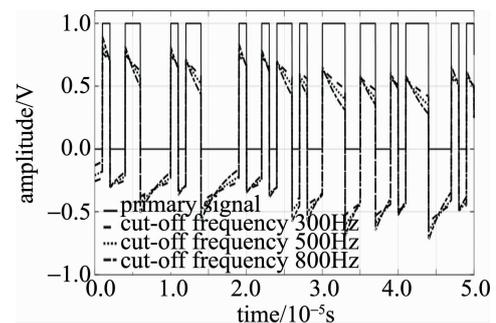


Fig. 1 Time domain signal after alternating current coupling at the receiving end

## 1.2 水下无线光信道传输模型

由于光束扩散和水下粒子等因素对光信号的吸收、散射作用<sup>[16]</sup>,对光信号的传输有很大影响,以下是水下无线光信道传输模型<sup>[17]</sup>:

$$P_r = P_t \exp(-cd) \left( \frac{a_r}{a_t + d\theta} \right)^2 + z \quad (6)$$

式中, $d$ 为传输距离; $a_t, a_r$ 分别为发射机的发射孔径半径和接收天线的孔径半径; $\theta$ 为光束发散半角; $P_r$ 和 $P_t$ 分别为接收信号光功率和发射信号光功率;此处的噪声 $z$ 近似为高斯白噪声; $c(\lambda)$ 为衰减系数,由吸收系数 $a(\lambda)$ 和散射系数 $b(\lambda)$ 组成。表1中给出了不同的海水类型中衰减系数的相应取值<sup>[18]</sup>。

Table 1 Typical attenuation coefficients for different water types

water types	$a(\lambda)/\text{m}^{-1}$	$b(\lambda)/\text{m}^{-1}$	$c(\lambda)/\text{m}^{-1}$
pure water	0.053	0.003	0.056
clear water	0.114	0.037	0.151
costal water	0.179	0.219	0.398

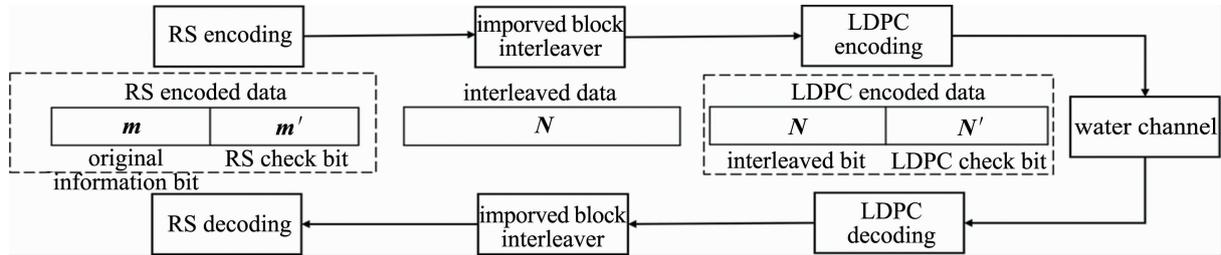


Fig. 2 Design flow chart of cascaded interleaving code scheme

## 2.1 RS 编译码

设计级联交织码方案时,首先进行 RS 编码。为了使内码的信息长度与外码相匹配,选择使用缩短 RS 码。 $RS(n, k)$ 是一种纠正集中错误能力较强的线性分组码,其中 $n$ 为总码长, $k$ 为信息位长度,进行 RS 编码首先定义本原元为 $\alpha$ ,生成多项式为:

$$g(x) = (x - \alpha)(x - \alpha^2) \cdots (x - \alpha^{2e}) = \prod_{h=1}^{2e} (x - \alpha^h) \quad (7)$$

式中, $e$ 为 RS 编解码可纠错的个数, $h$ 的取值范围为 $1, 2, \dots, 2e$ 。

信息多项式可以表示为(原始信息序列 $\mathbf{m} = (m_0, m_1, \dots, m_{k-1})$ ):

$$\mathbf{M}(x) = m_0 + m_1 x + \cdots + m_{k-2} x^{k-2} + m_{k-1} x^{k-1} \quad (8)$$

校验多项式如下式所示:

$$\mathbf{r}(x) = \mathbf{M}(x) \cdot x^{n-k} \pmod{g(x)} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{r}(x)$ 为 $n - k$ 次校验多项式; $\mathbf{M}(x)$ 乘以 $x^{n-k}$ 表示在原始的信息码字之后添加 $n - k$ 个监督位,则编码

作者所在课题组通过水下信道外场实验发现,在清澈水质下测得的接收光功率符合水下信道传输模型<sup>[19]</sup>(见(6)式),因此,本文中参量将根据课题组外场实验而进行设置。

## 2 级联交织码设计方案

在实际应用中,随着码字长度的增加,译码出现错误的概率会接近于0,但相应的复杂性和计算量也会增加。而水下通信需要快速的处理数据,不需要过于复杂的算法。为了在复杂度和性能之间取得平衡,本文中设计了级联交织码方案,采用 LDPC 码作为内码,RS 码作为外码,并加入改进的块交织技术,提高码字方案处理错误的概率。

本文中设计的方案如图2所示。图中, $\mathbf{m}$ 为原始信息序列, $\mathbf{m}'$ 为 RS 编码后的校验位比特序列; $\mathbf{N}$ 为进行级联交织后的交织序列,同时 $\mathbf{N}$ 也作为 LDPC 编码前的信息序列, $\mathbf{N}'$ 为 LDPC 编码后的校验位比特序列。

后的码多项式为:

$$\mathbf{c}(x) = x^{n-k} \mathbf{M}(x) + \mathbf{r}(x) \quad (10)$$

对于 RS 译码,可分为以下三部分:(1)利用接收到的码字 $\mathbf{R}(x)/g(x)$ ,得到伴随多项式;(2)由(1)式结果进一步得到错误图样 $\hat{\mathbf{E}}(x)$ ;(3)根据 $\mathbf{R}(x) - \hat{\mathbf{E}}(x)$ 计算出最大可能发送的码字 $\hat{\mathbf{C}}(x)$ ,完成 RS 码纠错。

## 2.2 改进的块交织技术

在级联码方案设计过程中,要对 RS 码编码后的码字进行随机化处理,而且实际的水下信道中可能存在着突发干扰,会导致系统产生连串的突发错误,所以在级联码编码方案中引入交织技术,增强码字的纠错能力。

交织是将原始消息序列按某种规则进行打乱后传输,按相应规则在接收端还原后再进行纠错的一种技术。设置交织器是为了使码字序列之间的相关性变小<sup>[20-21]</sup>,对于二元系统,假定每个信息位取0或1的概率为1/2,定义长度为 $l$ 的两个序列 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{Y}$ 的相关系

数为:

$$\gamma_{XY} = \sum_{l=0}^L (2X_L - 1)(2Y_L - 1) \quad (11)$$

式中,  $L$  的取值范围为  $0, 1, \dots, L$ 。由(11)式可知, 对于码字序列来说, 交织前后相应位置上的不动点个数、同一位置的元素是否取同一值都与序列之间的相关性有关, 其中同一位置的元素是否取同一值对相关系数的影响是一致的, 所以研究交织前后相应位置上的不动点个数。本文中采用块交织技术, 将要传输的信息序列存储在块交织矩阵中, 按特定读写规则来处理数据, 不同规则对应的输出序列不同。

图 3a 中展示出了一一种读写规则下的 A 型块交织器, 将原始信息序列按从左至右的顺序, 以行序写到交织器矩阵中, 之后按由上往下的顺序, 以列序从交织器矩阵中读出。为进一步降低信息序列的相关性, 本文中改进此块交织器的读写规则, 按从左至右的行序写入, 但在读出时首先读取次列数据, 之后依次读取次列之后的数据, 最后读取首列数据, 将其定义为 B 型块交织器, 经过 A、B 两种块交织器后输出的信息序列如图 3b 所示。

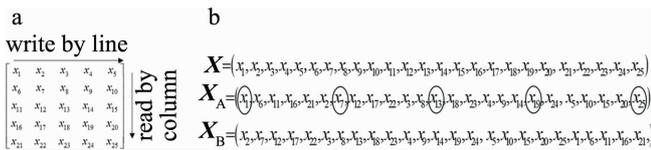


Fig. 3 A-type block interleaver and interleaver output information sequence under different read and write rules  
a—A-type block interleaver b—interleaver output information sequence under different read and write rules

可以看出, 对比两种规则下的交织器输出序列与原始消息序列, A 型交织器的输出序列在交织前后的不动点个数为 5, 改进后 B 型交织器的输出序列在交织前后的不动点个数为 0, 由此可见, 改进后的交织器可明显降低序列之间的相关性, 因此本文中使用了改进

后的 B 型块交织器技术。

### 2.3 LDPC 编译码

LDPC 码是一种  $(n, k)$  线性分组码, 其中  $n$  为总码长,  $k$  为信息位长度, LDPC 码可由校验矩阵  $H$  来唯一确定。本文中采用随机法来生成  $H$  矩阵, 使用的是规则 LDPC 码。在进行 LDPC 编码时, 首先得到校验矩阵  $H$  和生成矩阵  $G$ , 两者之间的关系如下所示:

$$H = [I_{(n-k) \times (n-k)} | - (P_{k \times (n-k)})^T] \quad (12)$$

$$G = [P_{k \times (n-k)} | I_{k \times k}] \quad (13)$$

式中,  $P$  是通过高斯消元后得到的矩阵,  $I$  为单位矩阵。

根据生成矩阵和原始信息序列, 即可得到编码后的码字  $c$ :

$$c = m \times G \quad (14)$$

然后进行 LDPC 码译码, 考虑到级联码会存在门限效应, 所以采用迭代译码。本文中使用了置信度传播 (belief propagation, BP) 算法, 其中基于 OOK 调制的 BP 译码算法初始概率密度函数如下式所示<sup>[20]</sup>:

$$P(i_f) = \begin{cases} \frac{\exp(2W - 1)}{1 + \exp\left(\frac{2W - 1}{2\sigma^2}\right)} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{1 - 2W}{2\sigma^2}\right)}, (f = 1) \\ 1 - P(i_1) = 1 - \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{1 - 2W}{2\sigma^2}\right)}, (f = 0) \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $P(i_f)$  表示解码信号  $i$  解码为 1 或 0 的概率,  $W$  表示接收符号,  $\sigma^2$  描述了噪声的强度。得到初始概率密度函数后, 完成节点更新和最终判决, 得到译码结果。

## 3 系统性能分析及实验模拟

### 3.1 水下 LED 光通信系统

水下 LED 光通信系统框图如图 4 所示。系统分

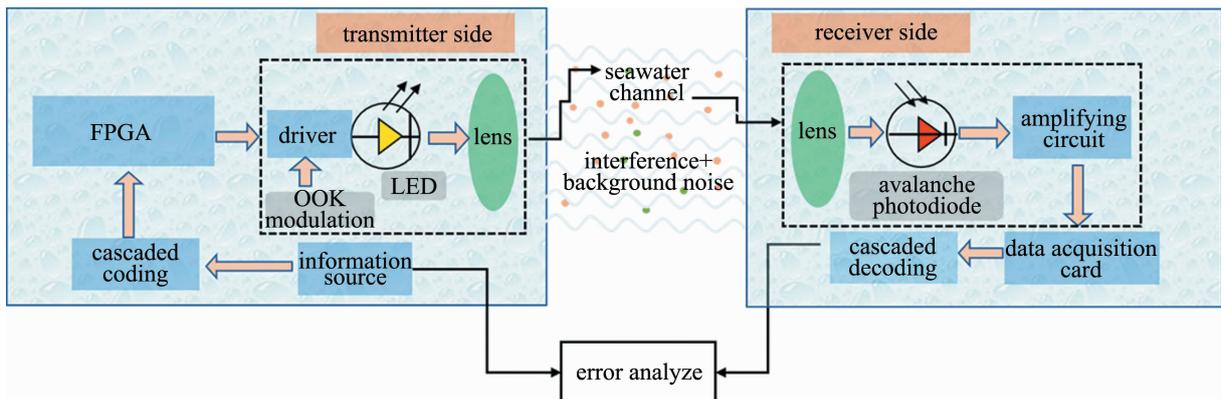


Fig. 4 Block diagram of underwater LED optical communication experimental system

为发射系统、海水信道、接收系统三部分,发射系统完成信号的产生、编码以及调制并进行传送,经过海水信

道,在接收系统进行接收和信号处理。

本文中各项参量的设置如表2所示。

Table 2 System parameter settings

name	parameter	name	parameter
LED wavelength	450nm	receiver sensitivity	$< 1 \mu\text{W}$
transmit power	5W	receiver radius	100mm
divergence half angle of light source	0.087rad	detector size	10mm $\times$ 10mm
transmitter radius	50mm	collecting efficiency of receiving antenna	76.46%

### 3.2 级联交织码方案性能分析

为研究级联交织码方案中不同码字参量对系统误比特率性能的影响,通过 MATLAB 搭建水下 LED 光通信系统模型,考虑水下无线光信道传输中光信号的衰减以及基线漂移特性,对比系统 BER 性能最终确定出级联交织码方案的优化参量,其中水质衰减系数取  $0.056\text{m}^{-1}$  (表示纯海水),通信距离选为 10m,系统其它参量按实验系统参量设置。

在设计码字方案时,级联 RS 码会使级联交织码的整体码率降低,导致加在编码后码字上的噪声能量增加,当 RS 码的码率较低时,可能会使码字纠错性能下降;其次在级联码译码过程中,先由 LDPC 码处理错误,若存在 LDPC 码处理不了的错误码字,RS 译码器可进一步对其进行改正,所以在设计级联交织码中的 RS 码字方案时,可以适当减少相应的校验位冗余。本文中选取 RS(240,158),RS(240,208),RS(240,224)分别与 LDPC(2880,1920)级联,交织深度为 4,得到不同 RS 码率下级联交织码系统 BER 曲线,如图 5 所示。由结果可知,RS(240,208) + LDPC(2880,1920)级联交织码方案下的水下 LED 光通信系统性能较好。由此可见,在单独使用 RS 码纠错时,码率越低纠错能力越强,但使用级联交织码方案时可适当增加 RS 码率,减少相应的校验位冗余。

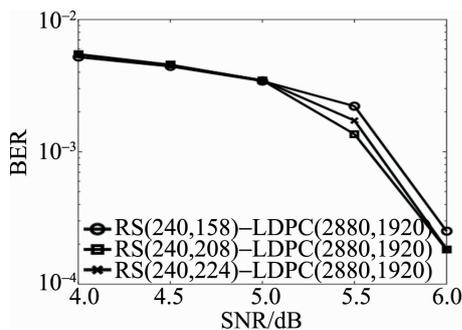


Fig. 5 Performance comparison of RS with different code rates in cascade interleaved code

RS 码组确定后内码 LDPC 的信息位个数也随之确定,下面研究级联码中 LDPC 码的码长对系统性能

的影响。选用 RS(240,208)作为外码,交织深度为 4,得到不同 LDPC 码码长下级联交织码的系统 BER 曲线,如图 6 所示。

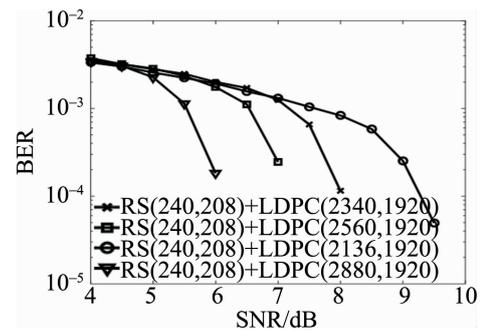


Fig. 6 Performance comparison of LDPC with different code lengths in cascade interleaved code

由对比结果可知 RS(240,208) + LDPC(2880,1920)级联交织码方案下的系统性能较好。与使用 RS(240,208) + LDPC(2560,1920),RS(240,208) + LDPC(2340,1920),RS(240,208) + LDPC(2136,1920)方案的系统相比分别具有的增益为 1dB,1.7dB,2dB。因此在设计级联码方案时可以增加内码 LDPC 码的校验位个数。但需注意噪声会对码字校验位造成影响,使水下 LED 光通信系统纠错性能变差,同时码长较长时还会导致较大时延,所以要合理设置 LDPC 码长使系统达到最佳性能。

在 RS(240,208) + LDPC(2880,1920)级联码方案中使用 B 型块交织技术,研究不同的交织深度对系统 BER 性能的影响。图 7 是不同交织深度参量下的性

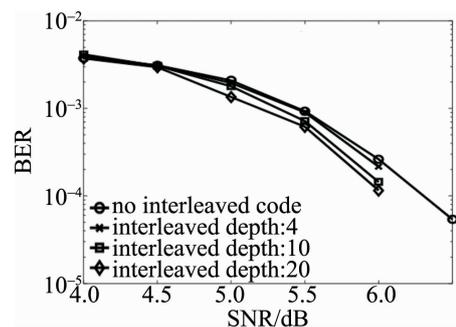


Fig. 7 Performance comparison of different interleave parameters in cascade interleaved code

能对比。从结果可以看出,加入交织技术后系统 BER 曲线收敛速度更快,且随着交织深度增大,系统性能越好。

通过分析,最终确定采用 RS(240,208)+LDPC(2880,1920)级联码方案进行模拟实验。但在实际应用中随着交织深度增大,会导致数据处理的时间变长,因此本文中选取 10 作为交织深度。

### 3.3 实验模拟数据分析

用 MATLAB 产生随机信息序列并进行级联交织编码,下载到现场可编程逻辑门阵列(field-programmable gate array,FPGA)上,使用 FPGA 对发送序列添加一定信噪比的高斯白噪声,通过光发送系统实现光信号的 OOK 调制。使用衰减系数为  $0.151\text{m}^{-1}$  的水质模拟清澈海水信道,光信号通过该种水质信道之后,在接收端进行数据采集,之后利用 MATLAB 将采集到的信号进行离线处理。离线处理包括信号的同步、译码等过程。实验中统计 1s 内传输数据中错误的信息个数,每组数据量为 993600bits。

在接收端接收到的未编码信号波形如图 8 所示。可观察到经过直流滤波后连“0”、连“1”信号引起的基线漂移现象(圆圈标识出的部分)以及水下信道存在的各类干扰对信号的衰减,若直接进行信号判决将会产生较大的误码。本文中将采集到的基线漂移信号在 MATLAB 上进行了离线处理,采用未编码、LDPC(2880,1920),RS(240,208),RS(240,208)+LDPC(2880,1920)等码字方案,固定通信距离为 10m,得到的系统 BER 曲线如图 9 所示。

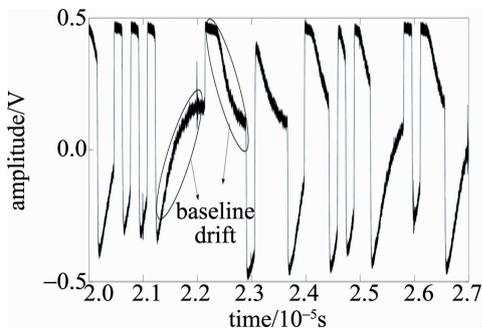


Fig. 8 Waveform of unencoded signal at receiver

由图 9 可知,系统误比特率为  $3.8 \times 10^{-3}$  时,与未编码系统相比,级联交织码系统具有大约 3.8dB 的编码增益,可有效提升水下 LED 光通信系统的 BER 性能。与单独加入 LDPC 码和 RS 码的系统相比,级联交织码系统的增益分别为 1.2dB 和 2dB。

通过固定系统发射端,移动接收端来控制通信距离,采用 RS(240,208)+LDPC(2880,1920),RS(240,

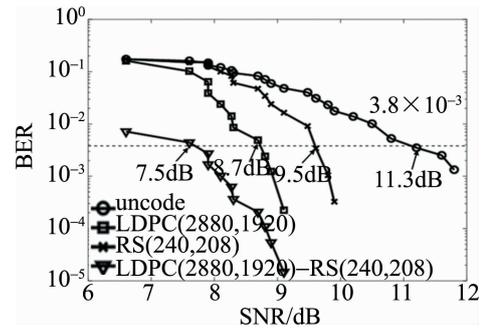


Fig. 9 System performance comparison at different coding methods

208),LDPC(2880,1920)码字方案,对发送序列添加的高斯白噪声信噪比为 10dB,研究不同方案下的水下 LED 光通信系统的通信距离与系统 BER 性能的关系,如图 10 所示。

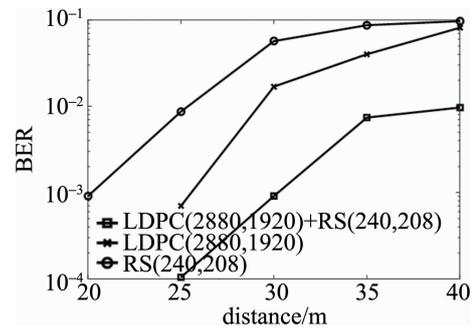


Fig. 10 System performance comparison at different distances

由图 10 可知,当通信距离为 25m 时,采用 RS(240,208)+LDPC(2880,1920)方案的系统 BER 为  $1.04 \times 10^{-4}$ ;采用 LDPC(2880,1920)码字方案系统 BER 为  $7.01 \times 10^{-4}$ ;采用 RS(240,208)码字方案的系统 BER 为  $8.67 \times 10^{-3}$ 。当通信距离增加到 30m 时,使用 LDPC 码和 RS 码的系统 BER 均高于  $3.8 \times 10^{-3}$ ,已无法满足可靠通信要求,而 LDPC-RS 级联交织码系统 BER 仍低于  $3.8 \times 10^{-3}$ 。对比可知,当系统传输相同距离时,与 LDPC 码或 RS 码系统相比,级联交织码系统性能更优。

通过选取 1Mbit/s,2Mbit/s,4Mbit/s,8Mbit/s 几种不同的传输速率,研究了系统传输速率与系统误比特率之间的关系,信噪比为 9dB,采用 RS(240,208)+LDPC(2880,1920)码字方案,如图 11 所示。

由图 11 可知,当系统传输速率为 1Mbit/s 时,使用级联交织码方案的系统误比特率为  $2.41 \times 10^{-5}$ ;当系统传输速率为 2Mbit/s 时,使用级联交织码方案的系统误比特率为  $2.59 \times 10^{-5}$ ;当系统传输速率为 4Mbit/s 时,使用级联交织码方案的系统误比特率为  $2.82 \times 10^{-5}$ ;当系统传输速率为 8Mbit/s 时,使用级联交织码方案的系统误比特率为  $3.03 \times 10^{-5}$ ;对比可

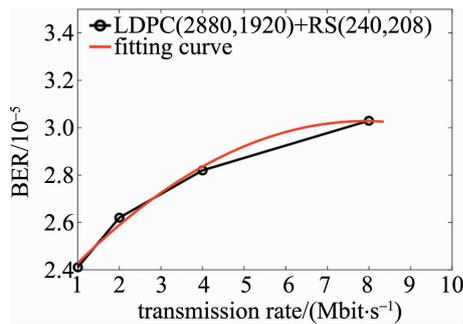


Fig. 11 System performance comparison at different transmission rate

知,在同样的信噪比环境下,随着系统传输速率的增加,系统误比特率在逐渐增大。这是因为当信噪比不变时,随着传输速率的增加,每比特对噪声的容忍度会急剧降低,出现误码的概率会增加,导致误比特率变差。另外在系统带宽一定的条件下,随着传输速率的增加,基线漂移现象加重,因此也会导致系统误比特率增加,但是通过纠错编码可提高误比特率性能。

#### 4 结论

首先根据大功率 LED 光信号调制特性,分析了基线漂移对接收信号的影响;在此基础上,考虑光束扩散和吸收散射对光信号的影响,研究了水下无线光信道传输模型,以及 LDPC 码、RS 码的编译码算法,同时为降低消息序列之间的相关性,使用改进的块交织器,提出了基于 OOK 调制的 LDPC-RS 级联交织码方案,搭建基于 LDPC-RS 级联交织码的水下 LED 光通信实验系统模型;之后利用 MATLAB 平台进行系统性能分析,得到不同 RS 码率下级联交织码系统的误比特率情况,从而在确定 RS 码组后确定 LDPC 的信息位数,研究了级联码中不同 LDPC 码的码长对系统性能的影响;最后分析不同的交织深度对系统性能的影响,得到级联交织码方案的优化参量。经水下通信实验模拟验证,该优化的级联交织码系统与未编码系统、RS 码系统、LDPC 码系统相比分别可获得 3.8dB, 2dB, 1.2dB 的增益,有效提升了系统的纠错能力;在使用不同的码字方案时,研究系统传输距离与误比特率的关系,对比发现当传输相同的通信距离时,该级联交织码系统的性能更优;但在同样的信噪比环境下,随着系统传输速率的增加,系统误比特率仍会逐渐增大。

本文中的研究可为水下 LED 光通信系统的工程应用提供参考方案,但现有的性能改进仍有限,还有许多可以提升和补充的地方,需要进一步深入研究:(1)本文中采用了随机构造的规则 LDPC 码,构造出的码性能虽然很好,但校验矩阵具有不规律性,存在校验矩

阵存储读取困难等问题,相对难以实现;下一步可以使用准循环 LDPC 码,其奇偶校验矩阵可以分成多个大小相等的方阵,每个方阵都是单位矩阵的循环移位矩阵或全 0 矩阵,非常便于存储器的存储和寻址,从而降低了 LDPC 码的编译码复杂度,能够实现线性复杂度的快速编码;(2)文中使用的交织器技术是块交织技术,为了进一步减小码字序列之间的相关性,还可以使用随机交织和卷积交织技术;(3)在系统设计中使用了 OOK 调制方式,为了进一步探究调制电路对系统性能的影响,可以改变系统调制方式,如脉冲位置调制、正交幅度调制调制等不同的调制方案。

如果综合考虑以上几点,研究成果的可靠性和准确性将会进一步提高,这些将在下一步的工作中实现。

#### 参考文献

- [1] TAO Y Sh, ZHANG Ch. Research on underwater LED communication based on FBMC technology[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020,43(10):153-157 (in Chinese).
- [2] CHI N, WANG Ch F, LI W P, *et al.* Research progress of underwater visible light communication technology based on blue/green LED[J]. *Journal of Fudan University(Natural Science Edition)*, 2019,58(5):537-548 (in Chinese).
- [3] CHI N, CHEN H. Progress and prospect of high-speed visible light communication[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020,47(3):6-17 (in Chinese).
- [4] QIN L, ZHANG Y Q, LI B S, *et al.* LED visible light communication systems based on MIMO technology[J]. *Laser Technology*, 2019,43(4):103-109 (in Chinese).
- [5] LIN T, HUANG Zh T, JI Y F. Hybrid run length limited code and pre-emphasis technique to reduce wander and jitter on on-off keying nonreturn-to-zero visible light communication systems [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(11):1105031.
- [6] ZENG Zh Q, SHU F, ZHANG H H, *et al.* A survey of underwater optical wireless communications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017,19(1):204-238.
- [7] FORNEY D, GEORG D. *Concatenated codes*[M]. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1966:113-124.
- [8] DONG Y, WANG J M, FANG X Y, *et al.* Simulation research of RS-Turbo code in indoor OFDM based visible light communication system [J]. *Electronic Science & Technology*, 2018,31(10):11-14 (in Chinese).
- [9] MA Ch B, TANG Ch P, AO J, *et al.* Design of laser communication system with variable code length serial concatenated code[J]. *Optical Communication Technology*, 2019,43(5):40-43 (in Chinese).
- [10] CAO Y, ZHANG X, PENG X F, *et al.* Cascade scheme based on multiple-output in spatial optical communication[J]. *Acta Optical Sinica*, 2018,38(1):0106003 (in Chinese).
- [11] COSSU G, CORSINI R, KHALID A M, *et al.* Experimental demonstration of high speed underwater visible light communications[C]// 2013 2nd International Workshop on Optical Wireless Communications. New York, USA:IEEE, 2014:11-15.
- [12] WANG W P, ZHENG B. The simulation design of LED-based

- closerange underwater optical communication system [C]//International Computer Conference Wavelet Active Media Technology and Information Processing. New York, USA:IEEE, 2013:283-285.
- [13] WANG J, ZENG F J, LIANG Q Q, *et al.* Research on LDPC coding for free space optical communication with modified Bessel-Gaussian beams based on  $K$ -distribution [C]// Matec Web of Conferences. Paris, France: EDP Science, 2018:1-9.
- [14] HU S Q, MI L, ZHOU T H, *et al.* 35.88 attenuation lengths and 332 bits/photon underwater optical wireless communication based on photon-counting receiver with 256-PPM [J]. Optics Express, 2018, 26(17):21685-21699.
- [15] CHEN L, MIAO D. Study on the baseline excursion in optical fiber network of missile control system [J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2006, 13(3):90-105 (in Chinese).
- [16] YANG Y, HE F T, GUO Q P, *et al.* Analysis of underwater wireless optical communication system performance. [J]. Applied Optics, 2019, 58(36):9808-9814.
- [17] YANG Y, ZHANG J N, YIN Y F. Performance analysis of LDPC code in seawater channel model [J]. Optical Communication Technology, 2018, 42(6):29-32 (in Chinese).
- [18] YE D M, LIU Y, WANG Y T, *et al.* Underwater LED optical communication technology of real-time error detection [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(9):151-157 (in Chinese).
- [19] WANG H X, HE F T, ZHAN F, *et al.* Design of underwater LED blue light communication system based on PPM [J]. Optical Communication Technology, 2018, 42(7):46-50 (in Chinese).
- [20] LIU D H, TANG Ch J. Design of interleaver in Turbo code system [J]. Wireless Communication Technology, 2000, 9(1):41-44 (in Chinese).
- [21] JIA M J, LU A J. Design and simulation of a new digital interleaving [J]. Modern Information Technology, 2019, 3(5):53-55 (in Chinese).