

基于低密度奇偶校验码和脉冲位置调制的水下长距离光通信系统设计

米乐^{1,2}, 胡思奇^{1,2}, 周田华^{1*}, 陈卫标^{1**}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于蒙特卡罗方法对水下激光脉冲长距离传输进行了模拟仿真。根据激光脉冲在水下的展宽情况及脉冲能量的变化规律, 系统采用波长为 532 nm、单脉冲能量为 1 mJ 的全固态脉冲激光器作为发射光源, 采用口径为 100 mm、接收视场角为 15° 的望远镜作为接收机。采用现场可编程门阵列 (FPGA) 进行低密度奇偶校验码 (LDPC) 编码和脉冲位置调制 (PPM), 经光电转换及采样后的接收端信号被发送到上位机进行后处理。最后, 基于研制的实验系统开展了水池实验, 以验证系统性能。理论与实验结果表明, 在 Jerlov II 类水质条件下, 误码率情况相同时 LDPC 编码与 PPM 相结合的通信系统可获得 2.34 dB 的编码增益。实验证明该系统可以实现水下 130 m 处误码率低于 10^{-5} 的可靠通信。

关键词 光通信; 水下激光通信; 低密度奇偶校验码编码; 脉冲位置调制; 蒙特卡罗法

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1006002

Long Distance Underwater Laser Communication System Based on Low-Density Parity Check Codes and Pulse-Position Modulation

Mi Le^{1,2}, Hu Siqi^{1,2}, Zhou Tianhua^{1*}, Chen Weibiao^{1**}

¹ Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The long distance transmission of underwater laser pulse is simulated based on Monte Carlo method. According to the underwater broadening of laser pulse and the variation of pulse energy, the system uses a solid-state laser with the wavelength of 532 nm and the single pulse energy of 1 mJ as the emission source, and uses a telescope with the aperture of 100 mm and the field angle of 15° as the receiver. Low-density parity check codes (LDPC) and pulse-position modulation (PPM) are accomplished based on a field-programmable gate array (FPGA). The received signal after photoelectric conversion and sampling is transmitted to the host computer for post-processing. Finally, a pool experiment is used to verify the system performance based on the developed experimental system. The theoretical and experimental results demonstrate that the designed system with LDPC and PPM can obtain 2.34 dB coding gain at the same bit error rate (BER) under the condition of Jerlov II water quality. Experiment shows that the system can achieve reliable underwater communication with BER of 10^{-5} and distance of 130 m.

Key words optical communications; underwater laser communication; low-density parity check code; pulse-position modulation; Monte Carlo method

OCIS codes 060.4510; 220.4830; 010.4450

收稿日期: 2018-03-19; 修回日期: 2018-04-22; 录用日期: 2018-05-03

基金项目: 国家 863 计划(2014AA093301)

* E-mail: siomzth@siom.ac.cn; ** E-mail: wbchen@mail.shcnc.ac.cn

1 引 言

在水下通信中,蓝绿激光通信方式具有通信速率高、保密性好及抗干扰能力强等优点^[1-2]。相较于大气激光通信,水下激光通信中激光脉冲在传输过程中受海水介质中粒子的吸收和散射的影响,使水下激光信号在传输过程中发生多径时域及空域的展宽和能量的衰减,最终导致水下激光通信的误码率(BER)急剧上升,限制了水下激光通信的距离^[3-4]。因此,探究抗干扰性能更好的编码方式与调制方式对于提高水下激光通信系统性能具有十分重要的意义。水下光通信常采用的调制方式有开关键控(OOK)调制和脉冲位置调制(PPM)这两种方式,Gabriel等^[5]探究了水下无线光通信中不同调制方式下通信系统的性能,比较了不同调制方式可实现的水下通信距离以及误码率。研究表明,采取8阶PPM的调制方式在水下可获得最远57 m的可靠通信,PPM相较于OOK调制可降低激光器的平均发射功率。梁波等^[6]对PPM与Reed-Solomon码(RS码)相结合的激光通信编码方案作了性能分析并验证了其有效性。低密度奇偶校验码(LDPC)是Gallager于1962年提出的一种基于稀疏矩阵的线性码,是目前可验证的距香农极限最近的纠错码^[7-8]。相比RS码,LDPC编码所需硬件简单,可实现并行编码。在相同条件下,LDPC比RS码表现出更加优越的译码性能^[7],其译码速度更快,可以纠正信道突发错误,抗干扰能力更强。将纠错能力强的LDPC编码应用在PPM的无线激光通信系统中,可节省发射功率,提高系统通信距离^[8-9]。

为了获得更远的传输距离和更高的激光通信性能,本文将抗信道干扰性能好及编译码速率快的LDPC与激光通信中可降低发射功率的PPM相结合,基于蒙特卡罗仿真分析了532 nm激光在水下信道中的传输特性,并根据仿真结果设计系统参数,构建了适用于水下长距离通信的激光通信系统。

2 系统仿真及设计

2.1 蒙特卡罗仿真

在水下激光通信中,受水下介质吸收和散射的影响,激光脉冲在水下传输时,脉冲发生时域展宽,能量呈指数衰减。进一步考虑背景杂散光的影响,通信系统的信噪比(SNR)降低,误码率上升。

水下激光通信的环境十分复杂,激光在水下传输过程中会受到各种环境因素的影响,激光信号具有很强的随机性。利用传统的解析法计算光在水下

传播时,需要进行简化运算,并且存在较大的误差。蒙特卡罗法可以用于模拟光束在介质中的传播。采取蒙特卡罗法进行仿真^[10-11]时,首先设定光子以一个特定的角度和方向进入传播介质,根据水体参数确定光子发生一次反射与折射的运动距离以及能量损耗,其次选取适当的散射相位函数确定光子发生一次反射与折射后的运动方向,并多次重复以上过程直到光子能量消亡或者到达接收面。

进行蒙特卡罗仿真时,需要设定激光脉冲参数、水下信道参数及接收端参数。其中,根据以往设计经验,设定单脉冲激光能量 E_T 为常数1,初始脉宽为10 ns,初始发散角为2 mrad。水下信道十分复杂,仿真参数包括脉冲激光在水下的衰减系数 c 、单次反照比 ω 以及不对称因子 g 。衰减系数 $c = a + b$,其中, a 为吸收系数, b 为散射系数,均与激光波长有关。激光波长为532 nm,根据Cox Jr^[12]对大洋水的分类,选取几种典型的水质参数进行仿真。选取的水质参数如表1所示。

表1 Jerlov典型水质参数

Table 1 Typical water quality parameters of Jerlov

Parameter	Jerlov IB	Jerlov II	Jerlov III
c / m^{-1}	0.144	0.303	0.556
ω	0.58	0.75	0.81

在水下介质中传输时,光子传输方向会改变。将光子发生一次散射后传输方向的极化角定义为散射角,散射角 θ 的分布称为散射相函数,文献[13]给出了散射相函数的近似值为

$$P(\theta) = \frac{1 - g^2}{2\pi(1 - 2g \cos \theta + g^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (1)$$

式中: g 为不对称因子,是 $\cos \theta$ 的平均值。文献[13]指出,当 g 取0.924时,可以符合绝大多数情况,因此仿真中选取 $g = 0.924$ 。在仿真时设定接收面为无限大平面,以便于无漏地收集和分析接收端光信号的时空分布情况。

根据蒙特卡罗仿真中记录的光子到达接收面的情况,可以统计出到达接收面的能量 E_R 分布。将光程除以光子在介质中的速度就可以知道光子从光源到达接收面的时间分布情况,统计一定数量的光子到达接收面的时间,就可以知道激光脉冲在水下信道中传输的时间特性。根据以往经验与现有接收机结构参数,设定接收视场角为 15° ,接收孔径为100 mm,可模拟出给定接收参数下的水下光通信的结果,图1分别为三种水质条件下不同传输距离的能量衰减及脉冲展宽情况。

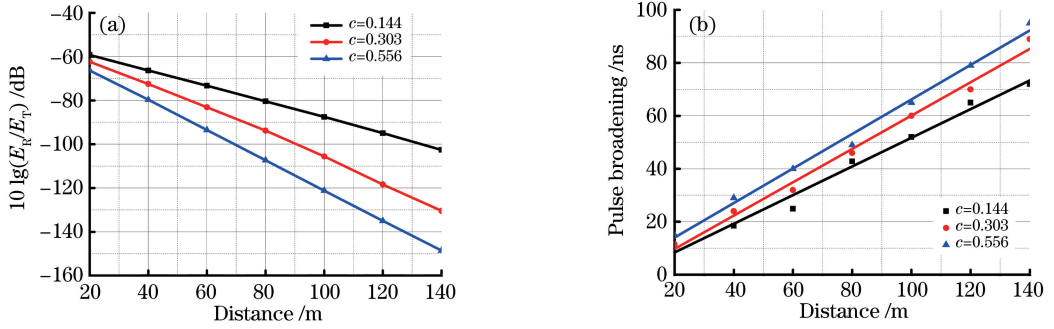


图 1 三种不同水质下接收端能量和脉冲展宽与传输距离的关系。

(a)接收端能量与传输距离的关系;(b)脉冲展宽与传输距离的关系

Fig. 1 Variation of received power and pulse broadening with transmission distance under three different water quality parameters. (a) Received power versus transmission distance; (b) pulse broadening versus transmission distance

图 1(a)中横坐标为激光脉冲在水下的传输距离,纵坐标为能量的衰减情况,仿真结果显示,随着传输距离的增加,到达接收面的脉冲能量近似呈指数衰减,且水质的衰减系数越大,脉冲能量的衰减也越快。考虑到接收机具有一定的口径和接收视场,对于不同的接收机来说,系统衰减量不同,而衰减系数是内在的光学参数,与系统无关。引入有效衰减系数概念,根据文献[14]中对有效衰减系数 k 的定义,在接收参数给定的情况下有效衰减系数为

$$k = -\frac{\ln(E_{l_2}/E_{l_1})}{l_2 - l_1}, \quad (2)$$

式中: E_{l_1}, E_{l_2} 为在距离 l_1 和 l_2 处接收面的能量。根据蒙特卡罗仿真结果可以得到三种类型水质的有效衰减系数分别为 $0.0837, 0.124, 0.159 \text{ m}^{-1}$ 。

图 1(b)所示为激光脉冲到达接收面的脉冲展宽情况,可以看出,随着传输距离的增加,脉冲在时域上的展宽越来越大,近似呈线性增加。

根据仿真结果得到 Jerlov II 类水下传输距离为 130 m 时总的衰减为 -124.4 dB ,即 130 m 处接收端能量为发射端的 3.63×10^{-13} 。选用对 532 nm 波长敏感的适用于弱光探测且具有高增益的光电倍增管(PMT)作为光电转换器件,其探测阈值达 1 nW。在不考虑环境噪声情况下,当接收到的脉冲光功率大于探测器阈值时可以达到通信系统极限探测能量,则根据接收到的脉冲光峰值功率 $P_D = \frac{E_R}{\tau}$ (其中 τ 为脉冲宽度),假设 $P_D = 1 \text{ nW}$,计算得所需系统发射端脉冲能量为 0.22 mJ。考虑到实际系统噪声以及光路偏转等因素带来的能量损耗,设计实验系统中选取波长为 532 nm、重复频率为 1.5 kHz、能量为 1 mJ 的脉冲

激光器作为系统发射光源,以保证通信效果。具体的系统设计参数如表 2 所示。

表 2 实验系统参数

Table 2 Parameters of experimental system

Parameter	Value
Wavelength λ /nm	532
Initial pulse width /ns	10
Single pulse energy /mJ	1
Initial divergence angle θ_0 /mrad	2
Pulse initial radius r_0 /mm	2
Emission efficiency η_e	0.8
Frequency /kHz	1.5
Aperture radius /mm	100
Field of view /($^\circ$)	15

2.2 PPM 与 LDPC 编码

在无线通信系统中采取前向纠错编码方式可以显著提高通信系统性能。LDPC 是一种以稀疏校验矩阵为基础的线性分组码,其校验矩阵仅由少数的 1 组成,其余为 0。LDPC 的纠错能力强,编译码复杂度低,所需的硬件较为简单,适用于信道条件复杂的水下激光通信系统。PPM 是利用激光脉冲所在时隙位置来表示传输的信息。与其他水下激光通信调制方式相比,PPM 具有脉冲峰值功率高、平均功率利用率高及调制速率高等优点。因此,将 PPM 与 LDPC 编码相结合,信息处理流程如图 2 所示。

系统采用编码后码长为 2304 bit 的几种码率的 LDPC 编码方式,信息经过 LDPC 编码完成后进行串并转换,每 8 bit 数据为一组,PPM 将分组后的 8 bit 传输信息映射为由 $2^8 = 256$ 个时隙组成时间段内的其中一个时隙处的脉冲信号。设传输的信息为 $u = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_8)$,则调制后的信息可表示为 2^8 个时隙内第 m 时隙位置上的脉冲信号:

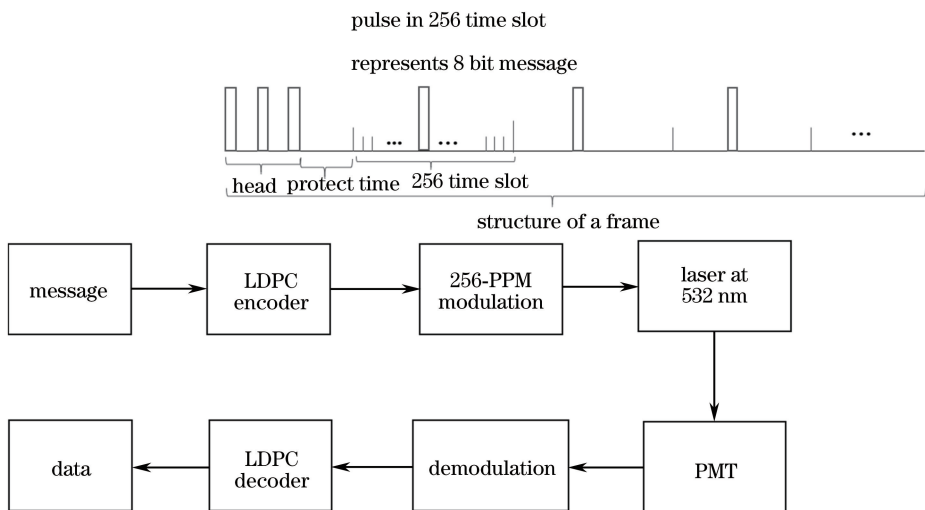


图 2 信息处理流程图

Fig. 2 Processing flow chart of system signal

$$m = 1 + \sum_{i=1}^8 2^{i-1} u_i. \quad (3)$$

根据图 1(b)所示的水下传输距离与脉冲展宽的关系可知,三类水质下水下传输 130 m 后最大脉冲展宽小于 100 ns,为了防止码间串扰所造成的影响,在每 256 个时隙前加入一段静默时隙,这一段时隙中不发送脉冲,称为保护时隙。为了便于解调,在所需发送的一系列光脉冲(代表一帧数据)前设置两个等间隔的脉冲作为帧头。调制后的数据作为控制激光器出光的控制信号,在系统接收端,探测器将采集到的光信号转换为电信号,采样后经匹配滤波对脉冲进行识别与提取处理。之后,信号进入解调器进行 PPM 解调,解调完成后 LDPC 译码器根据存储的校验矩阵进行比特翻转判决译码。最后,系统将译码得到的信息上传给计算机端显示。系统的信息处理过程均在 Xilinx 的 XC4VLX25 型现场可编程门阵列(FPGA)中实现。

根据上述信息处理流程进行仿真,产生随机二进制序列进行编码调制,加入高斯白噪声以模拟水下信道环境,最后统计码长为 2304 bit,码率分别为 1/2, 2/3, 3/4 和 5/6 的 LDPC 编码与 PPM 相结合在最大迭代次数为 10 次时解调译码后的信息产生的误码数,累加误码数并得到系统的误码率情况,如图 3 所示。

由仿真结果可知,码率为 1/2 的 LDPC 编码比 2/3 码率的编码多 1 dB 左右的编码增益,码率越低,编码性能越好。这是因为码率低的码字中校验位多,系统纠错的能力相对较好。由仿真结果可以看出,在相同信噪比条件下,经 LDPC 编码后系统

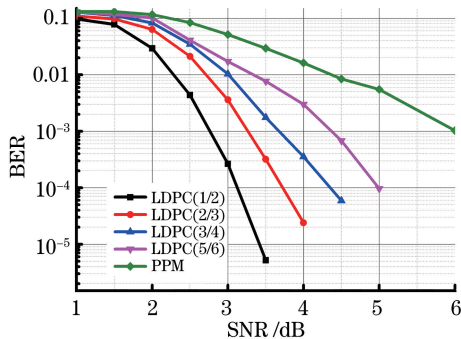


图 3 不同码率编码下误码率与信噪比曲线

Fig. 3 BER versus SNR under different code rates

误码率性能有明显改善,基本满足通信系统误码率要求。

3 水池实验

3.1 实验系统组成

系统发射端的信息经计算机通过串口传送到 FPGA 中进行 LDPC 编码与 PPM,通过控制电路控制激光器在相应的时隙产生光脉冲,激光脉冲通过发射端窗口在水中传输。在系统接收端,激光脉冲经过接收机的接收光路进入探测器,由探测器将光信号转换为电信号,并在 FPGA 中进行信息的处理。由串口将模数转换器(AD)采样后的数据上传给上位机。系统发射端与接收端密封在水密装置中并置于水底,图 4 为水池实验的系统框图。

3.2 实验结果与分析

实验选取水深为 5 m、长为 280 m、宽为 10 m 的水池作为水下信道环境,实验过程中固定系统发射端,通过接收端航程的改变来控制通信距离,

分别测试了系统在水下传输距离为 90, 100, 110, 120, 130 m 时的通信性能。在每个距离分别统计出 1/2, 2/3, 3/4 和 5/6 码率下 LDPC 编码与 PPM

相结合的通信性能。接收端对探测器接收的信号进行一系列信号处理, 图 5 为 130 m 处模拟探测信号采样图。

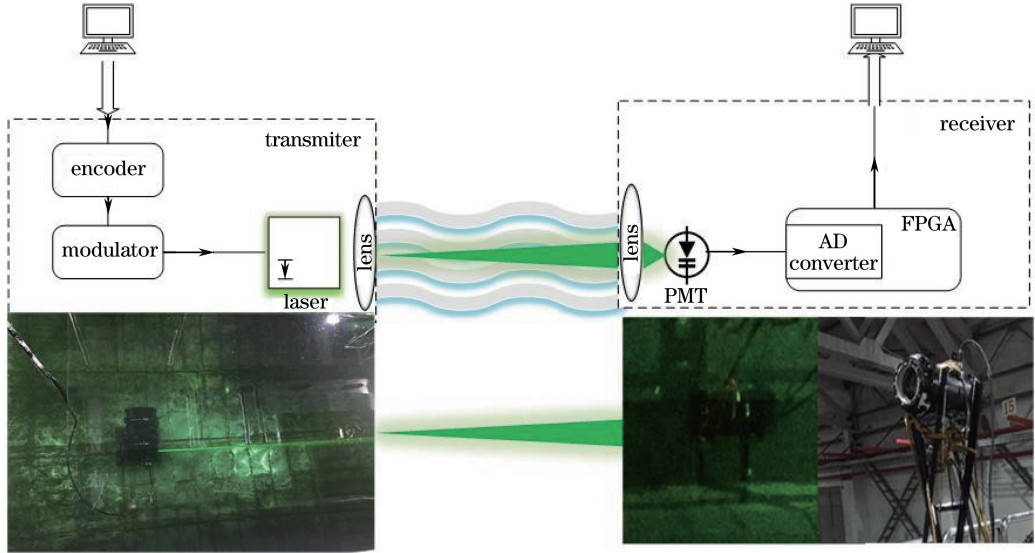


图 4 水下激光通信系统装置图

Fig. 4 Installation of underwater laser communication system

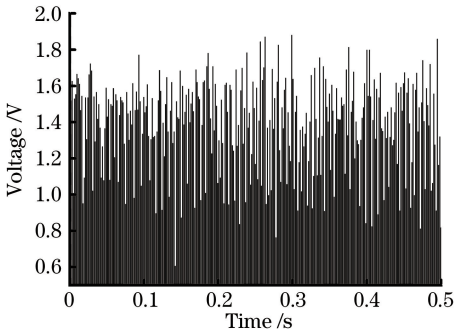


图 5 130 m 处模拟探测信号采样图

Fig. 5 Sampling map for analog detection signal at 130 m

实验中, 为了衡量水下长距离通信系统的通信性能, 将接收到的信息与发送信息进行错误个数统计, 将传输数据中的错误比特数与所传输的数据信号的比特数的比值定义为误码率。实验中采用的激光器重频为 1.5 kHz, 则 PPM 后速率为 12 kb/s。由于实验时间限制, 统计 2 min 内传输数据中错误的信息个数, 每组数据量为 1.44×10^6 bit ($12 \text{ kb/s} \times 2 \times 60 \text{ s}$)。为了更好地统计误码率情况, 定义在 2 min 内无误码的情况下, 误码率值小于 10^{-6} 时, 系统可以实现可靠通信。

对实验结果进行统计, 系统接收端信噪比、不同传输距离下未编码时误码率与不同码率编码后误码率如表 3 所示。

表 3 不同距离下信噪比与误码率统计

Table 3 Measured SNR and BER at different transmission distances

Distance /m	SNR /dB	BER				
		PPM	LDPC(1/2)+ PPM	LDPC(2/3)+ PPM	LDPC(3/4)+ PPM	LDPC(5/6)+ PPM
90	17.3034	$\leq 10^{-6}$	$\leq 10^{-6}$	$\leq 10^{-6}$	$\leq 10^{-6}$	$\leq 10^{-6}$
100	14.6350	$\leq 10^{-6}$	$\leq 10^{-6}$	$\leq 10^{-6}$	$\leq 10^{-6}$	$\leq 10^{-6}$
110	11.2464	$\leq 10^{-6}$	$\leq 10^{-6}$	$\leq 10^{-6}$	$\leq 10^{-6}$	$\leq 10^{-6}$
120	8.1350	7.14×10^{-4}	8×10^{-6}	3.899×10^{-5}	6.2391×10^{-4}	6.5104×10^{-4}
130	5.7854	0.00249	9.2×10^{-6}	7.735×10^{-4}	0.0010	0.0015

根据表 3 绘制的信噪比与误码率曲线如图 6 所示。

由图 6(a) 可知, 随着传输距离增加, 模拟实验中探测器接收到的能量近似呈指数衰减, 根据(1)式

计算有效衰减系数 k 为 0.1337 m^{-1} , 参考对 Jerlov 不同类型水质的蒙特卡罗仿真结果可知, 实验环境的水质情况接近 Jerlov II 类水质。由实验结果与仿真曲线的对比分析可得, 不同码率编码的误码率之间变化情况大致相同, 但在相同信噪比条件下仿真结果要优于实验统计结果, 分析原因主要为: 一方面, 由于仿真是在理想的高斯信道下对系统编码调制方式进行研究, 而实验是在船舶拖曳水池条件下进行的, 水质并不是理想情况下的水质; 另一方面, 由于通信系统电路的噪声等因素的影响, 以及在实验时存在的光路对准问题, 接收端可能并未对准激光光强的最强处, 这些因素会造成一定的能量损耗。最终实验结果与仿真结果存在一定的偏差。由表 3 统计结果可得, 在信噪比条件较好时, 通信距离小于 110 m 时经 PPM 的未编码系统可以获得较好的通信效果。但当传输距离增

大, 信噪比降低后, 未编码的 PPM 系统误码率增加, 系统通信性能下降, 在 120 m 处未编码系统误码率为 7.14×10^{-4} , 信噪比为 8.1350 dB。在 130 m 处通过码率为 2/3 的 LDPC 编码与 PPM 相结合的系统误码率为 7.735×10^{-4} , 信噪比为 5.7854 dB, 即在相同误码率条件下系统增益可达 2.34 dB。在水下传输距离 130 m 处, 经过 LDPC 编码与 PPM 后系统的误码率小于 10^{-5} , 对比有效衰减系数可得到在 Jerlov II 类水质下系统的最远通信距离可达 139.8 m。

图 6(b) 为不同码率情况下系统误码率与信噪比的关系曲线图, 不同码率下误码率变化情况与仿真结果误码率与编码码率趋势基本吻合, 码率越低, 系统误码率越低。在不考虑码率带来的速率降低问题的前提下, 采取 1/2 码率的 LDPC 编码与 PPM 结合可以得到更好的通信性能。

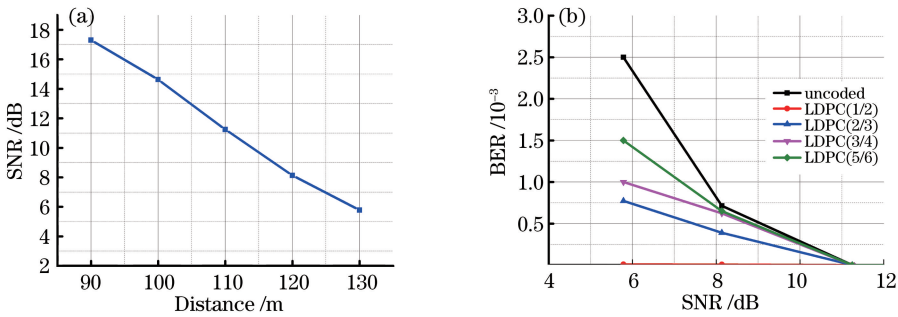


图 6 信噪比与误码率曲线。(a) 信噪比与水下传输距离的关系; (b) 不同编码情况下误码率与信噪比关系
Fig. 6 SNR and BER curves. (a) SNR versus underwater transmission distance; (b) measured BER versus SNR by different ways of coding

4 结 论

基于蒙特卡罗法对水下脉冲激光长距离传输特性进行仿真, 根据仿真结果设计相应系统参数, 并基于 FPGA 实现 LDPC 编码与 PPM 相结合的水下长距离激光通信系统。经水池实验验证, 该系统可以实现水下最远传输距离为 130 m 误码率低于 10^{-5} 的可靠通信。较之未编码的 PPM 系统可获得 2.34 dB 编码增益。通过优化编码校验矩阵的构造、解调译码的迭代、减小放大电路的噪声及提高接收机视场和口径等方式, 可以进一步提升系统性能。综上所述, 对于远距离、高速率的水下激光通信而言, 将 LDPC 编码与 PPM 相结合可以克服长距离信道引入的干扰, 有效保证通信的性能, 具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1518-1547.
- [2] Hu S Q, Mi L, Zhou T H, et al. Viterbi equalization for long-distance, high-speed underwater laser communication[J]. Optical Engineering, 2017, 56(7): 076101.
- [3] Hu X H, Zhou T H, He Y, et al. Design and analysis of underwater optical communication transceiver system based on digital signal processor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(3): 0305003.
胡秀寒, 周田华, 贺岩, 等. 基于数字信号处理机的水下光通信收发系统设计及分析[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0305003.
- [4] Li J W, Bi W H, Ren Y H. A method for simulating time-domain broadening of laser pulse in the

- underwater laser communication [J]. *Optical Technique*, 2012, 38(5): 569-572.
- 李仅伟, 毕卫红, 任炎辉. 水下激光通信中脉冲时域展宽的模拟计算方法[J]. *光学技术*, 2012, 38(5): 569-572.
- [5] Gabriel C, Khalighi M A, Bourennane S, *et al.* Investigation of suitable modulation techniques for underwater wireless optical communication[C]//2012 International Workshop on Optical Wireless Communications, October 22, 2012, Pisa, Italy. New York: IEEE, 2012: 13116994.
- [6] Liang B, Chen W B. Error correction for optical PPM communication using combination of RS and trellis code modulation techniques[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(7): 1361-1364.
- 梁波, 陈卫标. 基于 RS 编码及网格编码调制的光 PPM 通信纠错技术[J]. *光子学报*, 2008, 37(7): 1361-1364.
- [7] Han Z, Feng G Z, Bian Y B. Performance comparison of short LDPC and RS codes based on BP algorithm[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2009, 21(1): 61-65.
- 韩壮, 鄞广增, 卞银兵. 短 LDPC 码和 RS 码基于 BP 算法的性能比较[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2009, 21(1): 61-65.
- [8] Richardson T J, Urbanke R L. Efficient encoding of low-density parity-check codes [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, 47(2): 638-656.
- [9] Liu M. Research on the transmission performance of LDPC and PPM in wireless laser communication system[D]. Xi'an: Xidian university, 2013.
- 刘敏. 无线激光通信系统中 LDPC 码和 PPM 的传输性能研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [10] 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*, 2012, 5(1): 1-12.
- [11] Cochenour B, Mullen L, Muth J. Temporal response of the underwater optical channel for high-bandwidth wireless laser communications [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2013, 38(4): 730-742.
- [12] Cox Jr W C. Simulation, modeling, and design of underwater optical communication systems [M]. North Carolina State: North Carolina State University, 2012.
- [13] Jerlov N G. *Marine optics* [M]. Amsterdam: Elsevier, 1976.
- [14] Hu X H, Hu S Q, Zhou T H, *et al.* Rapid estimation of the maximum communication distance for an underwater laser communication system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0805007.
- 胡秀寒, 胡思奇, 周田华, 等. 水下激光通信系统最大通信距离的快速估计[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0805007.