

# 基于 LDPC 和 PPM 的水下光通信性能分析

杜劲松<sup>1</sup> 周田华<sup>2\*</sup> 陈卫标<sup>2</sup> 胡芳仁<sup>1</sup>

<sup>1</sup>南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210046

<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息技术研究中心, 上海 201800

**摘要** 在水下光通信中,信号在海水信道中衰减极大,严重影响通信系统的可靠性,因此必须采用优秀的纠错码来降低数据传输的误码率。将低密度奇偶校验码(LDPC)与脉冲位置调制(PPM)相结合,建立水下光通信系统模型,在原有的 PPM 软解调基础上进行简化,降低计算的复杂度,便于硬件实现。简化后的方法由于不需要知道信道的详细特征,特别适合复杂的海水信道中软信息的提取。Matlab 仿真分析比较简化前后系统的误码性能,结果表明,简化后的方法由于简化了软信息的提取,尽管相对于未简化方法造成了系统编码增益的下降,但相对于未编码情形来说仍然具有较高的编码增益;当 PPM 调制阶数较低时,简化后方法的误码性能甚至优于里德-所罗门码。总体而言,简化软解调的方案特别适合不同应用场合下的水下光通信。

**关键词** 光通信; 水下光通信; LDPC 码; PPM 调制; 简化软解调

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.120605

## Performance Analysis of Underwater Optical Communication Based on LDPC and PPM

Du Jinsong<sup>1</sup> Zhou Tianhua<sup>2</sup> Chen Weibiao<sup>2</sup> Hu Fangren<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts & Telecommunications,  
Nanjing, Jiangsu 210046, China

<sup>2</sup> Research Center of Space Laser Information Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** Because the signal attenuation is great in sea channel so as to seriously impact on the performance of communication system, an excellent error correcting code is necessary to reduce the error rate of data transmission in underwater optical communication. A system model of underwater optical communication is established by combining low density parity-check code with pulse position modulation. A simplified soft demodulation based on the general PPM soft demodulation is used to reduce the complexity of the algorithm, which is convenient for hardware implementation. What's more, the simplified soft demodulation method is very suitable for the extraction of soft information in sea channel because it does not need the detailed features of channel. The error performance between the general method and simplified method is analyzed by using Matlab software. According to the simulation results, the system code gain by using simplified method is decreased because of the simplified extraction of soft information, but it is still higher than code gain of the uncoded system. When PPM order is lower, the performance by using simplified method is even superior to that by Solomon Reed code. On the whole, the scheme of the simplified soft demodulation based on the combination of LDPC and PPM is very suitable for underwater optical communication in huge ranges of applications.

**Key words** optical communications; underwater optical communication; low density parity-check code; pulse position modulation; simplified soft modulation

收稿日期: 2016-08-25; 收到修改稿日期: 2016-09-06; 网络出版日期: 2016-12-06

基金项目: 国家 863 计划(2014AA093301)、中国科学院国防创新基金

作者简介: 杜劲松(1992—),男,硕士研究生,主要从事通信编码与调制方面的研究。E-mail: 1002928762@qq.com

导师简介: 陈卫标(1969—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光遥测方面的研究。

E-mail: webchen@siom.ac.cn

\* 通信联系人。siomzth@siom.ac.cn

OCIS codes 060.4080; 060.4510; 010.4450

## 1 引言

水下通信应用日益广泛,水下激光通信是当前主流的水下无线通信方式。相比于其他方式,水下激光通信具有频带资源丰富、传输速率高、抗噪声能力强、安全性高等显著优势<sup>[1]</sup>。20世纪60年代,美国的沙利文和敦特礼等<sup>[2]</sup>发现海水在蓝绿光波段(0.45~0.55 μm)存在低损耗窗口。激光技术的快速发展,已使激光能够穿透至水下约300 m的深度,通信速率亦可达到百兆量级<sup>[3]</sup>。

光通信中,较为常见的调制方式有关键控(OOK)、脉冲位置调制(PPM)以及差分脉冲间隔调制(DPIM)等。水下激光通信因具有较低的发射功率和优秀的抗噪声能力,调制方式通常选择PPM<sup>[4-5]</sup>。编码方面,里德-所罗门(RS)码广泛应用于水下光通信中,其优点是码长可调、编码效率高、与PPM完全匹配、硬件实现相对容易等<sup>[6]</sup>,但是RS码在信道条件变差时性能也会变差,对信道输出软信息利用率较低,这将导致其无法进一步提高系统的编码增益<sup>[7]</sup>,因而考虑用低密度奇偶校验(LDPC)码来代替RS码。LDPC码于20世纪60年代由Gallager提出后,由于被当时条件的限制,一度被人们遗忘;近年来,基于校验矩阵构造方法的改进<sup>[8]</sup>与高效译码算法的提出,LDPC码重回人们的视野。研究发现,LDPC码在加性高斯白噪声信道下拥有逼近香农极限的优异性能,而且码长越长性能越好,通过选择合适的译码算法,硬件实现也较为容易<sup>[9-10]</sup>。LDPC码还能充分利用信道输出的软信息进行解码,与PPM相结合可获得较高的编码增益<sup>[11]</sup>。

基于以上研究基础,本文研究了水下光通信中LDPC与PPM相结合系统的性能,提出一种简化提取PPM软信息的方案,通过Matlab进行仿真,重点分析了PPM调制阶数对系统误码性能的影响。

## 2 系统模型

基于LDPC和PPM的水下光通信系统的模型如图1所示。系统具体工作流程如下。1) 信源信息在编码端进行LDPC编码,经过调制器进行M-PPM调制(M为调制阶数),将调制的PPM的信号加载到激光上,由光学天线进行发送,这样发送端就完成了发送任务。2) 在接收端,需要利用光学天线来接收微弱的光信号并传送到光电探测器上[通常采用雪崩光电二极管(APD)作为探测器],APD将光信号放大并转换为电信号,通过采样将获得的信号输入解调器进行软解调,译码器利用所得的软信息进行纠错译码,获得信源信息<sup>[12]</sup>。

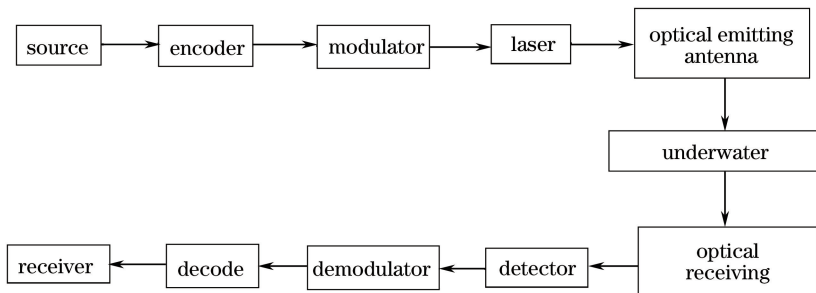


图1 系统框图

Fig. 1 System chart

由于海水信道复杂,为了便于仿真分析,假设信道为加性高斯白噪声信道,且引入乘性噪声 $I_k$ ,此时信道模型可表示为

$$y_k = I_k z_k + n_k, \quad I_k \geq 0, 1 \leq k \leq M, \quad (1)$$

式中 $z_k \in \{0, 1\}$ 是经过调制后的发送信号,代表第 $j$ 帧第 $k$ 个时隙有无信号; $y_k$ 是接收信号的幅度; $n_k$ 是均值为0、方差为 $N_0/2$ 的加性高斯白噪声; $I_k$ 是乘性噪声引起的瞬时强度增益,与 $n_k$ 相互独立。仿照空间光通信中的弱湍流情况,不失一般性,令 $I_k$ 满足均值为 $-2\sigma_x^2$ 、方差为 $4\sigma_x^2$ 的对数正态分布<sup>[13]</sup>,本文取 $\sigma_x = 0.1$ 。

## 3 PPM软信息的计算与简化

对于1个M阶PPM调制,1个PPM调制符号对应的原始信息比特数 $n = \lg M$ ,因此LDPC码的码长

$N$  应为  $n$  的整数倍。在调制时,将编码后的  $N$  比特分成  $N/m$  组,再将每组的  $n$  比特映射到  $M$  个时隙中的 1 个脉冲上,此时其他时隙均无脉冲,之后将其发送出去,接收端只需判断有脉冲时隙的位置,便可还原出原信息比特。

假设  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 共有  $n$  个比特映射到 1 个 PPM 信号点上,  $b$  是其中第  $l$  个比特,  $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_M)$  是  $M$  个 PPM 时隙的输出量,则原信息第  $l$  比特为  $b$  的后验概率表示为

$$p(b;l) = p(x_l = b | \mathbf{Y}) = \sum_{\substack{\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ x_l=b}} p(\mathbf{X} | \mathbf{Y}), b \in \{0, 1\}, \quad (2)$$

式中具体码元组合的后验概率可表示为

$$p(\mathbf{X} | \mathbf{Y}) = \frac{p(\mathbf{Y} | \mathbf{X})p(\mathbf{X})}{p(\mathbf{Y})} = \frac{p(\mathbf{Y} | \mathbf{X})p(\mathbf{X})}{\sum_{i=1}^M p(\mathbf{Y} | \mathbf{X}_i)p(\mathbf{X}_i)} = \frac{p(\mathbf{Y} | \mathbf{X})}{\sum_{i=1}^M p(\mathbf{Y} | \mathbf{X}_i)}, \quad (3)$$

其中  $\mathbf{X}_i$  表示信源比特所有可能出现的码元组合,如  $\mathbf{X}_0 = (0, 0, \dots, 0)$ ,  $\mathbf{X}_1 = (0, 0, \dots, 1)$ ,  $\dots$ ,且发送各码元组合的概率  $p(\mathbf{X}_i) = 1/M$ 。若用  $p_s(y_i)$  表示时隙中有信号时的概率密度,  $p_n(y_i)$  代表时隙中无信号的概率密度,则

$$p(\mathbf{X} | \mathbf{Y}) = p_s(y_l) \prod_{i=1, i \neq l}^M p_n(y_i) = \frac{p_s(y_l)}{p_n(y_l)} \prod_{i=1}^M p_n(y_i) = L_l \prod_{i=1}^M p_n(y_i), \quad (4)$$

式中  $L_l = \frac{p_s(y_l)}{p_n(y_l)}$  可表示为该帧第  $l$  时隙有无信号的似然比,则

$$p(\mathbf{X} | \mathbf{Y}) = \frac{L_l \prod_{i=1}^M p_n(y_j)}{\sum_{i=1}^M [L_i \prod_{i=1}^M p_n(y_j)]} = \frac{L_l}{\sum_{i=1}^M L_i}. \quad (5)$$

由(2)和(5)式可得出信源第  $l$  比特为  $b$  的概率:

$$p(b;l) = \frac{\sum_{\substack{\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ x_l=b}} L_l}{\sum_{i=1}^M L_i}. \quad (6)$$

进而可计算出信源每比特信息的对数似然率,也即 LDPC 译码所需的软信息,表达式为

$$L(x_l) = \ln \left[ \frac{p(0;l)}{p(1;l)} \right] = \ln \left[ \sum_{\substack{\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ x_l=0}} L_i \right] - \ln \left[ \sum_{\substack{\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ x_l=1}} L_i \right]. \quad (7)$$

对本文信道模型而言,由(1)式可计算出

$$p_s(y_i) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp \left[ -\frac{(y_i - I_i)^2}{N_0} \right], \quad (8)$$

$$p_n(y_i) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp \left( -\frac{y_i^2}{N_0} \right), \quad (9)$$

式中  $I_i$  为第  $i$  时隙的瞬时光强增益,  $N_0$  为高斯信道的噪声功率。将(8)和(9)式相除可得第  $i$  时隙的似然比:

$$L_i = \exp \left( \frac{2y_i I_i - I_i^2}{N_0} \right). \quad (10)$$

以上是计算 PPM 软信息的一般方法<sup>[14-16]</sup>,该方法重点在于计算每时隙似然比,为此需要知道详细的信道信息,即  $p_s(y_i)$  和  $p_n(y_i)$ ,这在实际光通信系统中经常是未知和难以准确建模的。实际应用中,由于接收端通常采用高增益的 APD 检测光信号,因此可以根据 APD 输出的电子计数进行解调,即将 APD 输出采用韦伯近似或高斯近似来模拟,然后利用输出的概率密度函数来计算每时隙的似然比<sup>[17]</sup>。这种算法复杂度高、参数多、计算繁琐,且平均每时隙到达的信号光子数和噪声光子数在实际状态中难以准确估计。

因此,考虑进行软信息的简化计算<sup>[18]</sup>。由(5)式可知,后验概率可表示为某一时隙的似然比与所有时隙似然比之和的比值,不妨考虑将某一时隙内的似然比用别的参量来替代,如接收端在该时隙内采样得到的电压幅度或者功率等。经验证,用某一时隙内的功率代替该时隙的似然比来近似计算后验概率  $p(\mathbf{X} | \mathbf{Y})$  可以获得不错的效果,即后验概率可使用某一时隙内接收到的功率除以 1 帧 PPM 信号的总功率来近似:

$$p(\mathbf{X} | \mathbf{Y}) \approx \frac{P_i}{\sum_{i=1}^M P_i}, \quad (11)$$

式中  $P_i$  表示第  $i$  时隙接收的功率,它与接收的信号幅度  $y_i$  满足平方关系。由于本文采用的是 PPM 调制,在解调时只需根据每个时隙内的功率来判断信号所在时隙的位置,故信道的相移与色散特性对信号的解调影响不大。若采用相移键控法(PSK)调制,则信道的相移和色散会严重影响解调结果,因此简化只适用于 PPM 解调。由于采用功率作为解调参量,当 PPM 时隙数增大时,发射功率不变,此时时隙内的功率将变得更加分散,可以预见,此时简化的可靠性也将降低,此时算法还有待改进。

采用这种简化计算,可以很方便地求出后验概率,不用特地计算出每时隙的似然比。对于 1 组码长为  $N$  的 LDPC 码,对应了  $N/\ln M$  个 PPM 符号,每个 PPM 符号需要计算  $M$  个时隙内的似然比,故减少了  $MN/\ln M$  次 e 指数计算。由于没有复杂的 e 指数运算,硬件实现的复杂度就降低了。最重要的是,即使不知道信道的详细信息,对于信道特性复杂的海水信道仍然适用,具有适用范围广的突出优点。

## 4 仿真分析

根据以上分析,利用(1)式的信道模型,分别在 8PPM,16PPM,32PPM,64PPM 信道下进行 Matlab 仿真。其中 LDPC 译码采用对数域(LLR)置信传播(BP)算法中的最小和(Min Sum)算法,又称最大积(Max Product)算法,它的优点是运算简单,便于硬件实现<sup>[19]</sup>。仿真中没有采用交织编码来提高抗突发差错能力,这是由于 LDPC 码监督矩阵的稀疏性,使 LDPC 码自身就有着优秀的抗突发误码的能力<sup>[20]</sup>。具体仿真流程如下。

- 1) 利用 Mackay1A 构造法构造出  $1200 \times 2400$  的稀疏校验矩阵,进而获得对应的生成矩阵;
- 2) 随机产生 1 组 1200 比特的 0,1 随机序列作为信源比特,将其与生成矩阵相乘获得编码后的序列;
- 3) 对编码后的信号进行  $M$ -PPM 调制,输出相应的 PPM 符号;
- 4) PPM 符号乘上服从对数正态分布的光强增益后通过高斯白噪声信道;
- 5) 在接收端对接收到的包含噪声的 PPM 信号进行软解调,输出每比特信号的似然软信息;
- 6) 将输出的软信息作为译码的初始消息,进行 BP 译码,输出译码序列;
- 7) 将译码序列与信息序列比较,计算错误码数,之后从 2) 开始重复执行以上步骤。

将每次得到的误码数累加,直至达到预设的最大分组数。具体仿真参数及数值见表 1。

表 1 仿真中用到的参数及数值

Table 1 Parameters and numerical values used in the simulation

Parameter	Numerical value
Code length	2400
Code rate	1/2
Degree of check node	3
Degree of variable node	6
PPM order	8,16,32,64
Iteration times	10
MAX group number	1000

仿真中选择(3,6)构造的 LDPC 码,性能优越,且编、译码较为简单<sup>[21]</sup>。为了对比,给出了在不同 PPM 调制阶数下所对应码长与码率的 RS 码误码曲线。由于 RS 码与 PPM 调制阶数之间存在着确定的关系,即码长  $N$  与调制阶数  $M$  满足  $N=M-1$  关系,所以与调制阶数相对应的 RS 码长分别为 7、15、31、63,码率均约为 0.5。具体仿真结果如图 2 所示。图 2 分别给出了采用一般提取 PPM 软信息方法的误码率曲线、采用

(11)式简化提取 PPM 软信息的误码率曲线、RS 码误码率曲线以及未编码误码率曲线(图中横坐标  $R_{SN}$  为信噪比,纵坐标  $R_{BE}$  为误码率)。

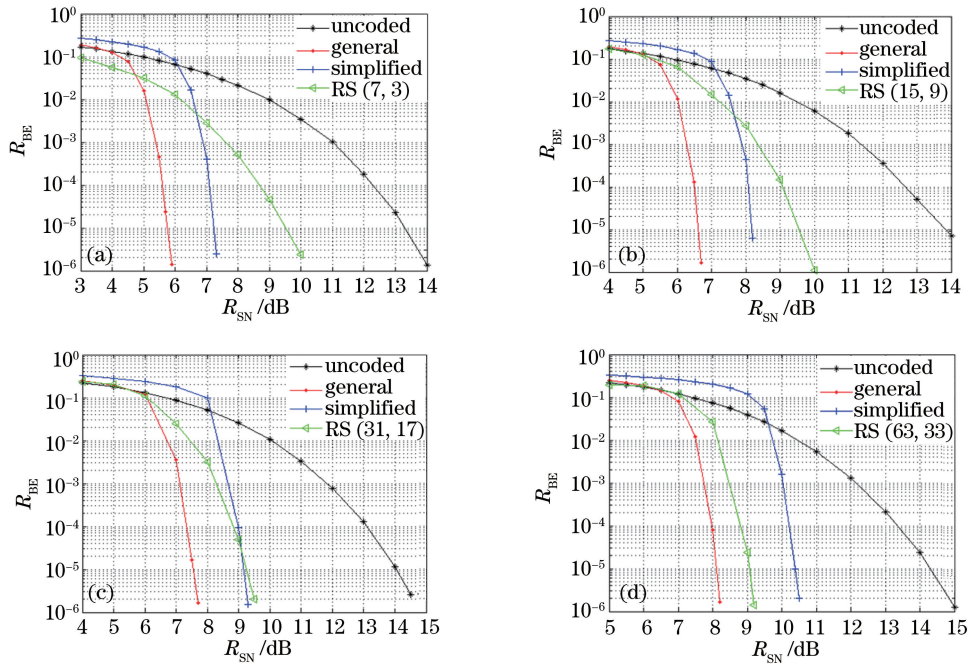


图 2 不同 PPM 信道性能曲线。(a) 8PPM;(b) 16PPM;(c) 32PPM;(d) 64PPM

Fig. 2 Performance curves of various PPM orders channels. (a) 8PPM; (b) 16PPM; (c) 32PPM; (d) 64PPM

从图中可以清楚地发现,随着 PPM 调制阶数的增加,达到相同误码率所需的信噪比将会增大,即系统可靠性能降低。这并不难理解,随着时隙数的增多,要想找到信号所在的时隙越困难,PPM 帧错误解调的可能性就越大。对比图中简化前后的误码率曲线,简化后的系统相较于未简化的系统,编码增益会有一些的损失,但简化后的误码性能仍远优于未编码的,且当调制阶数较低时,简化后的误码性能甚至超过 RS 码的。以误码率  $10^{-5}$  为例,表 2 给出了各调制阶数下几种方式间编码增益的比较以及采用简化方法时软信息绝对值的均值。

表 2 几种方式编码增益的比较

Table 2 Comparison of code gain among several methods

PPM order	Loss of code gain between simplified and general methods /dB	Code gain between simplified and uncoded methods /dB	Code gain between simplified and RS methods /dB	Mean value of soft information (simplified)
8	-1.4	6.0	2.4	1.42
16	-1.5	5.6	1.4	1.06
32	-1.5	5.0	0.1	0.76
64	-2.3	4	-1.2	0.55

由表 2 可知,在 PPM 调制阶数较低时,简化造成的编码增益损失较小,相对未编码情形有很高的编码增益,相对 RS 码亦获得了一定的编码增益,此时系统性能极佳。随着调制阶数的增加,输出软信息绝对值的平均值逐渐减小,而软信息绝对值的大小代表了该比特能否正确译码的可信度,可信度降低导致了误码数的增加,编码增益随之降低。尽管如此,简化后的方法,计算量较少,且由于未使用指数运算等高阶运算,对于硬件实现较为有利,在对信噪比要求不高的情况下,是一种不错的选择。另外,简化后提取软信息的方法不需要知道信道的具体特性,即  $p_s(y_i)$  和  $p_n(y_i)$ ,适用性广,对于信道特征极为复杂的水下光通信依然有效,且能获得较好的编码增益。但是对于高阶 PPM 调制而言,编码增益损失略大,此时以牺牲系统的信噪比来换取系统的简化,不建议使用,简化算法还有待进一步改进。

## 5 结 论

将 LDPC 码与 PPM 调制相结合,建立了水下光通信的系统模型,提出了一种适合水下光通信的 PPM 解调方案。采用一种简化的软信息提取方式,即用某一时隙内接收的功率与 1 帧 PPM 信号功率的比值来计算后验概率。仿真分析表明,在低阶 PPM 调制时,该方案性能极佳,误码性能甚至优于 RS 码的误码性能。采用简化提取软信息的方法,减少了计算量,同时降低了原算法的复杂度,便于硬件实现,特别适用于信道特性未知、不同水质的水下信道,应用性广。不过简化也造成了编码增益的下降,对高阶调制而言,性能会降低,此时该方案还有待改进。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Jian. Study and implement of underwater wireless optical communication system[D]. Xiamen: Xiamen University, 2014.  
吴 健. 水下无线光通信系统的研究和实现[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.
- 2 Duntley S Q. Light in the sea[J]. J Opt Soc Am, 1963, 53(2): 214-233.
- 3 Li Hongsheng, Yue Jun, Jin Jiucui. Review of the underwater communication technology using blue-green laser[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2015, 36(5): 16-22.  
李宏升, 岳 军, 金久才, 等. 蓝绿激光水下通信技术综述[J]. 遥测遥控, 2015, 36(5): 16-22.
- 4 Liu Min. Research on the transmission performance of LDPC and PPM in wireless 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.
- 5 Jia Kejun, Xue Jianbin, Peng Duo, *et al.* Modulation technologies under weak atmospheric turbulence channel[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(3): 569-573.  
贾科军, 薛建彬, 彭 铎, 等. 弱湍流信道中的调制技术[J]. 中国激光, 2009, 36(3): 569-573.
- 6 Hu Xiuhan, Zhou Tianhua, He Yan, *et al.* Design and analysis of underwater optical communication transceiver system based on digital signal processor[J]. Chinese J 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.
- 7 Li Haiyan, He Youjin, Ren Jiancun. Research on error-correcting code performance in laser communication with submarine simulative system[J]. Optical Communication Technology, 2010, 34(11): 49-51.  
李海燕, 何友金, 任建存. 激光对潜通信仿真系统中纠错码性能研究[J]. 光通信技术, 2010, 34(11): 49-51.
- 8 Lin Zhiguo, Bai Peng, Fan Wentong, *et al.* Research on a novel construction method of full rank QC-LDPC codes for optical communication systems[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(10): 1005003.  
林志国, 柏 鹏, 范文同, 等. 光通信系统中一种新颖的满秩 QC-LDPC 码的构造方法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1005003.
- 9 Guo Jianzhong, Tan Ying, Ai Yong. Performance analysis of LDPC coded pulse position modulation for deep-space optical communications[J]. Optical Communication Technology, 2007, 31(12): 57-59.  
郭建中, 谭 莹, 艾 勇. 基于 LDPC 码和 PPM 调制的深空光通信系统性能分析[J]. 光通信技术, 2007, 31(12): 57-59.
- 10 Yuan Ruijia. Study on efficient implementation of LDPC encoder and decoder [D]. Xi'an: Xidian University, 2012.  
袁瑞佳. LDPC 码的高效编译码实现技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- 11 Barua B, Majumder S P. Performance analysis of a LDPC coded multiple input/multiple output free-space optical system with Q-ary pulse-position modulation[C]. IEEE: International Conference on Electrical and Computer Engineering, 2010: 376-379.
- 12 Li Jinwei. The study on underwater laser communication system based on LDPC codes[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.  
李仅伟. 基于 LDPC 码的水下激光通信系统的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
- 13 Fan Yaqin. Research on channel coding and modulation technology of free space optical communication[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.

- 樊雅琴. 自由空间光通信信道编码与调制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- 14 Chen Jiajie, Li Xiaofeng. Belief propagation decoding of low-density parity-check codes for atmospheric turbulent optical PPM communication systems[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(2): 405-409.  
陈佳杰, 李晓峰. 大气湍流光 PPM 通信系统中 LDPC 码的置信传播译码[J]. 光子学报, 2009, 38(2): 405-409.
- 15 Hu Hongfei. Application research of LDPC in FSO communication[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2005.  
胡宏飞. LDPC 码在自由空间光通信中的应用研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2005.
- 16 Chen Chen. Research on iterative demodulating and decoding of LDPC-coded pulse-position modulation for space optical communication[D]. Wuhan: Wuhan Textile University, 2012.  
陈 琛. 空间光通信中 LDPC 码和 PPM 调制的迭代解调译码研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2012.
- 17 Dolinar S, Divsalar D, Hamkins J. Capacity of pulse-position modulation (PPM) on Gaussian and Webb channels[C]. IEEE: TELSIKS '09. 9th International Conference, 2000: 314-317.
- 18 Javornik T, Jelovčan I, Muhammad S S. Simplified soft value extraction for M-PPM-modulated signals in FSO systems [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2009, 63(7): 595-599.
- 19 Ma Chunbo, Xia Baohui, Ao Jun, *et al.* Accurate decoding arithmetic of LDPC based on APD receivers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(3): 1028-1033.  
马春波, 夏宝会, 敖 珺, 等. 基于 APD 接收机的 LDPC 精确译码算法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 1028-1033.
- 20 Hu Hongfei, Zhang Jiangxin. Performance and analysis of LDPC codes in PPM channel of space optical communication [J]. Space Electronic Technology, 2006, 3(3): 20-25.  
胡宏飞, 张江鑫. LDPC 码在空间光通信 PPM 信道中的性能与分析[J]. 空间电子技术, 2006, 3(3): 20-25.
- 21 Zhang T. Efficient VLSI architectures for error-correcting coding[D]. Minnesota: University of Minnesota, 2002.