

# 基于水印位的信道估计对 100 Gb/s PDM-DQPSK 光通信系统中低密度奇偶校验码纠错性能的提升

李超<sup>1</sup> 张文博<sup>2\*</sup> 张晓光<sup>1</sup> 席丽霞<sup>1</sup> 唐先锋<sup>1</sup> 何文雪<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

<sup>2</sup> 北京邮电大学理学院, 北京 100876

**摘要** 针对高速光通信系统中高斯白噪声和偏振模色散(PMD)引起的干扰问题,研究了一种改进的前向纠错方法,通过向低密度奇偶校验(LDPC)码中插入具有固定信息的比特位(“水印位”)来估计信道,并将其与译码算法结合构成新的算法。研究发现,若以误比特率(BER)低于 $10^{-9}$ 为标准,则在纠错性能方面,高斯信道中含 16、32 位水印位的 LDPC 码与卡方信道中传统的 LDPC 码相比,所需的光信噪比(OSNR)值可分别减少约 0.25 dB、0.35 dB;当考虑高速光通信中的 PMD 时,在差分群时延(DGD)为 20 ps 和 30 ps 时,含 16、32 位水印位的 LDPC 码与传统 LDPC 码字相比,所需 OSNR 值可分别减少约 0.63 dB、0.98 dB 和 1.16 dB、1.87 dB。

**关键词** 光通信;信道估计;低密度奇偶校验码;前向纠错;偏振模色散

**中图分类号** TN911.22 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0605007

## Performance Enhancement of LDPC in 100 Gb/s PDM-DQPSK Optical Communication Using a Water-Bit Based on Channel Estimation

Li Chao<sup>1</sup> Zhang Wenbo<sup>2</sup> Zhang Xiaoguang<sup>1</sup> Xi Lixia<sup>1</sup> Tang Xianfeng<sup>1</sup> He Wenxue<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China  
<sup>2</sup> School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** To reduce the interference caused by channel noise and polarization mode dispersion (PMD) in the optical communication, a modified forward error correction method is studied. By inserting fixed bits which are defined as the watermark bits (water-bit) into the low density parity check (LDPC) codes to estimate the channel, a new decoding algorithm which is combined with channel estimation is proposed. The results show that the LDPC code with 16, 32 water-bit transmitted over Gaussian channel outperforms the conventional LDPC code transmitted over Chi-square channel in the error correction performance, and with bit error rate (BER) below  $10^{-9}$  as standard, the optical signal to noise ratio (OSNR) value can reduce about 0.25 dB, 0.35 dB. When PMD is considered in the high-speed optical communications, the LDPC code with 16, 32 water-bit has a better tolerance than the conventional LDPC code, when differential group delay (DGD) is 20 ps and 30 ps, the OSNR value can reduce about 0.63 dB, 0.98 dB and 1.16 dB, 1.87 dB.

**Key words** optical communications; channel estimation; low density parity check codes; forward error correction; polarization mode dispersion

**OCIS codes** 060.2330; 060.4510

收稿日期: 2013-11-28; 收到修改稿日期: 2014-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(61205065)、国家 863 项目(2013AA013401)、山东省自然科学基金项目(ZR2010FM043)、区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室(上海交大)开放基金(2013GZKF031310)

作者简介: 李超(1988—),男,硕士研究生,主要从事光通信系统中的前向纠错技术方面的研究。

E-mail: chaolili2013@126.com

导师简介: 张晓光(1961—),男,教授,主要从事偏振模色散自动补偿、光孤子通信和光纤光栅等方面的研究。

E-mail: xgzhang@bupt.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: zhangwb@bupt.edu.cn

# 1 引 言

随着传输速率的不断提升,前向纠错技术已成为提高光通信传输性能的必然趋势<sup>[1]</sup>。低密度奇偶校验(LDPC)码作为新一代前向纠错码的代表,不仅具有较低的复杂度和优越的纠错性能,而且在改善高速光通信的传输性能方面,也卓有成效<sup>[2]</sup>。

将光通信系统的信道特性用高斯模型近似后,可以简化接收端的处理工作,但是高斯近似存在误差。故最近几年,有学者提出更加精准的光通信信道模型,即卡方信道模型,但是这种模型对高阶调制的移植性差且算法复杂度高。为了继续使用简单的高斯信道模型,本文引入信道估计,提高其纠错性能。

为了提高光通信系统对于光纤中偏振模色散(PMD)的容忍度,本课题组曾经将快速扰偏器分别和LDPC码、Reed-Solomon(RS)码结合<sup>[3-4]</sup>,研究发现前者对PMD的补偿性能较好。也有学者利用Turbo Equalization<sup>[5]</sup>来缓解PMD对于光信号的影响,即将置信度传播(BP)译码与Bahl-Cocke-Jelinek-Raviv(BCJR)算法结合,不过算法复杂度较高。

目前,LDPC码在光通信系统中已渐渐成为研究热点,已经有学者将LDPC应用于无线光通信系统<sup>[6-8]</sup>和大气激光通信系统<sup>[9-10]</sup>。光通信系统常用

的LDPC码型有QC(Quasi-Cycle)码<sup>[11-12]</sup>、SCG(Symmetric Configurable Graph)码<sup>[13]</sup>等,本文采用复杂度低的 $\pi$ -rotation LDPC码<sup>[14]</sup>,另外,人们也越来越多地将LDPC与其他技术进行结合<sup>[15]</sup>,来提高LDPC的纠错性能,如文献[16]引入交织技术解决通信系统产生的长串突发错误等问题。本文基于信道估计思想<sup>[17]</sup>,并在编码后的LDPC码插入若干“水印位”,以实现信道环境进行快速估计,并据此更新传统BP译码算法中的初始化信息,然后利用迭代译码算法进行译码。分析表明本文提出的方法具有较强的抗高斯白噪声和补偿PMD的能力,可以用于高速光通信系统。

# 2 搭建仿真平台

图1为以LDPC作为前向纠错时的100 Gb/s偏分复用-差分四相相移键控(PDM-DQPSK)仿真平台。本仿真系统采用的偏分复用(PDM)技术,即把两个相互正交的偏振利用起来进行复用。数据经串并转换变成两路,之后分别经过LDPC编码、插入水印位(具有固定信息的比特位)和PDM-DQPSK调制,得到最终码字。接收端按照相反的过程进行接收,最后得到译码结果。

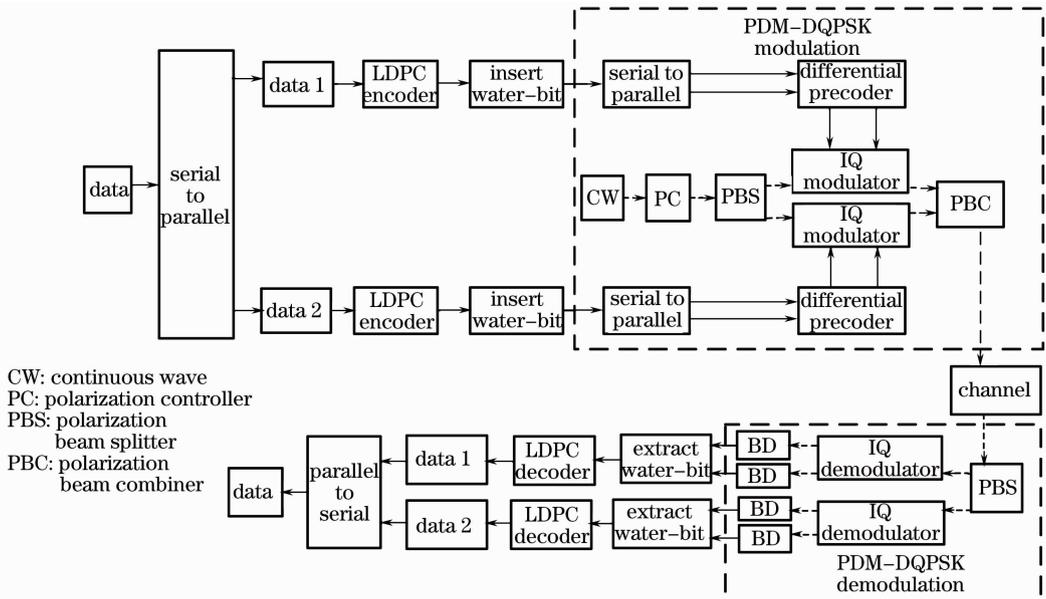


图1 加入LDPC的100 Gb/s PDM-DQPSK发送和接收系统框图

Fig. 1 Transmitter and receiver scheme of 100 Gb/s PDM-DQPSK with LDPC

光通信系统中的噪声来源包括发射机产生的噪声、光纤中的噪声、放大器的自发辐射(ASE)噪声和光接收机的噪声。用中心极限定理将这些噪声综合化归成高斯噪声,再利用随机过程知识将光通信系统

信道中的噪声简化为高斯噪声<sup>[18]</sup>。此仿真系统的传输链路由一段光纤组成,以高斯白噪声模拟光纤链路中损耗与掺铒光纤放大器引入的噪声,在波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 处PMD参量取为 $D = 0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 。

LDPC 码选用  $\pi$ -rotation LDPC 码型<sup>[19]</sup>, 校验矩阵  $\mathbf{H}$  的大小为  $512 \times 1024$ , 且经典的  $\pi$ -rotation

LDPC 码的校验矩阵  $\mathbf{H}$  由两个子矩阵组成, 其简图如图

$$\mathbf{H} = [\mathbf{H}^p | \mathbf{H}^d] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\pi}_A & \boldsymbol{\pi}_B & \boldsymbol{\pi}_C & \boldsymbol{\pi}_D \\ \boldsymbol{\pi}_B & \boldsymbol{\pi}_C & \boldsymbol{\pi}_D & \boldsymbol{\pi}_A \\ \boldsymbol{\pi}_C & \boldsymbol{\pi}_D & \boldsymbol{\pi}_A & \boldsymbol{\pi}_B \\ \boldsymbol{\pi}_D & \boldsymbol{\pi}_A & \boldsymbol{\pi}_B & \boldsymbol{\pi}_C \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中子矩阵  $\mathbf{H}^p$  是一个双对角线矩阵, 子矩阵  $\mathbf{H}^d$  是由旋转矩阵  $\boldsymbol{\pi}_A, \boldsymbol{\pi}_B, \boldsymbol{\pi}_C, \boldsymbol{\pi}_D$  组成。

编码算法为文献[20]中的  $\beta$ -矩阵编码算法, 即从  $\mathbf{H}$  矩阵的最后一行开始, 采用高斯消去法依次递推往上计算, 即可构造出  $\pi$ -rotation LDPC 码字。

### 3 对数域的置信传播译码算法

为了减少译码中的乘法运算, 使其在硬件上更容易实现, 译码算法采用对数域的 BP 算法 (LLR BP)。其译码流程如图 2, 其第一步计算就是初始化信息。

对数域的 BP 译码算法是迭代算法的一种, 可以分成 4 个步骤: 1) 初始化就是给变量节点赋初始值, 其中  $f_{LLR}(y_i)$  是初始化信息,  $L(q_{ij})$  是变量节点的信息; 2) 利用变量节点的值更新校验节点的信息, 其中  $L(r_{ji})$  是检验节点的信息; 3) 再利用校验节点的信息更新变量节点的信息; 4) 对变量节点进行判决, 其中  $C$  是判决之后的码字, 若满足结束条件  $\min(\mathbf{C}\mathbf{H}^T) = 0$ , 则直接输出码字, 否则继续迭代译码。

### 4 水印位的插入和提取

图 3 为插入水印位<sup>[21]</sup>技术的原理图, 图 3(a)代表传统的 LDPC 码字, 其中 A 和 B 是码字中任意的两个比特, 码长  $N=1024$ 。图 3(b)代表等间隔插入固定值为“0”比特(水印位)的 LDPC 码字,  $\tau$  为相邻水印位之间的比特间隔,  $G$  为插入水印位后的码长。图 3(c)是经过信道后接收到的码字。可见插入的水印位因为受到信道干扰, 在硬判决后会由“0”比特变成“1”比特, 说明此处受到的信道干扰较强, 图 3(c)中, B 点受到的信道干扰强于 A 点。图 3(d)为接收端提出水印位后的 LDPC 码字。若记水印位在码字中的位置为  $b_i$ , 则

$$b_i = \left(\frac{\tau}{2} + 1\right) + (i - 1)(\tau + 1), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N/\tau. \quad (2)$$

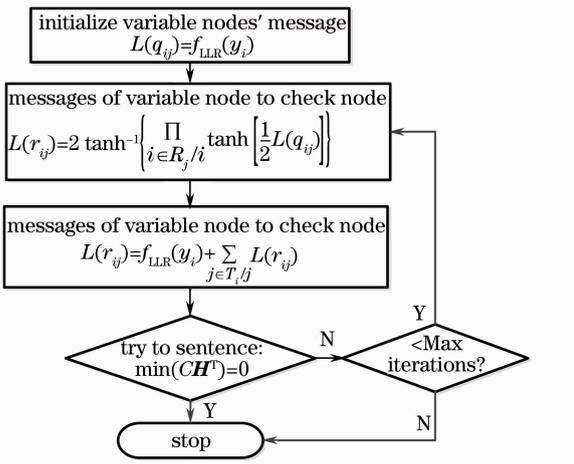


图 2 LLR BP 译码算法流程图

Fig. 2 Flow chart of LLR BP decoding algorithm

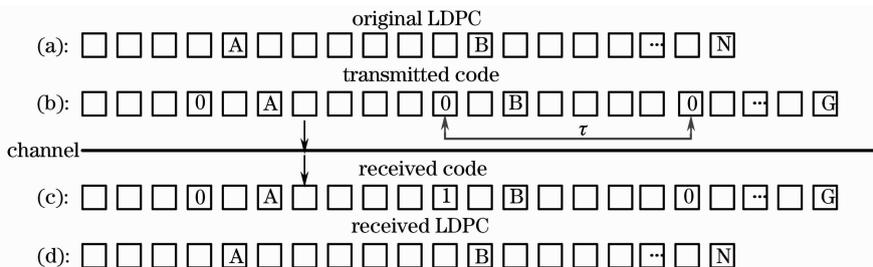


图 3 插入水印位的原理图

Fig. 3 Schematic diagram of water-bit algorithm

## 5 信道模型的选择

初始化信息的好坏直接影响了 LDPC 码的纠错性能和译码效率。研究表明,卡方信道模型<sup>[22]</sup>的初始化公式更符合光信道模型,但是对不同阶数的高阶调制,都需要重新计算其初始化信息。相比较而言,高斯信道模型则具有较为简单的结构,但是传统高斯信道模型的纠错性能低于卡方信道模型。在

$$P(y|C_i = 1) = \begin{cases} \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(\frac{y}{\sigma^2} - \frac{A^2}{2\sigma^2}\right) Q_1\left(\frac{A}{\sigma}, \frac{2\sqrt{y}}{\sigma}\right), & y \geq 0 \\ \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(\frac{y}{\sigma^2} - \frac{A^2}{2\sigma^2}\right), & y < 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $y$  为接收信号的幅度,  $C_i$  为发码字,  $Q_1$  是 1 阶 Marcum Q 函数,  $A$  为电场振幅  $\sigma^2$  为高斯白噪声方差。由于 DPSK 信号间存在  $\pi$  的相位差,因此发送‘0’和‘1’比特的概率密度函数的关系为

$$P(y|C_i = 0) = P(-y|C_i = 1). \quad (4)$$

对 PDM-DQPSK 信号解调输出功率进行统计分布,通过拟合其概率密度曲线,发现与 DPSK 相比,PDM-DQPSK 的信道转移概率密度函数只是存在平移和幅度上的缩放,其概率密度函数为

$$P(y|C_i = 1) = \frac{1}{24} \times \left[ \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(\frac{y-0.22}{\sigma^2} - \frac{A^2}{2\sigma^2}\right) Q_1\left(\frac{A}{\sigma}, \frac{2\sqrt{|y-0.22|}}{\sigma}\right) \right]. \quad (5)$$

### 5.2 高斯型初始化公式

袁建国等<sup>[18]</sup>将光信道模型近似为高斯信道模型。对于 LLR BP 译码算法,若令  $y$  为接收信号的幅度,  $C_i$  为发送的码字,  $P(C_i = 0|y)$  和  $P(C_i = 1|y)$  是码字的后验概率,  $P(y|C_i = 0)$  和  $P(y|C_i = 1)$  为信道转移概率密度,信源是等概率发送时,则 LLR BP 算法的初始化公式为

$$f_{\text{LLR}}(y) = \ln \frac{P(C_i = 0|y)}{P(C_i = 1|y)} = \ln \frac{P(y|C_i = 0)}{P(y|C_i = 1)}. \quad (6)$$

在高斯信道模型下,假设  $P(y|C_i = 0)$  和  $P(y|C_i = 1)$  是均值为  $-1$  和  $+1$ 、方差为  $\sigma^2$  的高斯函数,则(6)式化简为

$$f_{\text{LLR}}(y) = -\frac{2y}{\sigma^2}. \quad (7)$$

若将符号能量归一化为 1,且令  $R$  为码率,  $(E_b/N_0)$  为信噪比,则  $\sigma^2$  的表达式为

采用 4 节中介绍的水印位技术后,高斯信道模型的纠错能力已经可以超越卡方信道模型。

### 5.1 卡方分布型初始化公式

对于光域的差分移相键控 (DPSK) 调制信号,若使用平衡接收机进行直接检测,其接收信号的信道转移概率密度可以表示为<sup>[22]</sup>

$$\sigma^2 = \frac{1}{2R(E_b/N_0)}. \quad (8)$$

采用高斯信道模型以后,虽然初始化信道转移概率密度计算变得简单,但是却造成 LDPC 码纠错性能的下降。图 4 给出了卡方信道模型与传统高斯信道相比,误比特率 (BER) 随光信噪比 (OSNR) 的变化情况。可以看出,在达到相同的误比特率要求时,卡方信道模型对 OSNR 的需求可减少大约 0.1 dB。

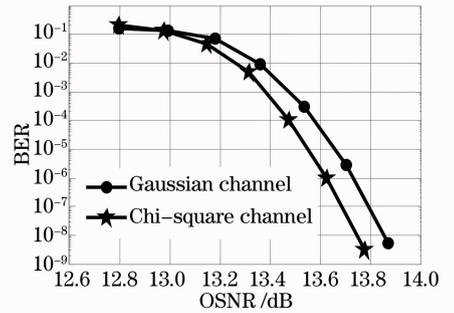


图 4 两种信道模型的 OSNR 与 BER 的关系曲线

Fig. 4 BER versus OSNR for the two channel models

### 5.3 加入信道估计的高斯型初始化公式

由于码字中每个比特受到信道干扰强度不同,故利用(7)式,可将估计的信道信息变成译码前的初始化信息,而信道信息的估计公式为

$$\sigma(n) = \frac{1}{\sqrt{2R(E_b/N_0)}} \times \sum_{i=1}^{N/\tau} x(i) \exp[-a(n-b_i)^2] + \frac{1}{\sqrt{2R(E_b/N_0)}}, \quad (9)$$

式中  $a$  为修正因子,  $n$  取值范围为  $1, 2, \dots, G$ ;  $x(i) \in \{+1, -1\}$ , 当水印位直接译码正确时,  $x(i) = -1$ , 否则为  $+1$ ,  $x(i)$  的正负取值直接反映了水印位周围受到干扰的强弱;  $b_i$  为图 3 中水印位的插入位置。

(9)式中的  $a$  是一个重要参数,  $a$  值的大小决定了每个水印位的影响范围。 $a$  取值越大, 每个水印位的影响范围就越小; 而  $a$  取值较小, 则相邻水印位的影响范围会发生重叠, 造成估计的混叠。所以,  $a$  值的选取会直接影响到译码性能。

在不考虑光纤中偏振模色散影响时, 基于系统仿真, 图(5)、图(6)给出了  $a$  的取值对译码结果 BER 的影响仿真中差分群时延(DGD)取为 0, 容易看出, 对于 16 位水印位算法, 0.01 为  $a$  的最佳选择。而在使用 32 位水印位算法时,  $a$  的最优取值为 0.04。

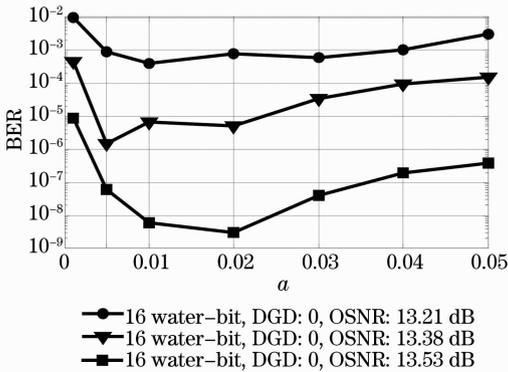


图 5 16 位水印位系统的误比特率与  $a$  值的关系曲线

Fig. 5 BER versus  $a$  for the system with 16 water-bit

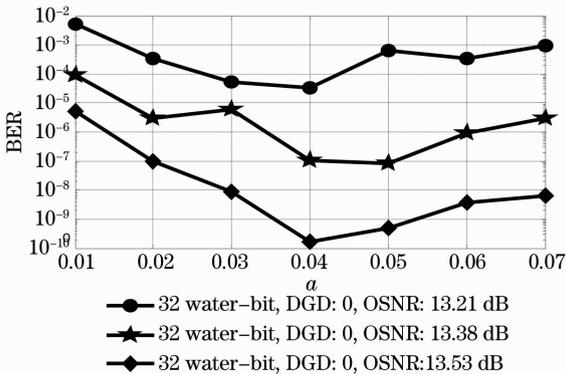


图 6 32 位水印位系统的误比特率与  $a$  值的关系曲线

Fig. 6 BER versus  $a$  for the system with 32 water-bit

从(9)式可知,  $a$  值可对高斯白噪声方差  $\sigma^2$  进行修正。而变动的高斯白噪声方差  $\sigma^2$  使初始化(7)式具有两个自由度, 初始化不仅受到信号  $y$  的影响, 同时也受  $\sigma^2$  的影响, 即  $\sigma^2$  对初始化信息也具有了修正作用。

综上所述, 梳理了水印位与  $a$  值的两种关系。1) 水印位的个数与  $a$  值的关系: 对于固定码长的 LDPC 码字, 如果插入的水印位个数越多, 则相邻两个水印位的距离就越近, 这会使相邻两个水印位的影响范围很容易发生重叠, 所以为了避免重叠, 根据(9)式可知, 此时的  $a$  值需要变大。2) 水印位个数

固定后, 纠错性能和  $a$  值的关系: 以 16 位、32 位水印位为例, 通过仿真测试分别找出 16 位、32 位的最优  $a$  值。

本文的更新点在于基于水印位的信道估计, 优化对数域 BP 译码算法第一步的初始化信息, 由(9)式可知, 可以将高斯白噪声均方差作为初始化信息和信道估计的中间参量, 若再利用(7)式, 则高斯白噪声均方差可以修正因信号幅度  $y$  造成的初始化信息的偏差, 故改进的译码算法表现出较强的纠错性能。

## 6 结果与分析

### 6.1 对纠错性能的分析

图 7 给出了在高斯信道中含 16 位水印位(损失 0.77% 冗余度)和含 32 位水印位(损失 1.51% 冗余度)的 LDPC 码 BER 与 OSNR 之间的关系, 以及卡方信道中传统 LDPC 码译码后的 BER 与 OSNR 之间的关系。若以译码后 BER 小于  $10^{-9}$  为标准, 可以看出, 则插入 16 位水印位的 LDPC 编码比传统卡方信道估计方法所需的 OSNR 可减少 0.25 dB, 插入 32 位的 LDPC 码, 与卡方信道相比, OSNR 的改善大于 0.35 dB。

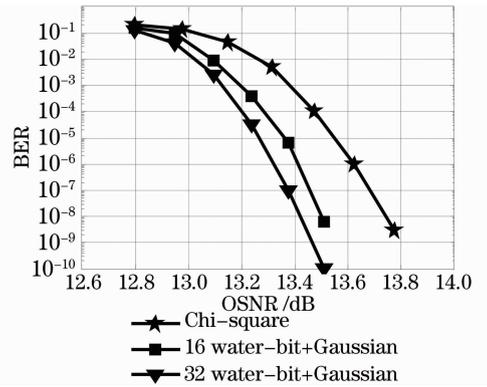


图 7 改进的高斯信道模型与卡方信道模型的误比特率曲线

Fig. 7 BER performances for modified Gaussian model and Chi-square model

光互联论坛(OIF)建议, 在 100 G 光通信系统下, LDPC 码的冗余度有 3% 的可调范围, 故以 1% 左右冗余损失, 来换取系统性能的提升是较合适的。

### 6.2 对一阶偏振模色散的容忍度分析

光纤通信系统中通常都有色散补偿模块, 残余色散量不会太大。图 8 给出了在高斯信道中含水印位的 LDPC 码与传统 LDPC 码, 在不同的 DGD 下的 BER 与 OSNR 之间的关系。

若以译码后的 BER 小于  $10^{-9}$  为标准, 可以看

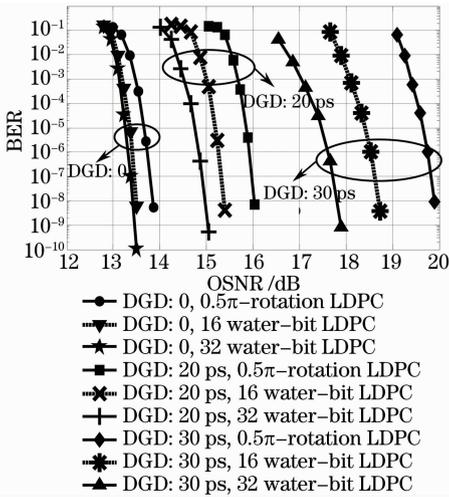


图 8 加入 PMD 后系统的误比特率曲线

Fig. 8 BER performances for the system with PMD

出,当 DGD 为 20 ps 时,则插入 32 位水印位的 LDPC 码比未加 PMD 时的 OSNR 增加了 1.54 dB,插入 16 位水印位的 LDPC 码比未加 PMD 时的 OSNR 增加了 1.89 dB,而传统的 LDPC 码性能最差,其比未加 PMD 时的 OSNR 增加了 2.18 dB;当 DGD 为 30 ps 时,插入 32 位水印位的 LDPC 码比传统 LDPC 码的 OSNR 减少 1.87 dB,插入 16 位水印位的 LDPC 码比传统 LDPC 码的 OSNR 减少 1.16 dB。

含水印位的 LDPC 码对 PMD 有补偿作用,是因为改进后的 LDPC 码的突发误码纠正周期 (BECP)长于 PMD 引起的突发错误码流长<sup>[23]</sup>。

## 7 结 论

LLR BP 算法在加入信道估计信息后,弥补了结构简单的高斯信道模型相对于卡方信道模型纠错能力弱的不足。利用 LLR BP 译码算法以损失 1%左右冗余度的代价来更新初始化信息,不仅得到了编码增益的提升,而且可以补偿高速光通信中的 PMD,是高速光通信系统前向纠错的一种较好的选择。

## 参 考 文 献

- Liao Wei, Wu Xiang, Liu Jingao. Design of a super-FEC code based on low density parity check code in optical communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(s2): 58-61.
- 廖薇,吴翔,刘锦高.基于低密度奇偶校验码的超强前向纠错码设计[J].光学学报,2008,28(s1):58-61.
- Ivan B Djordjevic, Lei Xu, Ting Wang. Optical LDPC decoders for beyond 100 Gbit/s optical transmission[J]. Opt Lett, 2009, 34(9): 1420-1422.
- Xi Lixia, Yang Lei, Chen Haoran, et al.. PMD mitigation by LDPC codes with polarization scramblers[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(s2): s20609.

- Han Dahai, Xi Lixia, Li Minliang, et al.. Impact of the distribution pattern of fast polarization scrambler on the performance of PMD mitigation with FEC for DQPSK optical system[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(7): 070604.
- Lyubomir L Minkov, Ivan B Djordjevic, Hussam G Batshon, et al.. Experimental evaluation of high-rate LDPC codes for PMD compensation by Turbo equalization [C]. Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineering (OFC/NFOEC), 2008, JThA59.
- Hao Shiqi, Leng Jiaofeng. Performance analysis of optical wireless communication based on LDPC codes and MIMO[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s105006.
- 郝士琦,冷蛟锋.基于LDPC码和MIMO的无线光通信系统性能研究[J].中国激光,2012,39(s1):s105006.
- Yongsheng Wu, Aiyang Yang, Yunan Sun, et al.. Modified LDPC decoding rule for pulse position modulation[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(s1): s10605.
- Jia Kejun, Zhao Yangang, Chen Hui, et al.. Analysis and methodology study of bit error performance of FSO system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(3): 030603.
- 贾科军,赵延刚,陈辉,等.无线光通信系统误码性能分析及方法研究[J].激光与光电子学进展,2012,49(3):030603.
- Wang Yong, Cao Jianian. Performance analysis of atmospheric laser communication system basing on asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing intensity modulation and lower density parity check code[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(12): 3031-3036.
- 王勇,曹家年.基于低密度奇偶校验码和非对称限幅光正交频分复用技术的大气激光通信系统性能[J].中国激光,2010,37(12):3031-3036.
- Liu Jialin, Hao Shiqi, Zhou Jianguo, et al.. Performance study of the diversity reception system based on LDPC codes[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 100604.
- 刘加林,郝士琦,周建国,等.基于LDPC码的分集接收系统性能研究[J].激光与光电子学进展,2013,50(10):100604.
- Yuan Jianguo, Wang Wang, Liang Tianyu. A novel construction method of QC-LDPC codes for high-speed long-haul optical communication systems[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2012, 23(5): 906-909.
- 袁建国,王望,梁天宇.一种高速长距离光通信系统中QC-LDPC码的构造方法[J].光电子·激光,2012,23(5):906-909.
- Xu Bo, Ding Hong. Performance analysis of LDPC code in fiber optic communication systems [J]. Study on Optical Communications, 2007, 33(5): 1-3.
- 许渤,丁宏.一种LDPC码在光纤通信系统中的性能分析[J].光通信研究,2007,33(5):1-3.
- Yuan Jianguo, Xie Ya, Wang Lin, et al.. A novel concatenated code based on the improved SCG-LDPC code for optical transmission systems[J]. Optoelectronics Letters, 2013, 9(1): 42-44.
- R Echard, S C Chang. The  $\pi$ -rotation low-density parity check codes[C]. San Antonio: Global Telecommunications Conference, 2001, 2: 980-984.
- Leng Jiaofeng, Hao Shiqi, Lü Xuguang, et al.. Study on bit-symbol mapping method of MPPM and system performance based on low density parity check codes[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0406001.
- 冷蛟锋,郝士琦,吕旭光,等.基于低密度奇偶校验码的MPPM比特符号映射及系统性能研究[J].光学学报,2012,32(4):0406001.
- Zhou Jianguo, Hao Shiqi, Liu Jialin, et al.. Interleaver design basing on genetic algorithm in atmospheric optical communication [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0605004.
- 周建国,郝士琦,刘加林,等.大气激光通信中基于遗传算法的

- 交织器设计[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0605004.
- 17 Yuan Dongfeng, Zhang Haigang. LDPC Code Theory and Application[M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2008. 230—238.
- 袁东风, 张海刚. LDPC 码理论与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008. 230—238.
- 18 Yuan Jianguo, Mao Youju, Ye Wenwei. Analysis on channel model and construction of FEC code type for optical communication systems [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2008, 29(4): 571—575.
- 袁建国, 毛幼菊, 叶文伟. 光通信系统中信道模型与 FEC 码型构造的分析[J]. 半导体光电, 2008, 29(4): 571—575.
- 19 R Echard, S C Chang. Good high-rate  $\pi$ -rotation LDPC codes based on novel puncturing techniques [C]. Taichung: International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA), 2010. 1—6.
- 20 He Heyun. Principle and Application of LDPC[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2009. 149—151.
- 贺鹤云. LDPC 码基础与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009. 149—151.
- 21 Bi Wei, Zhang Wenbo, He Wenxue, *et al.*. A modified decoding algorithm involving priori characteristics bits for LDPC [C]. Advanced Infocomm Technology (ICAIT), 2013. 245—246.
- 22 D Fauchamps, G Rodriguez-Guisantes, P Gallion. Chi-square statistical models as a good base for the optimisation of optical communication systems [C]. International Conference on Photonics in Switching, 2008. 4—7.
- 23 X Liu, C Xie, A J van Wijngaarden. Multichannel PMD mitigation through forward-error-correction with distributed fast PMD scrambling[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2004. 23—27.

栏目编辑: 王晓球