

# 用 $\pi$ 旋转型低密度奇偶校验码提升 100 Gb/s 偏振复用差分正交相移键控光通信系统性能

毕伟 席丽霞 张晓光 张文博

(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)

**摘要** 将  $\pi$  旋转型低密度奇偶校验(LDPC)码应用于 100 Gb/s 偏振复用差分正交相移键控(PDM-DQPSK)光通信系统中,进行了相应的数值仿真和性能分析比较,其中采用打孔技术得到了高码率的改进码型,并在纠错性能方面与原始码型进行了对比。在译码方面,推导了 PDM-DQPSK 系统的卡方统计模型,并与高斯统计模型进行了对比。结果表明,码率为 0.5 的  $\pi$  旋转型 LDPC 码在采用卡方统计信道概率模型时性能最佳,可使系统光信噪比(OSNR)在 14.2 dB 时保证误码率(BER)在  $10^{-9}$  以下;在 2 dB 的 OSNR 代价情况下,系统可容忍 102 ps/nm 的色度色散(CD)、18 ps 的一阶偏振模色散(PMD),以及  $4.88 \times 10^{-2}$  rad 的非线性引起的最大相位偏移,由此可知  $\pi$  旋转型 LDPC 码可以极大地提高高速光通信系统的传输可靠性。

**关键词** 光通信;  $\pi$  旋转型低密度奇偶校验码; 偏振复用差分正交相移键控; 前向纠错; 信道概率模型; 打孔技术  
**中图分类号** TN911.22 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0105002

## Performance Enhancement of 100 Gb/s Polarization Division Multiplexing Differential Quadrature Phase Shift Keying Optical Communication System with $\pi$ -Rotation Low-Density Parity-Check Codes

Bi Wei Xi Lixia Zhang Xiaoguang Zhang Wenbo

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications,  
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract**  $\pi$ -rotation low-density parity-check (LDPC) code is applied in polarization division multiplexing differential quadrature phase shift keying (PDM-DQPSK) modulation optical fiber communication system. Performance analysis and comparison are conducted by numerical simulation, in which the same kind of codes with higher code rates are generated by employing puncturing technique and compared with primitive code in correction performance. With regard to decoding, the Chi-square statistical model of PDM-DQPSK is derived and compared with Gaussian one. The results exhibit that  $\pi$ -rotation LDPC codes can achieve their utmost performances when code rate is 0.5 and Chi-square statistical model is employed, which ensures bit error rate (BER) is below  $10^{-9}$  while optical signal to noise ratio (OSNR) is 14.2 dB. When OSNR penalty is 2 dB, the system can tolerate 102 ps/nm chromatic dispersion, 18 ps first-order polarization mode dispersion and  $4.88 \times 10^{-2}$  rad nonlinear phase shift. The results indicate that  $\pi$ -rotation LDPC codes can enhance the transmitting reliability significantly.

**Key words** optical communications;  $\pi$ -rotation low-density parity-check codes; polarization division multiplexing differential quadrature phase shift keying; forward error correction; channel probability model; puncturing technique

**OCIS codes** 060.2330; 060.4510; 190.4370

收稿日期: 2013-07-16; 收到修改稿日期: 2013-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(61205065)、高等学校博士学科点专项科研基金(20110005110014)

作者简介: 毕伟(1987—),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: biwei2013bupt@163.com

导师简介: 席丽霞(1973—),女,硕士生导师,副教授,主要从事高速光纤通信与光信息处理技术等方面的研究。

E-mail: xilixia@bupt.edu.cn

# 1 引 言

在高速光纤通信系统特别是 100 Gb/s 及以上系统中,偏振模色散(PMD)和非线性(NL)等逐渐成为影响系统性能提升的主要因素,而以低密度奇偶校验(LDPC)码为代表的软判决前向纠错码(SD-FEC)能很好地补偿光信道中的各种损伤,提高高速传输系统的可靠性<sup>[1-4]</sup>,同时可降低接收端对光信噪比(OSNR)的要求,逐渐成为第四代前向纠错码(FEC)的主要码型,设计良好的 LDPC 码能很好地逼近香农极限<sup>[5]</sup>。近年来,LDPC 码在光通信系统中的应用成为学术界研究的热点,用于光通信系统的 LDPC 码型主要有准周期(QC)码<sup>[6-7]</sup>、对称配置图(SCG)码<sup>[8-9]</sup>、随机构造 LDPC 码<sup>[10]</sup>、渐进边缘图(PEG)算法构造码<sup>[11-12]</sup>和几何构造码<sup>[13-14]</sup>等。

$\pi$  旋转型 LDPC 码是特殊的近似规则型的 LDPC 码,该码型的校验矩阵( $\mathbf{H}$  矩阵)由若干个旋转子矩阵构成,仅需一个置换向量即可生成基础子矩阵,其他子矩阵由该基础子矩阵旋转生成,因而仅需存储一个子矩阵即可生成整个  $\mathbf{H}$  矩阵,大大降低了存储空间; $\mathbf{H}$  矩阵中包含一个双对角线子矩阵,从而可以直接用该矩阵进行编码,省去了用高斯消元法生成矩阵( $\mathbf{G}$  矩阵)的大量运算,而且由于  $\mathbf{G}$  矩阵是非稀疏的,存储该矩阵需要大量存储空间,而直接存储稀疏的  $\mathbf{H}$  矩阵便可节省大量存储单元,提高存储效率<sup>[15-17]</sup>。目前它已经在无线通信等领域广泛应用<sup>[17-18]</sup>,应用于光纤通信系统的相关报道较少。

本文将  $\pi$  旋转型 LDPC 码应用于 100 Gb/s 偏振复用差分正交相移键控(PDM-DQPSK)光纤通信系统中,数值仿真了不同码率的  $\pi$  旋转型 LDPC 码的误码率(BER,  $R_{BE}$ )随 OSNR 的变化关系,还详细讨论了一定 BER 条件下,系统对色散(CD)、PMD 和 NL 的容忍度。此外,LDPC 码译码多采用置信度传播(BP)算法等软判决译码算法,充分利用了来自信道的概率信息进行译码,因而信道的初始化信息公式选取的好坏直接关系到纠错性能,另外还对比了高斯统计模型和卡方统计模型概率密度函数作为信息初始化公式对 BP 译码性能的影响。

## 2 $\pi$ 旋转型 LDPC 码 $\mathbf{H}$ 矩阵的构造方法

LDPC 码的  $\mathbf{H}$  矩阵选取的好坏关系到编码的复杂度,同时对编译码性能也有很大的影响, $\pi$  旋转型 LDPC 码采用结构化  $\mathbf{H}$  矩阵,具有确定的结构,

它由两部分组成  $\mathbf{H} = [\mathbf{H}^p \quad \mathbf{H}^d]$ , 即

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \pi_A & \pi_B & \pi_C & \pi_D \\ \pi_B & \pi_C & \pi_D & \pi_A \\ \pi_C & \pi_D & \pi_A & \pi_B \\ \pi_D & \pi_A & \pi_B & \pi_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

如果 LDPC 码的码长是  $n$ , 信息位长是  $k$ , 则  $\mathbf{H}$  矩阵的大小为  $(n-k) \times n$ 。 $\mathbf{H}^p$  是一个  $(n-k) \times (n-k)$  的双对角线方阵,  $\mathbf{H}^d$  是一个由旋转子矩阵组成的  $(n-k) \times k$  的矩阵。对于冗余度为 0.5 的码,  $n = 2k$ ,  $\mathbf{H}^p$  和  $\mathbf{H}^d$  都是  $k \times k$  的方阵,  $\pi_A, \pi_B, \pi_C$  和  $\pi_D$  均是大小为  $k/4$  的方阵。其中  $\pi_A$  由置换向量生成, 其他的  $\pi_B, \pi_C, \pi_D$  都是由  $\pi_A$  分别旋转  $\pi/2, \pi, 3\pi/2$  得到。由置换向量生成  $\pi_A$  矩阵的算法流程图如 1 图所示, 其中  $m$  是  $\pi_A$  的长度, 这里  $m = k/4, a$  和  $b$  为大于 0 小于  $m$  的任意整数。

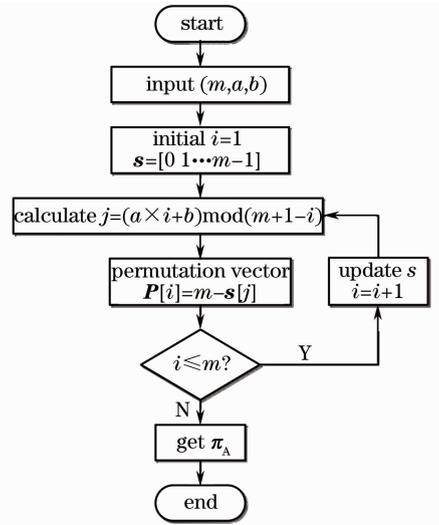


图 1 产生  $\pi_A$  矩阵的流程图

Fig. 1 Flow chart for generating the  $\pi_A$  matrix

码率大于 1/2 的  $\pi$  旋转码是通过打孔技术实现的<sup>[17-19]</sup>, 图 2 显示了通过打孔技术降低矩阵冗余度的过程, 它可以保证在信息位长度不变的前提下, 降低冗余比特。图 2(a) 是一个由双对角线矩阵和置换向量构成的  $\mathbf{H}$  矩阵, 其中  $\pi_A = [5 \ 1 \ 6 \ 2 \ 4 \ 3]$  是组成矩阵的位置向量, 表示矩阵  $\mathbf{H}^d$  第  $i$  列中, 第  $\pi_A[i]$  行为“1”, 如果打孔向量为  $\mathbf{P} = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1]$ , 矩阵的某些行和列将被消去以降低冗余度。如图 2(b) 所示, 向量  $\mathbf{P}$  中为零的位置表示矩阵  $\mathbf{H}$  中要被删除的行和列, 即  $\mathbf{H}$  矩阵的第三、四列和第三、四行要被删除, 在被删除时,  $\mathbf{H}^p$  矩阵中的行与列直接删除即可, 而  $\mathbf{H}^d$  矩阵中被删除行中的“1”要向所在列的上一行提升,

最后得到了由新的置换向量  $\pi_A = [3 \ 1 \ 4 \ 2 \ 2 \ 2]$  构成的新的校验矩阵,如图 2(c)所示。

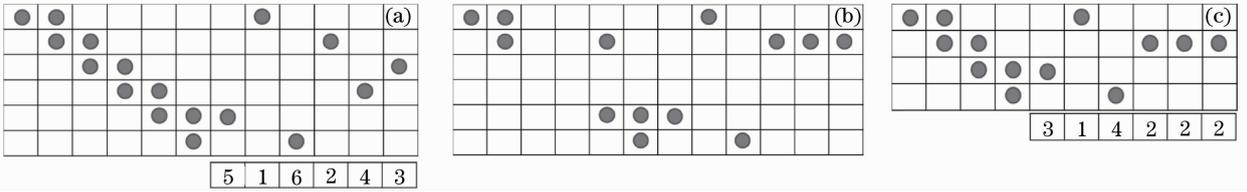


图 2 通过打孔技术降低  $\mathbf{H}$  矩阵冗余度过程

Fig. 2 Procedure of reducing the redundancy of matrix  $\mathbf{H}$  by puncturing

对于码率为 0.5 的  $\pi$  旋转型 LDPC 码,它的置换向量是  $[m, a, b] = [128, 2, 132]$ ,无四环。码率为 0.75 的 LDPC 码是通过打孔技术实现的,其置换向量为  $[m, a, b] = [270, 42, 165]$ 。

### 3 $\pi$ 旋转型 LDPC 码的编码

由以上介绍可知, $\mathbf{H}$  矩阵由两部分组成  $\mathbf{H} = [\mathbf{H}^p \ \mathbf{H}^d]$ ,相应的将  $\mathbf{H}$  矩阵所对应的码字  $\mathbf{c}$  分解为对应的校验位矢量  $\mathbf{c}^p$  和信息位矢量  $\mathbf{c}^d$ ,即有  $\mathbf{c} = [\mathbf{c}^p \ \mathbf{c}^d]$ ,奇偶校验矩阵  $\mathbf{H}$  与码矢量  $\mathbf{c}$  之间有如下关系:

$$\mathbf{H}\mathbf{c}^T = [\mathbf{H}^p \ \mathbf{H}^d] \begin{bmatrix} (\mathbf{c}^p)^T \\ (\mathbf{c}^d)^T \end{bmatrix} = \mathbf{H}^p (\mathbf{c}^p)^T + \mathbf{H}^d (\mathbf{c}^d)^T = 0. \quad (2)$$

对于伽罗华二阶有限域,(2)式可写为

$$\mathbf{H}^p (\mathbf{c}^p)^T = \mathbf{H}^d (\mathbf{c}^d)^T, \quad (3)$$

由于  $\mathbf{H}^p$  是双对角的上三角矩阵,对给定的信息位矢量  $\mathbf{c}^d = \{d_i\}$ ,根据(3)式很容易求得校验位矢量  $\mathbf{c}^p = \{p_i\}$ , $i = 1, 2, \dots, M$ ,先由  $\mathbf{H}^p$  矩阵的最后一行求出  $p_M$ ,再向上回代求得  $p_i$ 。 $p_M = \sum_j h_{M,j}^d d_j$ ,递推可得  $p_{M-i} = p_{M-i} + \sum_j h_{(M-i),j}^d d_j$ ,其具有线性时间复杂度。

### 4 $\pi$ 旋转型 LDPC 码的译码

$\pi$  旋转型 LDPC 码的译码算法就是基于 BP 的迭代算法,如果概率消息用对数似然比(LLR)表示,就得到 LLR-BP 算法,LLR-BP 算法的译码过程如图 3 所示。图中  $R_j$  表示与校验节点  $r_j$  相连的所有变量节点  $q_i$  的集合,即  $R_j = \{q_i \mid H_{ij} = 1\}$ , $C_j$  表示与变量节点  $q_i$  相连的所有校验节点  $r_j$  的集合,即  $C_i = \{r_j \mid H_{ij} = 1\}$ 。

在进行 LDPC 的软判决译码中,第一步就是对信道进行初始化估计,建立适当的信道概率模型。假设发射的码字  $c_k$  映射成  $x_k$ , $x_k = 0$  或  $1$ , $k = 1, 2, \dots, n$ ,接收的信息为  $y_k$ , $y_k = x_k + n_k$ , $n_k$  是方差为  $\sigma^2$  的高斯随机变量,则  $y_k$  也是高斯随机变量。在信源发射 0、1 等概率的情况下,LLR 的译码初始化信息为

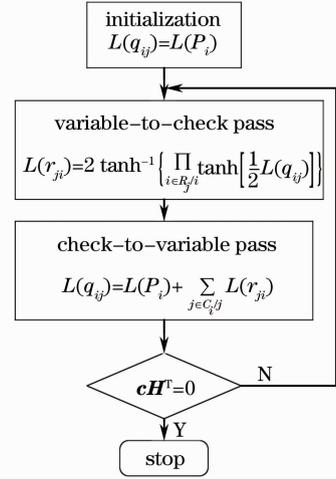


图 3 LLR-BP 译码算法流程图

Fig. 3 Flow chart of LLR-BP decoding algorithm

$$L(P_i) = \ln \left[ \frac{p(y | x_i = 0)}{p(y | x_i = 1)} \right]. \quad (4)$$

袁建国等<sup>[20]</sup>指出,通过近似处理,可以将光通信系统中的噪声简化为高斯噪声和占主导地位的放大自发辐射(ASE)噪声。而对于 ASE 噪声,在研究光通信系统中的 FEC 时,可以将其近似看成高斯白噪声,这样叠加后还是高斯白噪声。因此光通信系统的信道可以近似用加性高斯白噪声(AWGN)信道来模拟,并可将转移概率密度  $p$  用高斯函数表示为

$$\begin{cases} p(y | x_i = 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp[-(y+1)^2/2\sigma^2] \\ p(y | x_i = 1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp[-(y-1)^2/2\sigma^2] \end{cases}, \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式可得高斯统计下信息初始化公式为

$$L(P_i) = -\frac{2y}{\sigma^2}. \quad (6)$$

近几年,人们提出了一种新的信道模型:Chi-square,即卡方统计模型<sup>[21]</sup>,该模型考虑了光电探测器的二次特性,这种特性使得光电流的概率分布呈不对称性,因此这种模型能够更加精确地描述光纤通信信道。

对于光域的差分移相键控(DPSK)信号的接收,使用平衡接收机进行直接检测,其接收信号的条件概率为

$$p(r|1) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(\frac{r}{\sigma^2} - \frac{A^2}{2\sigma^2}\right) Q_1\left(\frac{A}{\sigma}, \frac{2\sqrt{r}}{\sigma}\right), \quad (7)$$

式中  $r$  为接收信号幅度,  $A$  为电场的振幅,  $Q_1(a, b)$

为一阶的 Marcum  $Q$  函数。若 DPSK 信号的相邻码元之间存在  $\pi$  相位差, 则其概率密度函数满足

$$p(r|0) = p(-r|1), \quad (8)$$

发送 0 与发送 1 时的条件概率密度函数(PDF)如图 4(a)、(b)所示, 图中  $\sigma^2$  与  $A$  均取 1。

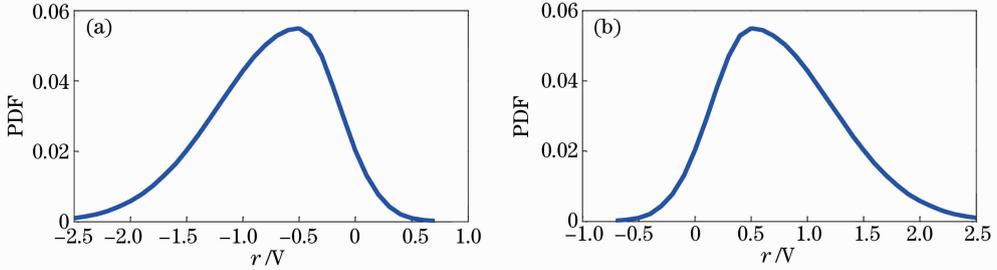


图 4 DPSK 光通信系统卡方统计模型概率密度函数。(a)  $p(r/0)$ ; (b)  $p(-r/1)$

Fig. 4 PDF of Chi-square statistical model of DPSK optical system. (a)  $p(r/0)$ ; (b)  $p(-r/1)$

根据 PDM-DQPSK 系统的接收结构与 DPSK 的相似性, 可知 PDM-DQPSK 的概率密度公式与 DPSK 信号的概率密度公式也具有相似性。由于 PDM-DQPSK 系统接收端较复杂, 用 DPSK 信号的概率密度公式来对 PDM-DQPSK 信号概率密度公式进行模拟。

在 PDM-DQPSK 传输系统中加入高斯白噪声, 在发送端发送一串全 0 码字和全 1 码字作为训练序

列, 统计解调后的每个信号幅值大小所占的百分比, 在码字很长时, 即可得出在发送 0 和 1 的条件下的条件概率, 与 DPSK 信号的概率密度曲线比较, 发现只要将图 4 的概率密度曲线经过平移和压缩, 即可得到 PDM-DQPSK 信号的 PDF, 其与图 4 形状相似, 只有幅值和位置上的不同, 从而得出光通信系统中 PDM-DQPSK 信号的条件概率为

$$p(r|1) = \frac{a}{2\sigma^2} \exp\left(\frac{r-b}{\sigma^2} - \frac{A^2}{4\sigma^2}\right) Q_1\left[\frac{A}{\sqrt{2}\sigma}, \frac{2\sqrt{|r-b|}}{\sigma}\right], \quad (9)$$

$$p(r|0) = \frac{a}{2\sigma^2} \exp\left(\frac{-r-b}{\sigma^2} - \frac{A^2}{4\sigma^2}\right) Q_1\left[\frac{A}{\sqrt{2}\sigma}, \frac{2\sqrt{|r-b|}}{\sigma}\right], \quad (10)$$

式中  $a$  为乘性修正因子,  $b$  为偏移因子,  $a$  和  $b$  均是关于振幅  $A$  的函数。将(9)、(10)式代入(4)式, 即可得到 PDM-DQPSK 信号的信道初始化公式为

$$L(P_i) = \ln\left[\frac{p(y|x_i=0)}{p(y|x_i=1)}\right] = \ln\left\{\frac{\exp\left[-(r-b/\sigma^2) - (A^2/4\sigma^2)\right]}{\exp\left[(r-b/\sigma^2) - (A^2/4\sigma^2)\right]}\right\} = \frac{-4r-4b-A^2}{4r-4b-A^2}. \quad (11)$$

在采用带延时线干涉仪的 I/Q 接收机中,  $b$  取值为  $A^2/4$ 。而解调器输入的信噪比  $R_{SN}$  与噪声方差  $\sigma$  之间的关系为

$$\sigma^2 = \frac{1}{2R(E_b/N_0)} = \frac{1}{2R \times 10^{R_{SN}/10}}, \quad (12)$$

式中  $R$  为 LDPC 的码率, 其中  $E_b$  为比特能量,  $N_0$  为单边功率谱宽度。

## 5 仿真平台搭建与结果讨论

搭建的仿真平台如图 5 和图 6 所示, 连续波激光器(CW)发出的光经过偏振控制器(PC)和偏振分

束器(PBS)后分成两个偏振态相互正交的偏振光, 而两路 50 Gb/s 的伪随机码(PRBS)经过 LDPC 编码器进行编码和差分预编码后送入两套 I/Q 调制器, 分别对生成的两个偏振态的光进行调制, 调制后的偏振光经偏振合束器(PBC)复用后送入光纤链路; 接收端采用直接检测方式, 由两套解调器组成, 每套由一个 DQPSK 解调器和两个平衡探测器(BD)组成, 分别对两个偏振光进行解调, 之后送入 LDPC 译码器进行译码、判决, 恢复出原来的信号。

传输链路由一段光纤组成, 其长度可调, 波长  $\lambda=1550$  nm 处的色散系数为  $D_\lambda=17$  ps/(nm ·

km), PMD 参量取  $\tau = 0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ , 非线性参量取  $\gamma = 1.22 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

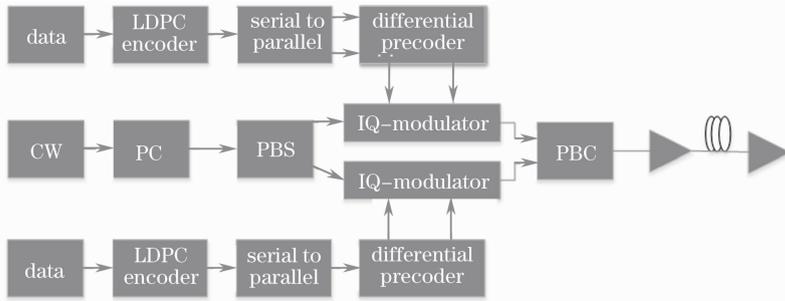


图 5 加入 FEC 的 100 Gb/s PDM-DQPSK 发送端框图

Fig. 5 Transmitter scheme of 100 Gb/s PDM-DQPSK with FEC

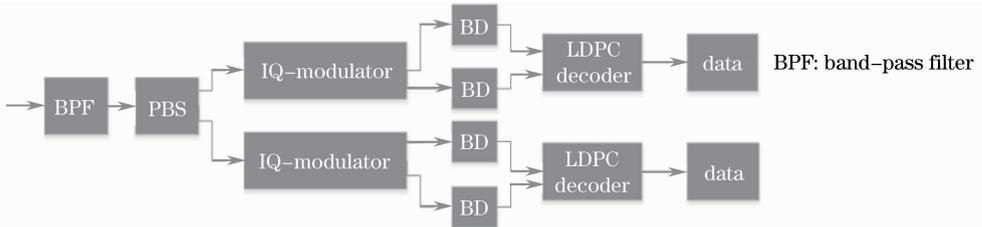


图 6 加入 FEC 的 100 Gb /s PDM-DQPSK 接收端框图

Fig. 6 Receiver scheme of 100 Gb/s PDM-DQPSK with FEC

仿真中, 分别将码率为 0.5 和 0.75 的  $\pi$  旋转型 LDPC 码加入系统, 而译码的初始化信息分别采用高斯型和卡方型的概率密度模型, 得出四种情况下的 BER 与光信噪比的关系曲线, 并与未加 LDPC 的系统进行了对比, 得到的仿真曲线如图 7 所示。由该图可知: 在 BER 为  $10^{-9}$  条件下, 码率为 0.5 的 LDPC 码比码率为 0.75 的 LDPC 码所需要的 OSNR 少大约 3 dB; 在采用高斯模型的情况下下降到 14.3 dB 左右, 甚至比未加 LDPC 的系统在 BER 为  $10^{-3}$  下所需要的 OSNR 还要少; 如果采用卡方型的概率密度模型, 可进一步降低 OSNR 大约 0.1 dB, 即降到 14.2 dB 左右。由此可知, 码率为 0.5 的  $\pi$  旋转型 LDPC 码在采用卡方型概率模型的情况下所需要的 OSNR 最小, 可以最大限度地降低 OSNR

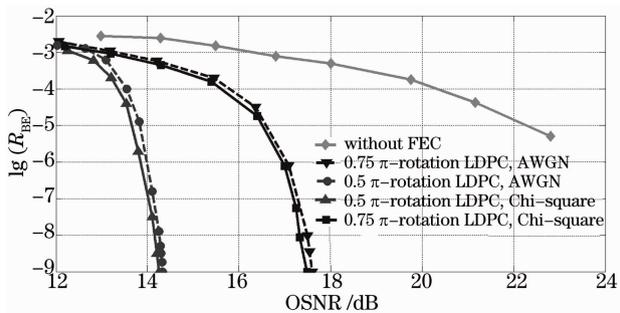


图 7  $\pi$  旋转型 LDPC 码误码率与 OSNR 的关系曲线

Fig. 7 BER versus OSNR for the system with  $\pi$ -rotation LDPC codes

容限。而卡方统计是在光通信系统中设计的信道模型, 在这种模型下  $\pi$  旋转型 LDPC 码可以达到最佳性能, 可见,  $\pi$  旋转型 LDPC 码可作为 100 Gb/s 高速光通信系统的理想码型。

此外, 仿真了在 BER 为  $10^{-9}$  条件下不同 OSNR 对 CD、一阶 PMD [即差分群时延 (DGD)] 和 NL 所引起的最大相位偏移  $\phi_{\max}$  的容忍度, 如图 8~10 所示。而由之前分析可知, 采用卡方统计比采用高斯统计能降低 OSNR 容限 0.1 dB, 故以下均采用卡方统计。由图可知: 对于码率为 0.5 的  $\pi$  旋转型 LDPC 码, 对应 OSNR 为 16.2 dB (2 dB 左右的 OSNR 代价) 时, 对 CD、PMD 以及最大相位偏移的容忍度分别为  $102 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1}$ 、 $17.6 \text{ ps}$  和  $4.88 \times 10^{-2} \text{ rad}$ , 通常的光纤通信系统中都有色散补偿模

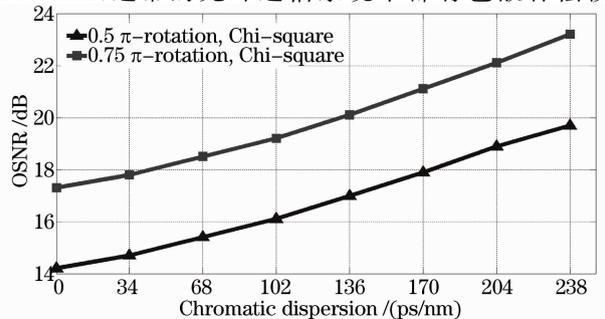


图 8 不同码率 LDPC 码的 OSNR 与 CD 的关系曲线

Fig. 8 OSNR versus CD for LDPC codes with different code rates

块,残余色散量不会太大,而非线性则可通过背向传输算法进行补偿,因此,对于色散残余量在102 ps/nm以内、PMD 值在 18 ps 以内以及最大相位偏移在  $5 \times 10^{-2}$  rad 以内的 PDM-DQPSK 光纤通信系统,如果采用 LDPC 码纠错,只需付出 2 dB 的 OSNR 代价,就能实现近似无误码传输。

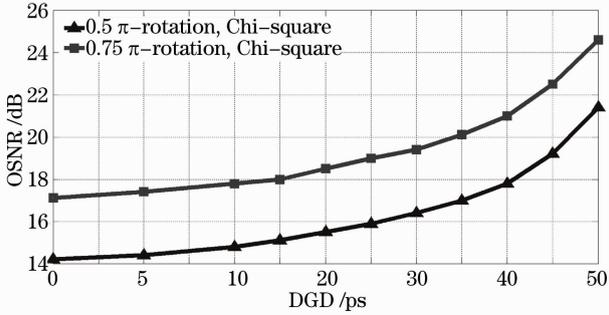


图 9 不同码率 LDPC 码 OSNR 与 DGD 的关系曲线  
Fig. 9 OSNR versus DGD for LDPC codes with different code rates

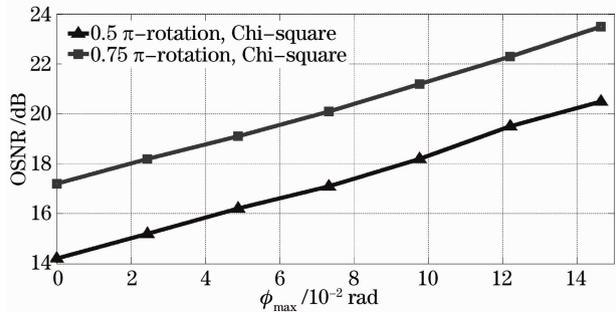


图 10 不同码率 LDPC 码 OSNR 与 φ<sub>max</sub> 的关系曲线  
Fig. 10 OSNR versus φ<sub>max</sub> for LDPC codes with different code rates

## 6 结 论

仿真了不同码率 π 旋转型 LDPC 码在 100 Gb/s PDM-DQPSK 系统中的性能,结果表明,码率为 0.5 的 π 旋转型 LDPC 码相比 0.75 的同种码会带来更大的净编码增益 (NCG),在 BER 为  $10^{-9}$  下可把 OSNR 容限降低到 14.3 dB,而在采用卡方统计作为译码初始化概率模型时,可进一步将 OSNR 容限降低 0.1 dB,对于残余色散量小于 102 ps/nm、PMD 低于 18 ps 和非线性相位偏移在  $5 \times 10^{-2}$  rad 以内的系统而言,只需 2 dB 的 OSNR 代价就能够实现近似无误码传输,因此,π 旋转型 LDPC 码非常适用于高速光纤通信系统中。

## 参 考 文 献

1 Y Zhang, M Arabaci, I B Djordjevic. Evaluation of four-

dimensional nonbinary LDPC-coded modulation for next-generation long-haul optical transport networks [J]. Opt Express, 2012, 20(8): 9296–9301.

2 J Fu, M Arabaci, I B Djordjevic, *et al.*. First experimental demonstration of nonbinary LDPC-coded modulation suitable for high-speed optical communications [C]. IEEE Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2011. 1–3.

3 M Tomizawa, Y Yamabayashi. Parallel FEC code in high-speed optical transmission systems[J]. Electron Lett, 1999, 35(16): 1367–1368.

4 L Xi, H Chen, M Li, *et al.*. Low-density parity-check codes used for polarization mode dispersion mitigation in 40-Gb/s optical fiber system [C]. IET International Conference on Advanced Infocom Technology, 2011 (ICAIT 2011), 2011. 1–3.

5 S Y Chung, G D Forney Jr, T J Richardson, *et al.*. On the design of low-density parity-check codes within 0.0045 dB of the Shannon limit[J]. Communications Letters, IEEE, 2001, 5(2): 58–60.

6 M Arabaci, I B Djordjevic, R Saunders, *et al.*. High-rate nonbinary regular quasi-cyclic LDPC codes for optical communications[J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(23): 5261–5267.

7 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.

8 J Yuan, Y Xie, L Wang, *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.

9 J G Yuan, Q Z Tong, L Xu. Study on ameliorating the SCG-LDPC code for high-speed optical communication systems[J]. Advanced Materials Research, 2012, 571: 224–228.

10 Lixia Xi, Lei Yang, Haoran Chen, *et al.*. PMD mitigation by LDPC codes with polarization scramblers[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(s2): s20609.

11 S Mumtaz, G Rekaya-Ben Othman, Y Jaouen. Quasi-cyclic LDPC based on PEG construction for optical communications[C]. Signal Processing in Photonic Communications, 2011. SPWB2.

12 Xu Tao. Research on Rate-Compatible LDPC Coding for Free Space Optical Communication [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.

徐 涛. 空间光通信中自适应 LDPC 编码的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.

13 B Vasic, I B Djordjevic. Affine geometry low-density parity check codes in long-haul optical communications[J]. Journal of Optical Communications, 2012, 23(3): 50–53.

14 P Kaur, D Dhawan, V K Jain, *et al.*. Study on FEC schemes for optical communication systems [C]. IEEE 2013 National Conference on Communications (NCC), 2013. 1–5.

15 R Echard, S C Chang. The π-rotation low-density parity check codes[C]. IEEE 2001 Global Telecommunications Conference, (GLOBECOM'01), 2001, 2: 980–984.

16 R Echard, S C Chang. Irregular π-rotation LDPC codes [C]. IEEE 2002 Global Telecommunications Conference, (GLOBECOM'02), 2002, 2: 1274–1278.

17 R Echard, S C Chang. Design considerations and performance analysis of good π-rotation LDPC codes[C]. IEEE 2006 Wireless Telecommunications Symposium, (WTS'06), 2006. 1–5.

18 Li Dong, Yin Suozhu. Performance analysis of π-rotation LDPC codes in MB-OFDM ultra-wideband system [J]. Guangxi Communication Technology, 2006, 4: 39–43.

- 李 栋,尹锁柱.  $\pi$  旋转 LDPC 码在 MB-OFDM 超宽带系统中的性能分析[J]. 广西通信技术, 2006, 4: 39-43.
- 19 R Echard, S C Chang. Good high-rate  $\pi$ -rotation LDPC codes based on novel puncturing techniques [ C ]. IEEE 2010 International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA), 2010. 1-6.
- 20 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.
- 21 D Fafchamps, G Rodriguez-Guisantes, P Gallion. Chi-square statistical models as a good base for the optimisation of optical communication systems[C]. IEEE 2008 International Conference on Photonics in Switching, 2008. 1-2.

栏目编辑:王晓玻