

文章编号: 2095-2163(2022)07-0108-06

中图分类号: TN928

文献标志码: A

无预编码(3,1)矢量信号直接检测系统及其基于LDPC的应用研究

左江丽, 赵 闯

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 本文提出一种基于单个马赫曾德尔调制器(Mach Zehnder Modulator, MZM)和光载波抑制调制的二倍频无预编码(3,1)矢量信号方案,理论分析了光矢量信号产生机理,在此系统基础上采用了低密度奇偶校验码(Low Density Parity Check Code, LDPC)来有效补偿光纤色散以及系统器件的非线性带来的信号损伤,提高系统的传输性能。仿真结果表明,在相同速率下,(3,1)矢量信号的误码性能明显优于正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)矢量信号的性能;并且当4 Gbaud速率的(3,1)矢量信号传输15 km标准单模光纤(Standard Single Mode Fiber, SSMF)时,采用LDPC可以获得约3 dB的误码增益。

关键词: 低密度奇偶校验码; 光载波抑制; 无预编码(3,1)矢量信号

Research on direct detection system of non-precoded (3, 1) vector signal and its application based on LDPC

ZUO Jiangli, ZHAO Chuang

(School of Optical Electrical information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

[Abstract] In this paper, a double frequency non-precoded (3, 1) vector signal scheme based on a single Mach Zehnder modulator (MZM) and optical carrier suppressed modulation is proposed. The generation mechanism of optical vector signal is analyzed theoretically. Based on this, low density parity check code (LDPC) is used to effectively compensate the signal damage caused by optical fiber dispersion and nonlinearity of system devices to improve the transmission performance of the system. The simulation results show that at the same rate, the bit error performance of (3, 1) vector signal is obviously better than that of quadrature phase shift keying (QPSK) vector signal. It is found that when the (3, 1) vector signal at 4 Gbaud rate is transmitted through 15 km standard single mode fiber (SSMF), the bit error gain of about 3 dB can be obtained by LDPC.

[Key words] low density parity check code (LDPC); optical carrier suppression; non-precoded (3, 1) vector signal

0 引言

随着当前物联网、大数据和人工智能等发展,人们对超大容量、高容错率和更好的网络流量处理能力的通信系统提出了更高的要求^[1]。光载无线通信结合了光纤通信和无线通信的优势,具有带宽大,移动灵活,损耗低等优点,可满足未来对大容量和高速率的需求,在未来的通信中显示出巨大的优势^[2]。然而,在传输链路中,信号会受到噪声,器件的非线性效应和色散等不利因素的干扰,信道编码技术可以补偿这些干扰给信号带来的损伤^[3]。LDPC作为信道编码的一种,因其基于稀疏矩阵的并行迭代译码算法,运算量要低于Turbo码译码算法,还可具有很强的纠错能力,获得质量更优的通信质量,满足未来高容错率系统的要求,所以基于

LDPC的信道编码方案的研究是光载无线通信技术领域的一个重要课题^[4]。文献[5]使用一个集成的双平行MZM来产生倍频光矢量毫米波信号,此方法中的双平行MZM有2个偏置电压需要控制,由于2个偏置电压的漂移容易造成系统的不稳定,而且双平行MZM的成本较高。文献[6]中的矢量光通信系统,采用的多电平正交幅度调制(Multilevel Quadrature Amplitude Modulation, M-QAM)信号需要在发送端进行幅度和相位预编码,一定程度上增加了发送端数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)的复杂度,而且由于相位预编码后矢量信号星座图的不对称性,也会影响到系统的传输性能。

本文的传输系统仅使用一个MZM,利用光载波抑制调制的二倍频方法产生光矢量毫米波信号,具有硬件成本低和结构简单的优势。本文所提出的无

作者简介: 左江丽(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向:光载无线通信。

收稿日期: 2022-01-14

预编码(3,1)矢量信号产生方案中,(3,1)矢量信号的一个星座点位于复平面的中心,其余 3 个星座点恒幅且相位均等地分布在中心星座点的周围。在基于光载波抑制调制的二倍频传输系统中,由于光电探测器(Photodetector, PD)的平方律特性,通过 PD 后的信号相位将变为原来的两倍。对于 QPSK 矢量信号来说,会产生星座重叠问题,因此在发送端需要进行相位预编码,而(3,1)矢量信号在发送端无需预编码,经过 PD 之后的星座图只会发生错位,在接收端只需调整解映射方法即可恢复出原始信号的星座图,既降低了发送端 DSP 的复杂度,也可确保信号的准确接收^[7]。在信号的传输过程中,本系统使用 LDPC 可以补偿系统器件的非线性带来的信号损伤和光纤的色散效应等不利影响,增强系统抗突发错误的能力,降低误码率,提高系统的通信质量。

文中对 2Gbaud 和 4Gbaud 速率的(3,1)矢量信号和 QPSK 矢量信号分别背靠背(Back-To-Back, BTB)传输,5 km、10 km 和 15 km SSMF 传输进行了

仿真。仿真结果表明,以相同速率传输相同距离时,(3,1)矢量信号的误码性能优于 QPSK 矢量信号的误码性能,且与未使用 LDPC 的矢量信号相比,使用 LDPC 的矢量信号具有更好的误码率特性。当以 4Gbaud 速率传输 15 km SSMF 时的(3,1)矢量信号和 QPSK 矢量信号的误码率都可低于硬判决前向纠错(Hard-Decision Forward-Error-Correction, HD-FEC)阈值 3.8×10^{-3} 。

1 原理

图 1 是(3,1)光矢量信号的产生原理图。首先,将伪随机二进制序列进行 LDPC 编码;将 LDPC 编码后的序列进行(3,1)映射,上变频后的信号作为射频(Radio Frequency, RF)电矢量信号驱动 MZM。同时,外腔激光器(External Cavity Laser, ECL)产生频率为 f_c 的连续波(Continuous Wave, CW)被 MZM 调制,ECL 产生的 CW 的频谱示意图如图 2 所示。

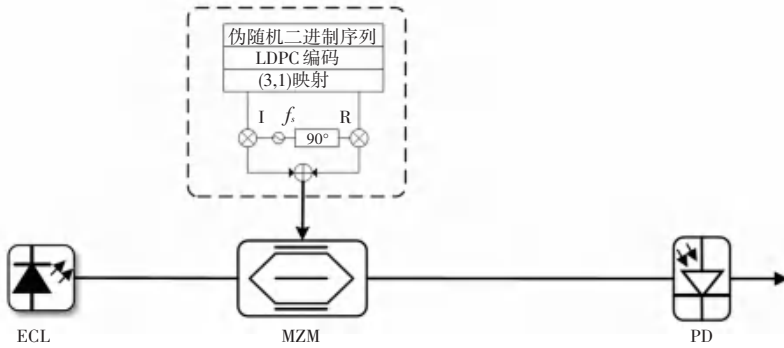


图 1 (3,1)光矢量信号的产生原理图

Fig. 1 The generation schematic diagram of (3, 1) optical vector signal

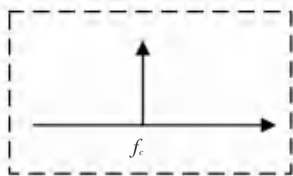


图 2 ECL 产生的 CW 的频谱示意图

Fig. 2 The spectrum diagram of CW generated by ECL

设驱动 MZM 的 RF 电矢量信号,式(1):

$$V_{drive} = V_{RF}A \cos(2\pi f_s t + \varphi) \quad (1)$$

其中, V_{RF} 代表 RF 信号的平均幅度; f_s 是 RF 信号的频率; φ 和 A 分别代表 RF 信号的相位和幅度。

ECL 产生的 CW 表示为式(2):

$$E_{in} = E_1 \exp(2\pi f_c t) \quad (2)$$

其中, E_1 和 f_c 分别代表光信号的幅度和光信号的中心载波频率。

则通过 MZM 后的光信号表示为式(3):

$$E_{out}(t) = \frac{1}{2} E_{in}(t) \left[\exp\left(j\pi \frac{V_{drive} + V_{DC}}{V_{\pi}}\right) + \exp\left(-j\pi \frac{V_{drive} + V_{DC}}{V_{\pi}}\right) \right] = E_{in}(t) \cos\left(\pi \frac{V_{drive}}{V_{\pi}} + \pi \frac{V_{DC}}{V_{\pi}}\right) = E_1 \exp(2\pi f_c t) \cos\left[\pi \frac{V_{RF}A \cos(2\pi f_s t + \varphi)}{V_{\pi}} + \pi \frac{V_{DC}}{V_{\pi}}\right] \quad (3)$$

其中, V_{DC} 和 V_{π} 分别是 MZM 的直流偏置电压和 MZM 的半波电压。

雅可比-安吉尔恒等式如式(4):

$$e^{jx \cos \theta} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^n(x) e^{jn\theta} \quad (4)$$

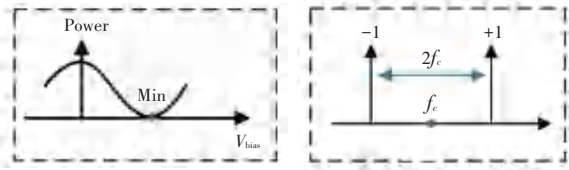
其中, $J_n(x)$ 是第一类整数阶的贝塞尔函数。

MZM 通过调整直流偏置电压可抑制偶数阶子载波(包括中心载波),利用式(4),当 V_{DC} 为 $V_{\pi}/2$ 时,偶数阶子载波被抑制,奇数阶边带则作为输出,通过调节 RF 电压的大小, ± 1 阶子载波可被设置为具有极高的功率并作为输出。此时, MZM 的输出光信号可表示为式(5):

$$E(t) = -2E_1J_1(\beta A)\cos(2\pi f_s t + \varphi)\exp(j2\pi f_c t) \quad (5)$$

其中, $\beta = \pi V_{drive}(t)/V_{pp}$ 是 MZM 的调制指数; V_{pp} 和 $V_{drive}(t)$ 分别为 MZM 的半波电压和驱动电压; J_1 是一阶贝塞尔函数。

MZM 的输出功率和偏置电压的关系曲线及 MZM 的工作点及 MZM 后的频谱示意图如图 3 所示,可以看到 MZM 后的频谱间隔为 $2f_s$, 是 RF 信号频率的 2 倍。



(a) MZM 的输出功率和偏置电压的关系曲线 (b) MZM 后的频谱示意图

图 3 MZM 的传输曲线和频谱示意图

Fig. 3 The transmission curve and the spectrum diagram of MZM

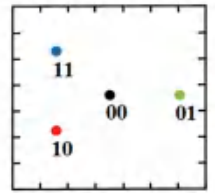
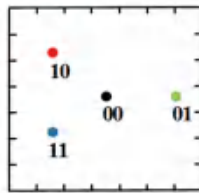
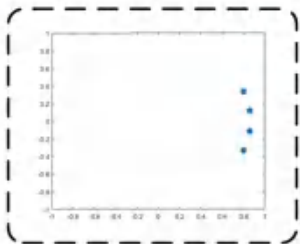
二倍频光矢量信号通过 PD 后的表达式如式(6):

$$iPD(t) = R |E(t)|^2 = 2RE_1^2 J_1^2(\beta A) + 2RE_1^2 J_1^2(\beta A) \cos(4\pi f_s t + 2\varphi) \quad (6)$$

其中, R 是 PD 的光电转换系数; 等式(6)的第一项是直流分量, 可被滤除; 第二项是通过 ± 1 阶边带倍频获得的信号。

由式(6)可知, 由于 MZM 输出的二倍频光矢量信号通过接收端的 PD 平方律检测后, 信号的相位会变为原来的两倍。因此, 为了在接收端可以恢复原始信号, 对 QPSK 矢量信号在发送端需要对其进行相位预编码, 相位预编码后的星座图如图 4(a) 所示。而对(3,1)矢量信号而言, 由于(3,1)矢量信号本身的特性, 无需在发送端进行预编码, 通过 PD 后的星座点只是错位, 仅仅是位于第二象限的“10”星座点和第三象限的“11”星座点会交换, 只需更改接收端的解映射方法即可恢复出正确的星座图, (3,1)矢量信号原始星座图和 PD 后的星座图分别如图 4(b) 和 4(c) 所示。

在本仿真中, LDPC 编码主要基于近似的下三角矩阵, LDPC 编码结构如图 5 所示, 其被划分为 6 块稀疏矩阵。



(a) QPSK 矢量信号预编码后的星座图 (b) 原始(3,1)矢量信号星座示意图 (c) (3,1)矢量信号通过 PD 后的星座示意图

图 4 星座示意图

Fig. 4 The constellation diagrams

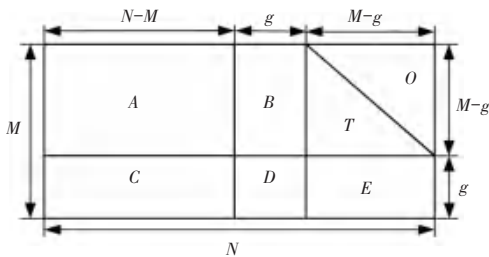


图 5 LDPC 编码结构示意图

Fig. 5 LDPC coding structure diagram

对于要发送的信息序列直接作为 LDPC 码字的前 $N - M$ 个信息比特输出, 对矩阵进行线性变换并与矩阵相乘, 可获得递推校验比特的矩阵, 如

式(7):

$$\begin{bmatrix} I & 0 \\ -ET^{-1} & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & T \\ -ET^{-1}A + C & -ET^{-1}B + D & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

令 $x = (s, p_1, p_2)$, s 代表系统比特; p_1 和 p_2 代表校验比特; 长度分别为 g 和 $M - g$, 可通过式(8) 分别递推出两部分校验比特。

$$\begin{cases} As^T + Bp_1^T + Tp_2^T = 0 \\ (-ET^{-1}A + C)s^T + (-ET^{-1}B + D)p_1^T = 0 \end{cases} \quad (8)$$

2 仿真系统

具体的仿真系统如图 6 所示。首先,在发送端通过 MATLAB 生成速率分别为 2 Gbaud 和 4 Gbaud 的伪随机二进制序列;其次,对此序列进行 LDPC 编码和(3,1)映射,并将(3,1)映射后的矢量信号上变频到 24 GHz。同时,ECL 产生中心波长为 1 549.26 nm 的 CW,该 CW 由 MZM 调制,以便能够传输(3,1)矢量信号的信息。信号通过 MZM 后,中心载波被抑制,且±1 阶边带之间的间隔为 48 GHz,是 RF 信号频率的两倍;随后,使用掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier,EDFA)放大发射信号,同时也可补偿调制损耗,以确保信号长距离传输。在接收端,48 GHz 光信号通过 PD 进行光电转换,在此过程中使用带宽为 50 GHz 的光滤波器(Optical Filter,OF)限制

PD 的带宽;最后,使用 DSP 将电信号还原为原始序列。DSP 主要有下变频,色散补偿,重定时,级联多模算法,盲相位搜索,(3,1)解映射,LDPC 译码和误码率计算。色散补偿可补偿信号传输过程中光纤色散的问题,重定时用来解决时钟不匹配的问题,级联多模算法可降低传输系统中的非线性损伤和光纤损耗,盲相位搜索用于解决相位偏移的问题。在 LDPC 译码中,本文使用了比特翻转算法,即将接收到的序列和发送端序列的二进制位分别进行异或,若为 1 则翻转接收端二进制对应位,若为 0 则保持不变,直至译码成功或达到最大译码次数。LDPC 通过对接收端的比特位进行纠错,降低整个传输系统的误码率,提高系统性能。(3,1)电矢量信号发送端的频谱,其 RF 信号的频率为 24 GHz 如图 7(a)所示;MZM 后的光谱和 PD 后的频谱如图 7(b)和 7(c)所示。

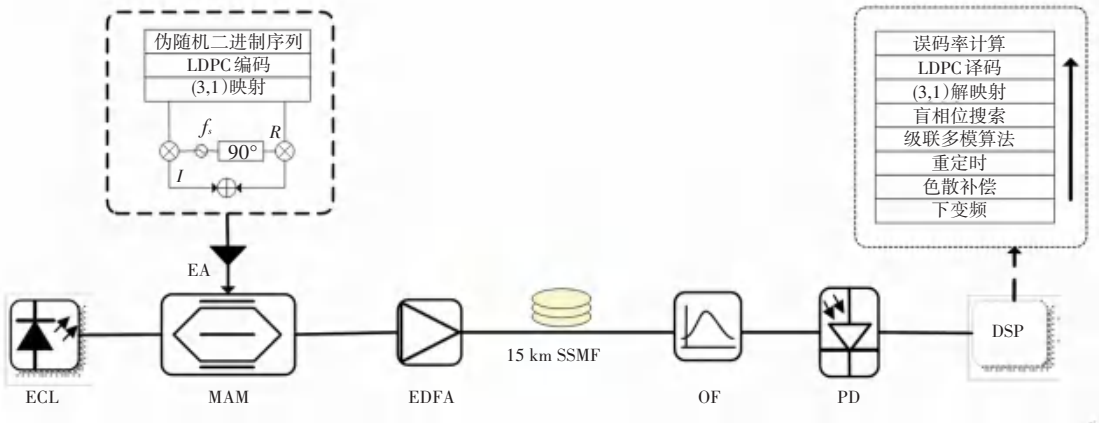


图 6 使用 LDPC 的 (3,1) 矢量信号仿真系统

Fig. 6 (3, 1) vector signal simulation system with LDPC

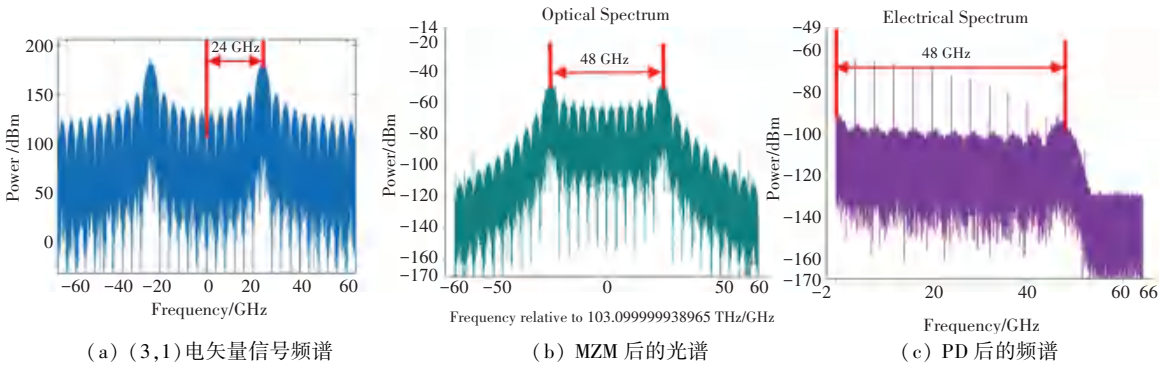
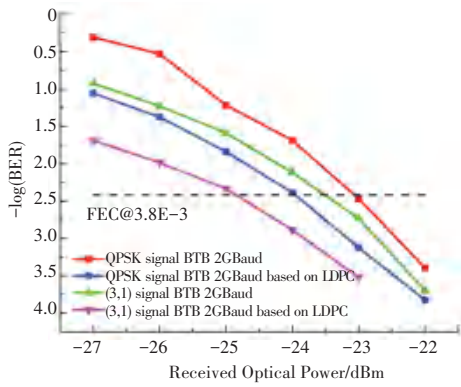


图 7 频谱图

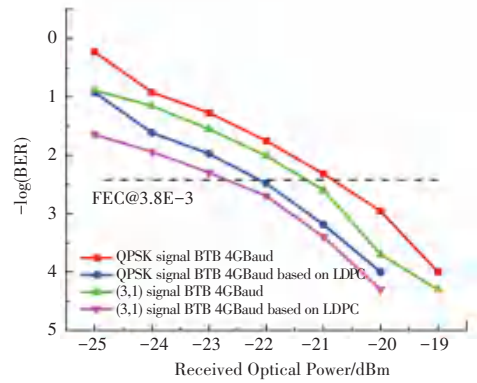
Fig. 7 The spectrum diagrams

(3,1)矢量信号和 QPSK 矢量信号 2 Gbaud 和 4 Gbaud 速率分别 BTB 传输,5 km、10 km 和 15 km SSMF 传输的误码性能如图 8 所示。相比 QPSK 矢量信号,以相同速率传输相同距离时,(3,1)矢量信号有更好的误码性能,这主要是因为(3,1)矢量信号的一个星座点位于复平面的中心,几乎不受光纤

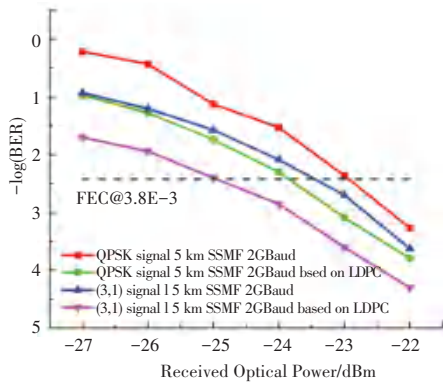
色散的影响,而且在相同发射功率情况下,(3,1)矢量信号的最小欧氏距离更大,减小了信号之间的干扰,且使用 LDPC 后,信号的误码率有所下降。由图 8(h)可知,4 Gbaud 速率传输 15 km SSMF 的(3,1)矢量信号采用 LDPC 可以提高约 3 dB 的性能。



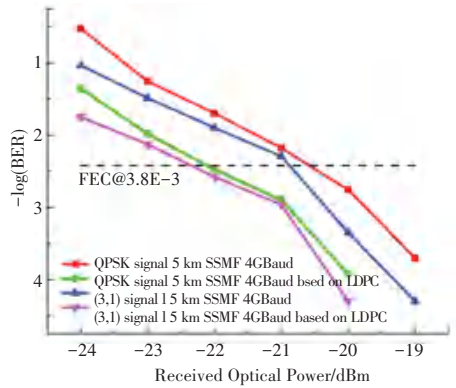
(a) 2 Gbaud 速率 BTB 传输



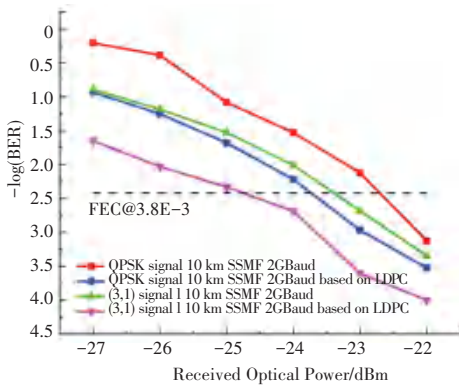
(b) 4 Gbaud 速率 BTB 传输



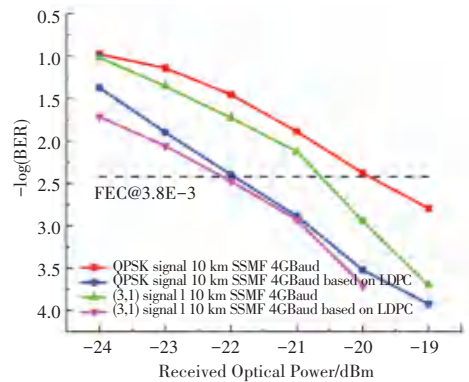
(c) 2 Gbaud 速率传输 5 km SSMF



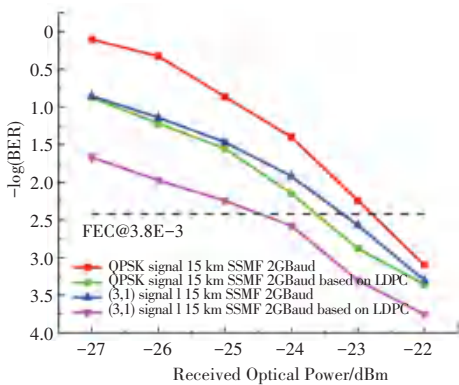
(d) 4 Gbaud 速率传输 5 km SSMF



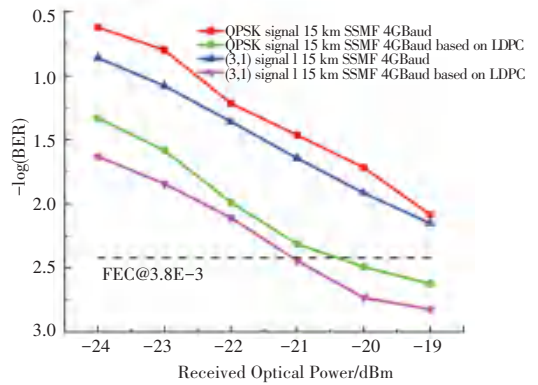
(e) 2 Gbaud 速率传输 10 km SSMF



(f) 4 Gbaud 速率传输 10 km SSMF



(g) 2 Gbaud 速率传输 15 km SSMF



(h) 4 Gbaud 速率传输 15 km SSMF

图 8 误码率曲线

Fig. 8 The BER curves

在接收光功率为 -19 dBm, 4 Gbaud 速率传输 5 km SSMF 后的(3,1)矢量信号星座图如图 9 所示, 分别展示了(3,1)矢量信号接收到的星座图、重定时后的星座图、级联多模算法后的星座图以及盲相位搜索后的星座图。可以看出,通过盲相位搜索后的星座图已经演变成了边界清晰的 4 个点。

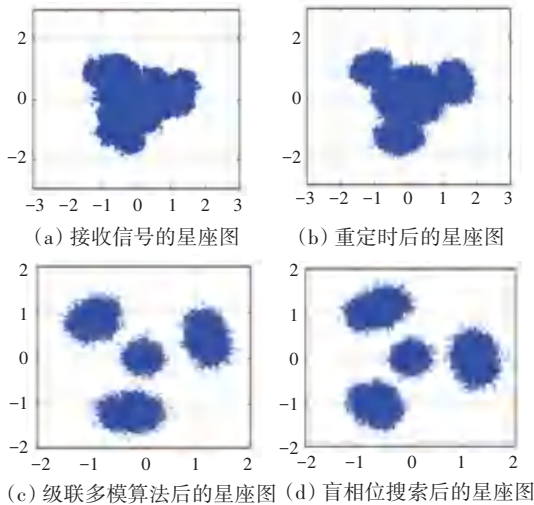


图 9 4 Gbaud 速率传输 5 km SSMF 的(3,1)矢量信号星座图

Fig. 9 (3, 1) vector signal constellation at 4 Gbaud over 5 km SSMF transmission

3 结束语

本文提出的无预编码(3,1)矢量信号的产生方法在降低发送端DSP复杂度的同时,也可确保信号

(上接第 107 页)

5 结束语

表面肌电信号的获取安全快捷,正在成为仿生假肢手重要的控制源信号。对于假手运动控制需要的关节角度范围大、精度高的问题,计算表面肌电信号的肌肉激活度作为特征值,使用 BPNN 构建分类器,并与 PSO-SVR 预测模型共同组成分层预测方案。经过实验分析,得到以下结论:基于肌肉激活度的分层角度预测均方根误差为 0.098 73、平均绝对误差 0.001 92、平均绝对百分比误差 0.59%,说明使用肌肉激活度的分层角度预测方案在关节角度范围较大的情况下仍能保证较高的预测准确度,使用本方案计算能够满足对假肢手臂控制的准确性和稳定性要求。

参考文献

- [1] 张发辉,杨大勇,刘婷. 基于肌电信号和姿态信号的手势识别[J]. 传感器与微系统,2019,38(7):46-49,52.
- [2] CLANCY E A, LIU L, LIU P, et al. Identification of constant-

的准确接收,而且LDPC应用在无预编码(3,1)矢量信号传输系统中的方法,可有效补偿系统器件的非线性和光纤的色散效应带来的信号损伤问题。通过仿真 2 Gbaud 和 4 Gbaud 速率的(3,1)矢量信号和 QPSK 矢量信号 BTB 传输,5 km、10 km 和 15 km SSMF 传输后的结果表明,(3,1)矢量信号有比 QPSK 矢量信号更好的性能,且采用 LDPC 后的误码率都可以得到明显的下降,使用 LDPC 后的(3,1)矢量信号和 QPSK 矢量信号以 4 Gbaud 速率传输 15 km SSMF 后的误码率可低于 HD-FEC 阈值 3.8×10^{-3} 。

参考文献

- [1] 李韦萍,孔森,石俊婷,等. 基于单个光调制器产生多路无线和有线信号[J]. 光学学报,2020,40(19):1906001.
- [2] MA J X and ZHOU W. Joint influence of the optical carrier-to-sideband ratio and guard band on direct-detection SSB-OOFDM system[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(5): 7801713.
- [3] 王鹏翔,王中训,张超,等. 非二进制 LDPC 码编码调制在光纤通信中的应用[J]. 光通信技术,2012,36(3):36-38.
- [4] 徐恒舟,李楠,赵可新,等. 5G 通信中准循环 LDPC 码的环结构分析[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(7):50-55.
- [5] YU J J, JIA Z, YI L, et al. Optical millimeter-wave generation or up-conversion using external modulators [J]. IEEE Photonics Technol Lett, 2006, 18(1): 265-267.
- [6] LI F, LI X, YU J J, et al. Performance comparison of DFT-spread and pre-equalization for 8×244.2 -Gb/s PDM-16QAM-OFDM [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(1): 227-233.
- [7] 庄云圣,潘炜,叶佳,等. 基于四倍频矢量信号和波长重用的双向光载无线系统[J]. 中国激光,2018,45(10):1006005.

posture EMG-torque relationship about the elbow using nonlinear dynamic models [J]. IEEE transactions on bio-medical engineering, 2012, 59(1):205-212.

- [3] OYONG A W, PARASURAMAN S, JAUW V L. Robot assisted stroke rehabilitation: Estimation of muscle force/joint torque from EMG using GA [C]// 2010 IEEE EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences (IECBES), 2010, 341-347.
- [4] MOBASSER F, EKLUND J M, HASHTRUDI Z K. Estimation of elbow induced wrist force with EMG signals using fast orthogonal search[J]. Biomedical Engineering, 2007, 54(4):683-693.
- [5] QICHUAN D, JIANDA H, XINGANG Z. Continuous Estimation of Human Multi-Joint Angles From sEMG Using a State-Space Model [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2017,25(9):1518-1528.
- [6] 王美茜,刘振泽,尹苍穹,等. 基于小波变换改进的上肢肌电信号降噪分析[J]. 控制工程,2015,22(S1):8-12.
- [7] SHANXIAO Y AND GUANGYING Y. Emotion Recognition of EMG Based on Improved L-M BP Neural Network and SVM[J]. Journal of Software, 2011, 6(8):1529-1536.
- [8] WINARNO H A, POERNAMA A I, SOESANTI I, et al. Evaluation on EMG Electrode Reduction in Recognizing the Pattern of Hand Gesture by Using SVM Method[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1577(1):012044.
- [9] Abdulhamit Subasi. Classification of EMG signals using PSO optimized SVM for diagnosis of neuromuscular disorders [J]. Computers in Biology and Medicine, 2013, 43(5): 576-586.