

## 激光与光电子学进展

## 基于注入锁定激光器和光相位补偿的相干解调方案

张旭蕊, 王菊\*, 于晋龙, 苏学敏, 马闯

天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072

**摘要** 提出一种基于注入锁定本地激光器和光相位补偿的相干解调方案。通过注入锁定恢复本振光(LO),利用零差相干检测的方式对信号光进行解调,使用比例-积分-微分(PID)算法控制压电陶瓷(PZT)补偿光相位,使光相位差波动不超过 $\pm 4.8^\circ$ 。实现了超密集波分复用无源光网络(UDWDM-PON)系统双用户 400 Mbit/s 伪随机二进制序列(PRBS)的调制、传输和解调,并进行了误码率(BER)测试。

**关键词** 相干解调; UDWDM-PON; 注入锁定; PID 控制; 光相位补偿

中图分类号 TN913

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231044

## Coherent Demodulation Based on Injection Locking Laser and Optical Phase Compensation

Zhang Xurui, Wang Ju\*, Yu Jinlong, Su Xuemin, Ma Chuang

School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** A coherent demodulation scheme based on injection locking local laser and optical phase compensation is proposed. The local oscillator (LO) is recovered by injection locking, and the signal is demodulated via homodyne coherent detection. Using the proportional-integral-derivative (PID) algorithm to control the piezoelectric ceramic (PZT) enables the optical phase compensation. The results demonstrate that the fluctuation of optical phase difference does not exceed  $\pm 4.8^\circ$ . The modulation, transmission, and demodulation experiments of a dual-user 400-Mbit/s pseudo-random binary sequence (PRBS) in the ultra-dense wavelength division multiplexing passive optical network (UDWDM-PON) are implemented. Additionally, the bit error rate (BER) test is conducted.

**Key words** coherent demodulation; UDWDM-PON; injection locking; PID control; optical phase compensation

## 1 引言

相干解调技术具有高接收灵敏度、灵活的波长选择等特点,并且无需额外的波长选择器件,在超密集波分复用无源光网络(UDWDM-PON)中有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。

传统的相干解调方案使用独立的本地激光器,本振光(LO)与信号光存在明显的频率偏移<sup>[2]</sup>,需使用复杂的数字信号处理(DSP)算法进行频偏估计和相位恢复<sup>[3]</sup>。例如,Shao等<sup>[4]</sup>基于光频率梳和数字接收机设计了UDWDM-PON系统,使用独立的本地激光器作为本振光,DSP模块需运行时序匹配、频偏估计、相位恢复等一系列算法。基于锁相环的相干解调方案在使

用独立本地激光器的基础上,加入锁相环对本振光频率进行调谐,有效减少了频率偏移,但仍需进行频偏估计和相位恢复<sup>[5]</sup>。例如,刘旭东等<sup>[6]</sup>使用鉴频鉴相器对本振光与信号光的混频信号进行检测,输出的相位差信号控制压电陶瓷(PZT)对本振光频率进行调谐,实现了本振光与信号光的相位锁定,进而实现零差相干检测。然而,该方案锁相后仍存在频率偏移,需进行频偏估计。Fujii等<sup>[7]</sup>使用现场可编程逻辑门阵列(FPGA)对相位差信号进行处理,实现了频偏估计和相位恢复,突破了模拟器件的限制,完成了高速信号的解调。为避免本地激光器引入的频偏估计环节,自零差相干检测方案在发射端发射导频光作为接收端的本振光,有效降低了相位恢复算法的难度<sup>[8-9]</sup>。然而,导

收稿日期: 2023-04-07; 修回日期: 2023-04-28; 录用日期: 2023-05-08; 网络首发日期: 2023-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(62005194)

通信作者: \*wangju@tju.edu.cn

频光的传输需使用波分/偏振/空分复用技术,降低了信道利用率。例如,Nakamura等<sup>[9]</sup>采用基于偏振复用的自零差相干检测方案,实现了导频光与信号光的正交偏振复用,接收端使用偏振分束器分离导频光与信号光并完成相干解调。该方案对激光器线宽有着较高的容忍度,但是浪费了导频光偏振方向的信道资源,并且接收端需要额外的放大器,提高了系统成本。

20世纪70年代,注入锁定技术被首次应用于CO<sub>2</sub>激光器中,迅速引起了研究人员的兴趣。锁定状态下,激光器可输出与主激光器频率、线宽一致的高功率本振光。注入锁定本地激光器方案避免了独立本地激光器方案和锁相环方案需进行的频偏估计环节,且克服了自零差相干检测方案的本振光衰减问题<sup>[10]</sup>,也不会额外占用信道资源。例如,Liu等<sup>[11]</sup>将窄线宽导频光加入信号光中,通过注入锁定实现了滤波以及注入频率的放大,从而获得纯净的窄线宽本振光。

注入锁定本地激光器方案中存在本振光与信号光的相位波动问题。比例-积分-微分(PID)算法设计过程简单,器件成本低廉,在位移控制<sup>[12-13]</sup>、温度稳定<sup>[14]</sup>等方面均有着广泛的应用。例如,曹荣等<sup>[15]</sup>将PID算法应用在PZT精准定位上,得到了满意的控制效果。PZT可根据不同的驱动电压产生不同的形变。例如,吴加丽等<sup>[16]</sup>设计了一款光纤耦合器,使用随机并行梯度下降算法计算PZT驱动电压,控制光纤产生微位移,提高了耦合效率。陈雨君等<sup>[17]</sup>通过改变PZT的驱动电压以调节激光器的腔长,进而实现激光器频率的调谐,响应速度快。综上所述,PID算法与PZT的结合可实现快速、精确、低成本的光相位补偿。

本文提出一种基于注入锁定本地激光器和光相位补偿的UDWDM-PON系统相干解调方案。通过注入锁定本地激光器的方法实现光零差相干检测,无需复杂的频偏估计。基于PID控制的光相位补偿机制通过零差相干检测将信号光与本振光的相位差转换为幅度变化,使用微处理器(MCU)进行运算,驱动PZT拉伸光纤以补偿光相位。最终实现了光相位差在 $\pm 4.8^\circ$ 内的稳定控制和UDWDM-PON系统双用户400 Mbit/s伪随机二进制序列(PRBS)的调制、传输和解调,接收功率大于-7 dBm时,误码率(BER)优于 $10^{-8}$ ,充分验证了所提方案的可行性,为光接入网相干解调技术提供了新的解决思路。

## 2 实验结构与原理

图1为UDWDM-PON系统双用户相干解调方案的原理图。按原理图搭建实验系统,光发射机实物图如图2(a)所示,基于注入锁定原理,采用锁模激光器(MLLD,厂家:Calmar Optcom,型号:PSL-10-TT)注入锁定从激光器的UDWDM-PON方案,具有结构简单、波长间隔稳定、从激光器波长在一定范围内跟随主激光器波长的特点<sup>[11]</sup>。MLLD受5 GHz射频(RF)信号驱动,产生波长间隔为0.04 nm的光频率梳。调整分布式反馈激光器(DFB1和DFB2,厂家:四川腾光,型号:930010C1424-81)的波长并使用偏振控制器(PC1和PC3)调整注入光频率梳的偏振态,使DFB1和DFB2分别注入锁定在光频率梳相邻波长分量上,表示两个不同的用户信道(channel 1和channel 2)。输出光信号调整偏振态后,使用马赫-曾德尔调制器

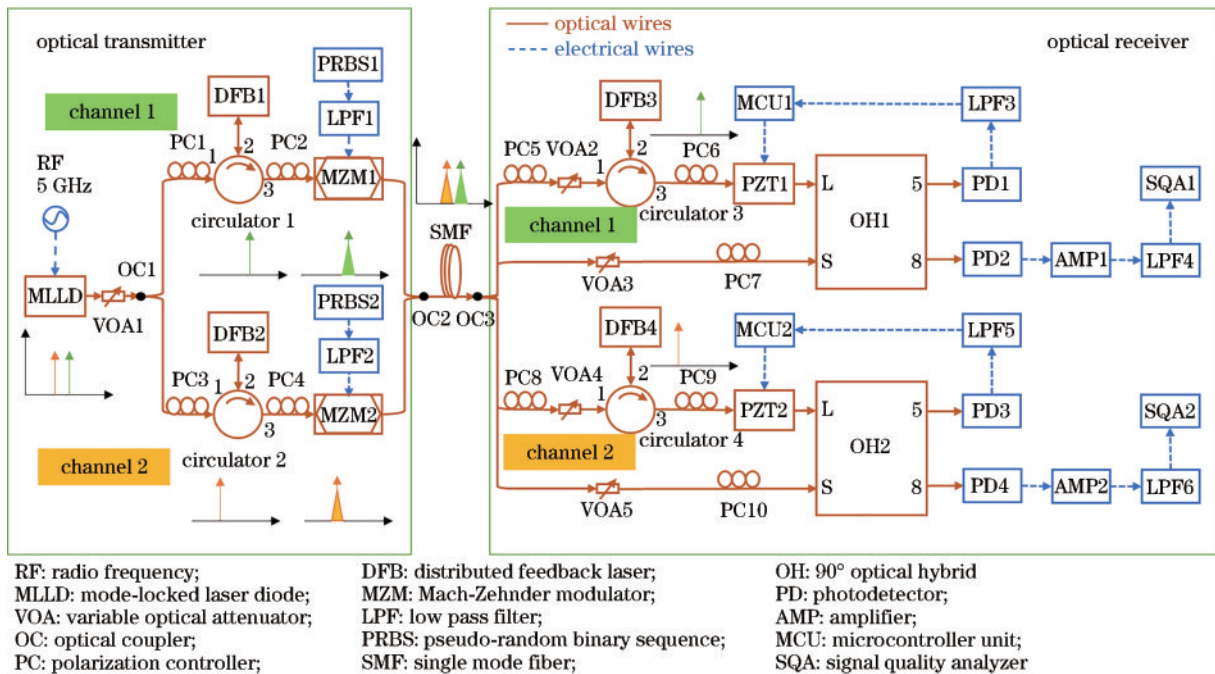


图1 UDWDM-PON系统双用户相干解调原理图

Fig. 1 Schematic of dual-user coherent demodulation of UDWDM-PON system

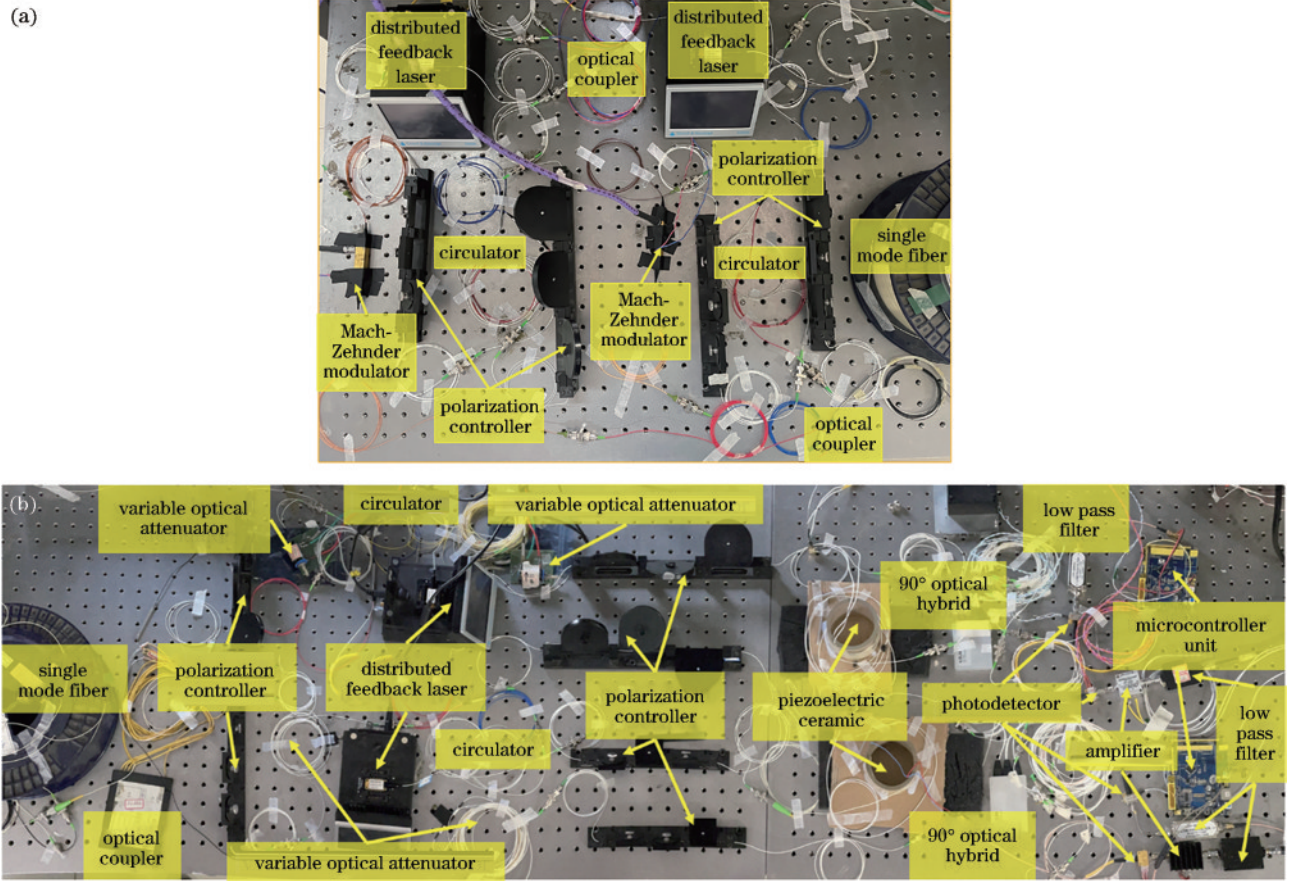


图 2 UDWDM-PON 系统双用户相干解调实验实物图。(a) 发射机；(b) 接收机

Fig. 2 Physical diagrams of dual-user coherent demodulation of UDWDM-PON system. (a) Transmitter; (b) receiver

(MZM1 和 MZM2, 厂家: 中国电科, 型号: GO15 MZPA7813) 调制由信号质量分析仪(SQA, 厂家: 安立, 型号: MP1800A) 产生的 400 Mbit/s 的 PRBS 信号, 其中, PRBS 信号经低通滤波器(LPF1 和 LPF2, 截止频率: 2 GHz) 滤除高频部分。调制后的光信号经光纤耦合器(OC2) 合路, 进入 10 km 单模光纤(SMF) 传输。光接收机实物图如图 2(b) 所示, 基于注入锁定和光相位补偿原理, 传输光信号经过 OC3 分为 4 路, 每个用户使用 2 路, 以 channel 1 为例 (channel 2 同理), 上路光信号调整偏振态和功率后, 经光环行器(circulator 3) 注入锁定 DFB3, 恢复与 DFB1 波长一致的本振光。本振光经压电陶瓷(PZT1, 延迟量 19  $\mu\text{m}$ ) 补偿光相位后输入 90° 光混频器(OH1, 厂家: Kyliya, 型号: COH28) 的 L 口; 下路光信号输入 OH1 的 S 口。以上两路输入在 OH1 中混频后分两路输出: 上路经光电探测器(PD1, 厂家: Discovery Semiconductor, 型号: DSC40S) 转化为电信号, 经低通滤波器(LPF3, 厂家: 菲尔特通信, 型号: LPF~50kHz) 滤波后被微处理器(MCU1, 厂家: 意法半导体, 型号: STM32F103) 采集, MCU1 运行 PID 算法控制 PZT1 实现光相位补偿; 下路转化为电信号后经放大器(AMP1, 厂家: Mini-Circuits, 型号: ZFL-500+) 放大和低通滤波器(LPF4, 截止频率: 2GHz) 滤波后进行解调信号的检测。

经过 MZM1 和 MZM2 的光信号可表示为

$$E_{MZMi} = \frac{(A_i + k_{ai} E_{PRBSi})}{2} \exp [j(2\pi f_i t + \varphi_i)], i = 1, 2, \quad (1)$$

式中:  $E_{MZMi}$  表示经过第  $i$  个马赫-曾德尔调制器的光信号幅度,  $i = 1, 2$ ;  $A_i, f_i, \varphi_i$  为 DFB $i$  的输出光信号幅度、频率和初始相位;  $E_{PRBSi}$  为 PRBS 信号;  $k_{ai}$  为比例系数。

以 channel 1 为例, 90° 光混频器(OH1) S 口的输入光信号可表示为

$$E_s = k_b (E_{MZM1} + E_{MZM2}) \exp(-j\Delta\varphi), \quad (2)$$

式中:  $k_b$  为衰减系数;  $\Delta\varphi$  表示本振光与信号光传输过程因温度变化等因素引入的光相位差波动。

在一定的注入光功率比下, 注入锁定 DFB3 可构成有源滤波器, 恢复窄线宽、高质量的本振光, DFB3 的输出光信号可表示为

$$E_3 = A_3 \exp [j(2\pi f_3 t + \varphi_3)], \quad (3)$$

式中:  $A_3, f_3, \varphi_3$  为 DFB3 的光信号幅度、频率和初始相位。当 DFB1 注入锁定 DFB3 时,  $f_3 = f_1$ 。PZT 可改变光程, 进而改变本振光光相位, OH1 L 口的输入光信号为

$$E_l = A_3 \exp \{j[2\pi f_3 t + \varphi_3 - k_c u(k)]\}, \quad (4)$$

式中:  $u(k)$  为 PID 算法的输出;  $k_c$  为比例系数。

根据 OH1 的输出光功率调整偏振控制器(PC6 和 PC7)后,OH1 的 5 口输出为

$$E_5 = \frac{1}{2} E_s + \frac{1}{2\sqrt{2}} E_L \exp\left(\frac{j\pi}{2}\right), \quad (5)$$

LPF3 的输出电压为

$$V_5 = I_{DC} R + \frac{k_b A_1 A_3 R_e R}{2\sqrt{2}} \times \sin[\varphi_3 - k_c u(k) - \varphi_1 + \Delta\varphi], \quad (6)$$

式中: $R_e$ 为光电探测器(PD1)响应度; $I_{DC}$ 为光电流直流项; $R$ 为 PD1 输出阻抗。

OH1 的 8 口输出为

$$E_8 = \frac{1}{2} E_s \exp(j\pi) + \frac{1}{2\sqrt{2}} E_L, \quad (7)$$

LPF4 的输出电压为

$$V_8 = I_{DC} R - \frac{(A_1 + k_{a1} E_{PRBS1}) k_b A_3 R_e R}{2\sqrt{2}} \times \cos[\varphi_3 - k_c u(k) - \varphi_1 + \Delta\varphi]. \quad (8)$$

光纤受温度变化等影响,无 PID 控制时, $u(k)=0$ ,光相位差 $\varphi_3 - \varphi_1 + \Delta\varphi$ 不稳定,式(8)中的解调信号幅度也随之变化。加入 PID 控制补偿光相位后,当光相位差满足 $\varphi_3 - k_c u(k) - \varphi_1 + \Delta\varphi = 2n\pi, n=0, \pm 1, \pm 2 \dots$ 时,解调信号幅度达极大值,此时 $V_5 = I_{DC} R$ ,处于近线性区间<sup>[18]</sup>,可使用 PID 控制。

使用 MCU1 采集  $V_5$ , 调整 PID 参数  $K_P, K_I, K_D$  和设定稳定点  $V_{set}$ , 计算 PID 输出电压驱动 PZT, 控制 PZT 的膨胀, 改变 PZT 径向半径, 以改变缠绕在 PZT 上的光纤长度, 进而改变光相位<sup>[19]</sup>。增量式 PID 算法克服了位置式 PID 算法存储数据量大、可产生积分饱和、故障时影响大的缺点<sup>[20]</sup>, 更适用于本实验系统。

增量式 PID 算法初始化  $e(k), e(k-1), e(k-2)$ 、输出增量  $\Delta u$  和输出  $u(k-1)$  为 0, 设定  $V_{set} = I_{DC} R$ , MCU 采集当前  $V_5$  数值:

$$e(k) = V_5 - V_{set}, \quad (9)$$

$$\Delta u = K_P [e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)], \quad (10)$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u, \quad (11)$$

更新  $e(k-2), e(k-1), e(k)$  数值, 进入下一循环。

### 3 分析与讨论

在发射端, MLLD 受 5 GHz 射频信号驱动, 输出的光频率梳线宽测量值约为 80 kHz, MLLD 的输出光谱如图 3(a) 虚线所示, 相邻波长分量间隔为 0.04 nm。DFB1 注入锁定在波长为 1554.875 nm 的波长分量上, 总注入光功率为 -29.5 dBm, 输出线宽等于注入光频率梳的线宽, 注入锁定 DFB1 的光谱如图 3(a) 实线所示, 波长为 1554.875 nm 的分量被放大。同理将 DFB2

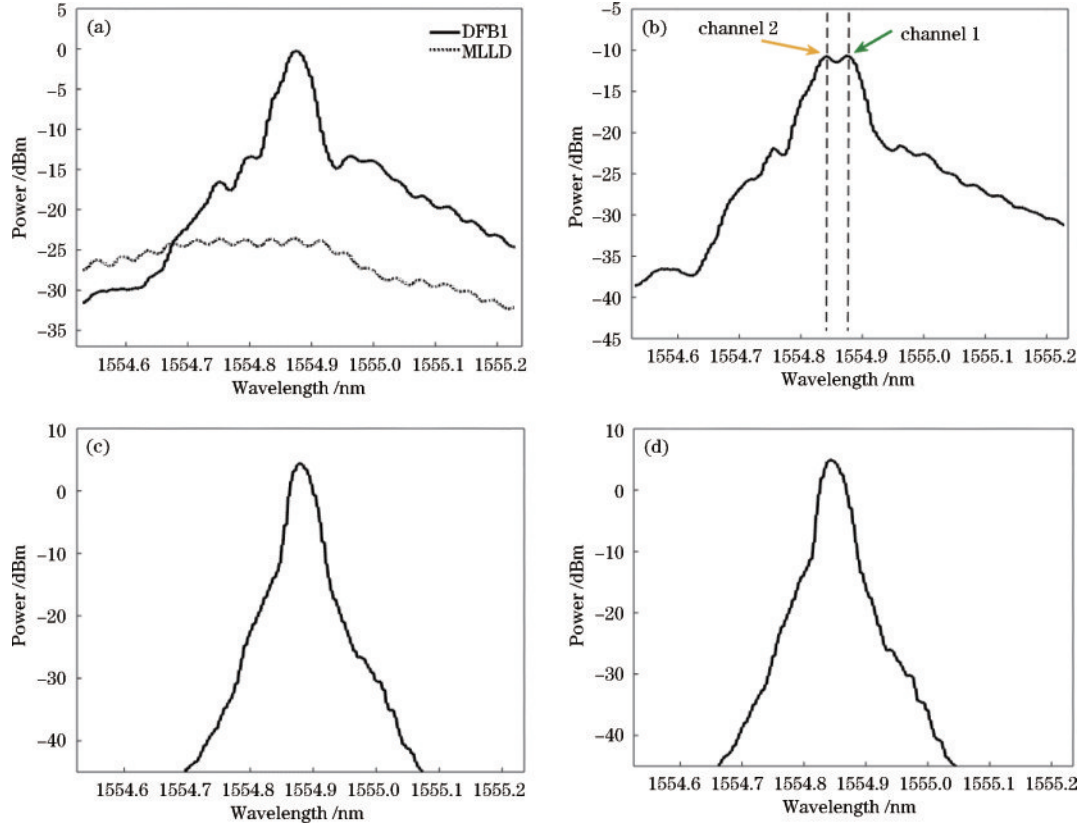


图 3 光谱图。(a) 锁模激光器和注入锁定 DFB1; (b) 同时注入锁定 DFB1 和 DFB2; (c) 注入锁定 DFB3; (d) 注入锁定 DFB4  
Fig. 3 Optical spectra. (a) MLLD and injection-locked DFB1 laser; (b) injection-locked DFB1 and DFB2 laser; (c) injection-locked DFB3 laser; (d) injection-locked DFB4 laser

注入锁定在波长为 1554.835 nm 的分量上,总注入光功率为  $-30.1$  dBm。同时注入锁定 DFB1 和 DFB2 的光谱如图 3(b)所示,信道间隔为  $0.04$  nm。

在接收端,如图 3(c)、(d)所示,注入锁定本地激光器(DFB3 和 DFB4)分别恢复波长为 1554.875 nm 和 1554.835 nm 的本振光,有效注入光功率为  $-30.9$  dBm,输出线宽等于注入光的线宽。

以 channel 1 解调为例,通过注入锁定 DFB3 获得

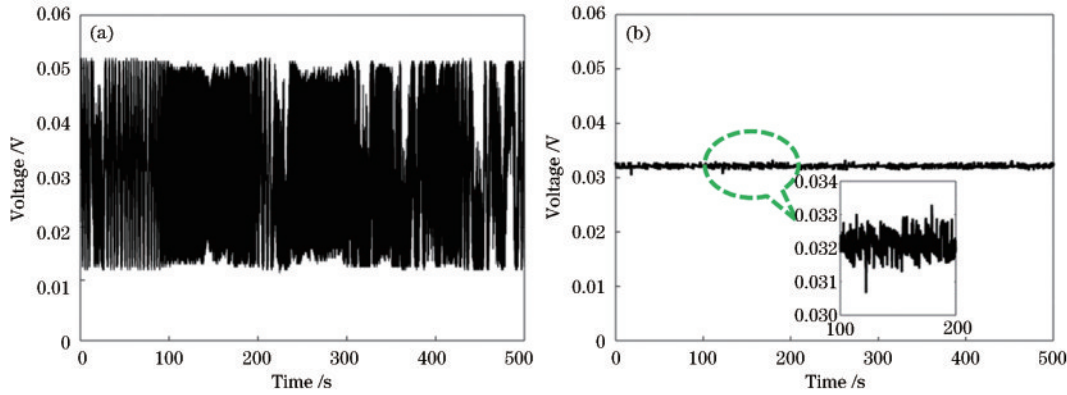


图 4  $V_{50}$ (a)无PID控制;(b)有PID控制

Fig. 4  $V_{50}$ . (a) Without PID control; (b) with PID control

为进一步测试系统的传输性能,使用信号质量分析仪对解调信号进行误码率测试,测试结果如图 5 所示。其中:方块形状和三角形状数据点分别代表 channel 1 和 channel 2 的误码率;空心数和实心数据点分别代表双用户和单用户传输的误码率;实线、虚线、双划线、点划线分别代表单用户传输 channel 1、单用户传输 channel 2、双用户传输 channel 1、双用户传输 channel 2 的误码率线性拟合。结果表明:眼图中“眼睛”的形状规则且张开幅度大时误码率较低;误码率随着接收功率的增大而减小,接收功率大于  $-7$  dBm 时,误码率优于  $10^{-8}$ 。眼图①和②、③和④分别有着相似的信号线模糊程度,表明两路信道传输性能基本相同。双用户相干解调对比单用户相干解调,信道串扰产生

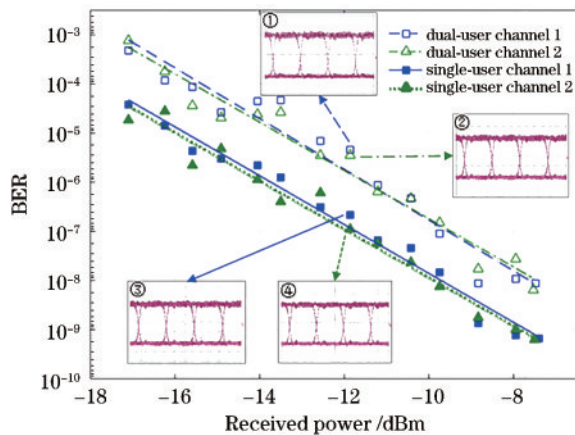


图 5 相干解调误码率

Fig. 5 BER of coherent demodulation

波长为 1554.875 nm 的本振光,本振光与信号光在光混频器(OH1)中混频。无PID控制时,光相位差随机波动, $V_5$ 的变化区间为  $[0.01136, 0.05195]$ ,如图 4(a)所示,可求出式(6)中  $I_{DC}R$  和  $k_b A_1 A_3 R_c R / 2\sqrt{2}$  的值。使用PID控制后,光相位差得到了补偿, $V_5$ 的变化区间为  $[0.03046, 0.03335]$ ,如图 4(b)所示。由反三角函数计算可得,使用PID控制后的光相位差在  $\pm 4.8^\circ$  内变化。

了约 2 dB 的功率代价:一方面,非理想的 LPF1 和 LPF2 使相邻信道的信号在光谱上出现重叠;另一方面,注入锁定激光器构成的有源滤波器滤波得到的本振光,其光谱包含少量相邻信道的信号信息。

## 4 结 论

提出一种基于增量式PID控制的相干解调光相位补偿机制,通过注入锁定本地激光器获得本振光,本振光与信号光在  $90^\circ$  光混频器中混频,混频信号经PID算法处理,控制PZT补偿光相位,稳定光相位差,获得稳定的解调信号。实验结果表明,该光相位补偿机制可以使光相位差长时间稳定在  $\pm 4.8^\circ$  内,相干接收机能较好地实现基带信号解调,为光接入网相干解调技术提供新思路。

## 参 考 文 献

- [1] Reis J D, Shahpari A, Ferreira R, et al. Terabit ( $192 \times 10$  Gb/s) nyquist shaped UDWDM coherent PON with upstream and downstream over a 12.8 nm band[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(4): 729-735.
- [2] Presi M, Bottoni F, Corsini R, et al. All DFB-based coherent UDWDM PON with 6.25 GHz spacing and a  $> 40$  dB power budget[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(2): 107-110.
- [3] Zhou R, Anandarajah P M, Maher R, et al. 80-km coherent DWDM-PON on 20-GHz grid with injected gain switched comb source[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(4): 364-367.
- [4] Shao T, Zhou R, Vujicic V, et al. 100 km coherent

- Nyquist ultradense wavelength division multiplexed passive optical network using a tunable gain-switched comb source[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2016, 8(2): 112-117.
- [5] Herzog F, Kudielka K, Erni D, et al. Optical phase locking by local oscillator phase dithering[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, 42(10): 973-985.
- [6] 刘旭东, 李晶, 郭肃丽, 等. 空间零差相干光通信的锁相技术[J]. *无线电工程*, 2018, 48(8): 718-722.  
Liu X D, Li J, Guo S L, et al. Study on optical phase-locked loop technology in space homodyne coherent optical communication[J]. *Radio Engineering*, 2018, 48(8): 718-722.
- [7] Fujii A, Shirazawa F, Kanda Y, et al. Stable QPSK demodulation using a digital optical phase-locked loop[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(18): 1847-1850.
- [8] 唐明, 李伟昊, 章明明, 等. 同源自零差相干光传输技术[J]. *中国激光*, 2022, 49(12): 1206002.  
Tang M, Li W H, Zhang M M, et al. Homologous homodyne coherent light transmission technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(12): 1206002.
- [9] Nakamura M, Kamio Y, Miyazaki T. Linewidth-tolerant 30 Gbit/s 8-PSK self-homodyne using single modulator and phase-noise cancelling technique[J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(7): 368-369.
- [10] Zhou R, Shao T, Pascual M D G, et al. Injection locked wavelength de-multiplexer for optical comb-based nyquist WDM system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(24): 2595-2598.
- [11] Liu Z X, Wu D S, Richardson D J, et al. Homodyne OFDM using simple optical carrier recovery[C]//*Optical Fiber Communication Conference*, March 9-13, 2014, San Francisco, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2014: W4K.3.
- [12] 艾志伟, 陈俊沅, 嵇建波, 等. 快速反射镜装配误差扰动抑制方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(19): 1912004.  
Ai Z Y, Chen J Y, Ji J B, et al. Disturbance suppression method for assembly errors in fast steering mirrors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(19): 1912004.
- [13] 李俊华, 董岩, 林本震, 等. 基于光通信快速反射镜的改进型自抗扰控制算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(7): 0706007.  
Li J H, Dong Y, Lin B Z, et al. Improved active disturbance rejection control algorithm based on fast steering mirror for optical communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(7): 0706007.
- [14] 高家鑫, 宋延嵩, 刘洋. 非线性PID自抗扰控制在快反镜温控系统中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(5): 0523001.  
Gao J X, Song Y S, Liu Y. Application of nonlinear PID active disturbance rejection control in the temperature control system of fast steering mirror[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(5): 0523001.
- [15] 曹荣, 秦岚, 夏含信, 等. PID控制在压电陶瓷精密定位过程的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(S2): 132-135.  
Cao R, Qin L, Xia H X, et al. The application of PID controlling technique in PZT precision positioning[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(S2): 132-135.
- [16] 吴加丽, 柯熙政, 杨尚君, 等. 多维耦合器校正空间光-单模光纤耦合对准误差[J]. *光学学报*, 2022, 42(7): 0706003.  
Wu J L, Ke X Z, Yang S J, et al. Correction of alignment error in coupling space light into single-mode fiber by multi-dimensional coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(7): 0706003.
- [17] 陈雨君, 姚波, 刘昊炜, 等. 基于石英玻璃掺铈光纤的单纵模DBR光纤激光器的研制[J]. *量子电子学报*, 2023, 40(1): 56-61.  
Chen Y J, Yao B, Liu H W, et al. Development of single-longitudinal-mode DBR fiber laser based on thulium-doped silica glass fiber[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2023, 40(1): 56-61.
- [18] 李小伟, 史俊武, 张建武. 主动油气悬架反馈线性化及PID控制[J]. *上海交通大学学报*, 2009, 43(10): 1521-1525.  
Li X W, Shi J W, Zhang J W. Feedback linearization and PID control for active hydropneumatic suspension[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2009, 43(10): 1521-1525.
- [19] 金锋, 姬文越. 对光纤PZT相位调制器的研究[J]. *光通信技术*, 1989, 13(1): 84-87.  
Jin F, Ji W Y. Study on the optical fiber pzt phase modulator[J]. *Optical Communication Technology*, 1989, 13(1): 84-87.
- [20] 宋安然, 周德廉, 刘艳梨. 基于增量式PID控制的锅炉温控系统设计[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(6): 11-16.  
Song A R, Zhou D L, Liu Y L. Design of boiler temperature control system based on incremental PID control[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(6): 11-16.