

偏振分集相干光 OFDM 通信系统中的相位噪声消除

余 骏 黄鸣柳 邹焱昭 王 旺 宋英雄

上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200072

摘要 提出了一种基于偏振分集的相干光正交频分复用(OFDM)链路。然而相干检测对相位噪声比较敏感,偏振分集接收过程又会产生额外的乘性相位噪声,因此基于偏振分集相干光 OFDM 系统,提出了基于数字信号处理的相位噪声消除方案。在 100 km 单模光纤中,以 8 Gbit/s 的传输速率零误码传输 16 进制正交振幅调制 OFDM 信号,经相干检测之后,基于数字信号处理,对相干光 OFDM 信号完成了相位噪声消除,并对相位噪声消除后的信号星座图进行了实验结果分析。另外,还将经过相位噪声消除后的偏振分集相干光 OFDM 链路与其他相干光 OFDM 链路方案进行了性能对比,从而验证了此方案的优越性。

关键词 光纤光学;相干接收机;偏振分集;正交频分复用;数字信号处理;相位噪声

中图分类号 TN911.74 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0806001

Phase Noise Cancellation for Coherent Optical OFDM System Based on Polarization Diversity

Yu Jun Huang Mingliu Zou Yaozhao Wang Wang Song Yingxiong

Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract The coherent optical orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system based on polarization diversity is proposed. However, the coherent detection is very sensitive to phase noise and the polarization diversity reception can produce additional multiplicative phase noise. Therefore, a phase noise cancellation scheme based on digital signal processor with coherent optical OFDM system is proposed. Error-free transmission of an 8 Gbit/s 16 quadrature amplitude modulation OFDM signal over a 100 km single mode fiber is experimentally demonstrated. After the coherent detection, the phase noise through digital signal processing is cancelled, and the experimental constellation diagrams of the signals after phase noise cancellation is analyzed. In addition, the coherent optical OFDM link based on polarization diversity after phase noise cancelling is compared with other coherent optical OFDM link as the advantage of this scheme is verified.

Key words fiber optics; coherent receiver; polarization diversity; orthogonal frequency division multiplexing; digital signal processing; phase noise

OCIS codes 060.5060; 200.4560; 220.4830; 270.1670

1 引 言

近几年来,随着数字信号处理(DSP)技术快速发展,光正交频分复用(OFDM)链路中采用相干检测技术引发了业内广泛的兴趣。相比于一般的强度调制-相干检测光 OFDM 链路,采用相干检测技术的光 OFDM 链路包含以下几个优势:1)相比于直接检测,相干接收机的灵敏度能够提高 20 dB 左右;2)电后期处理函数如色散补偿和偏振膜色散,能够在数字领域得到实现;3)相干检测可以允许采用高频谱利用率的高阶调制方式^[1]。然而,相干检测同时也是一种对相位噪声比较敏感的信号处理方式。因此,对于采用相干检测的光

收稿日期: 2016-03-01; **收到修改稿日期:** 2016-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(61132004,61275073,61420106011)、上海科学技术发展基金(13JC1402600,14511100100,15511105400,15530500600)

作者简介: 余 骏(1992-),男,硕士研究生,主要从事光接入网方面的研究。E-mail: yujun20111118@163.com

导师简介: 宋英雄(1973-),男,博士,教授,主要从事光接入网方面的研究。E-mail: herosf@shu.edu.cn(通信联系人)

OFDM 链路来说,需要跟踪其接收信号的相位信息。近年来,提出了基于 DPS 技术的相位噪声消除技术^[2],由发射激光源和本振激光器所引入的相位噪声能够在相干接收机的输出端转化成幅度噪声,将幅度噪声分别加载到相干接收机的同相正交(IQ)两路上。本文通过理论和实验证明了一种基于电域的数字相位噪声消除方案的相干光 OFDM 链路。在发射端,通过马赫曾德尔调制器(MZM)将射频 OFDM 信号强度调制到光载波上。然后将光强度调制信号通过 100 km 单模光纤传输到相干接收机。在接收端,光强度调制信号由偏振分集和相位分集的相干接收机进行检测,从而产生如图 1 所示的 4 路信号: I_{PD1} , I_{PD2} , I_{PD3} 和 I_{PD4} 。验证了通过基于 DSP 的相位噪声消除(PNC)模块对这 4 路信号进行处理,从而彻底消除由发射激光源和本振激光源所引入的相位噪声。本文展工了理论性的分析,并且进行了实验验证,实现了以 8 Gbit/s 速率通过 100 km 单模光纤零误码传输 16 进制正交振幅调制(16-QAM) OFDM 信号。

2 基本原理

图 1 表示采用相干检测的光 OFDM 链路的原理框图,射频 OFDM 信号直接通过 MZM 调制到光载波上去,然后,将调制好强度的光载波信号通过 100 km 单模光纤传输到接收端。一般来说,在相干光通信系统中采用偏振分集和相位分集技术是为了消除接收机灵敏度对接收光偏振态的依赖性,以及长距离传输的光纤中的偏振模色散的影响^[1],因此采用偏振分集和相位分集相干光接收机来对光调制信号进行检测,在相干光接收机的输出端,可以从偏振分束器分别获取到两个正交偏振态(XPBS 和 YPBS)的各自 IQ 两路信号,然后把这 4 路信号传输到基于数字信号处理的 PNC 模块中去。

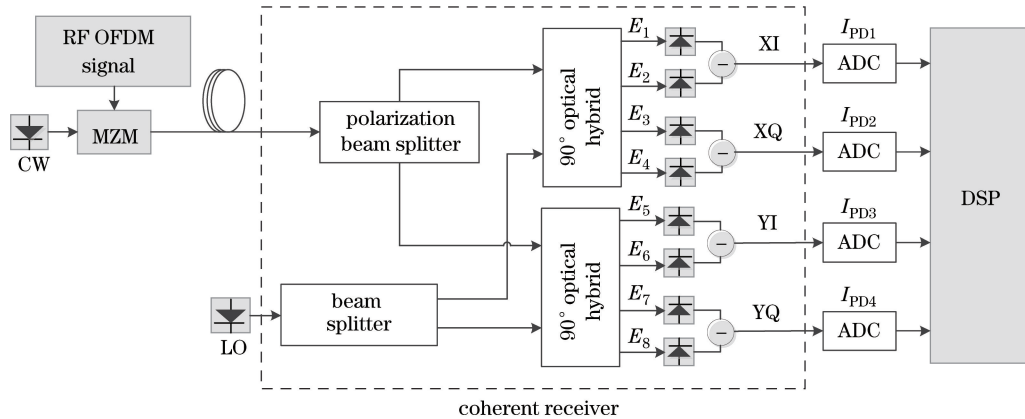


图 1 基于 PNC 方案的相干光 OFDM 链路原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of the coherent OFDM link based on PNC module

在发射端,马赫曾德尔调制器输出的光调制信号可以表示为^[3-6]

$$E_s(t) = \sqrt{2P_s L_s} \cos\left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{S_{RF}(t)}{V_\pi} + \frac{\theta}{2}\right] \exp\{j[\omega_s t + \phi_s(t)]\}, \quad (1)$$

式中 P_s 为发射激光器的光输出功率, L_s 为发射机和相干接收机之间的链路损耗系数, ω_s 为光载波的角频率分量, $\phi_s(t)$ 为发射激光器的相位分量, $S_{RF}(t)$ 为输入的射频 OFDM 信号, V_π 表示 MZM 的半波电压, $\theta = \pi \cdot V_{DC} / V_\pi$ 表示 MZM 调制点的相位分量, V_{DC} 表示 MZM 的偏置电压。

在另一端,本振激光源的输出光信号可以表示为

$$E_{LO}(t) = \sqrt{2P_{LO}} \exp\{j[\omega_{LO} t + \phi_{LO}(t)]\}, \quad (2)$$

式中 P_{LO} 为本振激光源的光功率, ω_{LO} 为本振激光源的角频率分量, $\phi_{LO}(t)$ 为本振激光源的相位分量。

通过偏振分束器,本振激光源光波分别与光调制信号在两个 90° 混频器输入端进行相干偏振极化,可以得到 (3) 式给出的 8 路光信号,其中 L_h 为 90° 混频器所造成的链路损耗系数, φ_x, φ_y 表示由于本振激光源与光调制信号偏振失衡所产生的相位分量。

$$\begin{bmatrix} E_1(t) & E_2(t) & E_3(t) & E_4(t) \\ E_5(t) & E_6(t) & E_7(t) & E_8(t) \end{bmatrix} = \sqrt{L_h} \begin{bmatrix} E_x(t) & E_{LO}(t)\exp(j\varphi_x)/\sqrt{2} \\ E_y(t) & E_{LO}(t)\exp(j\varphi_y)/\sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & \exp(j\pi) & \exp(j\pi/2) & \exp(-j\pi/2) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

分别把 (E_1, E_2) , (E_3, E_4) , (E_5, E_6) , (E_7, E_8) 输入到4个平衡检测器,可以得到4路输出光电流信号:

$$I_{PD1} = 2RL_h \sqrt{2P_S P_{LO} L_S} \cos \left[\frac{\pi S_{RF}(t)}{2V_\pi} + \frac{\theta}{2} \right] \cos[\Delta\omega t + \Delta\phi(t) - \varphi_x], \quad (4)$$

$$I_{PD2} = 2RL_h \sqrt{2P_S P_{LO} L_S} \cos \left[\frac{\pi S_{RF}(t)}{2V_\pi} + \frac{\theta}{2} \right] \sin[\Delta\omega t + \Delta\phi(t) - \varphi_x], \quad (5)$$

$$I_{PD3} = 2RL_h \sqrt{2P_S P_{LO} L_S} \cos \left[\frac{\pi S_{RF}(t)}{2V_\pi} + \frac{\theta}{2} \right] \cos[\Delta\omega t + \Delta\phi(t) - \varphi_y], \quad (6)$$

$$I_{PD4} = 2RL_h \sqrt{2P_S P_{LO} L_S} \cos \left[\frac{\pi S_{RF}(t)}{2V_\pi} + \frac{\theta}{2} \right] \sin[\Delta\omega t + \Delta\phi(t) - \varphi_y], \quad (7)$$

式中 $\Delta\omega$ 为本振激光器和发射激光器之间的频率偏差,其中 $\Delta\omega = \omega_s - \omega_{LO}$, $\Delta\phi(t)$ 表示由发射激光器和本振激光器所引入的相位噪声,其中 $\Delta\phi(t) = \phi_s(t) - \phi_{LO}(t)$ 。通过(4)~(7)式可以看出,由于本振激光器和发射激光器之间的频差和相位差,使得每路信号分别多了一个乘性分量的相位噪声 $\cos[\Delta\omega t + \Delta\phi(t) - \varphi_x]$, $\cos[\Delta\omega t + \Delta\phi(t) - \varphi_x]$ 和 $\sin[\Delta\omega t + \Delta\phi(t) - \varphi_x]$, $\sin[\Delta\omega t + \Delta\phi(t) - \varphi_y]$ 。然后,相干接收机端输出的4路信号分别单独用4个模拟数字转换器(ADC)进行数字采样。采样信号通过DSP单元进行相位噪声消除,也就是需要通过数字信号处理,对各路信号的乘性噪声分量进行消除,从而恢复出OFDM信号。使用DSP单元,可以简单执行以下乘法操作:

$$\begin{aligned} I_o &= I_{PD1} \times I_{PD3} + I_{PD2} \times I_{PD4} = \\ & 8R^2 L_h^2 P_S P_{LO} L_S \cos^2 \left[\frac{\pi S_{RF}(t)}{2V_\pi} + \frac{\varphi}{2} \right] \{ \cos[\Delta\omega t + \Delta\phi(t) - \varphi_x] \cos[\Delta\omega t + \Delta\phi(t) - \varphi_y] + \\ & \sin[\Delta\omega t + \Delta\phi(t) - \varphi_x] \sin[\Delta\omega t + \Delta\phi(t) - \varphi_y] \} = \\ & 8R^2 L_h^2 P_S P_{LO} L_S \cos^2 \left[\frac{\pi S_{RF}(t)}{2V_\pi} + \frac{\varphi}{2} \right] \cos(\varphi_y - \varphi_x) = \\ & 4R^2 L_h^2 P_S P_{LO} L_S \left\{ 1 + \cos \left[\frac{\pi S_{RF}(t)}{V_\pi} + \varphi \right] \cos(\varphi_y - \varphi_x) \right\}, \end{aligned} \quad (8)$$

从(8)式可以看到,当调制器在正交偏置点($\varphi = \pi/2$)时,可以得到:

$$\begin{aligned} I_o &= 4R^2 P_S P_{LO} L_S \left\{ 1 - \sin \left[\frac{\pi S_{RF}(t)}{V_\pi} \right] \right\} \cos(\varphi_y - \varphi_x) \approx \\ & 4R^2 P_S P_{LO} L_S \left[1 - \frac{\pi S_{RF}(t)}{V_\pi} \right] \cos(\varphi_y - \varphi_x), \end{aligned} \quad (9)$$

可以看出,相位噪声已经消除,射频OFDM信号也得到恢复。

3 实验结果

基于图1装置,进行了实验来验证基于DSP的相位噪声消除技术的可行性。将可调激光器的光波长调为1553.599 nm,线宽为600 kHz,光功率为10 dBm的光信号发送到MZM。MZM的消光比为30 dB,半波电压为2V。通过任意波形发生器(AWG)产生一个16-QAM OFDM信号发送到MZM的射频端口。然后,从MZM输出的强度调制的光信号经过100 km单模光纤传输到相干接收机进行相干检测。本振激光器的光波由另一个波长为1553.519 nm,线宽为1 MHz,输出光功率为16 dBm的连续波激光器产生。4路采样信号 I_{PD1} 、 I_{PD2} 、 I_{PD3} 和 I_{PD4} 在PC端进行离线处理。

首先,将中心频率为 2 GHz 的 16-QAM OFDM 信号传输至 MZM 射频端。图 2 表示相干接收机输出端的一路信号 I_{PD1} 的频谱图。从图 2 可以看出,偏振分集所产生的乘性相位噪声,使得接收到信号的频谱产生了频率偏差和相位偏移,这个相位噪声是由发射激光器和本振激光器共同引起的。其中,由于两个激光器的光波长不同,16-QAM OFDM 信号变频。为了消除相位噪声,解调 16-QAM OFDM 信号,将相干接收机输出的 4 路信号输送至基于 DSP 的 PNC 模块。图 3 为经过基于 DSP 的 PNC 处理后的 OFDM 信号频谱图,显然,经过 PNC 模块处理后的 OFDM 信号频率恢复到了原始提取出来的射频 OFDM 频率。

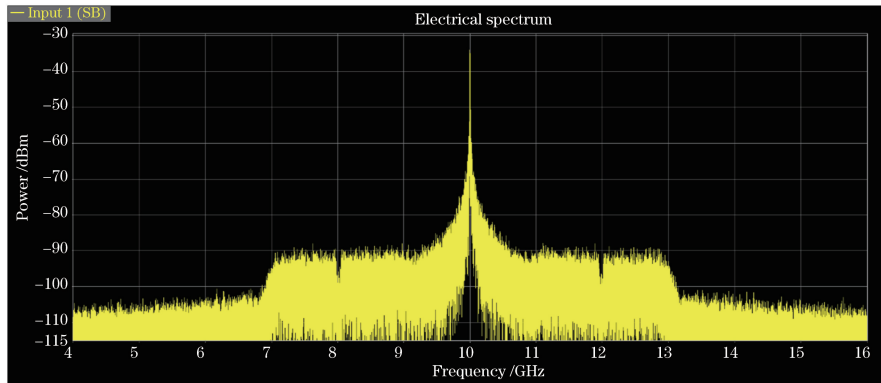
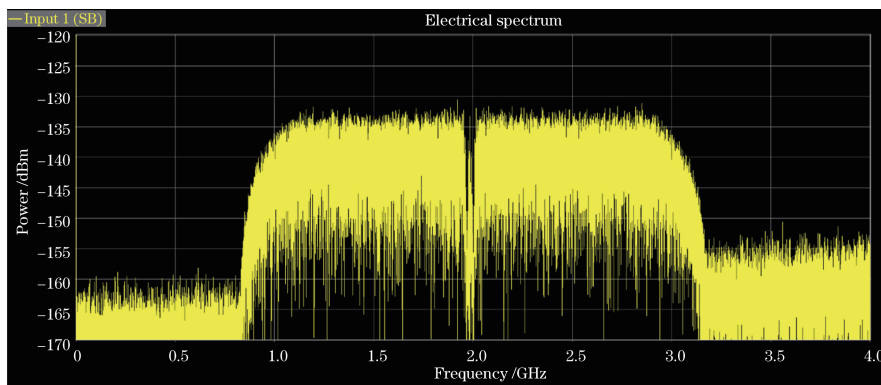
图 2 I_{PD1} 信号频谱Fig. 2 Spectrum of the I_{PD1} signal

图 3 恢复后的 16-QAM OFDM 信号频谱

Fig. 3 Spectrum of the recovered 16-QAMOFDM signal

其次,测量解调信号的信噪比(SNR)和误码率(BER)随着接收光功率的变化情况,以此作为所提出方案性能的进一步研究指标,并且与文献[2]中的包络检测方案进行了对比,如图 4 所示。图 5(a)、(b)分别表示偏振分集和包络检测在 4 种不同接收光功率下,所接收到信号的星座图,可以看出偏振分集相干光 OFDM 系统的接收灵敏度更好,通过实验测量计算出偏振分集相干接收机的灵敏度比文献[2]中方案要高 3 dBm~4 dBm。

4 结 论

提出了一种基于相干光 OFDM 链路的相位噪声消除方案,并且进行了实验验证。基于 DSP^[7-8] 的 PNC 模块来消除相位噪声的基本概念主要是处理从偏振分集和相位分集的相干接收机输出端的 4 路输出信号。将中心频率为 2 GHz 的 16-QAM OFDM 信号在 100 km 单模光纤上零误码传输,对所提出相位噪声消除方案的有效性进行实验验证。

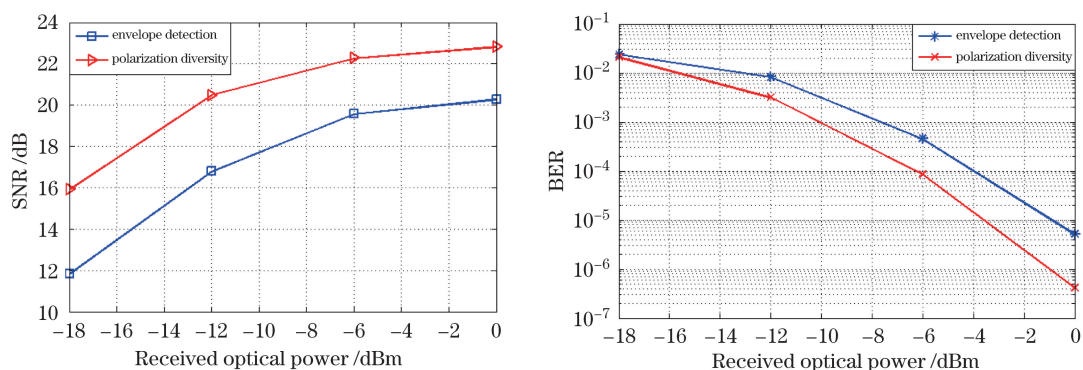


图 4 两种方案传输链路中的 SNR 与 BER 随接收光功率的变化曲线

Fig. 4 SNR and BER curves along with the change of receiving optical power use two kinds of transmission link

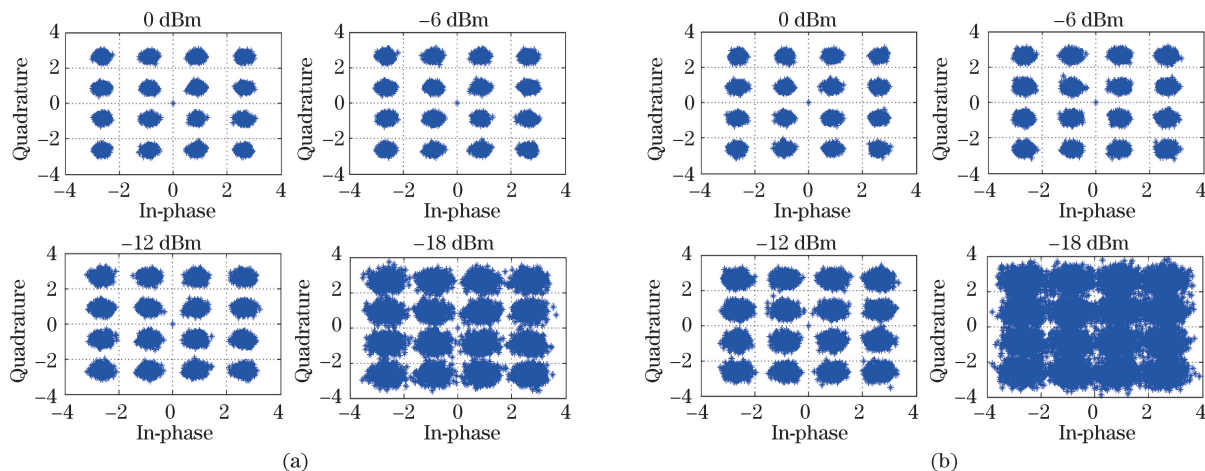


图 5 (a) 偏振分集恢复后的 16-QAM OFDM 的星座图; (b) 包络检测恢复后的 16-QAM OFDM 的星座图

Fig. 5 (a) Constellation diagrams of 16-QAM OFDM after polarization diversity;

(b) constellation diagrams of 16-QAM OFDM after envelope detection

参 考 文 献

- Nakazawa M, Kikuchi K, Miyazaki T. High spectral density optical communication technologies [M]. New York: Springer Verlag, 2010:11-50.
- Chen X, Shao T, Yao J. Digital phase noise cancellation for a coherent-detection microwave photonic link [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(8): 805-808.
- Shieh W, Bao H, Tang Y. Coherent optical OFDM: Theory and design [J]. Optics Express, 2008, 16(2): 841-859.
- Chen X, He J, Che D, *et al.* Hybrid modulated multiband coherent optical OFDM for low-complexity phase noise compensation [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(1): 126-132.
- Yao J P. Microwave photonics [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
- Zhang Nana, Zhou Xian, Shi Junfei, *et al.* 40 Gbps OFDM-PON system using polarization division multiplexing for upstream transmission [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(7): 0706018.
张娜娜, 周 娴, 施俊飞, 等. 40 Gbps OFDM-PON 系统采用偏振复用技术实现上行链路传输 [J]. 光子学报, 2014, 43(7): 0706018.
- Wang Lingzi, Tang Xianfeng, Zhang Xiaoguang, *et al.* Blind phase estimation algorithms based on decision-directed and decision-feedback in PDM-CO-OFDM systems [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305001.
王凌子, 唐先锋, 张晓光, 等. PDM-CO-OFDM 系统中基于判决引导与判决反馈的盲相位估计算法 [J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305001.
- Hao Yaohong, Li Yuquan, Wang Rong. Optimum design for optical modulator in coherent optical orthogonal frequency-division multiplexing system [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0305003.
郝耀鸿, 李玉权, 王 荣. 相干光正交频分复用系统中光调制的优化设计 [J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0305003.