

# 一种光正交频分复用系统的联合相位均衡方法

高丽娜<sup>1</sup> 刘剑飞<sup>1</sup> 曾祥焯<sup>1</sup> 姜伟虎<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 河北工业大学信息工程学院, 天津 300401  
<sup>2</sup> 石家庄机械化步兵学院, 河北 石家庄 050083)

**摘要** 正交频分复用(OFDM)技术加相干接收与数字信号处理法(DSP)的组合是超长距离光通信的理想模型。光 OFDM 系统对相位噪声十分敏感,必须对相位噪声进行补偿。提出一种基于正交小波基变换的光 OFDM 系统的联合相位均衡方案。该方案将块状导频周期性地插入 OFDM 信号,在接收端利用导频信息首先消除各个子载波的公共相位误差,然后采用自适应均衡方式消除每个子载波自身相位误差。仿真结果表明,对于二进制正交振幅键控(4QAM)调制信号,在采用常规的 G.652 光纤、100 Gb/s 的相干光 OFDM 系统中,该联合相位补偿方法可使信号在满足传输系统的误码性能要求下,传输距离达到 1000 km。

**关键词** 光通信;相位补偿;自适应均衡;正交频分复用

**中图分类号** TN913.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0106004

## Joint Phase Equalization in Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing System

Gao Lina<sup>1</sup> Liu Jianfei<sup>1</sup> Zeng Xiangye<sup>1</sup> Jiang Weihu<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China  
<sup>2</sup> Shijiazhuang Mechanized Infantry Academy, Shijiazhuang, Hebei 050083, China)

**Abstract** The combination of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technology, coherent receiver and digital signal processing (DSP) is one of the ideal models in long-haul communication. However, optical OFDM receiver is sensitive to phase noise, so it is necessary to compensate phase noise for optical OFDM systems. A joint phase equalization solution to optical OFDM system based on orthogonal wavelet transform is proposed. In this method, block pilots are periodically inserted into the frame of OFDM signals. At receiver, the phase rotations of pilots are extracted to eliminate common phase difference of each subcarrier. Then, an adaptive equalization is applied to eliminate the phase error inside each subcarrier. Simulation results demonstrate that the proposed method is effective for 100 Gb/s optical binary translation quadrature amplitude modulation (4QAM) OFDM system in which data transmitted over 1000 km with G.652 fiber.

**Key words** optical communications; phase compensation; adaptive equalization; orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)

**OCIS codes** 060.4510; 060.1660; 060.4230

## 1 引 言

基于正交频分复用(OFDM)的高速光传输系统(光 OFDM 系统)融合了无线 OFDM 技术和光通信的优点,具有传输速率高、抗色散能力强和谱效率高等优势<sup>[1,2]</sup>,是目前高速光传输领域的研究热点之

一<sup>[3,4]</sup>。光正交频分复用系统在接收端有直接检测<sup>[5,6]</sup>和相干接收<sup>[7]</sup>两种。相干接收方式具有高的接收机灵敏度,适用于超长距离传输,但是光纤中色散的影响不可忽略。色散会使接收机信息符号星座发生旋转<sup>[8]</sup>,而相位旋转严重影响系统性能<sup>[9,10]</sup>,所

收稿日期: 2011-07-11; 收到修改稿日期: 2011-08-22

基金项目: 河北省自然科学基金(F2008000116)资助课题。

作者简介: 高丽娜(1986—),女,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail: linamuye@163.com

导师简介: 刘剑飞(1968—),男,教授,博士,主要从事光通信与无线通信等方面的研究。

E-mail: jfliu@hebut.edu.cn(通信联系人)

以必须对色散进行均衡。随着数字信号处理(DSP)技术的高速发展,电子色散补偿(EDC)技术不需要对系统设备进行更换,只需在收发两端改进,是对色散进行补偿的一种可行的低成本方案<sup>[11]</sup>。

为了消除子载波间的干扰,常见的快速傅里叶变换-正交频分复用(FFT-OFDM)系统中需要加入循环前缀(CP)作为保护间隔,CP引入会造成近25%的带宽被占用<sup>[12,13]</sup>。为了进一步提高频谱利用率和抗干扰能力,基于正交小波变换(OWT)的OFDM系统引起人们的关注。相对于FFT-OFDM系统,OWT-OFDM系统不需要循环前缀,所以可以提供更大的带宽。由于OWT有很好的频谱集中性,子信道之间的隔离度更高,能更好地对抗符号间干扰和子载波间干扰<sup>[14]</sup>。在 高 斯 白 噪 声 信 道 中,OWT-OFDM系统具有硬件实现相对简单、更优的

误差比特率(BER)性能、峰均比低和更好的信号重建等优点<sup>[15]</sup>。然而 OWT-OFDM 系统仍然存在对相位误差敏感的问题。本文建立了 OWT-OFDM 相干光接收系统模型,在接收端对信号进行相位补偿。该相位均衡方案的思想是利用导频信息,消除信号的公共相位误差,对子载波的自身相位误差采用基于线性最小均方误差(LMS)算法的自适应均衡器进行均衡。

## 2 光 OFDM 相干传输系统

### 2.1 系统模型

光 OFDM 系统一般是先产生电域的 OFDM 信号,然后经过光同相正交(I/Q)调制调到光载波上进行传输。如图 1 所示。

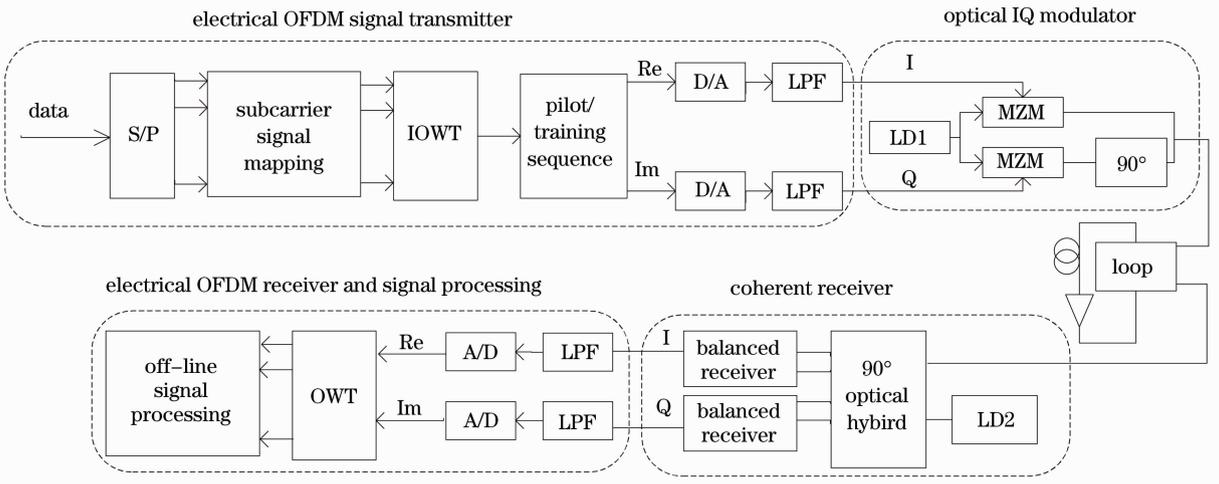


图 1 相干光 OFDM 系统

Fig. 1 Optical coherent OFDM system

在图 1 中,相干光 OFDM 系统由电 OFDM 信号产生、光 IQ 调制、相干接收、电 OFDM 信号接收和离线处理四个模块组成。二进制数据经过正交振幅键控(QAM)、串并变换、插入导频和逆正交小波基变换(IOWT),然后将信号分 IQ 两路分别调制到光载波上。其中光 IQ 调制器是由一对具有 90°相偏的马赫-曾德尔调制器(MZM)组成。在接收端,信号经过两个平衡接收机产生 I、Q 两路信号,合成一路复用信号后经过串并变换、OWT 后将数据保存,进行离线处理。

### 2.2 信道模型与相位噪声

#### 2.2.1 理论推导

光 OFDM 系统的信道模型不同于典型的无线信道,不能建模为时域多径离散瑞利过程,而是一个连续频域色散过程<sup>[16]</sup>。基于 Haar 小波基变换的基

带 OFDM 时域信号可以表示为<sup>[17]</sup>

$$x(t) = X_0 \phi_{0,0}(t) + \sum_{i=0}^{\log_2 N - 1} \sum_{j=0}^{2^i - 1} X_k \psi_{i,j}(t), \quad (1)$$

式中  $0 \leq i \leq \log_2 N - 1; 0 \leq j \leq 2^i - 1; k = 2^i + j, 0 \leq k \leq N - 1$ 。(1) 式中  $X_k (k = 0, 1, 2, \dots, N - 1)$  代表每个子载波的输入数据, $\phi(t)$  称为尺度函数, $\psi(t)$  为小波函数。 $\phi(t)$  和  $\psi(t)$  经过伸缩和平移分别得到  $\phi_{j,k}(t)$  和  $\psi_{j,k}(t)$ , 他们构成一组正交小波基。

经上变频调制到光域的 OFDM 信号可表示为

$$E(t) = \exp[j(\omega_{LD1} t + \phi_{LD1})] \cdot x(t), \quad (2)$$

式中  $\omega_{LD1}$  和  $\phi_{LD1}$  分别是发射激光器的角频率和相位。光 OFDM 信号经过具有脉冲响应  $h(t)$  的光纤信道,然后进行相干接收,接收信号  $r(t)$  可以表示为

$$r(t) = \exp\{j[(\omega_{LD1} - \omega_{LD2})t + (\phi_{LD1} - \phi_{LD2})]\} x(t) \otimes h(t), \quad (3)$$

(3) 式中  $\otimes$  代表卷积。OFDM 信号的采样值经 OWT 后可以表示为<sup>[11]</sup>

$$r_{ki} = \exp(\phi_i) H_{ki} x_{ki} + n_{ki}, \quad (4)$$

式中  $r_{ki}$  是接收到的信息符号,  $\phi_i$  是 OFDM 符号相位或公共相位误差(CPE),  $H_{ki}$  是频域信道传输函数,  $n_{ki}$  是随机噪声。

由(3)式中的信道模型可知,有三种因素会使接收机信息符号  $r_{ki}$  星座产生旋转:信道色散  $H_{ki}$ , 破坏了载波的正交性;小波变换时钟采样定时偏移;发射和接收激光器的相位噪声。

### 2.2.2 系统仿真

在仿真中,由于采用 OWT 代替 FFT,发射和

接收激光器的相位噪声相对于色散的影响可以忽略,并假定时钟采样的定时偏移是理想的。

系统采用 4QAM 调制方式,这样系统符号速率降到比特速率的一半。其它仿真参数设置为:发送伪随机序列的长度为  $2^{31} - 1$ ,子载波个数 64,每个子载波传输 2048 bit 信息,光纤传输的传输环路(loop)数取 10,每个 loop 长度为 100 km,光纤色散为 17 ps/(nm·km),偏振模色散为 0.1 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ 。

当系统速率分别为 10 Gb/s 和 100 Gb/s 时,可得接收端信号的星座图分别如图 2 和图 3 所示。

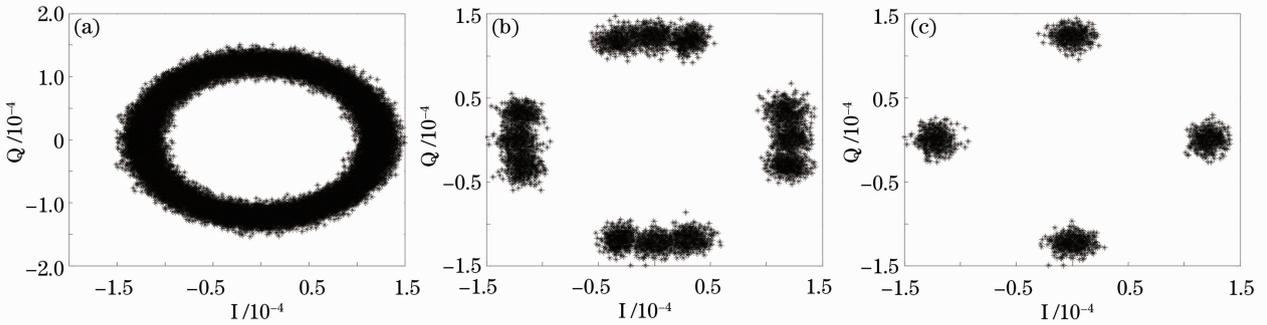


图 2 10 Gb/s 系统接收信号星座图。(a)接收信号星座图;(b)接收信号三个子载波的星座图;  
(c)其中一个子载波的星座图

Fig. 2 Received signals constellation of 10 Gb/s system. (a) Constellation of received signals; (b) constellation of three subcarriers; (c) constellation of one subcarrier

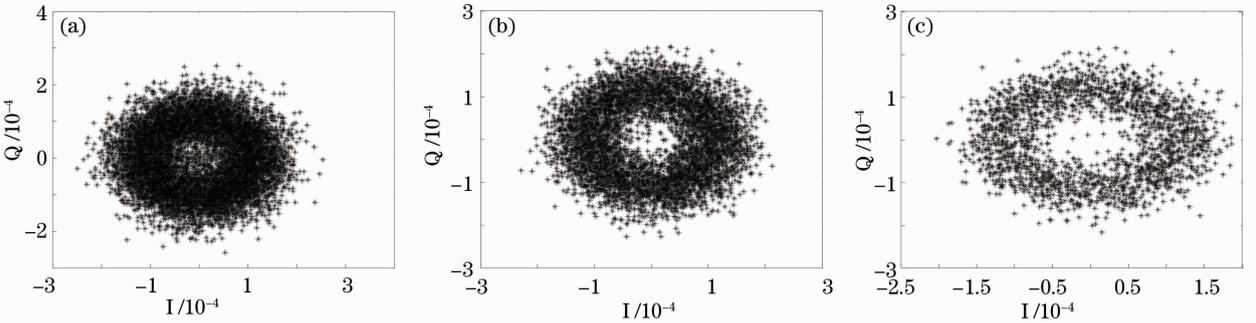


图 3 100 Gb/s 系统接收信号星座图。(a)接收信号星座图;(b)接收信号三个子载波的星座图;  
(c)其中一个子载波的星座图

Fig. 3 Received signals constellation of 100 Gb/s system. (a) Constellation of received signals; (b) constellation of three subcarriers; (c) constellation of one subcarrier

图 2 为系统在 10 Gb/s 速率下,传输 1000 km 的星座图。其中图 2(a)是全部子载波信号经过串并变换的星座图,图 2(b)是任意 3 个子载波的星座图,图 2(c)是其中一个子载波的星座图。由图 2 可见每个子载波都进行了一个整体的相位旋转,即公共相位误差,但每个子载波自身的星座点相位并没有大的改变。由此可见,在低速系统中,只需补偿子

载波间的公共相位误差即可实现信号的均衡。

图 3 为系统在 100 Gb/s 速率下,传输 1000 km 的星座图。其中图 3(a)是全部接收信号星座图,图 3(b)是其中任意三个子载波的星座图,图 3(c)是一个子载波的星座图。由图 3 可见,当速率提升时,每个子载波内部星座图都会发生旋转,即除了公共相位误差,子载波内部每个信号都会受色散等的影

响发生旋转。综上所述,针对高速系统的相位噪声,必须同时补偿公共相位误差和自身相位误差。

### 3 基于导频和自适应算法的联合相位补偿

针对高速系统对相位误差更为敏感的问题,本文提出了一种利用块状导频信息<sup>[18]</sup>消除子载波公

共相位误差,然后用基于 LMS 算法的有限冲激响应(FIR)均衡器消除自身相位误差的联合相位均衡方案。

#### 3.1 算法原理

OFDM 符号的帧结构如图 4 所示。每个子载波中导频信息及其后的数据称为一帧,块状导频周期性地地在时域内插入 OFDM 信号。

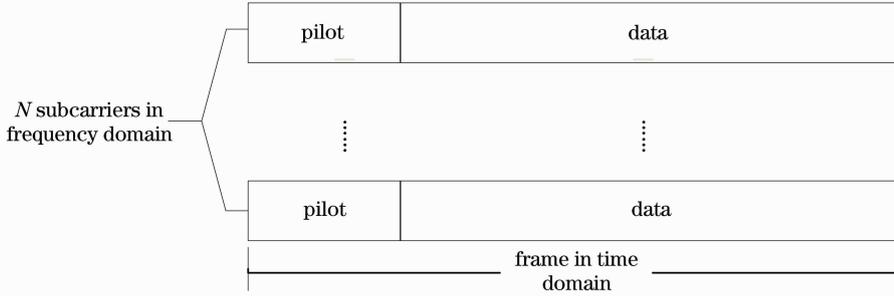


图 4 OFDM 信号帧结构

Fig. 4 Structure of OFDM signals frame

在接收端,根据导频信息的相位偏移,首先对信号进行无偏估计,得到每个子载波的公共相位偏差估计值,实现公共相位的补偿,然后对信号进行自适应均衡,补偿子载波的自身相位误差。本文基于硬件实现的考虑,采用 LMS 算法进行自适应均衡。

图 5 为联合相位均衡的原理框图。根据已知的导频信息,对接收端信号序列  $r(k)$  进行无偏估计,

估计出公共相位误差对信号进行相位预补偿,得到  $r'(k)$ 。然后分别获取  $r'(k)$  序列信息判决前后的相位,把二者相位差  $\varphi(k)$  作为自适应相位均衡模块 LMS 算法的输入。LMS 算法的输出信息  $\theta(k)$  反馈给  $r'(k)$  的判决输出信号  $x(k)$ , 完成对信号的相位补偿。

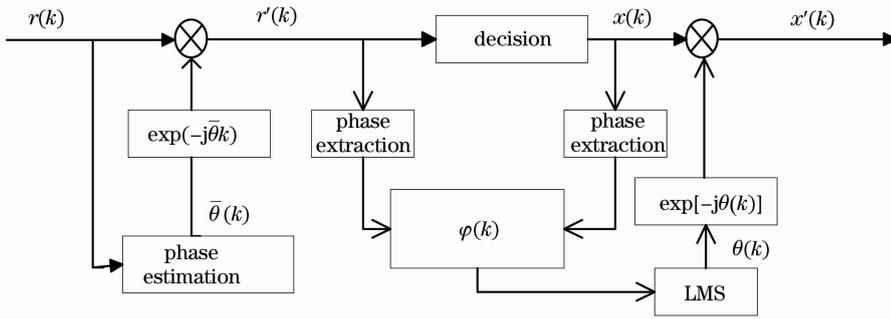


图 5 联合相位均衡原理

Fig. 5 Principle of joint phase equalization

LMS 算法的原理可表示为

$$\theta(k) = \mathbf{W}(k) \cdot \varphi(k), \quad (5)$$

$$e(k) = \varphi(k) - \theta(k), \quad (6)$$

$$\mathbf{W}(k+1) = \mathbf{W}(k) + 2\mu e(k) \cdot \varphi(k), \quad (7)$$

式中  $\theta(k)$  是 LMS 算法输出的相位偏差,  $\varphi(k)$  是预补偿后信号  $r'(k)$  和初步判决后的相位偏差,  $e(k)$  是误差信号,  $\mathbf{W}$  表示抽头系数矩阵, (7) 式为权重迭代公式。

相位补偿过程中,在收敛阶段,  $\varphi(k)$  取  $r'(k)$  和

期望信号的相位差,在补偿阶段,  $\varphi(k)$  取  $r'(k)$  和  $x(k)$  的相位差。通过迭代,自适应调整抽头系数,完成滤波器特性对相位误差的跟踪、补偿。其中步长  $\mu$ , 用来控制每次迭代的调整量。 $\mu$  的取值会影响收敛速度和收敛后的误差,取值太大会导致系统不稳定,仿真中取  $\mu = 0.001$ 。

#### 3.2 结果分析

采用上述联合均衡方案,将 100 Gb/s 系统仿真经 OWT 后的数据保存,在 Matlab 中进行离线处

理,经多次实验,自适应 FIR 均衡器取 9 个抽头,能得到相对清晰的星座图。该联合相位均衡方案结果如图 6 所示。图 6(a)是公共相位补偿后的星座图;图 6(b)是联合均衡后的星座图。可以看出,经过联

合补偿后,信号的星座能够清晰地恢复。

将该相位均衡模块加入光 OFDM 系统中仿真,可得系统的 BER 与系统光信噪比(OSNR)的关系曲线,如图 7 所示。

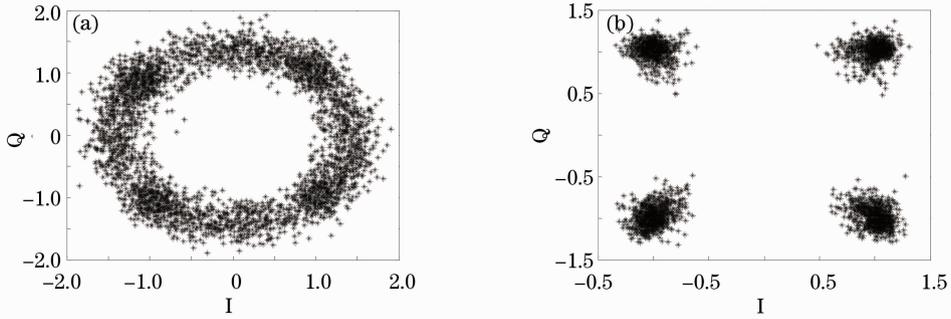


图 6 公共相位补偿与联合相位补偿后的星座图。(a)公共相位补偿后的星座图;(b)联合相位补偿后的星座图

Fig. 6 Constellations after common phase compensation and joint phase compensation. (a) Constellation after common phase compensation; (b) constellation after joint phase compensation

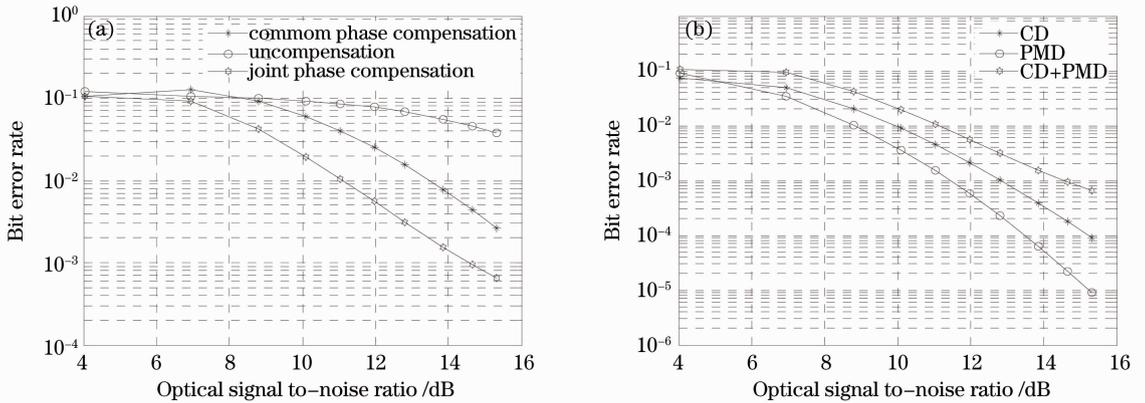


图 7 BER 与 OSNR 关系曲线。(a) 相位补偿前、公共相位补偿后、联合相位补偿后的误码性能;  
(b) 联合补偿后的误码性能

Fig. 7 Relation between BER and OSNR (a) BER performance of uncompensation, common phase compensation and joint phase compensation; (b) BER performance after phase compensation

图 7 是相位均衡后误码性能曲线。其中图 7(a)比较了没有相位补偿、公共相位补偿和联合相位补偿后的误码性能;图 7(b)是在仅存在色散、仅存在偏振模色散以及同时存在色散和偏振模色散三种情况下的误码性能。由图 7 可见,只进行公共相位补偿时,在 OSNR 16 dB 以内,BER 不能达到  $10^{-3}$  的要求。而联合相位补偿方案使系统 BER 大幅提升,OSNR 在 15 dB 左右达到前向纠错码的误码上限  $10^{-3}$  的要求。在达到同样的误码性能时,色度色散影响下的 OSNR 相对与偏振模色散条件的 OSNR 下,有 1.5 dB 左右的损伤。

## 4 结 论

光 OFDM 系统对相位噪声十分敏感。仿真实

验搭建了基于正交小波基变换的光 OFDM 相干接收系统,色散会造成接收机信息符号星座旋转。根据导频信息和训练序列分别对公共相位噪声和自身相位误差进行了补偿。仿真结果表明,在实验所设系统条件下,该联合补偿方案可以补偿相位噪声,达到系统的误码性能要求。充分说明了联合均衡方案的可行性,并可以有效地提高光 OFDM 系统的传输性能。

## 参 考 文 献

- Wang Jing, Cao Zizheng, Zhou Hui *et al.*. A wavelength division multiplexing radio-over-fiber system with 58 GHz optical orthogonal frequency division multiplexing millimeter-wave signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1274~1278
- 王 晶, 曹子峥, 周 慧 等. 承载正交频分复用信号的 58 GHz 光载毫米波波分复用光纤无线通信系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1274~1278

- 2 Li Zhaoxi, Hu Guijun, Kong Lingjie. Performance analysis of a multimode fiber communication system based on the adaptive modulation orthogonal frequency division multiplexing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 582~586  
李兆玺, 胡贵军, 孔令杰. 自适应调制的正交频分复用多模光纤通信系统性能分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 582~586
- 3 N. E. Jolley, H. Kee, R. Rieckard *et al.*. Generation and propagation of a 1550 nm 10 Gb/s optical orthogonal frequency division multiplexed signal over 1000 m of multimode fibret using a directly modulated DFB[C]. OFC, 2005, OFP3
- 4 William Shieh. OFDM for adaptive ultra high-speed optical networks[C]. OFC, 2010, OWO1
- 5 Wei-Ren Peng, Itsuro Morita, Hideski Tanaka. Digital phase noise estimation and mitigation approach for direct-detection optical OFDM transmission[C]. ECOC, 2010, Tu. 3. C. 3
- 6 Chen Lin, Cao Zizheng, Dong Ze *et al.*. Experimental investigation of direct-detection optical orthogonal frequency-division multiplexing transmission system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 554~557  
陈 林, 曹子峥, 董 泽 等. 直接检测的光 OFDM 信号光纤传输系统实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 554~557
- 7 S. Chen, Y. Ma, W. Shieh. 110-Gb/s multi-band real-time coherent optical OFDM reception after 600-km transmission over SSMF fiber[C]. OSA/OFC/NFOEC, 2010, OMS2
- 8 Arthur James Lowery, Jean Armstrong. Orthogonal-frequency-division multiplexing for dispersion compensation of long-haul optical systems[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(6): 2079~2084
- 9 T. Kobayashi, A. Sano, H. Masuda *et al.*. 160-Gb/s polarization-multiplexed 16-QAM long-haul transmission over 3123 km using digital coherent receiver with digital PLL based frequency offset compensator[C]. OFC/NFOEC, 2010, OTuD1
- 10 Xi Lixia, Wang Shaokun, Zhang Xiaoguang. Probability density of phase noise in optical phase-modulated transmission systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3408~3412  
席丽霞, 王少康, 张晓光. 光相位调制传输系统中相位噪声的概率分布特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3408~3412
- 11 J. McNicol, M. O' Sullivan, K. Roberts *et al.*. Electrical domain compensation of optical dispersion [C]. OFC, 2005, OThJ3
- 12 A. Peled, A. Ruiz. Frequency domain data transmission using reduced complexity algorithms[C]. ICASSP, 1980, 964~967
- 13 Zhang Jing, Qiu Kun, Li Yonggang *et al.*. Adaptively modulated optical orthogonal frequency division multiplexing system with variable guard interval[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 323~326  
张 静, 邱 昆, 李永刚 等. 自适应调制光正交频分复用系统的可变长保护间隔研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 323~326
- 14 Arman Farhang, Mohammad Molavi Kakhki, Behrouz Farhang-Boroujeny. Wavelte-OFDM versus filtered-OFDM in power line communication systems [C]. International Symposium on Telecommunications, IST'2010: 691~694
- 15 W. Saad, N. El-Fishawy, S. EL-Rabaie *et al.*. An efficient technique for OFDM system using discrete wavelet transform [C]. GPC 2010, LNCS 6104: 533~541
- 16 William Shieh, Ivan Djordjevic. OFDM for Optical Communications[M]. Bai Chenglin, Feng Min, Luo Qinglong Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. 84~89  
William Shieh, Ivan Djordjevic. 光通信中的 OFDM[M]. 白成林, 冯敏, 罗清龙 译. 北京: 电子工业出版社, 2011. 84~89
- 17 Zhang Xuecheng. OFDM Base Band Transmission System Based on Discrete Wavelet Transform[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2006. 44~45  
张学成. 基于离散小波变换的 OFDM 基带传输系统研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2006. 44~45
- 18 Wang Wenbo, Zheng Kan. OFDM Technology in Broadband Wireless Communication[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2007. 46~49  
王文博, 郑 侃. 宽带无线通信 OFDM 技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007. 46~49

栏目编辑: 谢 婧