

## 光偏振复用正交频分复用系统中基于联合近似特征矩阵对角化-独立分量分析的盲均衡算法

冯平兴<sup>\*①</sup> 魏平<sup>①</sup> 张洪波<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(电子科技大学电子工程学院 成都 611731)

<sup>②</sup>(电子科技大学通信工程学院 成都 611731)

**摘要:** 该文提出一种在光偏振复用正交频分复用(PDM-OOOFDM)系统中基于联合近似特征矩阵对角化-独立分量分析(JADE-ICA)的盲解偏振复用算法。在传统的偏振复用系统中,恒模算法(CMA)被用于解偏振复用信号。然而,该方法需要多次对CMA滤波器系数更新,CMA收敛时间较长,并且CMA算法解偏振复用可能导致奇异性问题。该文结合对经典ICA算法及其模型的分析,提出将JADE-ICA算法用于PDM-OOOFDM系统中进行解偏振复用信号。利用该方法,可以分离在发送端和接收端混有高斯白噪声的偏振信号成分,并且提高了系统中偏振信号的分离性能;同时,避免了传统CMA在解偏振复用中的奇异性问题。仿真结果表明,该文方法可以有效分离PDM-OOOFDM系统中的偏振信号。

**关键词:** 偏振复用光正交频分复用; 独立成分分析; 联合近似特征矩阵对角化-独立分量分析算法; 恒模算法

中图分类号: TN 929.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)12-3041-05

DOI: 10.11999/JEIT150455

## Channel-equalization Using Joint Approximate Diagonalization of Eigen-matrices-independent Component Analysis in Polarization Division Multiplexed in Optical OFDM Systems

Feng Ping-xing<sup>①</sup> Wei Ping<sup>①</sup> Zhang Hong-bo<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

<sup>②</sup>(School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** In this study, a complex-valued Joint Approximate Diagonalization of Eigen-matrices (JADE)-Independent Component Analysis (JADE-ICA) algorithm is proposed for the Polarization Division Multiplexed in Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing (PDM-OOOFDM) systems. Generally, the Constant Modulus Algorithm (CMA) method is used to devise polarization signals in PDM-OOOFDM systems. However, this method requires multiple filter coefficients update on CMA, needs more time to converge, and lead it to the polarization multiplexing singularity problem. In this paper, a method based on JADE-ICA algorithm is applied to the PDM-OOOFDM systems. With this method, the signals can be separated at the sending and the receiving, which mixed with white Gaussian noise polarization components. Moreover, it improves the separation performance of the system with respect to the polarization signal, while avoiding the traditional CMA polarization multiplexing in the solution of the singularity. Simulations demonstrate the effectiveness of the proposed method to devise signals of polarization in PDM-OOOFDM systems.

**Key words:** Polarization Division Multiplexing-Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing (PDM-OOOFDM); Independent Component Analysis (ICA); Joint Approximate Diagonalization of Eigen-matrices-ICA (JADE-ICA) algorithm; Constant Modulus Algorithm (CMA)

### 1 引言

光正交频分复用(Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OOOFDM)有很高的频谱效率和较强的抗色散能力,结合相干检测技术实现的相

干光正交频分复用系统(Coherent Optical-OFDM, CO-OFDM),还可大幅提高接收灵敏度<sup>[1,2]</sup>,并且利用相干光通信的偏振复用技术(Polarization Division Multiplexing, PDM)实现的PDM-OOOFDM,可以进一步提高系统频谱利用率,因而,它是未来光通信系统的重要调制技术<sup>[3-11]</sup>。虽然PDM技术能够提高系统容量,但它需要在接收端对信号进行偏振分解复用和补偿。在相干光纤通信系统中,通常采用恒模算法(Constant Module

收稿日期: 2015-04-20; 改回日期: 2015-08-11; 网络出版: 2015-10-13

\*通信作者: 冯平兴 pingxing.feng@hotmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(11176005)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (11176005)

Algorithm, CMA)实现对 PDM 信号的解复用。

然而 CMA 存在两个技术上的问题<sup>[1]</sup>:一方面,由于两偏振信号独立收敛,CMA 存在两路输出都收敛到同一个源上的奇异性问题;另一方面,CMA 算法要求调制信号具有恒定且唯一的模长。

ICA 算法是利用统计的方法分析信号的独立性,从而实现信号的分离,在理论上可以避免 CMA 算法在分离偏振信号时存在的奇异性问题。由于高阶累积量所具有的估计非最小相位系统和不受 Gauss 噪声影响的能力,因此,ICA 算法比 CMA 更具优势。

本文基于 ICA 的基本方法,利用一种基于四阶累积量的矩阵联合对角化方法<sup>[2]</sup>,给出一种新的 PDM-OOFDM 系统的盲均衡解复用算法——联合近似特征矩阵对角化-独立分量分析(Joint Approximate Diagonalization of Eigen-matrices-Independent Component Analysis, JADE-ICA)。JADE 算法收敛速度快,分离效果好,能够实现偏振信号的分离,在性能上比传统的恒模算法更为优越,尤其在低维空间,与 CMA 方法相比其收敛速度更快。

## 2 复值独立成分分析

独立分量分析(Independent Component Analysis, ICA)是一种非常有效的数据分析工具,它主要用来从混合数据中提取出原始的独立信号,是信号分离的一种有效方法。

### 2.1 复值 ICA 模型

独立成分混合模型是基于信号源之间相互独立的基本假设,估计信号与源信号的关系可以表示为<sup>[3]</sup>

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s} \quad (1)$$

其中  $\mathbf{s} = \mathbf{s}^R + i\mathbf{s}^I$  是  $n$  维相互独立的复数信号,  $\mathbf{x} = \mathbf{x}^R + i\mathbf{x}^I$  是  $m$  维观测的幅值信号,  $\mathbf{A}$  为  $m \times n$  维混合矩阵。为简单起见,通常假定信号源的维数和观测信号的维数相等,即  $m = n$ , 混合问题的实质相当于线性变换,于是该问题的解就变成对矩阵  $\mathbf{A}$  的估计。利用经典独立成分分析方法,信号源可以表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{x} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{w}$  是  $n \times n$  是估计矩阵,  $\mathbf{y} = \mathbf{y}^R + i\mathbf{y}^I$  是  $n$  维相互独立的估计信号。如果预先对观测信号进行白化处理,那么估计出的信号也是白化的且均值为 0。为了便于分析,可以先对估计矩阵作正交化处理,即

$$\mathbf{W}\mathbf{W}^T = \mathbf{I} \quad (3)$$

由于对复数数据进行白化处理会使得 ICA 问题变得简单,因此可以对噪声成分进行白化投影处理。

设  $\mathbf{E} = (e_1, e_2, \dots, e_n)$  是协方差矩阵  $\mathbf{C}_x = \mathbf{x}\mathbf{x}^T$  对应的特征向量,且  $\mathbf{D} = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n)$  是由矩阵

$\mathbf{C}_x$  的特征值组成的角对称矩阵,那么白化矩阵可以表示为

$$\mathbf{V} = \mathbf{E}^T \mathbf{D}^{-1/2} \mathbf{E}^T \quad (4)$$

因而,对观测到的噪声成分,白化处理可以写成

$$\mathbf{z} = \mathbf{V}\mathbf{x} \quad (5)$$

### 2.2 复值代价函数

按照经典 ICA 理论,在幅值成分分离算法中需要寻找一个合适的代价函数进行迭代运算,利用该函数对样本进行估计优化。本文采样的代价函数由式(6)给出<sup>[4]</sup>:

$$J_G(\mathbf{w}) = \mathbb{E} \left\{ G \left| \mathbf{w}^H \mathbf{x} \right|^2 \right\} \quad (6)$$

其中  $G: \mathbb{R}^+ \cup \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$  是一个光滑的偶函数,  $\mathbf{w}$  是  $n$  维复数向量,且  $\mathbb{E} \{ \left| \mathbf{w}^H \mathbf{x} \right|^2 \} = 1$ , 如果函数是实的,那么利用牛顿梯度算法寻找目标向量的极值是可以实现的。因此,我们的代价函数是利用绝对值,而不是对复数数据进行计算。考虑到约束去相关以及白化处理:

$$\mathbb{E} \left\{ \left( \mathbf{w}_k^H \mathbf{x} \right) \left( \mathbf{w}_j^H \mathbf{x} \right)^* \right\} = \delta_{jk} \quad (7)$$

可以得到以下优化问题:

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = \max \mathbb{E} \left\{ G \left( \left| \mathbf{w}^H \mathbf{x} \right|^2 \right) \right\} \Big|_{\mathbb{E} \left\{ \left( \mathbf{w}_k^H \mathbf{x} \right) \left( \mathbf{w}_j^H \mathbf{x} \right)^* \right\} = \delta_{jk}} \quad (8)$$

幅值独立成分分析算法是在实数 ICA 算法的基础上发展起来的。与实数 ICA 相比,虽然计算量有所增加,但仍然具有较高的收敛速度,其分离性能仍可以满足实际需求。

### 2.3 JADE-ICA 算法

特征矩阵的联合近似对角化(JADE)是为了解决 ICA 分离矩阵中,具有相同特征值问题的方法,主要是利用雅克比矩阵的对角化来寻找独立成分,在低维空间中,与不动点 ICA 算法, JADE 算法在收敛速度方面具有相当的优势。

JADE 算法的原理如下:令

$$\mathbf{Q} = \mathbf{W}\mathbf{F}(\mathbf{M}_i)\mathbf{W}^T \quad (9)$$

其中  $\mathbf{F}(\mathbf{M}_i)$  为任意对角矩阵,  $\mathbf{W}$  为解混矩阵,显然,式(9)的对角化程度是可以度量的。由于正交矩阵  $\mathbf{Q}$  不改变其元素的总平方和,极小化非对角元素的平方和等价于极大化对角元素的平方和,于是可以得到式(10)的目标函数<sup>[12]</sup>:

$$J_{\text{JADE}}(\mathbf{W}) = \max_i \sum \left\| \text{diag} \left( \mathbf{W}\mathbf{F}(\mathbf{M}_i)\mathbf{W}^T \right) \right\|^2 \quad (10)$$

其中  $\left\| \text{diag}(\cdot) \right\|^2$  表示对角元素的平方和,因此极大化  $J_{\text{JADE}}(\mathbf{W})$  就成了将  $\mathbf{F}(\mathbf{M}_i)$  联合近似对角化的一种

方法。现在的问题变成如何选择矩阵  $M_i$ , 一个自然的选择是累积张量的特征矩阵, 根据观测到的信号, 我们可以得到累积张量包含的所有相关性信息, 从而分离不同的独立信号, 其中累积张量可表示为

$$J_{\text{JADE}}(\mathbf{W}) = \sum_{ijkl \neq iikl} \text{cum}(y_i, y_j, y_k, y_l)^2 \quad (11)$$

通过优化计算得到极大化矩阵  $Q$  对角元素的平方和, 便可以得到源信号的估计信号

$$\mathbf{y} = \mathbf{Q}\mathbf{x} \quad (12)$$

由于 JADE 算法是直接计算观测信号的累积张量, 对于低维空间的问题, 特别是 OFDM 偏振信号的分离问题, 是一个非常具有竞争力的选择, 在收敛速度方面具有强大的优势<sup>[15]</sup>。

JADE 是基于多变量 4 维累积量函数的自适应批处理 ICA 优化算法, 从而实现对信号的辨识和分离。此外, 由于 JADE 方法是直接计算观测信号的累积量, 与 CMA 方法相比, 避免了奇异性的问题, 即存在两路输出都收敛到同一个源上的可能。

### 3 仿真系统结构

PDM-OOFDM 系统接收机结构如图 1 所示。一个偏振分集接收机 (Polarization Diversity Receiver, PDR) 通过  $90^\circ$  光混频器和平衡探测器用于接收 PDM-OOFDM 信号的两偏振复用同相和正交分量共 4 路信号, 然后通过低通滤波器 (Low Pass Filter, LPF) 和模数转换器 (Analog-to-Digital Convertor, ADC) 将 PDR 接收到的 4 路信号送入 DSP 模块进行数字信号处理: 包括色散补偿、OFDM 子载波分离、偏振解复用、相位噪声补偿、载波恢复, 以及符号逆映射为比特流等。在偏振解复用部分, 通常采用 CMA 算法实现自适应均衡和偏振解复用<sup>[16]</sup>。然而, 传统的 CMA 算法在解偏振复用时通常会有奇异性, 本文采用基于 JADE-ICA 算法进行偏振解复用, 可以很好地避免奇异性, 并且根据 JADE 算法的特性, JADE-ICA 在低维度的信号分离中更具优势。因此, JADE-ICA 比采用传统的 ICA 算法更适用于偏振复用信号的解复用。

### 4 仿真分析

图 2 显示了偏振分集接收机接收到的  $x$  偏振方向 QPSK 信号在采用 CMA 和 JADE-ICA 进行盲均衡前后的星座图, 其中, 横坐标、纵坐标分别表示同相分量和正交分量。在经过相同的载波恢复后, 采用 JADE-ICA 算法解复用的 QPSK 信号比 CMA 算法的 Q 值大约高 0.6 dB。仿真系统中, 激光线宽 100 kHz, 通过仿真结果可以发现, 通过 JADE-ICA 算法可以在有激光相噪的情况下成功实现偏振解复用, 并且解复用后星座图的 Q 值比传统 CMA 算法解复用后高大约 0.6 dB。

收敛性能比较: 图 3 和图 4 针对传统 CMA 算法和本文提出的 JADE-ICA 算法进行偏振解复用的收敛性进行了对比。在低维度情况下, JADE-ICA 算法相比传统的 ICA 算法具有较强的优势, 可以很快实现信号分离, 用于 PDM-OOFDM 系统中, 通过仿真发现, JADE-ICA 同样可以实现快速收敛, 并且无需大量符号进行统计。

为验证本文算法在相干 PDM-OOFDM 光纤传输系统中的解偏振复用性能, 搭建了 80 Gbps 的 PDM-OOFDM 光纤传输系统。假设在理想信道条件下, 光纤色散及非线性 (包括器件非线性) 得到完全补偿, 经过 CMA/JADE-ICA 盲均衡和二阶锁相环实现载波恢复, 以及 IQ 不平衡补偿、盲相位搜索抑制激光相噪后解调并逆映射为比特流数据, 最后采用蒙特卡洛方法进行误码率统计。通过光信噪比 OSNR 与 BER 关系曲线可以看出, 采用改进 CMA 算法实现的解偏振复用 BER 性能比基于 JADE-ICA 解偏振复用的系统性能差, 如图 5 所示。假设系统 FEC 阈值为  $\text{BER} = 1 \times 10^{-3}$ , CMA 算法在 FEC 处的 OSNR 为 15.3 dB, 基于 JADE-ICA 的性能相比 CMA 有大约 0.4 dB OSNR 增益; 同时, 在  $\text{FEC} < 1 \times 10^{-3}$  时, JADE-ICA 相比 CMA 保持约 0.4 dB OSNR 增益。通过系统仿真发现, 采用 JADE-ICA 在相干光纤偏振复用系统中进行解偏振复用是可行的, 并且相比传统的 CMA 算法, 在 80 Gbps

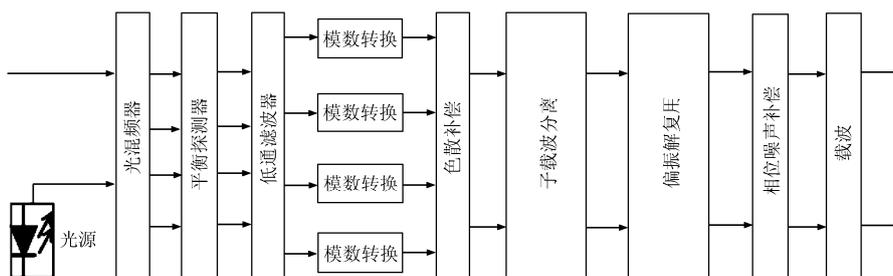


图 1 PDM-OOFDM 系统接收机结构图

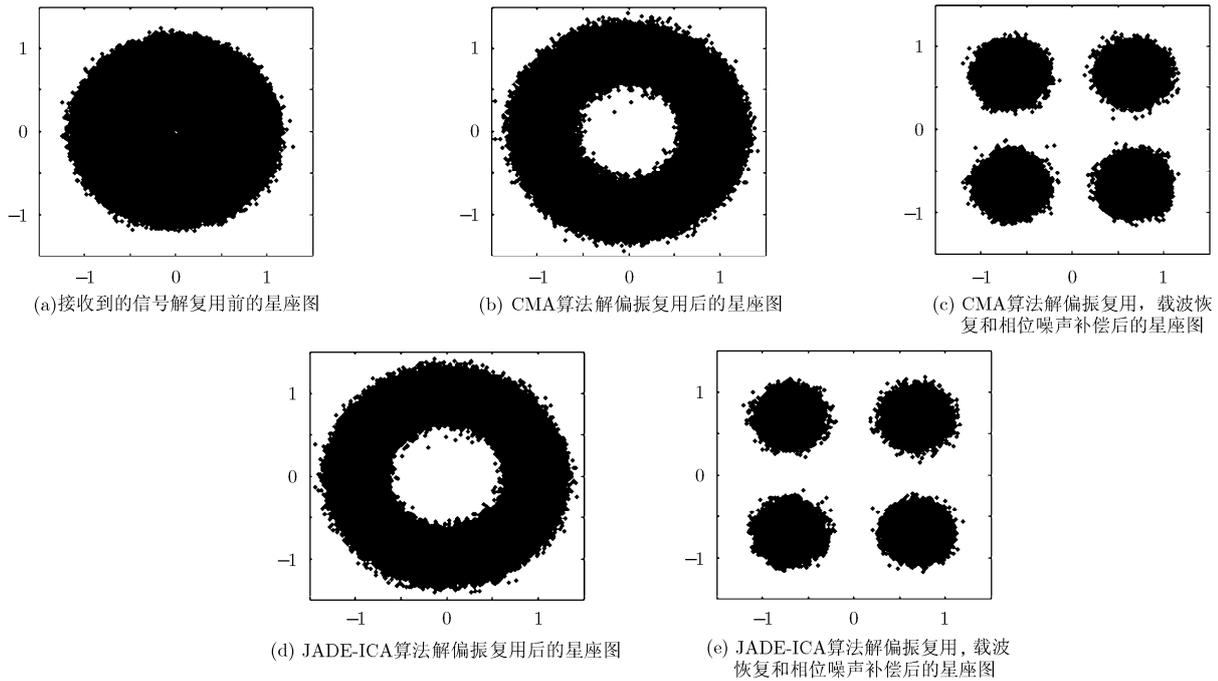


图 2 PDM-OOFDM 系统解偏复用过程中的星座图

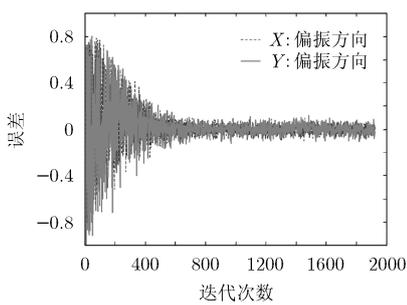


图 3 CMA 算法误差函数曲线

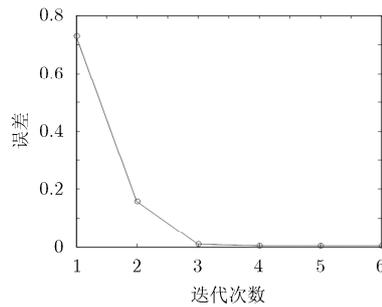


图 4 JADE 算法的迭代误差

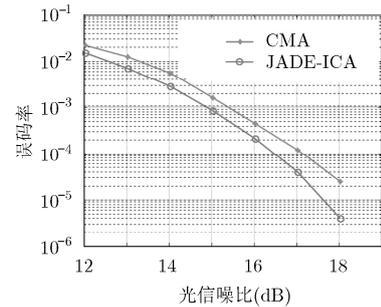


图 5 基于 JADE-ICA 解偏复用的 PDM-OOFDM 系统误码率与光信噪比曲线

PDM-OOFDM 光纤传输系统中有大约 0.4 dB OSNR 增益。同时, JADE-ICA 有更快的收敛速度, 占用更少资源, JADE-ICA 可以作为偏复用系统中另一个可选的盲均衡技术。

### 5 结论

针对 PDM-OOFDM 光纤通信系统的解偏复用性能, 本文提出了一种适合于偏复用系统的基于幅值独立成分分析分离算法的新解偏复用算法——JADE-ICA 解偏复用算法, 该算法具有计算简单, 收敛速度快的特点。在解偏复用信号的同时避免了传统 CMA 算法的奇异性, 改进了传统 PDM-OOFDM 系统的解偏复用性能。仿真结果表明, 本文提出的 JADE-ICA 算法能有效对 PDM-OOFDM 系统中发送和接收端混有高斯白噪声的偏复用信号进行解复用。

### 参考文献

- [1] 郝耀鸿, 王荣, 李玉权, 等. 相干光正交频分复用系统偏复用效应研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 122-127.  
Hao Yao-hong, Wang Rong, Li Yu-quan, et al. Investigation of polarization effect in coherent optical orthogonal frequency division multiplexing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 122-127.
- [2] 胡毅, 杨家龙. 40/100 Gb/s 偏复用相干检测光模块的技术分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 78-81.  
Hu Yi and Yang Jia-long. Technical analysis of 40/100 Gb/s polarization multiplexing and coherent detection for optical transponder module[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(8): 78-81.
- [3] Breuer L, Dammers J, Roberts T P, et al. A constrained ICA approach for real-time cardiac artifact rejection in magnetoencephalography[J]. *IEEE Transactions on*

- Biomedical Engineering*, 2014, 61(2): 405-414.
- [4] 黄高勇, 方旭明, 陈煜. 基于速率约束的 OFDM 中继链路能效最优资源分配策略[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(9): 2104-2110.  
Huang Gao-yong, Fang Xu-ming, and Chen Yu. Resource allocation for energy efficiency maximization based on rate constrains in OFDM DF relay link[J]. *Journa of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(9): 2104-2110.
- [5] 叶新荣, 朱卫平, 张爱清, 等. OFDM 系统双选择性慢衰落信道的压缩感知估计[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(1): 169-174.  
Ye Xin-rong, Zhu Wei-ping, Zhang Ai-qing, et al. Compressed sensing based on doubly-selective slow-fading channel estimation in OFDM systems[J]. *Journar of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(1): 169-174.
- [6] 黄敏, 李兵兵. 基于整体最小二乘的联合信道估计及 OFDM 信号检测算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(6): 1448-1453.  
Huang Min and Li Bing-bing. Joint channel estimation and OFDM signals detection based on total least square[J]. *Journar of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(6): 1448-1453.
- [7] 李晓辉, 王维猛, 黑永强. 基于空频相关性的大规模 MIMO-OFDM 信道压缩反馈算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(5): 1178-1183.  
Li Xiao-hui, Wang Wei-meng, and Hei Yong-qiang. Compressed channel feedback based on spatial-frequency correlation for massive MIMO-OFDM Systems[J]. *Journar of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(5): 1178-1183.
- [8] 解志斌, 薛同思, 田雨波, 等. 一种稀疏增强的压缩感知 MIMO-OFDM 信道估计算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(3): 665-670.  
Xie Zhi-bin, Xue Tong-si, TianYu-bo, et al. A sparsity enhanced channel estimation algorithm based on compressed sensing in MIMO-OFDM systems[J]. *Journa of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(3): 665-670.
- [9] 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): 96-101.  
Wang Ling-zi, Tang Xian-feng, Zhang Xiao-guang, et al. Blind phase estimation algorithms based on decision-directed and decision-feedback in PDM-CO-OFDM systems [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(3): 96-101.
- [10] 张伟涛, 楼顺天, 张延良. 非对称非正交快速联合对角化算法[J]. 自动化学报, 2010, 36(6): 829-836.  
Zhang Wei-tao, Lou Shun-tian, and Zhang Yan-liang. Non-symmetrical non-orthogonal fast Joint diagonalization algorithm[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(6): 829-836.
- [11] 何振亚, 刘磊, 杨绿溪, 等. 盲均衡和信道参数估计的一种 ICA 和进化计算方法[J]. 中国科学(E 辑), 2000, 30(2): 142-149.  
He Zhen-ya, Liu Ju, Yang Lu-xi, et al. An ICA and EC based approach for blind equalization and channel parameter estimation[J]. *SCIENCE IN CHINA (Series E)*, 2000, 30(2): 142-149.
- [12] Cardoso J F and Souloumiac A. Blind beamforming for non gaussian signals[J]. *IEE Proceedings-F*, 1993, 40(6): 362-370.
- [13] Hyvärinen A and Oja E. A fast fixed-point algorithm for independent component analysis[J]. *Neural Computation*, 1997, 9(7): 1483-1492.
- [14] Bingham E and Hyvärinen A. A fast fixed-point algorithm for independent component analysis of complex valued signals[J]. *International Journal of Neural Systems*, 2000, 10(1): 1-8.
- [15] Hyvärinen A, Karhunen J, and Oja E, Independent Component Analysis[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001: 234-235.
- [16] 唐进, 陈林, 肖江南. 偏振复用 QPSK 相干光数字通信系统实验研究[J]. 光电子·激光, 2012, 23(10): 1895-1900.  
Tang Jin, Chen Lin, and Xiao Jiang-nan. Experiment on a polarization division multiplexed QPSK coherent optical digital communication system[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(10): 1895-1900.
- 冯平兴: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为非合作信号处理技术、信号处理、通信与信息系统.
- 魏平: 男, 1966 年生, 博士, 教授, 研究方向为非合作信号处理技术、信号与信息处理、自适应及阵列信号处理.
- 张洪波: 男, 1983 年生, 博士, 研究方向为光通信、光信号处理、光算法.