

高模式群时延模分复用系统的级联独立成分分析解复用技术研究

方妍 胡贵军 宫彩丽 李莉

吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012

摘要 针对高模式群时延(H-MGD)的少模光纤模分复用系统,提出了一种级联独立成分分析(C-ICA)算法,其基本思想是:采用延时补偿与 C-ICA 结合的技术方案,运用两次 ICA 算法同时消除模分复用器和解复用器引起的串扰。利用该算法对 2×2 模分复用系统进行了解复用,并且将其解复用性能与单次 ICA 算法解复用进行了比较。仿真结果表明,C-ICA 算法能够有效实现 H-MGD 少模光纤模分复用系统的解复用,在同等条件下其解复用效果明显优于单次 ICA 解复用。

关键词 光通信; 模分复用; 复数独立成分分析; 少模光纤

中图分类号 TN913.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0806001

Mode Demultiplexing Based on Cascaded Independent Component Analysis for Mode Division Multiplexing System with High Mode Group Delay

Fang Yan Hu Guijun Gong Caili Li Li

College of Communications Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract Aiming at the mode division multiplexing system with high-mode group delay (H-MGD) using few-mode fiber, a cascaded independent component analysis (C-ICA) algorithm is proposed. The core idea of the algorithm is that two complex ICA algorithms are combined with a delay compensation module to eliminate the modal crosstalk induced by the mode multiplexer and the demultiplexer respectively. Then the proposed C-ICA algorithm is utilized to demultiplex the received signals from a 2×2 mode division multiplexing system, and the demultiplexing performance of C-ICA is compared with that of the common ICA in which the complex ICA algorithm is used only once. The simulation results indicate that the proposed C-ICA algorithm can implement mode demultiplexing of the mode division multiplexing system with H-MGD few-mode fiber validly. Moreover, C-ICA has better mode demultiplexing performance than the common ICA under the same conditions.

Key words optical communications; mode multiplexing; complex independent component analysis; few-mode fiber

OCIS codes 060.4510; 060.4230; 060.2330

1 引言

近年来,单模光纤作为骨干网传输的重要传输媒介得到广泛应用,被成功地应用于信息的长距离干线传输。结合波分复用^[1](WDM)、偏振复用^[2](PDM)和高阶调制^[3]等技术,单模光纤的信道容量得到不断扩充。然而由于单模光纤自身固有的非线性效应的限制,系统容量逐渐接近香农极限^[4-5]。为了应对单模光纤可预见的带宽危机,满足未来更高的信道容量需求,人们提出基于少模光纤(FMF)的模分复用技术

收稿日期: 2016-01-26; **收到修改稿日期:** 2016-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(61575078,61177066)、吉林省科技发展计划(20140203009GX)、吉林省发改委产业技术研究专项(2014Y087)

作者简介: 方妍(1990—),女,硕士研究生,主要从事模分复用通信方面的研究。E-mail: fangyanam3@163.com

导师简介: 胡贵军(1970—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤通信技术和器件等方面的研究。

E-mail: hugj@jlu.edu.cn(通信联系人)

(MDM)。MDM 技术的基本思想是利用少模光纤的几个正交且独立稳定模式来传输不同的光信号。其中，少模光纤不仅具有更大的有效面积与更强的抗非线性效应能力，而且 MDM 技术使得系统容量随传输模式数成倍地增加，实现了对通信系统的进一步扩容。

从少模光纤角度上看，基于少模光纤的 MDM 系统一般有两种实现方式：1) 采用低模式群时延(L-MGD)的少模光纤，此类光纤模式间耦合较大且不可预测，需要在接收端配合多输入多输出(MIMO)均衡算法，在长距离传输时 MIMO 均衡算法的复杂度和可靠性难以确定^[6]；2) 采用高模式群时延(H-MGD)的少模光纤，这类光纤的各个模式信道相对独立，在信号的传输过程中少模光纤模式间耦合带来的串扰较小^[7]，更利于信息的长距离大容量传输。然而无论采用何种光纤，模分复用/解复用器^[8](MUX/DEMUX)引起的串扰都不可忽略，故对输出信号进行解复用是必不可少的。针对 L-MGD 少模光纤 MDM 系统，Zhao 等^[9]提出了基于频域独立成分分析(F-ICA)的解复用方法，消除了多模式信道卷积性混合引起的信号串扰，成功实现了 L-MGD 少模光纤 MDM 系统的解复用。然而，将 ICA 运用到 H-MGD 少模光纤 MDM 系统时，效果却并不理想。由于 H-MGD 的存在，当 ICA 分离矩阵的子滤波器长度较短时，仅可消除接收端解复用器所带来的串扰，无法消除发送端复用器引入的串扰，因此分离效果不佳。当 ICA 分离矩阵的子滤波器长度足够长时，虽然能同时消除复用/解复用器所引入的模式串扰，但计算复杂度直线上升，且由于所需估计的未知参数过多反而导致解复用效果劣化。因此，本文针对 H-MGD 少模光纤 MDM 系统的解复用问题，提出了一种级联独立成分分析算法(C-ICA)，对输出信号进行解复用。该算法采用延时补偿与 C-ICA 相结合的方案，采用两次 ICA 可同时消除模分复用器和解复用器所引起的串扰，取得了较好的效果。

2 模分复用传输系统模型

基于少模光纤的 2×2 模分复用系统由发送端、传输链路和接收端三部分组成，如图 1 所示，图中 M-Z 为马赫-曾德尔调制器。在发送端使用两个集成正交相移键控(QPSK)信号发送模块，分别发送 LP_{01} 模和 LP_{11} 模信号，接着通过模分复用器将两路信号送入 40 km 的少模光纤(FMF)中进行传输。在接收端采用相干接收方式，将探测到的信号送入数字信号处理(DSP)模块中。DSP 模块框图如图 2 所示：先对接收信号进行 2 倍过采样，随后对两路信号的色度色散(CD)进行单独补偿，再进行解复用处理，最后利用 Viterbi 算法对信号进行载波相位估计(CPR)，以去除激光器相位噪声引起的相位偏转。

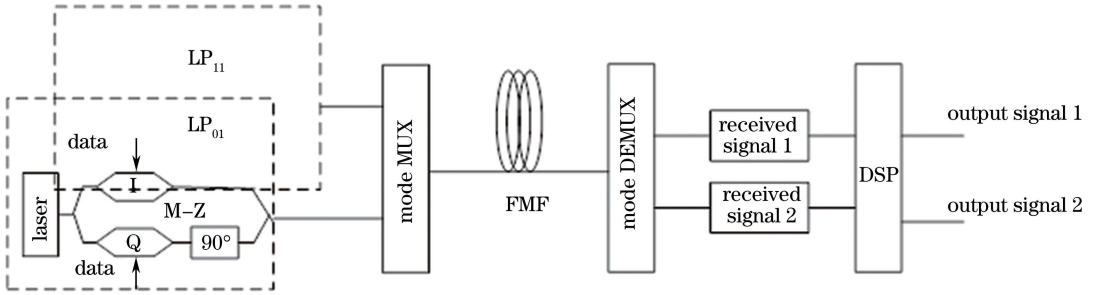


图 1 模分复用系统框图

Fig. 1 Diagram of mode multiplexing system

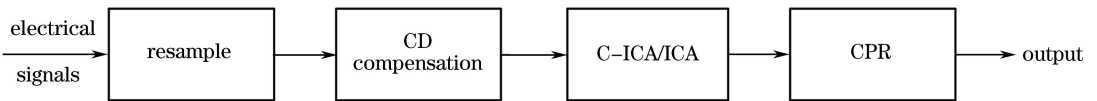


图 2 DPS 模块框图

Fig. 2 Diagram of DSP module

2×2 H-MGD 少模光纤 MDM 系统^[10]可等效成图 3 所示的形式。图 3 中 x_{01} 、 x_{11} 与 y_{01out} 、 y_{11out} 分别表示系统的两个输入与输出。经复用器后输入与输出的关系为

$$\begin{bmatrix} s_{01} \\ s_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} \\ h_{12} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{01} \\ x_{11} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

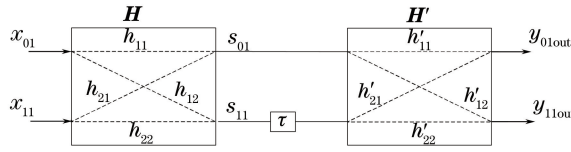


图 3 H-MGD 少模光纤 MDM 等效模型

Fig. 3 Equivalent model of MDM system in few-mode fiber with H-MGD

式中 $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} \\ h_{12} & h_{22} \end{bmatrix}$ 为复用器的传输矩阵, 每一项元素取决于复用器的串扰系数, s_{01} 和 s_{11} 为复用后的传输信号。H-MGD 少模光纤可忽略模式之间的耦合^[11], 即信号在光纤传输过程中无模式串扰。解复用器模型的建立与复用器相似, 则经 H-MGD 少模光纤传输链路与解复用器后输出信号可表示为

$$\begin{bmatrix} y_{01out} \\ y_{11out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h'_{11} & h'_{21} \\ h'_{12} & h'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{01} \\ s_{11}(t - \tau) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 τ 为两个模式之间的差分模式群时延, $\mathbf{H}' = \begin{bmatrix} h'_{11} & h'_{21} \\ h'_{12} & h'_{22} \end{bmatrix}$ 为解复用器的传输矩阵。联立(1)式和(2)式, 可得整个系统的输入与输出的关系为

$$\begin{cases} y_{01out} = h_{11}h'_{11}x_{01} + h_{12}h'_{21}x_{01}(t - \tau) + h_{21}h'_{11}x_{11} + h_{22}h'_{21}x_{11}(t - \tau) \\ y_{11out} = h_{11}h'_{12}x_{01} + h_{12}h'_{22}x_{01}(t - \tau) + h_{21}h'_{12}x_{11} + h_{22}h'_{22}x_{11}(t - \tau) \end{cases} \quad (3)$$

3 级联 ICA 算法

级联 ICA 算法的基本思想如图 4 所示: 先假设已处理接收端各模式信号, 对其进行严格的时钟恢复, 确保各个模式信号精确地按照解复用端发送时间的前后顺序对齐。在假设基础上, 将信号送入到第一级 ICA₁ 算法进行解复用, 其作用是消除解复用器带来的串扰。随后将解复用后信号分别延时 k 个码元数, 以保证接收信号按照复用器端收到的时间顺序对准, 最后传送到第二级 ICA₂ 算法来消除复用器造成的模式串扰。其中, 在级联 ICA 算法中, 每次瞬时 ICA 的分离矩阵均为一个二维矩阵, 而矩阵中的每一个标量元素相当于一个抽头长度为 1 的子滤波器。此处延时码元数 k 需要满足条件

$$k = \frac{D_k \cdot L}{T}, \quad (4)$$

式中 D_k 为模式群时延, L 为少模光纤长度, T 为一个码元周期。在实际通信系统中, 受外界因素影响, 模式色散数值会发生一定程度的变化。为了准确调整延迟码元数, 可通过短脉冲冲激响应测试的方法来获得传输链路的实际模式群时延(MGD)。

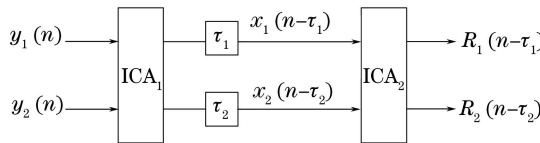


图 4 级联 ICA 算法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cascaded ICA algorithm

采用复数 ICA 中的基于负熵最大化不动点复数 ICA(T-CMN)算法。T-CMN 算法是一种利用非高斯性最大化作为判断依据的复数 ICA 算法^[12-17], 其优势在于能很好地将代价函数和源信号分布相匹配, 有很强的稳健性。基本思想是利用观测信号的统计独立性原则, 建立目标函数和自然梯度的优化算法实现 MDM 系统输出信号的分离。它的实现依赖于对数据统计特性的提取, 即 T-CMN 算法对于接收数据的处理是整体进行的, 其过程包含全部码元。主要步骤如下:

- 1) 对观测到的信号数据 \mathbf{x} 进行白化处理, 得到 $\mathbf{z} = \mathbf{V}\mathbf{x}$, \mathbf{V} 为白化矩阵;
- 2) 对向量 \mathbf{w} 初始化, 使其具有单位范数, 其中, \mathbf{w} 为分离矩阵 \mathbf{W}^H 的列向量, \mathbf{W} 为单位矩阵;

3) 对 w 进行更新:

$$w \leftarrow -E[G^*(y)g(y)x] + E[g(y)g^*(y)]w + E(xx^T)E[G^*(y)g'(y)]w^*, \quad (5)$$

其中 $G(y)$ 是非线性函数, $g(y)$ 和 $g'(y)$ 分别为 $G(y)$ 的一阶导数和二阶导数。

4) 对 w 进行标准化: $w \leftarrow w / \|w\|$;

5) 若算法未收敛则返回步骤 3) 继续对 w 进行更新;

6) 利用公式 $y = W^H x$ 得到源信号估计。

4 仿真结果

为验证 C-ICA 算法对 H-MGD 少模光纤 MDM 系统解复用的有效性, 搭建了 2×2 模分复用仿真系统, 采用 QPSK 调制, 其仿真参数如表 1 所示。在 40 km 传输长度下, 由 (4) 式可知, 少模光纤 MDM 系统中 LP_{01} 模与 LP_{11} 模总差分模式群时延(MGD_T)为 100 ns, 对应的延时码元数 $k=2800$ 。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Parameter-settings for simulation

Parameter	Value
Laser wavelength /nm	1550
Optical transmitter power /(10^{-3} W)	1
Bit-rate of signal /(Gbit/s)	56
Fiber length /km	40
Crosstalk coefficient of MUX/DEMUX	0.2
MGD size /(ps/m)	2.5
Fiber dispersion /[ps/(nm·km)]	20

在模分复用/解复用器中, 当串扰系数 $\alpha=0.2$ (基于空间相位调制器或光纤光栅的模分复用/解复用器的模式串扰系数在 10%~40% 左右^[18-19]), 光信噪比(OSNR, R_{SN})为 20 dB 时, 图 5(a) 为解复用前的 LP_{11} 模接收信号, 可以看出由于复用/解复用器引入的模式串扰, 接收信号幅度和相位均有较大失真, 传输质量略差。图 5(b)、(c) 分别为单次 ICA 与 C-ICA 解复用后的信号星座图, 图 5(d) 为信号在同等条件下经 C-ICA 解复用后未进行 CPR 处理的信号星座图。对比图 5(b)、(c) 可以看出, 经 C-ICA 解复用后的信号星座图更加聚集且清晰, 可见 C-ICA 算法能够更好地提高传输系统的性能。对比图 5(c)、(d) 可以看出, CPR 实现了对信号相位偏转的纠正, 可有效消除相位噪声的干扰。

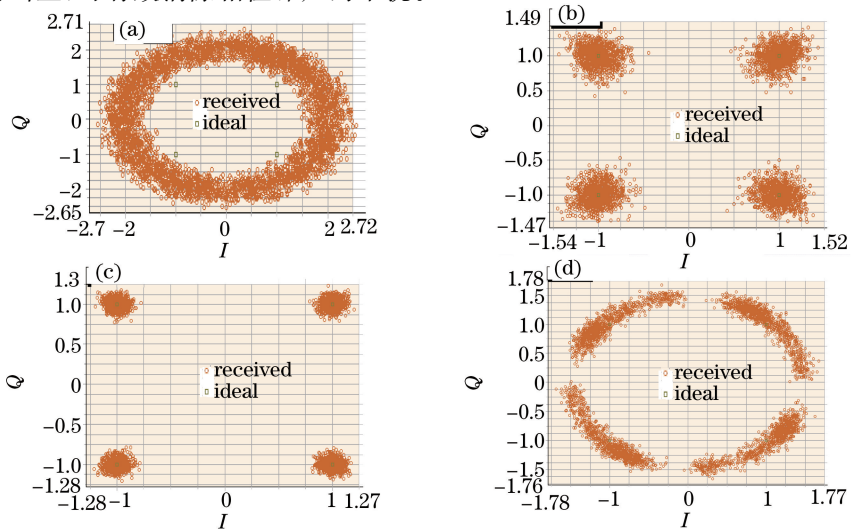


图 5 LP_{11} 模解复用前、后信号星座图。(a) 解复用前; (b) 解复用后(单次 ICA); (c) 解复用后(C-ICA); (d) 解复用后未进行 CPR(C-ICA)

Fig. 5 Constellation of LP_{11} mode before and after demultiplexing. (a) Before demultiplexing;

(b) after demultiplexing (single ICA); (c) after demultiplexing (C-ICA); (d) after demultiplexing without CPR (C-ICA)

为验证 C-ICA 算法的均衡能力,研究了比特误码率(BER)随模分复用/解复用器串扰系数在 0.1~0.4 范围内变化的情况($R_{SN}=20$ dB)。图 6 为 LP₁₁ 模经单次 ICA 与 C-ICA 解复用后的 BER 随模分复用/解复用器串扰系数变化的曲线。对比可以看出:单次 ICA 与 C-ICA 的 BER 随串扰系数的增加均明显上升,但 C-ICA 的抗误码性能一直优于单次 ICA,且两种算法之间的抗误码性能随串扰系数的增加差距不断加大。这是因为单次 ICA 相当于消除了接收端解复用器所带来的串扰,而忽略了复用器端引入的串扰,随着串扰系数增加,其误码率继而有了较大上升。而 C-ICA 算法中设置了合理的延时,运用级联特性同时均衡了复用/解复用器的模式串扰,其解复用效果良好。由此可知,在复用/解复用器给 H-MGD 少模光纤 MDM 系统带来略大的串扰时,C-ICA 解复用的能力比单次 ICA 更为突出。

为了进一步验证 C-ICA 算法的均衡能力,在含噪信道下将单次 ICA、C-ICA 算法的误码性能进行了对比。设定此时复用/解复用器的串扰系数 $\alpha=0.2$ 。图 7 为对数坐标下 LP₁₁ 模经单次 ICA 与 C-ICA 解复用前、后系统误码率随 OSNR 大小变化情况。从图中看出,利用两种算法解复用后,系统误码率都明显下降;在相同的 OSNR 下,C-ICA 算法误码性能明显优于单次 ICA。若将前向纠错(FEC)阈值设为 10^{-3} (此时 FEC 开销为 10%),C-ICA 算法达到这个门限时,OSNR 要求比单次 ICA 低约 1.5 dB。

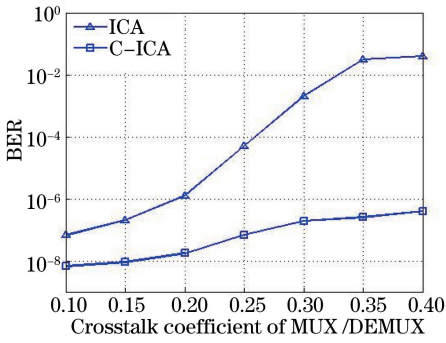


图 6 解复用后系统 BER 随复用/解复用器串扰系数的变化($R_{SN}=20$ dB)

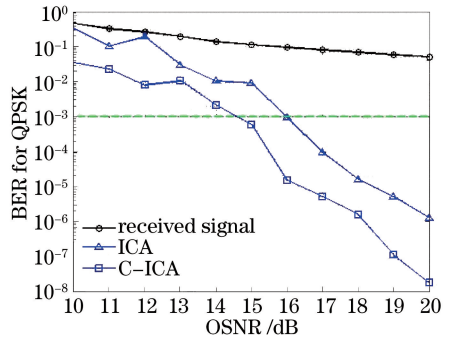


图 7 解复用后系统 BER 随 OSNR 的变化

Fig. 7 BER versus OSNR after demultiplexing

Fig. 6 BER versus crosstalk coefficients of MUX/DEMUX after demultiplexing ($R_{SN}=20$ dB)

为充分验证 C-ICA 算法的解复用性能,探究了不同传输距离下的总差分模式群延时(MGD_T)对算法解复用性能的影响。图 8 给出了两种算法解复用后,在对数坐标下,BER 随 MGD_T 的变化($R_{SN}=20$ dB)。由图 8 可以看出,单次 ICA 算法误码率随 MGD_T 的增大呈上升趋势,而 C-ICA 算法误码率一直优于单次 ICA,且较为平稳几乎不变。这是因为 C-ICA 的延时补偿模块覆盖了 H-MGD 少模光纤中的大时延,只要合理设定 C-ICA 中的延时补偿,C-ICA 解复用性能几乎不受 MGD_T 大小的影响。由此可以推测,若在少模光纤模式耦合可控条件下,C-ICA 算法在未来 MDM 系统长距离传输方面具有极大优势。

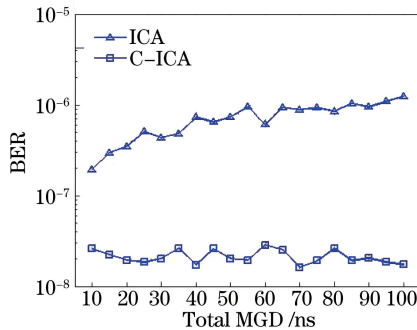


图 8 解复用后系统 BER 随 MGD_T 的变化($R_{SN}=20$ dB)

Fig. 8 BER versus MGD_T after demultiplexing ($R_{SN}=20$ dB)

在 ICA 算法中,要得到 N 个符号的信息,信号进行白化处理过程需 $12N$ 次复乘,而更新分离矩阵的过程需要 $11Nm$ 次复乘,其中 m 为迭代次数,最后输出解复用信号需要 $4N$ 次复乘,因此得到每个符号所需要

的乘法次数为

$$C_{\text{ICA}} = \frac{12N + 11Nm + 4N}{N} = 16 + 11m. \quad (5)$$

由于 C-ICA 由两个 ICA 级联而成,其计算开销相当于两次 ICA 算法,所以 C-ICA 算法的复杂度与单次 ICA 相比增加了一倍。尽管如此,C-ICA 的复杂度与 ICA 仍在同一个数量级,仍在可接受的范围内。

5 结 论

为了解决 H-MGD 少模光纤 MDM 系统的串扰问题,提出了一种 C-ICA 算法,对 MDM 系统的输出信号进行解复用,并且将该算法与单次 ICA 进行了性能对比分析。结果表明,C-ICA 算法能够成功实现 H-MGD 少模光纤 MDM 系统的解复用,且误码性能优于单次 ICA,为高模式群时延的少模光纤模分复用系统的长距离传输提供了新的解复用途径。

参 考 文 献

- Zhang Xia, Tian Feng, Zhang Xiaoguang, *et al.* Study of coherent optical wavelength division multiplexing terabit transmission experiment system based on multi-carrier[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0605005.
张霞,田风,张晓光,等.基于多载波的相干波分复用太比特传输实验研究[J].中国激光,2014,41(6):0605005.
- Jiang Lin, Yan Lianshan, Yi Anlin, *et al.* Adaptive dispersion monitoring for polarization-multiplexed coherent optical communication systems[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1106006.
蒋林,闫连山,易安林,等.偏振复用相干光纤通信系统中的自适应色散监测[J].光学学报,2014,34(11):1106006.
- Yang Dalong, Chen Dahai, Zhang Jian, *et al.* Constant modulus equalization algorithm for higher-order general constellations[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(12): 2855-2861.
杨大龙,陈大海,张健,等.高阶调制通用恒模盲均衡算法[J].电子与信息学报,2012,34(12):2855-2861.
- Essiambre R, Mecozi A. Capacity limits in single mode fiber and scaling for spatial multiplexing[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2012, OW3D: OW3D.1.
- Essiambre R J, Tkach R W. Capacity trends and limits of optical communication networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(5): 1035-1055.
- Vuong J, Ramantanis P, Frignac Y, *et al.* Mode coupling at connectors in mode-division multiplexed transmission over few-mode fiber[J]. Optics Express, 2015, 23(2): 1438-1455.
- Genevaux P, Simonneau C, Labroille G, *et al.* 6-mode spatial multiplexer with low loss and high selectivity for transmission over few mode fiber[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2015, W1A: W1A.5.
- Chang Yuxin, Hu Guijun, Bai Song, *et al.* Research of asymmetric planar waveguide type mode division multiplexer/demultiplexer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1205004.
常玉鑫,胡贵军,柏松,等.非对称平面光波导型模式复用/解复用器研究[J].中国激光,2014,41(12):1205004.
- Zhao L, Hu G J, Yan L, *et al.* Mode demultiplexing based on frequency-domain-independent component analysis[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(2): 185-188.
- Sakamoto T, Mori T, Yamamoto T, *et al.* Mode-division multiplexing transmission system with DMD-independent low complexity MIMO processing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(13): 2192-2199.
- Salsi M, Koebele C, Sperti D, *et al.* Mode-division multiplexing of 2×100 Gb/s channels using an LCOS-based spatial modulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(4): 618-623.
- Diao Guoying, Hu Guijun, Li Gongyu, *et al.* Application of ICA in the output signal separation of mode group diversity multiplexing system[J]. Journal on Communications, 2010, 31(9): 118-121.
刁国影,胡贵军,李公羽,等.ICA在模式群分集复用系统输出信号分离中的应用[J].通信学报,2010,31(9):118-121.
- Gu Xin, Lu Jin, Ren Hongliang, *et al.* Channel equalization using independent component analysis with adaptive variable step in PDM-CO-OFDM[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1006003.
顾欣,卢瑾,任宏亮,等.基于自适应ICA的PDM-CO-OFDM系统信道均衡算法[J].光学学报,2015,35(10):1006003.
- Feng Jie, Xiao Junxiong, Han Jilong, *et al.* Low complexity frequency offset estimation algorithm based on amplitude

- ratio[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0506007.
- 冯 婕, 肖骏雄, 韩纪龙, 等. 基于幅度比值的低复杂度频偏估计算法[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0506007.
- 15 Hu Guijun, Wang Yanping, Yan Li, *et al.* Mode demultiplexing based on CMA under the condition of differential group delay[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(3): 961-965.
- 胡贵军, 王艳萍, 闫 李, 等. 差分群时延条件下基于恒模算法的模式解复用技术[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(3): 961-965.
- 16 Lu J H, Hu G J, Sun Y B, *et al.* Polarization de-multiplexing based on T-CMN[J]. Optics Communications, 2013, 290: 49-54.
- 17 Li J H, Hu G J, Li Y, *et al.* De-multiplexing based on complex ICA for mode group diversity multiplexing system[J]. Optical and Quantum Electronics, 2015, 47(2): 217-224.
- 18 Hanzawa N, Saitoh K, Sakamoto T, *et al.* Mode multi/demultiplexing with parallel waveguide for mode division multiplexed transmission[J]. Optics Express, 2014, 22(24): 29321-29330.
- 19 Cao Yuan, Shi Weihua, Xu Guanjie, *et al.* Design of bend-resistant large-mode-area dual-mode photonic crystal fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 100602.
- 曹 原, 施伟华, 徐冠杰, 等. 抗弯曲大模场面积双模光子晶体光纤的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 100602.