

·测试、试验与仿真·

## 模分复用系统频域盲均衡算法仿真

靳伟娜, 王目光

(北京交通大学 光波技术研究所 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要:** 模分复用系统中的模式耦合和差分模式群时延对信号传输的影响, 需在接收端进行均衡补偿以实现信号可靠传输。与时域均衡相比, 频域均衡可有效降低 DSP 复杂度。基于频域盲均衡算法 FD-CMA (frequency-domain constant modulus algorithm) 和 FD-MMA (frequency-domain multimodulus algorithm) 在  $2 \times 56$  Gb/s 16 QAM 模分复用系统中进行仿真对比。结果表明, 从星座图和误码性能角度来讲, FD-MMA 对非常数模信号的均衡性能优于 FD-CMA。在误比特率为  $10^{-3}$  处, FD-MMA 较 FD-CMA 有 2.8 dB 光信噪比的提升。

**关键词:** 模分复用; 频域均衡; FD-CMA; FD-MMA

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-01-0060-06

## Frequency-domain Blind Equalization Algorithm Simulation for Mode-division Multiplexing System

JIN Wei-na, WANG Mu-guang

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The effects of mode coupling and difference mode group delay on signal transmission in mode-division multiplexing system can be compensated with equalization to realize signal reliable transmission. Compared with time-domain equalization, frequency-domain equalization can effectively reduce digital signal processor (DSP) complexity. FD-CMA (frequency-domain constant modulus algorithm) and FD-MMA (frequency-domain multi-modulus algorithm) are used to simulate and compare in  $2 \times 56$  Gb/s 16QAM mode-division multiplexing system. The results show that the equalization performance of FD-MMA is better than FD-CMA in constellation diagram and bit error rate (BER) performance. At the error bit rate of  $10^{-3}$ , FD-MMA has a 2.8 dB improvement of optical signal-to-noise ratio than FD-CMA.

**Key words:** mode-division multiplexing; frequency-domain equalization; frequency-domain constant modulus algorithm (FD-CMA); frequency-domain multi-modulus algorithm (FD-MMA)

目前, 现代通信业务的爆炸式增长<sup>[1]</sup>, 推动着光网络全面进入超高速时代, 同时也驱动着骨干网的带宽高速增长。为满足不断快速增长的通信业务流量的需求, 基于少模光纤 (few-mode fiber, FMF) 的模分复用 (mode-division multiplexing, MDM) 技术把

FMF 中的模式看做独立的信道进行信号传输, 可大幅度提高传输系统的容量与频谱效率。然而模式耦合 (mode coupling, MC) 和差分模式群时延 (differential mode group delay, DMGD) 的相互作用严重影响 MDM 系统信号传输的质量<sup>[2-5]</sup>。为保证信号可靠

收稿日期: 2018-01-30

基金项目: 国家自然科学基金 (61475015, 61775015) 资助

作者简介: 靳伟娜 (1991-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤通信系统与模分复用系统均衡技术; 王目光, 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事全光信号处理、光电器件、光通信等方面的研究。

传输,需在接收端对信号进行MIMO均衡。MIMO均衡分为时域均衡和频域均衡。与时域均衡相比,频域均衡利用重叠保留法和高效的FFT/IFFT可将时域均衡中复杂的线性卷积运算转换为简单的乘积运算,有效降低均衡算法的计算复杂度<sup>[6-7]</sup>。基于训练序列的最小均方(least mean square, LMS)算法<sup>[8]</sup>和恒模盲均衡算法<sup>[9]</sup>(constant modulus algorithm, CMA)是模分复用系统中常用的两种均衡算法。与LMS算法不同,CMA不需要周期性发送训练序列,仅利用系统发送信号的统计信息可实现均衡器向量的更新,因而提高了频谱利用率。CMA一般用于恒模信号的均衡,对于高阶调制信号的均衡,存在收敛速度慢和稳态误差大的缺点。多模盲均衡算法<sup>[10]</sup>(multimodulus algorithm, MMA)同时利用了发送信号的幅值和相位信息,不需要对均衡后的信号进行载波相位恢复,比CMA更加简便。文中采用FD-CMA和FD-MMA进行解复用均衡,并从均衡输出信号的星座图和误码率两方面进行仿真对比。文中, $(\cdot)^*$ 表示Hermitian共轭矩阵; $\text{conj}(\cdot)$ 表示共轭运算;“ $\otimes$ ”表示矩阵对应元素相乘, $(\cdot)^e$ 和 $(\cdot)^o$ 分别表示偶子均衡器和奇子均衡器; $(\cdot)^r$ 和 $(\cdot)^i$ 分别表示参数的实部和虚部; $O_L$ 表示 $1 \times L$ 的零矩阵。

## 1 频域均衡算法

### 1.1 FD-CMA算法

图1为CMA的基本结构。

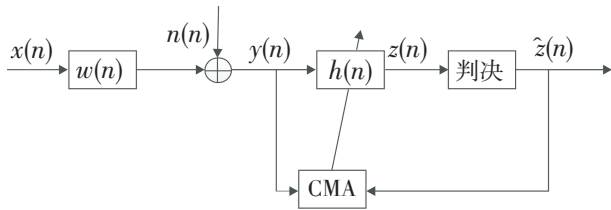


图1 CMA结构

$x(n)$ 为发射信号, $w(n)$ 为信道脉冲响应, $n(n)$ 为加性高斯白噪声; $y(n)$ 为均衡器接收信号; $z(n)$ 为均衡器输出信号, $\hat{z}(n)$ 是 $z(n)$ 的判决输出信号。

CMA算法利用发送信号的高阶统计特性构造代价函数,CMA的代价函数只和接收信号的幅值有关,和相位无关,因此CMA对相位不敏感。其代价函数为

$$J_{\text{FD-CMA}}(n) = \frac{1}{4} E \left\{ \left[ |z(n)|^2 - R_2 \right]^2 \right\} \quad (1)$$

其中, $R_2$ 为CMA模值,可由下式得到

$$R_2 = \frac{E \left[ |x(n)|^4 \right]}{E \left[ |x(n)|^2 \right]} \quad (2)$$

时域误差函数为

$$e(n) = \left[ R_2 - |z(n)|^2 \right] \times z(n) \quad (3)$$

那么,频域均衡器的权向量记为 $H(k)$ ,其迭代公式为

$$H(k+1) = H(k) + \mu \left[ E(k) \otimes \text{conj}(Y(k)) \right] \quad (4)$$

式中, $\mu$ 为学习步长; $Y(k)$ 为均衡器的频域输入信号; $E(k)$ 为频域误差向量。

### 1.2 FD-MMA算法

FD-MMA算法利用了输入信号的幅度信息和相位信息,可同时完成对信号幅度和相位的均衡,因此无需对均衡后的信号进行载波相位恢复。

FD-MMA的代价函数为

$$J_{\text{FD-MMA}}(n) = E \left\{ \left[ |z^r(n)|^2 - R_M \right]^2 + \left[ |z^i(n)|^2 - R_M \right]^2 \right\} \quad (5)$$

其中, $z^{r,i}(n)$ 为均衡器时域输出信号的实部和虚部; $R_M$ 是收敛半径。

$$R_M = \frac{E \left[ (x^r)^4 \right]}{E \left[ (x^r)^2 \right]} = \frac{E \left[ (x^i)^4 \right]}{E \left[ (x^i)^2 \right]} \quad (6)$$

时域误差信号为

$$e^{r,i}(n) = \left[ R_M - |z^{r,i}(n)|^2 \right] \times z^{r,i}(n) \quad (7)$$

对于 $2 \times 2$ MDM系统,参照文献[11]中FD-CMA计算流程,FD-MMA均衡的计算流程见图2。其中经过两倍过采样的输入序列记为 $y_1(n)$ 和 $y_2(n)$ ,首先通过串并转换将每路输入序列变为奇偶序列,接着每一路奇/偶子序列进而分为块数据,第 $k$ 块数据记为 $y_1^{e,o}(k)$ 和 $y_2^{e,o}(k)$ ,每块数据长度为 $L$ 。通过FFT和重叠保留法(重叠率选为0.5)实现时域信号到频域信号的转换,频域信号 $Y_{1,2}(k)$ 由前一块的 $L$ 个采样值和当前块的 $L$ 个采样值组成,可表示为

$$Y_{1,2}^{e,o}(k) = \text{FFT} \left[ \begin{matrix} y_{1,2}^{e,o}(kL-L), y_{1,2}^{e,o}(kL-L+1), \dots, \\ y_{1,2}^{e,o}(kL+L-1) \end{matrix} \right]^T \quad (8)$$

频域均衡输出信号可由输入序列和相应的均衡器复乘相加得到,即

$$Z_1(k) = H_{11}^e(k) \otimes Y_1^e(k) + H_{11}^o(k) \otimes Y_1^o(k) + H_{12}^e(k) \otimes Y_2^e(k) + H_{12}^o(k) \otimes Y_2^o(k) \quad (9)$$

$$Z_2(k) = H_{21}^e(k) \otimes Y_1^e(k) + H_{21}^o(k) \otimes Y_1^o(k) + H_{22}^e(k) \otimes Y_2^e(k) + H_{22}^o(k) \otimes Y_2^o(k) \quad (10)$$

对  $Z_{1,2}(k)$  进行 IFFT 得到时域均衡输出序列为  $z_{1,2}(k) = \text{后}L\text{个元素}\{\text{IFFT}[Z_{1,2}(k)]\}$  (11)

根据式(7)即可得到每路信号的时域误差向量的实部误差向量和虚部误差向量,记为  $e_{1,2}^{r,i}$ ,其长度为  $L$ 。进而得到频域误差向量为

$$E_{1,2}^{r,i}(k) = \text{FFT}[O_L; e_{1,2}^{r,i}]^T \quad (12)$$

所以,频域偶子均衡器的权向量的迭代公式为

$$\begin{cases} H_{pq}^{e,r}(k+1) = H_{pq}^{e,r}(k) + \mu \cdot \text{FFT}[\nabla_{pq}^{e,r}; O_L]^T \\ H_{pq}^{e,i}(k+1) = H_{pq}^{e,i}(k) + \mu \cdot \text{FFT}[\nabla_{pq}^{e,i}; O_L]^T \\ H_{pq}^e(k+1) = H_{pq}^{e,r}(k+1) + i \cdot H_{pq}^{e,i}(k+1) \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $p$  和  $q$  分别取 1 或 2。 $\nabla_{pq}^{e,r}$  和  $\nabla_{pq}^{e,i}$  为梯度更新,可由式(14)得到。

$$\begin{cases} \nabla_{pq}^{e,r} = \text{前}L\text{个元素}\{\text{IFFT}[E_p^r(k) \otimes \text{conj}(Y_q^e(k))]\}^T \\ \nabla_{pq}^{e,i} = \text{前}L\text{个元素}\{\text{IFFT}[E_p^i(k) \otimes \text{conj}(Y_q^e(k))]\}^T \end{cases} \quad (14)$$

频域奇子均衡器的权向量的迭代公式同理即可得到。

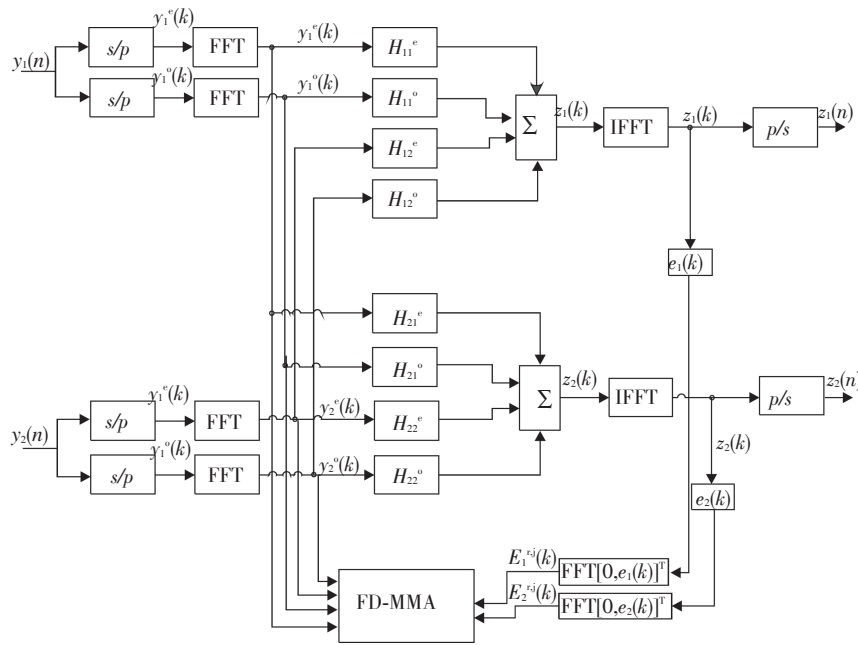


图2 FD-MMA 计算流程

## 2 模分复用系统结构

为分析 FD-CMA 和 FD-MMA 的均衡性能,文中在 OptiSystem 平台上搭建了  $2 \times 2$  模分复用系统,具体结构见图 3。发送端将两路 56 Gb/s 16 QAM 信号搭载在  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  两个模式进行传输。根据矩阵传输理论<sup>[12]</sup>在 MATLAB 平台上建立少模光纤模型,其包括了模式相关损耗、模式色散、色度色散和模式耦合的影响,并将其封装为一个 MATLAB 模块嵌入到 MDM 系统中,具体参数见表 1。

表 1 参数设置

参数名称	参数值
比特率	56 Gb/s
比特序列长度	65 536
光纤总长度	100 km
光纤传输损耗( $LP_{01}$ 模)	0.19 dB/km
光纤传输损耗( $LP_{11}$ 模)	0.20 dB/km
光纤色散系数( $LP_{01}$ 模)	20 ps/nm/km
光纤色散系数( $LP_{11}$ 模)	21 ps/nm/km
DMGD( $LP_{11} - LP_{10}$ )	27 ps/km
耦合系数	0.01

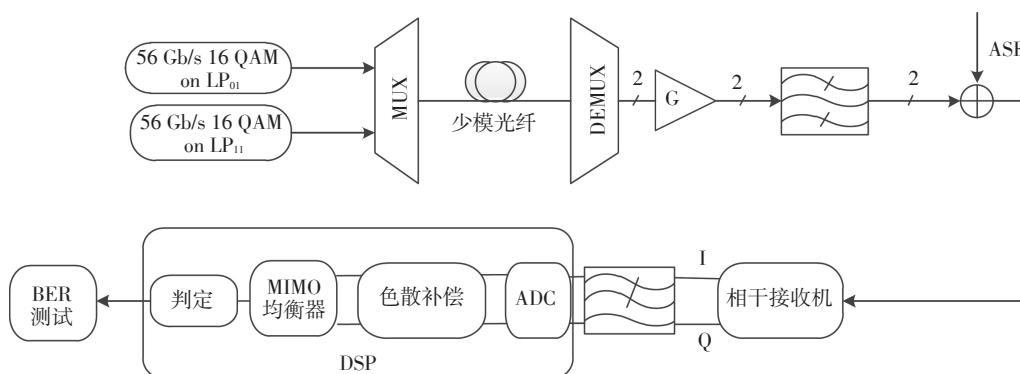


图3 基于少模光纤的模分复用系统模型

加入 ASE 噪声以调节信号的光信噪比。接收端采用相干接收机接收后,通过低通滤波器去除噪声后,送入 DSP 模块进行信号处理。

DSP 的信号处理流程为:首先对接收到的信号进行模数转换,把模拟信号转换为数字信号,然后对处理后的数据进行色散补偿,再将色散补偿的信号采用频域均衡算法进行 MIMO 均衡,以实现接收信号恢复。若采用 FD-CMA 算法均衡,均衡后的信号还需要载波相位估计,最后对均衡后的信号进行解调及误码统计。误码统计通过蒙特-卡罗方法计算平均误码率。

### 3 仿真结果分析

迭代步长是影响均衡算法收敛速度和稳态误差的重要因素。以 FD-MMA 算法为例,图 4 给出了不同迭代步长时的算法收敛比较曲线。

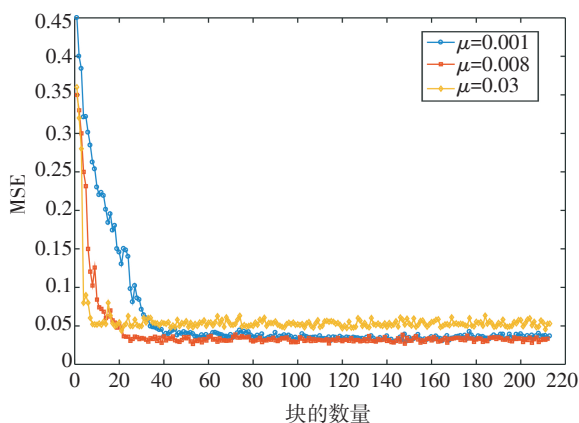


图4 不同迭代步长时,FD-MMA 均衡收敛曲线

其中,MDM 系统中发送信号为 16 QAM 信号,光信噪比(optical signal noise ratio, OSNR)为 20 dB,

均衡器权向量长度为 77,迭代步长  $\mu$  分别取 0.001、0.008 和 0.03。MSE 代表均衡后每块数据的平均均方误差。从图 4 中可以看出,随着迭代步长的增大,收敛速度越来越快,同时达到收敛时的 MSE 也随之增大。表明较小的迭代步长,稳态误差小,但是收敛较慢;较大的迭代步长,收敛速度快,但是稳态误差大。因此,迭代步长的选取需在收敛速度和稳态误差之间折衷考虑。

为比较 FD-CMA 和 FD-MMA 对模分复用信号的均衡性能,在  $2 \times 56$  Gb/s 16 QAM 模分复用系统中进行仿真。图 5 为采用 FD-CMA 和 FD-MMA 均衡时  $LP_{01}$  模收敛速度比较曲线。

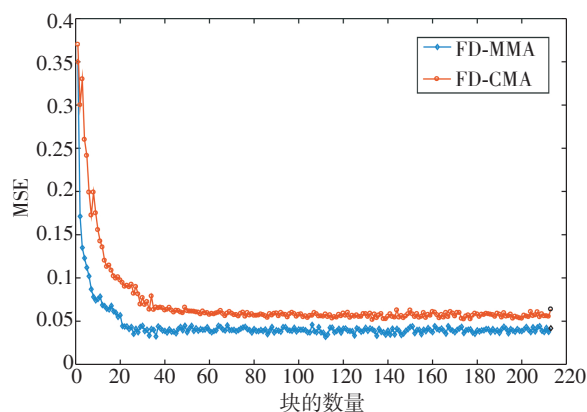


图5 FD-MMA 和 FD-CMA 收敛性能对比

其中 OSNR=24 dB,  $\mu=0.008$ 。图 5 中 FD-MMA 比 FD-CMA 收敛速度更快,FD-MMA 需要 20 块趋于收敛,FD-CMA 需要 40 块趋于收敛。并且,达到稳态时,FD-MMA 的 MSE 为 0.04,FD-CMA 的 MSE 为 0.06,FD-MMA 的稳态误差更小。

图 6 为分别采用 FD-CMA 和 FD-MMA 均衡时,误比特率随 OSNR 变化曲线。

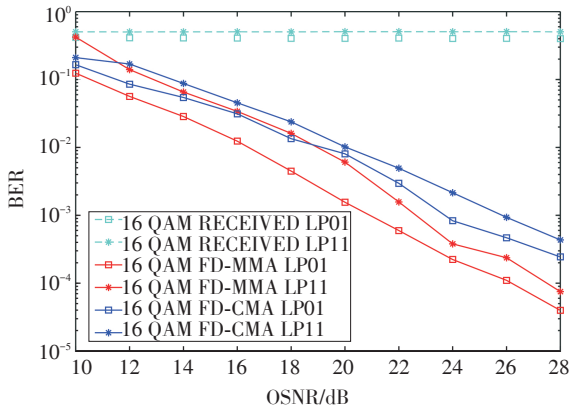


图6 FD-MMA和FD-CMA误码性能对比

对于高阶调制格式16 QAM信号均衡,相同OSNR下,FD-MMA的误码性能优于FD-CMA误码性能,在误比特率为 $10^{-3}$ 处,FD-MMA较FD-CMA有2.8 dB的OSNR提升。图7和图8分别为OSNR=26 dB时,采用FD-CMA和FD-MMA均衡后的 $LP_{01}$ 模和 $LP_{11}$ 模的输出信号星座图。

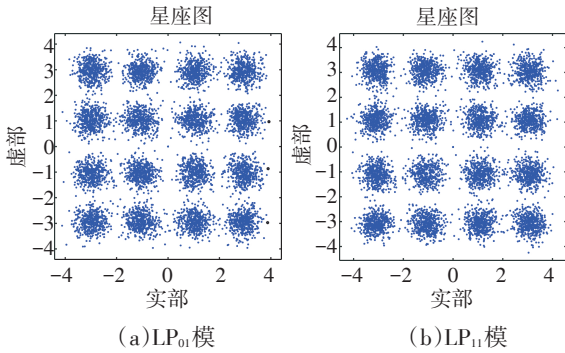


图7 FD-CMA  $LP_{01}$ 模和 $LP_{11}$ 模

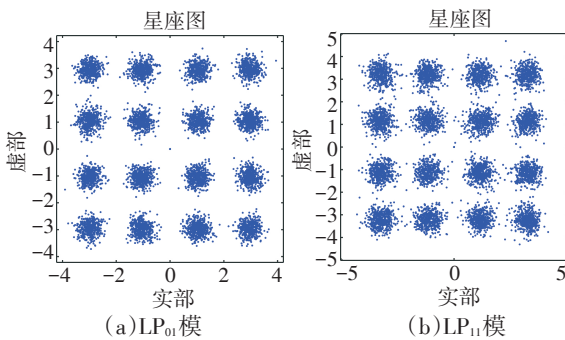


图8 FD-MMA  $LP_{01}$ 模和 $LP_{11}$ 模

经FD-MMA均衡后的信号星座图较经FD-CMA均衡后的信号星座图更紧凑。综合均衡后信号星座图和误码性能表明,FD-MMA的均衡性能优于

FD-CMA的均衡性能,适于模分复用系统中的非常数模信号的均衡。

### 4 结论

模分复用系统中的模式耦合和差分模式群时延严重影响了信号的传输质量,因此解复用端的均衡对于信号的可靠传输是至关重要的。针对非常数模信号的模分复用传输,文中在 $2 \times 56$  Gb/s 16 QAM模分复用系统中对FD-CMA和FD-MMA的均衡性能进行了仿真对比。结果表明,FD-MMA在星座图和误码率两方面的均衡性能均优于FD-CMA。在误比特率为 $10^{-3}$ 处,FD-MMA较FD-CMA有2.8 dB光信噪比的提升。FD-MMA是一种适于模分复用系统均衡的算法。

### 参考文献

- [1] Yang Y, Li J X. Implementation and design of 100G optical transmission system based on inverse- multiplexing technology[J]. Video Engineering, 2016, 40(7): 99-103.
- [2] Mori T, Sakamoto T, Wada M, et al. Few-mode fibers supporting more than two LP modes for mode-division-multiplexed transmission with MIMO DSP[J]. Lightwave Technology Journal, 2014, 32(14): 2468-2479.
- [3] Ho K P, Kahn J M. Linear propagation effects in mode-division multiplexing systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(4): 614-628.
- [4] Bai N, Li G. Adaptive frequency-domain equalization for mode- division multiplexed transmission[J]. Photonics Technology Letters, 2012, 24(21): 1918-1921.
- [5] Yang J, Werner J J, Dumont G A. The multimodulus blind equalization and its generalized algorithms[J]. Selected Areas in Communications IEEE Journal, 2002, 20(5): 997-1015.
- [6] Faruk M S, Kikuchi K. Adaptive frequency-domain equalization in digital coherent optical receivers[J]. Optics Express, 2011, 19(13): 12789.
- [7] Ho K P, Kahn J M. Mode coupling and its impact on spatially multiplexed systems[M]. Optical Fiber Telecommunications VIB, Elsevier Inc, 2013:491-568.
- [8] Farhang-Boroujeny B. Adaptive Filters: Theory and Applications[M]. British, Wiley: 2013.
- [9] Jones D L. A normalized constant-modulus algorithm[C]// 1995 Conference Record of the Twenty-Ninth Asilomar Conference on IEEE, 1995, 1: 694-697.



- [10] Yang J, Werner J J, Dumont G A. The multimodulus blind equalization and its generalized algorithms[J]. Selected Areas in Communications IEEE Journal on 2002, 2002, 20 (5): 997-1015.
- [11] Faruk M S, Kikuchi K. Adaptive frequency-domain equalization in digital coherent optical receivers[J]. Optics Express, 2011, 19(13): 12789.
- [12] Ho K P, Kahn J M. Mode Coupling and its Impact on Spatially Multiplexed Systems[M]. Elsevier Inc, 2013: 491-568.

### 《光电技术应用》编辑部征稿通知

《光电技术应用》期刊是中国电子科技集团公司主管,中国电子科技集团公司光电研究院主办,公开发行的学术性中文科技期刊。以光电技术为主要专业特色,传播光电技术、光电系统应用技术专业领域的先进科技信息,报道新型科技成果,推动工程技术交流,促进行业科技进步与发展。

期刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊。期刊的影响因子连续几年上升,2015年、2016年两年连续入选《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊。

期刊所设栏目主要有:综述,光电系统,光学设计,红外技术,激光技术,光电探测,光电器件与材料,信号与信息处理,电路与控制,测试、试验与仿真等。

期刊拥有优秀的编委会成员,审稿专家涉及光电技术的各个领域,具有审稿速度快、质量高,编辑人员具有较高的职业素质,工作认真负责、反馈速度快,期刊版面设计合理、美观大方,印刷质量好,出刊及时。对于优秀论文可以减收或不收版面费。

编辑部通信地址:天津市空港经济区纬五道9号;邮政编码:300308;联系电话:022-59067938;联系人:朱编辑 牛编辑;投稿邮箱:aoe-cetc@vip.163.com。

《光电技术应用》编辑部