

单光束相干光通信中偏振态控制器的 GRNN 建模

翟耀宗, 黄春晖*

(福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350116)

摘要: 针对偏振态控制器(PSC)输出信号精度不高的问题, 在制作 LiNbO_3 晶体 X-Z-X 型 PSC 的基础上, 提出了采用广义回归神经网络(GRNN)对实际的 PSC 进行建模的方案, 并对所提出的方案进行了实验测试和仿真计算。实测结果显示: 未加修正模块的 PSC 输出信号误差最大约为 0.06, 加上修正模块的信号最大误差约为 0.03。

关键词: 相干光通信; 偏振控制; 广义回归神经网络; LiNbO_3

中图分类号: TN918 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)06-0025-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.06.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



GRNN modeling of polarization state controller in single beam coherent optical communication

ZHAI Yaozong, HUANG Chunhui*

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350106, China)

Abstract: Aiming at the problem of low precision of polarization state controller (PSC) output signal, based on the manufacture of X-Z-X polarization state controller PSC for LiNbO_3 crystal, a method of modeling practical PSC using generalized regression neural network (GRNN) is proposed, and the proposed method is tested and simulated. The measured results show that the maximum error of PSC output signal without correction module is about 0.06, and the maximum error of PSC output signal with correction module is about 0.03.

Key words: coherent optical communication; polarization control; GRNN; LiNbO_3

0 引言

量子密钥分发(QKD)技术已经成为量子通信领域的研究热点之一^[1,2]。根据载体不同,可分为连续变量量子密钥分发(CV-QKD)^[3]和离散变量量子密钥分发(DV-QKD)^[4]。DV-QKD 研究相对较早,技术也相对成熟,但由于光源制备困难、检测设备昂贵和检测效率低等因素制约了其进一步发展;CV-QKD 技术研究虽然发展起步相对较晚,但其具有光源较易实现、通信容量大、检测设备简单和检测灵敏度高等诸多优点,成为 QKD 领域新的研究热点之一^[5-7]。

由于单光束相干光通信(SBCOC)的众多优点,可以使用 SBCOC 搭建 CV-QKD 系统,由于 CV-QKD 传输的是微弱光信号,其偏振态控制器(PSC)的器件蠕动特性、安装偏差等因素导致的误差使得 PSC 输出精度不高,会对系统的工作状态产生很大影响。因此,提高 CV-QKD 中 PSC 输出信号的精度具有实际应用价值^[8,9]。

近年来,提高 PSC 输出信号精度主要有外加模块修正输出法和公式描述法^[10]。在外加模块修正法中,如用比例-积分-微分(PID)控制器对 PSC 进行调节使得输出稳定^[11],但是存在调节速度缓慢以及当器件的特性发生蠕动后,PID 控制效果下降等问题;也有使用在线偏振仪对 PSC 输出进行修正^[12],但是存在设备昂贵与增加搭建复杂度等问题。在公式描述法中,常对 PSC 作用原理用公式推导加以描述,但公式是在理想情况下建立的,实际器件有材料特性误差、加工误差和安装位置误差等现实原因,必将导致输出与理论值存在偏差和误差,降低实验的稳定性和精度。

收稿日期:2018-11-28。

基金项目:国家自然科学基金(批准号:61177072)资助。

作者简介:翟耀宗(1993-),男,浙江台州人,硕士研究生,主要研究方向为光通信系统的设计、嵌入式系统。参与国家自然科学基金项目 1 项,项目内容涉及到光调制器件的研制,光解码检测系统的设计与实现。已授权发明专利 1 项,在审发明专利 1 项。

* 通信作者:黄春晖(E-mail:hchuang@fzu.edu.cn)。



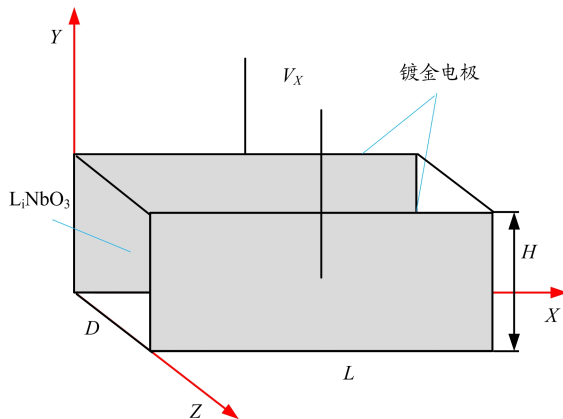
为使 PSC 稳定地输出精确信号,本文在分析 PSC 原理和误差产生因素的基础上,提出利用广义回归神经网络 (GRNN)^[13,14] 非线性逼近能力,辨识 PSC 的输入/输出之间的非线性特性,建立输入电压与输出修正量之间的模型。

1 X-Z-X 型 PSC 的结构及实现

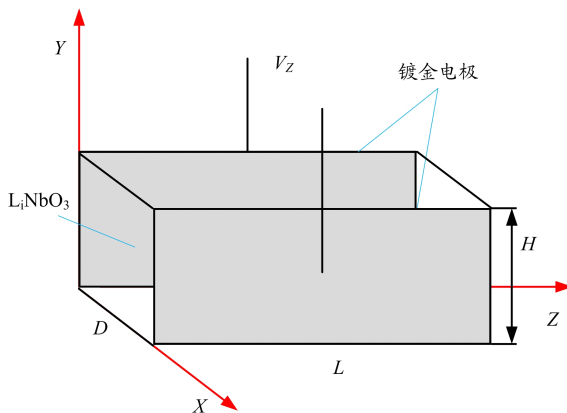
一束偏振光的偏振态可以用 Stokes 参量 $[S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$ 表示, S_0 表示总光强, S_1 表示水平和垂直方向光强差, S_2 表示 $\pm 45^\circ$ 正交方向光强差, S_3 表示右旋圆偏振光和左旋圆偏振光之间的光强差。

在 SBCOC 系统中实现偏振态编码功能的器件称为 PSC, 本文的 PSC 是基于 LiNbO_3 晶体构造的 X-Z-X 型 PSC, 在输入电压 $[V_X \ V_Z]^T$ 作用下, 起着把入射光的偏振态做相应改变的作用。X-Z-X 型 PSC 中的 X 型 LiNbO_3 晶体和 Z 型 LiNbO_3 晶体的构造如图 1 所示。

图 1(a) 中, 透光轴沿着 X 轴方向, 电压沿着 Z 轴



(a) X 型 LiNbO_3 晶体构造图



(b) Z 型 LiNbO_3 晶体构造图

图 1 X-Z-X 型 PSC 中的
X 型 LiNbO_3 晶体和 Z 型 LiNbO_3 晶体的构造图

方向, 两电极采用镀金工艺 (如图中阴影部分所示), 在镀金电极中间部分采用 SMA 接口的镀银铜线引出, 用导电银胶作为镀金电极和引出线的黏连剂, 构造成本轴方向为 0° 、延迟量 δ_x 随着所加电压变化的 X 型压控波片, 其 Mueller 矩阵表示为:

$$M_{\delta_x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta_x & \sin \delta_x \\ 0 & 0 & -\sin \delta_x & \cos \delta_x \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $\delta_x = 2\pi L(n_0 - n_e)/\lambda + \pi L(n_e^3 \gamma_{33} - n_0^3 \gamma_{13})V_X/(\lambda D)$, λ 是通过电光晶体的偏振光波长, n_0 、 n_e 分别为寻常光折射率和非寻常光折射率, L 为晶体长度, γ_{13} 、 γ_{33} 为 LiNbO_3 晶体电光系数, V_X 为沿着 Z 轴方向的电压, D 为晶体宽度。

图 1(b) 中, 透光轴沿着 Z 轴方向, 电压沿着 X 轴方向, 两电极以及引出线均与 X 型晶体构造方式相同, 构造成本轴方向为 45° 、延迟量 δ_z 随着所加电压变化的 Z 型压控波片, 其 Mueller 矩阵表示为:

$$M_{\delta_z} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta_z & 0 & -\sin \delta_z \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin \delta_z & 0 & \cos \delta_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $\delta_z = 2\pi n_0^3 \gamma_{22} L V_Z/(\lambda D)$, γ_{22} 为 LiNbO_3 晶体电光系数, V_Z 为沿着 Z 轴方向的电压。

安装的 X、Z 型 LiNbO_3 晶体的 PSC 基座如图 2 所示。标号 1、4 为 X 型 LiNbO_3 晶体, 标号 2 为晶体固定螺丝槽, 标号 3 为 Z 型 LiNbO_3 晶体, 标号 5 为聚四氟乙烯材料, 标号 6 为固定螺丝孔, 标号 7 为镀金电极引出线槽。

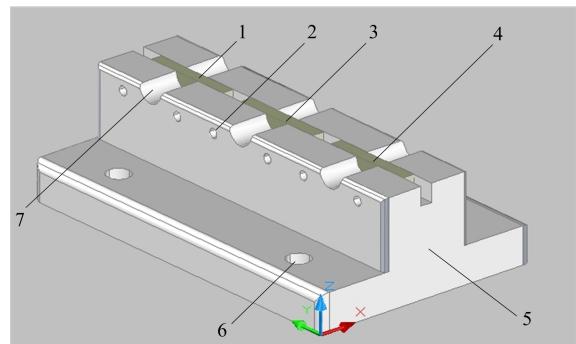
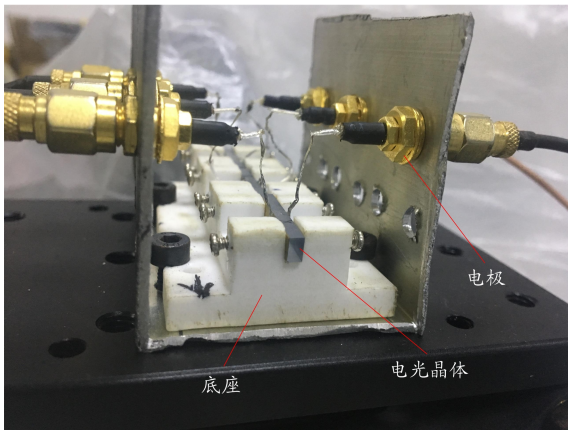


图 2 PSC 基座

根据以上分析, 把 X、Z 型 LiNbO_3 晶体按照 X-Z-X 顺序装配在聚四氟乙烯基座上, 得到 PSC 实物如图 3 所示。

图3 X-Z-X 型 LiNbO₃ PSC 实物

由式(1)、式(2)可知,得到的 X-Z-X 型 LiNbO₃ PSC 的 Mueller 矩阵为:

$$M_{\text{PSC}} = M_{\delta_x} \times M_{\delta_z} \times M_{\delta_x} \quad (3)$$

设入射光的偏振态记为 S_{in} , 则在一组控制电压向量 $[V_x \ V_z]^T$ 的控制下, 通过 PSC 后, 出射光的偏振态记为 S_{out} , 则:

$$S_{\text{out}} = M_{\text{PSC}} \times S_{\text{in}} \quad (4)$$

从式(1)~式(4)可以看出, 由于矩阵 M_{PSC} 中所包含的电光晶体长度 L 、宽度 D 等理论尺寸与实际器件的数值存在误差, 以及矩阵中所包含偏振光折射率 n 、晶体电光系数 γ 等参数与厂家提供的参考值有误差, 尤其是器件的构造装配和实际的光通信系统搭建过程中, 不可避免存在误差, 这些不可避免的误差导致实际测量值 S_{meas} 与严格推导出来的公式理论值 S_{out} 存在误差。从矩阵 M_{PSC} 中可以看出, 输入/输出具有很强的非线性关系, 使用一般的数值方式难以修正这些误差, 而 GRNN 具有很强的非线性逼近能力, 它为解决这个问题提供了一个可行方案。

2 基于 GRNN 的 PSC 修正模型

GRNN 是径向基函数神经网络的一种特殊形式, 以样本数据为后验条件, 依据最大概率原则计算输出, 具有良好的非线性逼近能力, 适用于解决非线性问题。相比广泛使用的前馈神经网络(BPNN), GRNN 具有训练速度快、全局收敛性好和需要人为设置的参数少等优点, 特别是基于少量的样本能得到合理的回归面^[15]。

PSC 中 GRNN 的结构如图 4 所示。

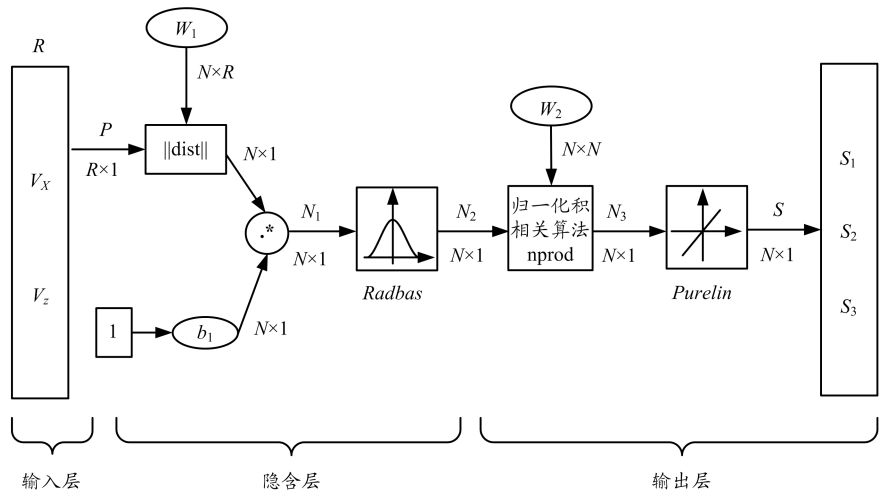


图4 PSC 中 GRNN 结构图

GRNN 由输入层、隐含层和线性输出层组成。首先, 将输入向量 P 传输到隐含层, 其中 R 表示网络输入的维数, N 表示训练样本数。本文中训练样本的输入向量即 PSC 的输入电压 $[V_x \ V_z]^T$, 目标向量为 Stokes 测量值与理论值的偏差, 隐含层的神经元数目等于训练样本数 N , 使用欧式距离 $\| \text{dist} \|$ 表示输入向量 $[V_x \ V_z]^T$ 与第一层的权值 b_1 之间距离, b_1 为隐含层阈值, 记为 $(-\ln 0.5)^{1/2} \sigma$, 大小由径向基函数分布密度 σ 决定。然后, 通过调节 σ 以改变阈值 b_1 , 可以调节 GRNN 的非线性逼近能力, 理论上 σ 越小, 逼近程度越高, 但越不光滑; σ 越大, 则越光滑, 但逼近误差就越大。因此, 为了兼顾实验效果, 可选 σ 为 0.6 左右。隐含层输出 $N_2 = \text{Radbas}(\| \text{dist} \| \times b_1)$, 其中 Radbas 使用高斯函数表示。隐含层与输出层之间的权值为 W_2 , 输出层输出为 $S = \text{purelin}(W_2 \times N_2 / \text{sum}(N_2))$ 。

3 实验分析

为了验证 GRNN 算法能够提升 PSC 的输出精度, 本文首先根据目标输出偏振态, 计算相对应的输入电压, 并将电压通过驱动加载到 PSC, 最后对经过了 GRNN 算法修正的信号进行测量, 并将测量结果与目标的理论值进行对比和分析。

3.1 数据源

本节内容按上述方式, 目标偏振态记为 $[S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$, 对应的输入电压记为 $[V_x \ V_z]^T$, 测到的 Stokes 参量记为 $[S_{\text{meas}.0} \ S_{\text{meas}.1} \ S_{\text{meas}.2} \ S_{\text{meas}.3}]^T$ 。实验中, 电压精度为 0.1V, 由实验室自制的高压驱动提供, Stokes 参量由 TXP5004 偏振测量仪测得, 精度为

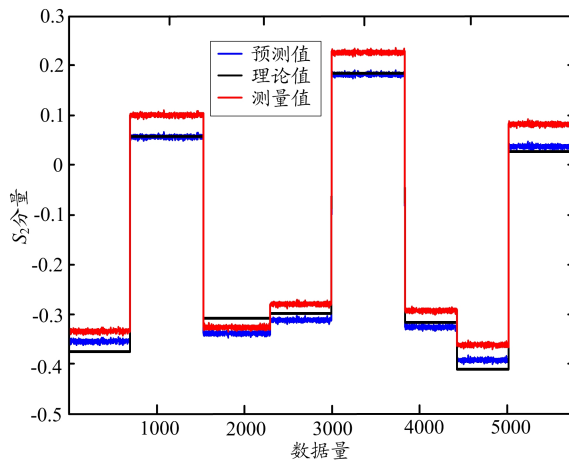
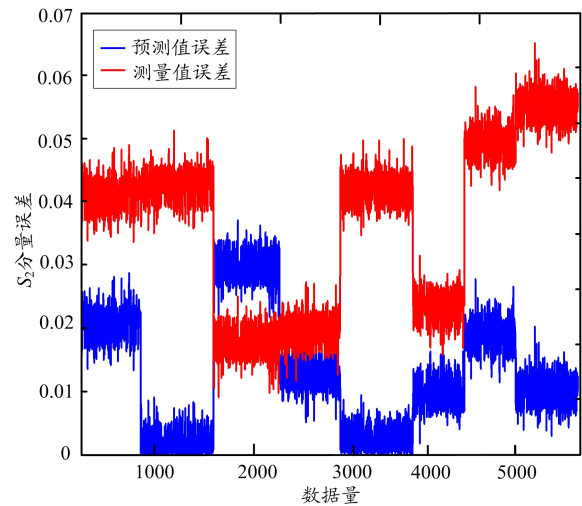
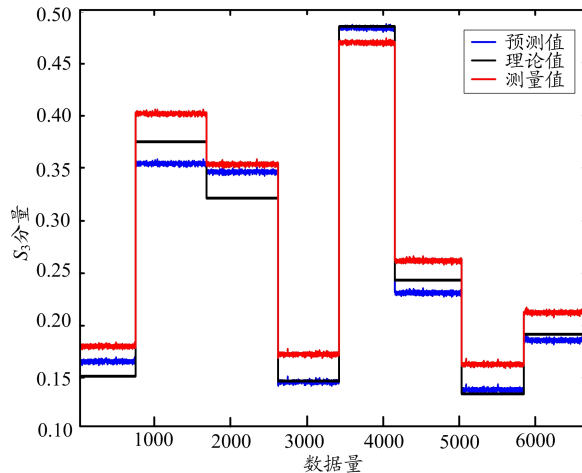
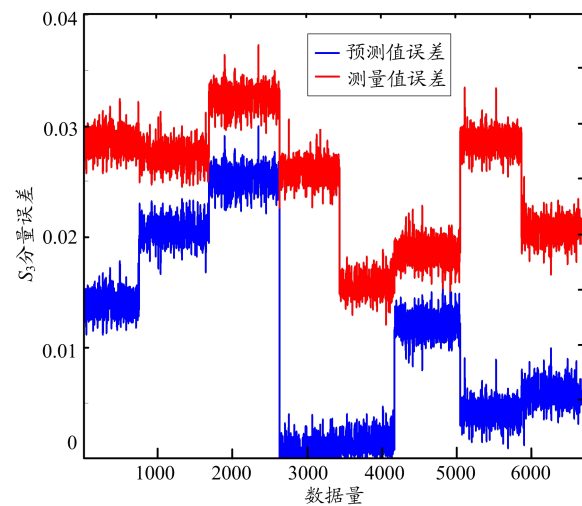
0.001。剔除掉异常数据后,共得到 76 种输入电压组合和 56518 组数据。我们随机选择其中的 80% 作为训练集,剩余的 20% 作为测试集。部分测量数据与理论数据如表 1 所示。

表 1 测量数据与理论数据

序号	输入电压(V)		实测 Stokes 参量			理论 Stokes 参量		
	V_x	V_z	$S_{meas.1}$	$S_{meas.2}$	$S_{meas.3}$	S_1	S_2	S_3
1	11.2	24.2	0.08	-0.985	0.171	0.117	-0.982	0.146
2	11.6	29.3	0.104	-0.977	0.18	0.142	-0.978	0.151
3	18.8	27.7	0.169	-0.952	0.261	0.134	-0.961	0.243
4	29.8	48.5	0.183	-0.895	0.404	0.231	-0.897	0.375
5	86.8	38.1	0.051	-0.358	0.93	0.156	-0.411	0.899
6	90.6	4.4	0.121	-0.332	0.935	0.018	-0.375	0.926
7	96.1	33.7	0.124	-0.28	0.951	0.133	-0.299	0.945
8	118.1	94.1	0.185	-0.082	0.978	0.318	0.027	0.947
...	...	...	...	...	...	...	...	...

3.2 实验测量、仿真与结果分析

图 5 为 Stokes 参量 S_2 分量和 S_3 分量的预测值、理论值、测量值以及误差的分布图。图 5(a)、图 5(c) 分别给出了 S_2 分量和 S_3 分量的预测值、理论值以及测量值的分布情况,可以看出测量值与理论值的变化趋势一致,说明构造的 PSC 工作可靠,搭建的光路有效。图 5(b)、图 5(d) 分别给出了 S_2 分量、 S_3 分量的预测值

(a) S_2 的预测值、理论值和测量值的分布(b) S_2 的预测值、测量值的误差分布(c) S_3 的预测值、理论值和测量值的分布(d) S_3 的预测值、测量值的误差分布图 5 Stokes 参量 S_2 、 S_3 分量的预测值、理论值、测量值和误差的分布

与测量值的误差分布情况,可以看出加上修正模块后的预测值比未加修正模块误差更小、更接近理论值。有些预测值能完全消除误差,说明使用 GRNN 得到的修正模型能有效地提升 PSC 的输出信号精度。

4 结束语

本文针对 PSC 输出信号误差较大的问题,首先介绍了 PSC 的工作原理,分析了误差引入的原因,并且在理论分析基础上,构造控制器实物。为了提升 PSC 输出信号精度,提出了一种基于 GRNN 的 PSC 修正预测模型。经过计算仿真和实验测量,对比了修正补偿后的预测值与理论值、未修正补偿的测量值与理论值之间的误差,发现由 GRNN 得到的模型能更好地修正误差,使最终的误差不超过 0.03,远远优于未加修正补偿的误差,使得 PSC 的输出能更逼近理论值,进一步提升了 PSC 的性能。该器件模型可用于单光束相干光通信中。

参考文献:

- [1] JOUGUET P, KUNZ-JACQUES, SÉBASTIEN, et al. Experimental demonstration of long-distance continuous-variable quantum key distribution[J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 378–381.
- [2] WOOTTERS W K, ZUREK W H. A single quantum cannot be cloned[J]. Nature, 1982, 299(5886): 802–803.
- [3] FORK R L, GREENE B I, SHANK C V. Generation of optical pulses shorter than 0.1 psec by colliding pulse mode locking [J]. Applied Physics Letters, 1981, 38(9): 671–672.
- [4] LO H K, CURTY M, TAMAKI K. Secure quantum key distribution[J]. Nature Photonics, 2015, 8(8): 595–604.
- [5] HUANG P, LIN D K, HUANG D, et al. Security of Continuous-Variable

Quantum Key Distribution with Imperfect Phase Compensation[J]. International Journal of Theoretical Physics, 2015, 54(8): 2613–2622.

[6] WANG C, LIN D, HUANG D, et al. High-speed continuous-variable quantum key distribution without sending a local oscillator [J]. Optics Letters, 2015, 40(16): 3695–3698.

[7] SU X, WANG W, WANG Y, et al. Continuous variable quantum key distribution based on optical entangled states without signal modulation[J]. EPL (Europhysics Letters), 2011, 87(2): 20005–20010.

[8] HAASTEREN A J P, DER TOL J J G M, DEVENTER M O, et al. Modeling and characterization of an electrooptic polarization controller on LiNbO₃[J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(7): 1151–1157.

[9] 黄春晖,荣维波. 三波片型 LiNbO₃ 偏振态产生器的控制方案设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 190–196.

[10] ZHANG Xiaoguang, ZHENG Yuan. The number of least degrees of freedom required for a polarization controller to transform any state of polarization to any other output covering the entire Poincare sphere [J]. Chinese Physics B, 2008, 17(7): 2509–2513.

[11] Li Y, MENG X, Qi A, et al. Design and implementation of electro-optic modulator adaptive polarization control system[J]. Infrared & Laser Engineering, 2015, 44(6): 1854–1858.

[12] 张晓光,方光青,赵鑫媛,等. 光纤中偏振稳定控制的实验研究[J]. 光学学报, 2009, 29(4): 888–891.

[13] KHALID M, YUSOF R, JOSHANI M, et al. Nonlinear Identification of a Magneto-Rheological Damper Based on Dynamic Neural Networks[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2014, 29 (3): 221–233.

[14] ZHANG Xiaofan, LAN Sheng. A method to identify excitation inrush current of transformer based on GRNN neural network [J]. Electrical Measurement Instrumentation, 2016, 53(23): 84–89.

[15] ALILOU V K, YAGHMAEE F. Application of GRNN neural network in non-texture image inpainting and restoration[J]. Pattern Recognition Letters, 2015, 62(9): 24–31.

关于举办《光通信技术》首届年度优秀论文评选活动的公告

尊敬的各位作者和读者:

为了活跃光通信学术氛围,提高光通信科技水平,提升《光通信技术》杂志所刊登光通信技术文章的科技含量和实用性,《光通信技术》编辑部决定从 2019 年起,每年举办一次年度优秀论文评选活动《光通信技术》优秀论文评选活动,评选出本年度 6~10 篇已正式刊登(纸质版)的优秀论文,对获优秀论文奖的第一署名作者颁发荣誉证书和现金奖励(500 元/篇),获奖名单将在 2019 年第 12 期《光通信技术》杂志和网站公布。敬请广大作者积极支持我们的工作,踊跃佳作,与我们共同携手把《光通信技术》办得更好。

《光通信技术》编辑部