

激光与光电子学进展

混沌激光对激光显示中的散斑抑制研究

贺培鑫^{1,2}, 赵彤^{1,2*}, 沈振民^{3,4}

¹太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

²太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;

³北京空间机电研究所, 北京 100094;

⁴中国空间技术研究院空间激光信息感知技术核心专业实验室, 北京 100094

摘要 利用混沌激光的低相干性实现了对激光散斑的有效抑制。其中, 使用了激光显示中常用的激光二极管, 通过光反馈扰动激光器和电混沌信号调制激光器产生了混沌激光, 分别研究了光反馈系统中偏置电流、反馈强度和调制系统中偏置电流、调制幅度对散斑抑制的影响, 并对两个系统的散斑抑制效果进行了对比研究。实验结果表明, 通过两种方式产生的混沌激光有效地抑制了散斑噪声, 其散斑对比度均可降低 0.9 以上, 使用混沌激光可使光谱最大可展宽至 4.6 nm, 其相干长度从 441 μm 降低至 87 μm 。

关键词 激光器; 散斑抑制; 混沌激光; 光反馈; 混沌信号调制

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0714001

Speckle Suppression by Chaotic Laser in Laser Display

He Peixin^{1,2}, Zhao Tong^{1,2*}, Shen Zhenmin^{3,4}

¹Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

²College of Physics and Optoelectronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

³Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;

⁴Key Laboratory for Space Laser Information Perception Technology, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

Abstract We use the chaotic laser with low coherence property to achieve speckle suppression. In particular, we use laser diodes commonly used in laser display to generate chaotic laser by diodes with optical feedback perturbation and diodes with electrical chaotic signal modulation. The effects of bias current and feedback strength in the optical feedback system, and the bias current and modulation amplitude in the modulation system on speckle suppression are studied, respectively. Moreover, the speckle suppression effects of two systems are compared. The experimental results show that the chaotic laser generated by two methods effectively suppresses the speckle noise, and the speckle contrast of speckle patterns is reduced by more than 0.9, the maximum spectrum can be expanded to 4.6 nm by using chaotic laser, and the coherence length is reduced from 441 μm to 87 μm .

Key words lasers; speckle suppression; chaotic laser; optical feedback; chaotic signal modulation

收稿日期: 2021-05-08; 修回日期: 2021-05-31; 录用日期: 2021-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(61705160, 61705007)、山西省“1331工程”重点创新团队建设计划

通信作者: *zhaotong_tyut@outlook.com

1 引言

激光显示技术相比于其他显示技术,具有色域空间大、亮度高、电光转换效率高、光源寿命长等优点^[1-2],成为最具潜力的显示技术之一。但是由于激光的时间和空间相干性极高,使得激光投影成像时存在复合散斑,造成投影图像的分辨率和对比度严重下降^[3]。该问题一直阻碍着激光显示技术的发展,所以寻找到一种可有效地抑制散斑噪声的方法显得非常重要。

根据 Goodman^[3]研究的叠加原理可知,当 M 个不相关的散斑图样在人眼或是探测器的积分时间内进行叠加时,图样的散斑对比度会降低到原来的 $M^{-1/2}$ 。获得独立散斑图样的方法可以大致分为两类:一种为瞬间产生多个散斑图样;另一种为在一定的时间内产生多个散斑图样。使用多个互不相干光源^[4]或特殊激光器^[5-9],可以瞬间产生多个散斑图样;在光路中利用多模光纤^[10-11]或增加扩散器等光学元件^[12-18]改变激光相位、添加马达等动力器件使屏幕机械运动^[19]、使用不同材料改进投影屏幕^[20-21]等方式,在积分时间内产生多个散斑图样。此外,还可以通过算法降低激光的散斑噪声^[22-23]。

国内外的相关公司也申请了相干长度调节的专利,例如通过使用相位干扰元件^[24]、多模光波导^[25]、光谱控制单元^[26]、温度梯度^[27]、调制元件^[28]、多模光纤^[29]等方式降低激光的相干性。研究发现,混沌激光也会对激光的相干长度产生影响^[30-36]。2006年 Peil 等^[33]实现了半导体输出激光相干长度在 130~8 m 内可调,并在彩虹折射实验中消除了散斑噪声^[37]。2008年 Wang 等^[34]研究了 808 nm 的半导体激光二极管在光反馈状态下输出激光相干长度变化的规律。2015年 Redding 等^[35]设计了一个支持多模的 D 型混沌微腔激光二极管,在一个腔内实验实现了 1000 多个相互非相干模的激光,利用混沌微腔激光二极管作为照明光源,实现了无散斑全场成像。2020年 Halpaap 等^[36]研究了通过光反馈或泵浦电流调制诱导低相干发射的传统激光二极管和纳米激光器。虽然以上研究均可以实现散斑抑制的目的,但并未有人对激光显示领域常用的大功率、多模、红光激光二极管进行探究,因此,值得开展相关实验研究此类激光器产生混沌激光后的散斑抑制效果。

本文选用激光显示领域常用的大功率红光激

光二极管,利用光反馈扰动和电混沌信号调制两种方式使激光二极管产生混沌激光,降低激光二极管的相干性,实现了散斑抑制。该方法不会增加机械运动,保持了光路相对的稳定性;在光反馈系统里,仅仅需要在光路中添加反射装置或在已准直光路中的任意元件表面镀上透反膜,即可产生混沌激光,并实现散斑抑制。而调制系统中,仅在激光器泵浦电流添加处使用 Bias-Tee,将调制信号耦合进泵浦电流即可降低光源的相干性。本文提出的混沌激光抑制散斑的方法适用范围更广,可以在不改变现有激光投影仪内部系统光路的情况下使用,并且还能与其他抑制散斑的方法兼容。分别研究了光反馈系统中的偏置电流和反馈强度与调制系统中偏置电流和调制幅度对散斑抑制效果的影响,并对两种方式的抑制效果进行对比。结果表明,通过两种方式产生的混沌激光,都可使激光的散斑对比度有所下降,最终散斑对比度均可降低 0.9 以上,激光器的谱线宽度从 0.92 nm 展宽至 4.6 nm,相干长度从 441 μm 降低至 87 μm 。

2 实验装置及结果

混沌激光抑制散斑实验装置如图 1(a)所示,由混沌源、图样采集与分析系统和混沌光分析系统组成。混沌光经过半波片(HWP1)、偏振分束器(PBS1)之后分为两路:一路进入由中性密度滤波片(NDF)、扩散片(D)、透镜(L1)和 CMOS 相机组成的散斑图样采集系统;另一路进入由透镜(L)、光电探测器(PD)、示波器(OSC)和频谱仪(ESA)组成的混沌光分析系统。其中半波片(HWP1)用来调节进入 CMOS 相机的光强,避免仪器损坏或图片过度曝光,偏振分束器(PBS1)和 1/4 波片(QWP)组成光隔离器防止光反射对实验结果造成影响。

混沌激光由光反馈扰动激光器和电混沌信号调制激光器两种方式产生,分别如图 1(b)和图 1(c)所示。在光反馈方式中,激光二极管输出光经透镜(L4)准直后,经过半波片(HWP2)和偏振分束器(PBS2)再由反射镜(M)反射后耦合进激光二极管,对激光二极管产生扰动并输出混沌激光,反馈强度被定义为反馈光强度与输出光强度的比值,通过半波片(HWP2)和偏振分束器(PBS2)之间的相对偏振角度控制。在电混沌信号调制方式中,电混沌信号经过放大器(AMP)放大之后,由 Bias-Tee 加载至激光二极管驱动电流上,实现对激光二极管的调

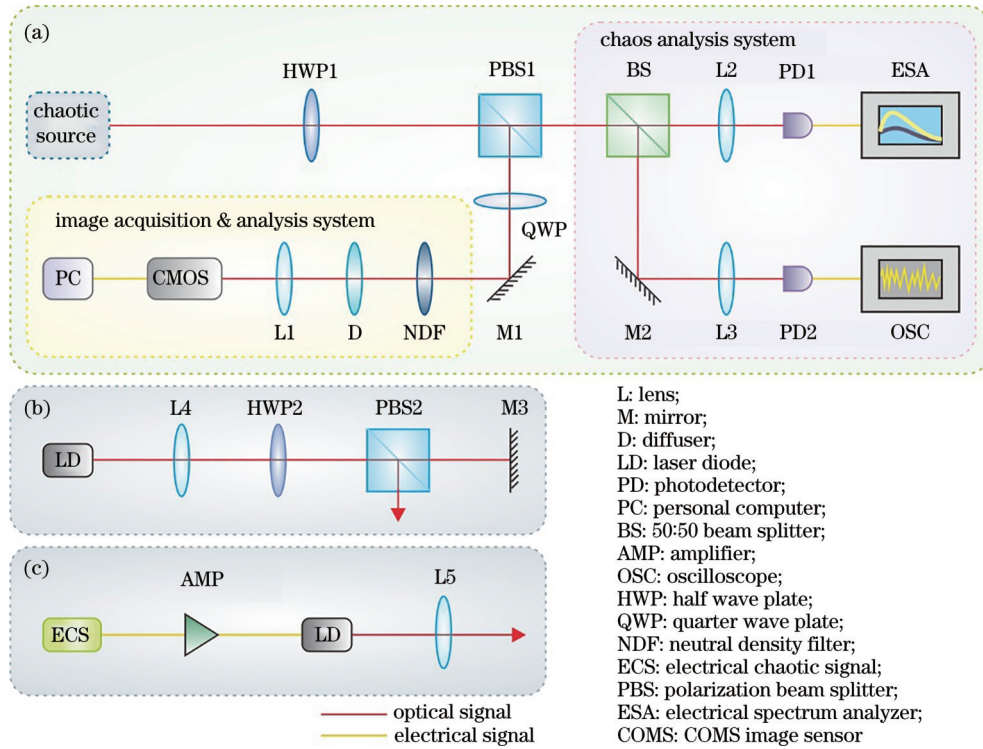


图 1 混沌激光抑制散斑实验系统。(a)实验装置图;(b)光反馈扰动激光器混沌产生实验装置;(c)电混沌信号调制激光器混沌产生实验装置

Fig. 1 Experimental systems of speckle suppression using chaotic lasers. (a) Experimental setup diagram; (b) experimental setup of chaos generation with optical feedback; (c) experimental setup of chaos generation by electrical chaotic signal modulation

制,进而产生混沌激光,最后经过透镜(L5)准直输出混沌光。

实验中混沌光输出的频谱和时序经光电探测器(DET025AL/M, Thorlabs, 美国, 带宽为 2 GHz)转换后分别由频谱分析仪(FSW26, Rohde & Schwarz, 德国, 带宽为 26.5 GHz)和示波器(DPO 2014B, Tektronix, 美国, 带宽为 100 MHz, 采样率为 1 GS/s)进行记录,散斑图样通过 CMOS 图像传感器(STC-MBE132POE, Omron, 日本, GigE 数据传输接口,黑白传感器)采集,根据相关参数的影响以及人眼和散斑测量标准^[38-40],在测量散斑时选用的 CMOS 相机参数设置:光圈 F 值为 5.6,分辨率为 1280 pixel×1024 pixel,尺寸 5.3 μm×5.3 μm,其积分时间设置为 30 ms,CMOS 相机前透镜的焦距为 30 mm,成像透镜与相机之间的距离为 60 mm。实验过程中保持黑暗,避免其他光射入进而影响实验结果。采集到的数据通过计算机(PC)处理,得出光源的散斑图样信息以及混沌状态。激光二极管安装在激光二极管安装座(LDM56, Thorlabs, 美国,带宽调制口为 600 MHz),通过电流源(LDC200C, Thorlabs, 美国)对激光二极管提供电流,温控源

(TED200C, Thorlabs, 美国)使其温度稳定在 25 °C。使用激光投影显示中的多横模激光二极管(LD, HL63193MG, Ushio, 日本)进行实验,其阈值电流 $I_{th} = 188$ mA,中心波长为 638 nm,横磁(TM)模式振荡,电光转换效率为 1.16 W/A,最大输出功率为 1000 mW。使用光谱分析仪(OSA, AQ6370D, YOKOGAWA, 日本,波长范围为 600~1700 nm,分辨率为 0.02 nm)测量了激光的光谱,并通过迈克耳孙干涉仪测量了混沌激光相干长度的变化。激光器的谱线宽度为 0.92 nm,中心波长在 639.5 nm,相干长度在 441 μm。

在有关散斑抑制研究中,通常使用散斑对比度(C)作为评价散斑的方法,具有计算简单、物理意义明确等优点,通常被定义为散斑图样中强度涨落的大小相对于平均光强的度量,

$$C = \frac{\sigma_I}{\bar{I}}, \quad (1)$$

式中: σ_I 表示散斑图样中光强的标准差; \bar{I} 表示光强的均值。

2.1 光反馈产生混沌激光

激光器在光反馈扰动下,输出状态由稳定态、

倍周期态到达混沌态,对应光谱线宽也在逐渐展宽^[30,33-34],改变了激光器的时间相干性,进而可以改变激光器输出的散斑图样。反馈光进入激光器后,直接作用于激光器腔内光场,形成的外腔振荡模式也直接与激光器内部的谐振模式相互作用,模式竞争下最终形成混沌激光输出,且光谱也分立出多个竞争模式,进而实现光谱的展宽和相干长度的缩短。

激光二极管添加光反馈扰动前后输出的时序和

散斑图样如图 2 所示,此时激光二极管的偏置电流设置为 $1.9I_{th}$ 。在无光反馈条件下,激光二极管输出光的时序及其对应状态下采集的散斑图样如图 2(a1)和(b1)所示。从时序图可以看出,激光二极管稳态输出,起伏主要来源于示波器本身的噪声。从散斑图样中可以看出光强分布不均匀,散斑噪声明显,散斑对比度 C 为 1.15。通过光反馈半导体激光器产生混沌之后,通过调节反馈强度可使激光器的光谱线宽展宽至 3.8 nm,所得相干长度在 $120 \mu\text{m}$ 。

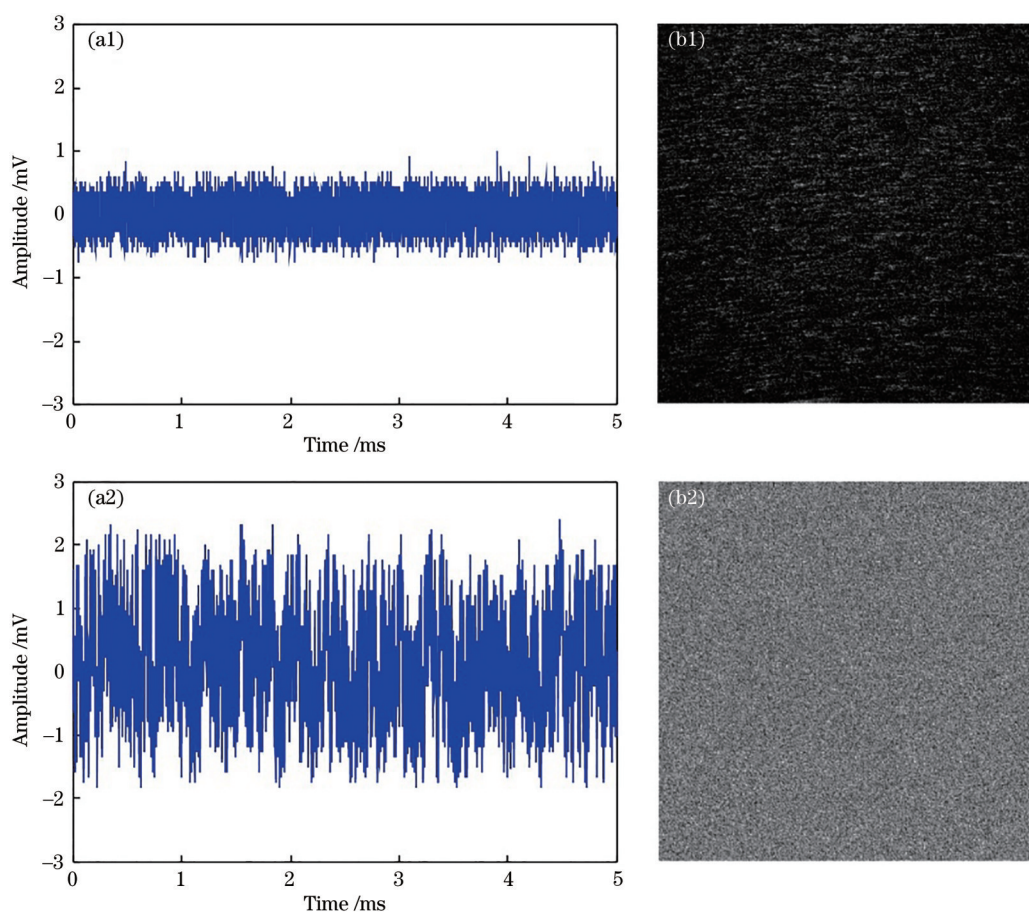


图 2 $I=1.9I_{th}$ 时,光反馈扰动前后激光二极管输出的时序和散斑图样。(a1)(b1)无光反馈扰动;(a2)(b2)反馈强度为 -2.1 dB

Fig. 2 Time series and speckle patterns of the laser diode with and without optical feedback disturbance when $I=1.9I_{th}$.

(a1)(b1) Without optical feedback disturbance; (a2)(b2) feedback strength is -2.1 dB

当反馈强度调至 -2.1 dB 的光反馈扰动时,激光二极管输出的时序及该状态下采集的散斑图样如图 2(a2)和(b2)所示。此时激光二极管输出混沌激光,从图中可以看出时序振幅大幅度增加,其频谱也有一定抬升,但受探测器带宽限制,带宽仅为 2 GHz 。此时散斑图样的光强分布均匀,散斑抑制效果良好,散斑对比度 C 为 0.2。从上述结果中可以看出,激光二极管添加光反馈扰动前后,散斑对比度降低了 0.95,表明光反馈扰动激光二极管产生

混沌方式,可以有效地抑制散斑噪声。

光反馈扰动产生混沌激光方式中,反馈强度和偏置电流对散斑对比度的影响如图 3 所示。激光二极管的偏置电流为 $1.9I_{th}$ 时,激光二极管的散斑对比度随反馈强度的变化如图 3(a)所示。随着反馈强度的增加,散斑对比度呈现先平缓后迅速的下降趋势,从 0.75 下降至 0.2。当反馈强度从 -31.43 dB 增加至 -8.7 dB 时,散斑对比度随反馈强度的增加下降至 0.16;当反馈强度从 -8.7 dB 增

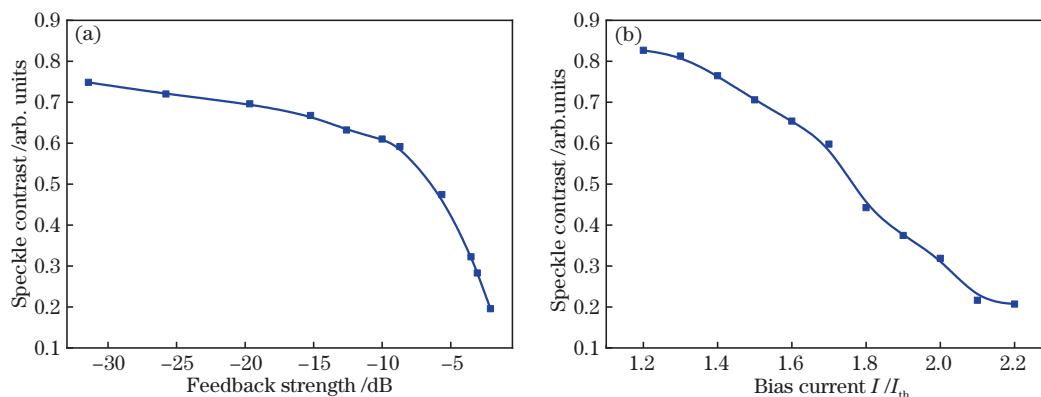


图3 光反馈产生混沌系统中反馈强度和偏置电流对散斑对比度的影响。(a)偏置电流为 $1.9I_{th}$ 时,反馈强度对图样散斑对比度的影响;(b)反馈强度为 -2.1 dB时,偏置电流对图样散斑对比度的影响

Fig. 3 Influence of feedback strength and bias current on speckle contrast in a chaotic system with optical feedback. (a) Influence of feedback strength on speckle contrast when bias current is $1.9I_{th}$; (b) influence of bias current on speckle contrast when feedback strength is -2.1 dB

至 -2.1 dB时,散斑对比度随反馈强度的增加快速下降,由 0.59 降至 0.2 。

随后,将反馈强度固定在 -2.1 dB,分析了激光的散斑对比度随偏置电流的变化规律,如图3(b)所示。此时散斑对比度随着偏置电流的增加散斑对比度呈现近似线性下降的趋势。当激光二极管的偏置电流从 $1.2I_{th}$ 增加至 $2.2I_{th}$ 时,散斑对比度降低了 0.62 。

2.2 电混沌信号调制产生混沌激光

电混沌信号可以由多种方式产生,例如蔡氏电路、布尔网络、文氏电路等。布尔网络输出的混沌序列具有高带宽、高熵值以及较强鲁棒性的特点。本文中使用了自治布尔网络结构产生频谱带宽为 680 MHz的电混沌信号^[41],将宽带的混沌电信号调制到激光器上,使光谱同样被调制展宽,相干性降低。探究电混沌信号调制对激光二极管的散斑图样对比度的影响。

激光二极管在混沌信号调制前后输出的时序和散斑图样如图4所示。激光二极管的偏置电流设置为 $1.9I_{th}$ 。在无电混沌调制时,激光二极管输出光的时序及该状态下采集的散斑图样如图4(a1)和(b1)所示。从图中可以看出该状态下,激光二极管稳定输出,且散斑图样的噪声明显,散斑对比度 C 为 1.15 。激光二极管在调制幅度为 4.8 V的混沌信号调制下,输出的时序和散斑图样如图4(a2)和(b2)所示,受电混沌信号调制的影响,激光二极管输出时序振幅明显增加,输出混沌光。此时散斑图样更加清晰平滑,光强分布更加均匀,散斑抑制效

果明显,该图样的散斑对比度 C 为 0.14 。在电混沌信号的调制下,激光二极管的散斑对比度降低了 1.1 。在增加电混沌信号调制之后,激光二极管的谱线宽度最大可展宽至 4.6 nm,随着调制深度的增加,其相干长度从 194 μm 缩短至 87 μm 。

实验中,将电混沌调制信号的调制幅度设置在 $1.2\sim 6$ V之间稳定增加,保证电混沌信号对激光二极管进行了有效的调制,从而进一步分析了激光器偏置电流和调制幅度对激光的散斑图样对比度的影响,如图5所示。当固定激光二极管的偏置电流时,随着调制信号幅度的增加,激光二极管输出混沌光的时序幅度也明显增加;当固定调制信号的幅度时,激光二极管输出混沌光的时序振幅随着偏置电流的增加而相对减弱。

当激光二极管的偏置电流为 $1.9I_{th}$ 时,激光二极管的散斑图样对比度随调制幅度的变化如图5(a)所示。随着调制幅度的增加,散斑对比度降低至 0.14 后趋于平稳。激光二极管的调制幅度从 1.2 V增加至 4.4 V时,散斑对比度下降了 0.17 ;当调制幅度高于 4.4 V之后,散斑对比度在 0.14 附近浮动。激光二极管在调制幅度为 4.8 V的混沌调制下,激光二极管的散斑图样对比度随偏置电流的变化如图5(b)所示。从图中可以看出,随着偏置电流的增加,散斑对比度开始缓慢下降而后快速降低,最后趋于稳定。偏置电流从 $1.1I_{th}$ 增加至 $1.4I_{th}$ 时,散斑对比度只降低了 0.03 ,此时偏置电流对散斑对比度影响相对较小。当偏置电流高于 $1.4I_{th}$ 时,散斑对比度随着偏置电流的增加快速下降,偏置电流增至

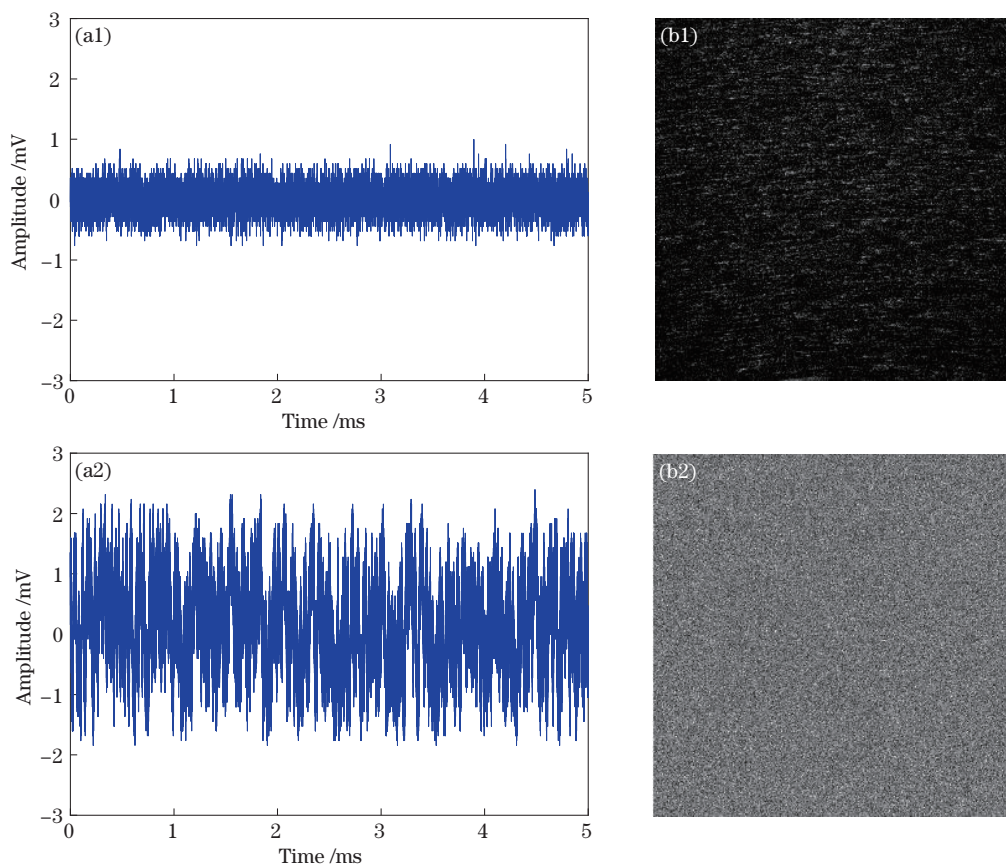


图 4 $I = 1.9I_{th}$ 时,电混沌信号调制前后激光二极管输出时序及散斑图样。(a1)(b1)无混沌信号调制;(a2)(b2)混沌信号调制幅度为 4.8 V

Fig. 4 Time series and speckle patterns of laser diode with and without electrical chaotic signal modulation when $I=1.9I_{th}$. (a1)(b1) Without chaotic signal modulation; (a2)(b2) modulation amplitude of chaotic signal is 4.8 V

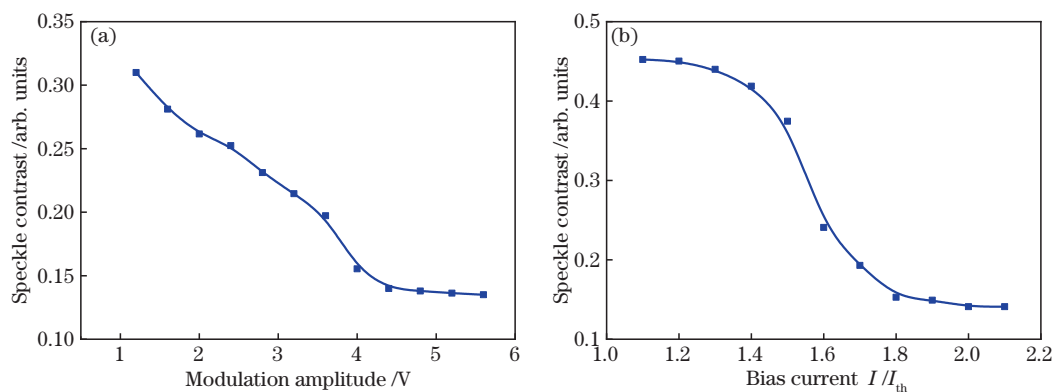


图 5 电混沌信号调制产生混沌系统中调制幅度和偏置电流对散斑对比度的影响。(a)偏置电流为 $1.9I_{th}$ 时,调制幅度对图样散斑对比度的影响;(b)调制幅度为 4.8 V 时,偏置电流对图样散斑对比度的影响

Fig. 5 Influence of modulation amplitude and bias current on speckle contrast in a chaotic system using electrical chaotic signal modulation. (a) Influence of modulation amplitude on speckle contrast when bias current of the laser diode is $1.9I_{th}$; (b) influence of bias current on the speckle contrast when modulation amplitude of laser diode is 4.8 V

$1.8I_{th}$ 时降低了 0.3,此时偏置电流对散斑对比度影响较大。当偏置电流高于 $1.8I_{th}$,激光二极管的散斑图样对比度变化趋于平缓,基本维持在 0.14。

3 结 论

本文利用光反馈和电混沌信号调制两种方式使激光二极管产生混沌激光,降低了激光二极管的

相干性,进而有效地抑制了激光散斑。光反馈系统中研究了偏置电流和反馈强度对散斑抑制的影响,发现反馈强度对散斑对比度影响较大,调节反馈强度可使散斑对比度降低 0.55;同时还分析了调制系统中偏置电流和调制幅度对散斑抑制效果的影响,通过调制可使散斑对比度降至 0.14。对激光显示中常用的大功率红光二极管进行多次重复性实验发现,利用光反馈扰动产生混沌激光的方式,在偏置高于 $2.1I_{th}$,反馈强度高于 -2.1 dB 的参数设置下,能够有效地抑制散斑,激光二极管的散斑对比度值可从无反馈时的 1.15 降低到 0.2,降低了 0.95。激光二极管利用电混沌信号调制产生混沌激光的方式中,在高于 $1.8I_{th}$ 偏置电流,电混沌信号的调制幅度高于 4.4 V 下,能够更好地抑制散斑,其散斑对比度可以降至 0.14,降低了 1.1。通过运用混沌激光,激光器的光谱可以从 0.92 nm 展宽至 4.6 nm,其相干长度从 441 μm 缩短至 87 μm 。目前的散斑抑制研究中主要使用小功率、单模、稳定的激光器,该研究为其提供了一种抑制激光散斑的新思路。

参 考 文 献

- [1] Chellappan K V, Erden E, Urey H. Laser-based displays: a review[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(25): F79-F98.
- [2] Xu Z Y. Large colour gamut display: the new generation of display technique[J]. *Physics*, 2010, 39(4): 227-231.
许祖彦. 大色域显示: 新一代显示技术[J]. *物理*, 2010, 39(4): 227-231.
- [3] Goodman J W. Speckle phenomena in optics: theory and applications[M]. Englewood: Roberts and Company, 2007: 1-48.
- [4] Zhang S T, Gao W H, Zhao P F, et al. Laser speckle reduction due to angular diversity introduced by 2D laser diode array[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1): 0102005.
张圣涛, 高文宏, 赵鹏飞, 等. 激光阵列光源角度多样性抑制散斑方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0102005.
- [5] Yu N N, Choi J W, Kang H, et al. Speckle noise reduction on a laser projection display via a broadband green light source[J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 3547-3556.
- [6] Burdukova O A, Konyshkin V A, Petukhov V A, et al. Low-coherence dye laser with an intracavity radiation diffuser[J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 11453-11467.
- [7] Redding B, Choma M A, Cao H. Speckle-free laser imaging using random laser illumination[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(6): 355-359.
- [8] Yao Y, Knox W H. Speckle-free femtosecond red-green-blue (RGB) source from a fiber laser driven spectrally efficient two zero dispersion wavelength fiber source[J]. *Optics Express*, 2015, 23(1): 536-544.
- [9] Xu L H, Wang Y F, Jia Y F, et al. Research progress of low-coherence laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823008.
徐林海, 王宇飞, 贾宇飞, 等. 低相干性激光的研究进展[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823008.
- [10] Mehta D S, Naik D N, Singh R K, et al. Laser speckle reduction by multimode optical fiber bundle with combined temporal, spatial, and angular diversity [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(12): 1894-1904.
- [11] Jia Q Y, He F T. Speckle homogenization in laser projection display[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(3): 400-403.
贾琼瑶, 贺锋涛. 激光投影显示中散斑均化问题的研究[J]. *激光技术*, 2013, 37(3): 400-403.
- [12] Lapchuk A, Pashkevich G, Prygun O, et al. Very efficient speckle suppression in the entire visible range by one two-sided diffractive optical element[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(5): 1481-1488.
- [13] Liang C Y, Zhang W, Rui D W, et al. Beam homogenized shaping and speckle suppression in laser projection display system using liquid crystal on silicon[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1201001.
梁传祥, 张巍, 芮大为, 等. 基于硅基液晶实现激光投影显示系统匀光整形和散斑抑制[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1201001.
- [14] Du T Y, Kong Y, Qian X L, et al. Suppression of speckle noise in digital holography with spatial and temporal domain depolarization[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 22266-22274.
- [15] Fu H Y, Liu W Q, Wei Z L, et al. Speckle reduction using rotating random micro-lens array in laser display[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(2): 359-364.
付瀚毅, 刘伟奇, 魏忠伦, 等. 转动随机微透镜阵列对激光显示中散斑的抑制[J]. *液晶与显示*, 2015, 30(2): 359-364.
- [16] Ma X H, Wang A T, Ma F, et al. Speckle reduction

- using phase plate array and lens array[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3(1): 190036.
- [17] Deng L X, Dong T H, Fang Y W, et al. Speckle reduction in laser projection based on a rotating ball lens[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 135: 106686.
- [18] Kuratomi Y, Sekiya K, Satoh H, et al. Speckle reduction mechanism in laser rear projection displays using a small moving diffuser[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, 27(8): 1812-1817.
- [19] Rawson E G, Nafarrate A B, Norton R E, et al. Speckle-free rear-projection screen using two close screens in slow relative motion[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1976, 66(11): 1290-1294.
- [20] Redding B, Allen G, Dufresne E R, et al. Low-loss high-speed speckle reduction using a colloidal dispersion[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(6): 1168-1172.
- [21] Chen D, Leby M S, Jachimowicz K E. Non-speckle liquid crystal projection display: US6122023A[P/OL]. (2000-09-19) [2021-05-01]. <https://patents.google.com/patent/US6122023A>.
- [22] Liu J, Huang X H, Wu J H, et al. Adaptive total variation speckle denoising method based on sine-cosine decomposition[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1004004.
刘吉, 黄晓慧, 武锦辉, 等. 基于正余弦分解的自适应全变分散斑去噪方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1004004.
- [23] Qiu Y, Tang C, Xu M, et al. Shearlet-transform-based improved total variation speckle denoising method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(2): 021003.
邱岳, 唐晨, 徐敏, 等. 基于剪切波变换的改进全变分散斑去噪方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(2): 021003.
- [24] Chen Z X. Laser spot suppression device and suppression method of laser projection systems: CN102681198A[P]. 2012-09-19.
陈致晓. 激光投影系统的激光光斑抑制装置及其抑制方法: CN102681198A[P]. 2012-09-19.
- [25] Omar S, Nicolas D. Speckle removal for a laser scanning projector: CN102292664A[P]. 2011-12-21.
奥马尔·斯库利, 尼古拉斯·德沙尔姆. 激光扫描投影仪的散斑去除: CN102292664A[P]. 2011-12-21.
- [26] Fan Y Y, Zhao J S, Wu Y T, et al. Spectral dispersion principle-based method and device for adjusting laser coherence length: CN104752947A[P]. 2015-07-01.
范元媛, 赵江山, 吴月婷, 等. 一种基于光谱色散原理调节激光相干长度的方法和装置: CN104752947A[P]. 2015-07-01.
- [27] Wu L, Lin J M, Ren C. A visible light semiconductor laser with broadband output: CN102064473A[P]. 2011-05-18.
吴砺, 林江铭, 任策. 一种宽带输出的可见光半导体激光器: CN102064473A[P]. 2011-05-18.
- [28] Wu L, Ling J W, Ma Y J, et al. A method to reduce laser speckle effect: CN101425656A[P]. 2009-05-06.
吴砺, 凌吉武, 马英俊, 等. 一种减少激光散斑效应的方法: CN101425656A[P]. 2009-05-06.
- [29] Wu L, Ling J W, Chen Y P, et al. Optical structure and manufacturing method for reducing laser speckle effect: CN101539666A[P]. 2009-09-23.
吴砺, 凌吉武, 陈燕平, 等. 减少激光散斑效应的光学结构及制造方法: CN101539666A[P]. 2009-09-23.
- [30] Soriano M C, García-Ojalvo J, Mirasso C R, et al. Complex photonics: dynamics and applications of delay-coupled semiconductor lasers[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2013, 85(1): 421.
- [31] Schwefel H G L, Türeci H E. A chaotic approach clears up imaging[J]. *Science*, 2015, 348(6231): 189-190.
- [32] Cao H, Chriki R, Bittner S, et al. Complex lasers with controllable coherence[J]. *Nature Reviews Physics*, 2019, 1(2): 156-168.
- [33] Peil M, Fischer I, Elsäßer W. Spectral broadband dynamics of semiconductor lasers with resonant short cavities[J]. *Physical Review A*, 2006, 73(2): 023805.
- [34] Wang Y C, Kong L Q, Wang A B, et al. Coherence length tunable semiconductor laser with optical feedback[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(5): 969-973.
- [35] Redding B, Cerjan A, Huang X, et al. Low spatial coherence electrically pumped semiconductor laser for speckle-free full-field imaging[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(5): 1304-1309.
- [36] Halpaap D, Marconi M, Hernandez R, et al. Experimental study of speckle patterns generated by low-coherence semiconductor laser light[J]. *Chaos: an Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2020, 30(6): 063147.
- [37] Peil M, Fischer I, Elsäßer W, et al. Rainbow refractometry with a tailored incoherent semiconductor laser source[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89

- (9): 091106.
- [38] Roelandt S, Meuret Y, Craggs G, et al. Standardized speckle measurement method matched to human speckle perception in laser projection systems[J]. Optics Express, 2012, 20(8): 8770-8783.
- [39] Cheng W Z, Tong Z M, Jia S T, et al. Laser speckle reduction using motionless image conduits[J]. Optical Review, 2018, 25(1): 143-148.
- [40] Huang Q, Duan X Y, He Y W, et al. Optical lens designed for speckle measurement based on human eyes resolution cells on speckle pattern induced by laser projector[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 112: 229-235.
- [41] Zhang Q Q, Zhang J G, Li P, et al. Boolean-chaos-based physical random number generator[J]. Journal on Communications, 2019, 40(1): 201-206.
- 张琪琪, 张建国, 李璞, 等. 基于布尔混沌的物理随机数发生器[J]. 通信学报, 2019, 40(1): 201-206.