

# 采用单像素桶探测器的数字全息成像方法

龙涛 王玉荣 江山 孟祥锋 杨修伦

山东大学信息科学与工程学院山东省激光技术与应用重点实验室, 山东 济南 250100

**摘要** 针对面阵探测器的靶面尺寸较小、分辨率较低,并且某些波段的面阵探测器难以制作等问题,提出基于单像素桶探测器的数字全息成像方法。该方法采用光寻址空间光调制器(OASLM)作为数字全息与计算幻影成像的中间转换器件,待成像物体的全息图作为写入光直接写入 OASLM;用可以动态刷新、携带有参考矩阵编码信息的结构光作为电寻址空间光调制器的读出光读出全息图,并由单像素桶探测器探测其光强;该光强信号与参考矩阵进行关联运算,经由计算幻影成像算法得到重建全息图;再根据数字全息成像再现算法得到待成像物体的再现像。通过原理分析和模拟实验验证了该方法的可行性。

**关键词** 全息;幻影成像;空间光调制器;单像素桶探测器;关联运算

**中图分类号** O438 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.100901

## Digital Holographic Imaging with Single Pixel Bucket Detector

Long Tao Wang Yurong Jiang Shan Meng Xiangfeng Yang Xiulun

*Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Technology and Application, School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China*

**Abstract** In order to solve the problem that the plane-array detectors have small size of target surface, low resolution and difficult to make in certain wavelengths, a digital holographic imaging method with single pixel bucket detector is proposed. In this scheme, an optically addressed spatial light modulator (OASLM) works as a conversion device between the digital holography system and computational ghost imaging system. The hologram of object to be imaged is used as the writing light and written directly into the OASLM. The written hologram is readout and retrieved by using computational ghost imaging procedure, in which an electrically addressed spatial light modulator is utilized to produce a sequence of updateable, computer-generated, and independent reference matrix. And a single pixel bucket detector is used to collect the intensity of the readout beam. The associated operation of light intensity signal and reference matrix is conducted, the reconstructed hologram is obtained through calculating the phantom imaging algorithm. The reproductive image of the object is obtained using the digital holographic reconstruction algorithm. The feasibility of the proposed method is proved by theory analysis and simulation experiment.

**Key words** holography; ghost imaging; spatial light modulator; single pixel bucket detector; correlated algorithm

**OCIS codes** 090.1995; 090.2890; 230.6120

## 1 引言

数字全息(DH)<sup>[1-2]</sup>采用面阵光电探测器记录全息图、并基于光波衍射传播原理采用数值计算方法再现物光波。与传统光学全息相比,数字全息不需要化学或物理显影定影过程,并且可以定量获得物光波的振幅

**收稿日期:** 2016-05-30; **收到修改稿日期:** 2016-06-28; **网络出版日期:** 2016-09-22

**基金项目:** 中国科学院空间主动光电技术重点实验室开放课题(2016-2017)

**作者简介:** 龙涛(1994—),男,硕士研究生,主要从事幻影成像及数字全息等方面的研究。

E-mail: 2540959950@qq.com

**导师简介:** 王玉荣(1965—),男,博士,教授,主要从事数字全息与光电检测等方面的研究。

E-mail: yrw@sdu.edu.cn(通信联系人)

和相位信息,因此,具有制作成本低、成像速度快、再现灵活、易于光电集成和小型化等优点,特别适用于光电成像、显示及精密检测<sup>[3-6]</sup>。近年来,随着计算机技术特别是面阵光电探测器件的发展,数字全息技术及其应用研究受到越来越多的关注。但在实际应用中还存在以下两个问题:1)面阵光电探测器的靶面尺寸和分辨率还远低于光学全息记录介质,使数字全息的成像分辨率、视场及其应用领域受到较大限制;2)在某些波段(如红外、太赫兹等),因受到材料和工艺等方面的限制,目前还难以制作出用于数字全息记录的具有较大尺寸和较高分辨率的面阵探测器件。计算幻影成像(CGI)<sup>[7-8]</sup>是基于光场关联特性和符合测量的一种新型成像技术。与采用具有空间分辨能力的面阵探测器的传统成像方式不同,计算幻影成像采用不具有空间分辨能力的单像素桶探测器,特别适用于大尺寸、高分辨率面阵探测器难以制作或者价格非常昂贵的波段和应用领域。在数字全息与幻影成像相结合方面,Clemente等<sup>[9]</sup>将幻影成像中的单像素探测和数字全息相结合,提出单像素数字幻影全息术,采用相移干涉和零差方法提取待测物体的振幅和相位信息;Zhang等<sup>[10]</sup>在相移数字全息中采用单像素探测和压缩感知算法来实现相位物体成像;Zhao等<sup>[11]</sup>在量子轨道角动量纠缠幻影成像中采用前向纠错信道编码(里所码)来提高通过大气湍流成像的性能,进一步提升了全息鬼成像的成像质量。

本文采用光寻址空间光调制器<sup>[12-14]</sup>(OASLM)作为数字全息和计算幻影成像之间的连接和转换器件,将两种技术相结合,提出了一种新的采用单像素桶探测器的数字全息成像方法。在该方法中,数字全息所产生的待成像物体的全息图作为写入光实时写入到OASLM的写入面中;利用计算机控制电寻址空间光调制器(EASLM)产生可以动态刷新、携带有参考矩阵编码信息的结构光作为读出光,将写入OASLM的全息图读出,并由单像素桶探测器探测其积分能量或功率值并存储在计算机中;采用计算幻影成像算法重建全息图,然后利用数字全息波前重建算法得到物光波,进而实现成像、显示与检测。另外,由于光寻址空间光调制器的写入光与读出光可以采用不同波长的光波,因此本文方法还可以实现记录与再现之间的波长转换(例如可以实现红外光波全息记录、可见光波再现全息像)。该方法结合了数字全息和计算幻影成像各自的优点,不仅可以克服数字全息成像分辨率和视场受到面阵光电探测器靶面尺寸和分辨率不足的限制,而且可以解决在某些波段面阵光电探测器难以制作的问题,从而形成新的具有特殊性能或适用于特定应用领域的成像方法。这些特点不仅可以提高数字全息成像的性能,而且可以拓展数字全息技术的应用范围及灵活性。

## 2 原理与实现过程

单像素探测数字全息成像的结构原理光路如图1所示,其中LS为光源,L为透镜,M为反射镜,BS为分束镜,PBS为偏振分束镜,O为待成像物体,OASLM是光寻址空间光调制器,EASLM是电寻址空间光调制器,BD是单像素桶探测器。待成像物体O及电寻址空间光调制器EASLM可以是透射型的、也可以是反射型的,原理图中均以透射型为例。图1中的OASLM和EASLM均以液晶空间光调制器为例,二者均需要线偏振光;EASLM本身已包含起偏器和检偏器(图1中未画出),PBS既作为起偏器又作为检偏器,经PBS反射的竖直线偏振光经OASLM调制后偏振方向发生旋转,其水平分量刚好能透过PBS;根据实际系

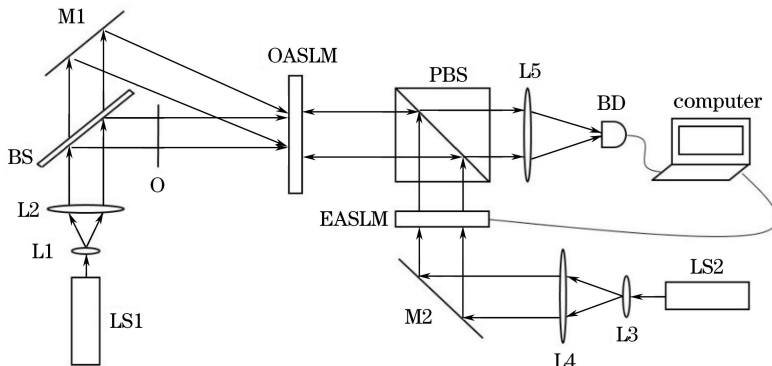


图1 采用单像素桶探测器的数字全息成像原理图

Fig. 1 Schematic diagram of digital holographic imaging with single pixel bucket detector

统中所采用空间光调制器的类型和工作原理不同,这一部分光路及所采用的器件会有所不同。

## 2.1 全息图的实时写入和读出

在图 1 所示系统结构中, OASLM 及其左边光路是全息图产生和写入部分。LS1 光源出射的相干光波经透镜 L1 和 L2 扩束准直和分束器 BS 分束分成两束, 一束经物体 O(反射或透射)作为物光波  $O(x, y)$ , 另一束经反射镜 M1 反射作为参考光波  $R(x, y)$ , 二者在光寻址空间光调制器 OASLM 的写入面叠加干涉, 干涉条纹的强度分布为

$$I_H(x, y) = |O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 + O^*(x, y)R(x, y) + O(x, y)R^*(x, y), \quad (1)$$

该干涉图即为全息图, 作为写入光实时写入到 OASLM 中。当物光波与参考光波的夹角为  $0^\circ$  时为同轴全息, 当物光波与参考光波存在一定的夹角时为离轴全息。

LS2 光源出射的光波经透镜 L3 和 L4 扩束准直并经反射镜 M2 反射后入射到 EASLM 调制 EASLM 上, 设入射到 EASLM 上的光波为  $R_E(x, y)$ 。计算机将预先生成的编码矩阵或随机矩阵信号序列  $M_n(x, y), n=1, 2, \dots, N$ , 依次加载到 EASLM 上, 在编码矩阵或随机矩阵信号驱动下, EASLM 对入射到其上的光波  $R_E(x, y)$  进行调制, 调制后的出射光波  $R'_{E,n}(x, y)$  可表示为

$$R'_{E,n}(x, y) = \alpha R_E(x, y) M_n(x, y), \quad (2)$$

式中  $\alpha$  表示 EASLM 的调制效率。该出射光波经自由空间或光学成像系统衍射传播并经偏振分束器 PBS 反射后入射到 OASLM 的读出面上, 设到达 OASLM 读出面上的光波为  $R''_{E,n}(x, y)$ , 可以由  $R'_{E,n}(x, y)$  采用光波衍射理论通过计算得到, 即

$$R''_{E,n}(x, y) = R'_{E,n}(x, y) * h(x, y), \quad (3)$$

式中  $*$  是卷积运算符,  $h(x, y)$  是从 EASLM 出射面到 OASLM 读出面的光波衍射传播点扩展函数。光波  $R''_{E,n}(x, y)$  从 OASLM 中读出全息图时被全息图  $I_H(x, y)$  调制, 设调制后的读出光波为  $R''_{E,n,H}(x, y)$ , 可表示为

$$R''_{E,n,H}(x, y) = \beta R''_{E,n}(x, y) I_H(x, y), \quad (4)$$

式中  $\beta$  表示 OASLM 的写入-读出转换效率。

## 2.2 采用计算幻影成像方法重建数字全息图

在图 1 所示系统结构中, OASLM 及其右边光路构成全息图读出和计算幻影成像系统。设(1)式所示的全息图  $I_H(x, y)$  在 OASLM 中的写入保持时间为  $T_{OS}$ , 在该时间内基于(2)式完成全息图的读出。设在该时间内用于驱动 EASLM 的编码矩阵或随机矩阵信号序列  $M_n(x, y) (n=1, 2, \dots, N)$  依次刷新  $N$  次。对于其中的第  $n$  次, (4)式所示的被全息图  $I_H(x, y)$  调制后的读出光波  $R''_{E,n,H}(x, y)$  透过偏振分束器 PBS、再经透镜 L5 会聚后由单像素桶探测器 BD 探测, 单像素桶探测器 BD 探测到的光能量或功率大小为

$$B_n = \iint |R''_{E,n,H}(x, y)|^2 dx dy. \quad (5)$$

$N$  次探测共得到  $N$  个探测值  $B_n (n=1, 2, \dots, N)$ 。采用计算幻影成像方法<sup>[7-8]</sup>得到全息图  $I_H(x, y)$  的重建全息图  $G_H(x, y)$  为

$$G_H(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (B_n - \langle B \rangle) |R''_{E,n}(x, y)|^2 = \langle B |R''_{E,n}(x, y)|^2 \rangle - \langle B \rangle \langle |R''_{E,n}(x, y)|^2 \rangle, \quad (6)$$

式中  $\langle \cdot \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N$ ,  $|R''_{E,n}(x, y)|^2$  是由(3)式入射到 OASLM 写入面上的光波场的强度分布。(6)式是探测数据  $B_n$  和  $|R''_{E,n}(x, y)|^2$  的关联运算。理论上, 当探测次数  $N \rightarrow \infty$  时, 由计算幻影成像方法得到的重建全息图会无限接近原全息图, 即  $G_H(x, y) = I_H(x, y)$ 。实际应用中的  $N$  不可能无限大, 所需要的探测次数  $N$  主要与所采用的编码矩阵或随机矩阵序列  $M_n(x, y)$  的特性有关, 选用合适的矩阵并采用适当算法(如压缩感知算法等)可以大大降低探测次数。只要关联运算结果  $G_H(x, y)$  足够逼近原全息图  $I_H(x, y)$ , 就可以由  $G_H(x, y)$  采用数字全息波前重建算法<sup>[14]</sup>重建待测物体的物光波, 从而实现对待测物体的成像、显示和检测。

在完成一次全息图写入和读出过程中, 全息图  $I_H(x, y)$  在 OASLM 中的稳定保持时间  $T_{OS}$ 、EASLM 的刷新时间(周期)  $T_E$ 、以及单像素桶探测器 BD 的探测时间(周期)  $T_D$  应当满足下面的匹配关系

$$T_{OS} \geq NT_E, \quad (7)$$

$$T_E \geq N'T_D, \quad (8)$$

式中  $N$  是 EASLM 的刷新次数;  $N'$  是在一次刷新过程中单像素桶探测器 BD 的探测次数,  $N'$  大于等于 1, 当  $N'$  大于 1 时, 需要对多次探测结果取平均。

### 3 模拟实验及结果分析

采用 Matlab 软件进行模拟实验, 验证上述采用单像素桶探测器的数字全息成像方法。

设光源 LS1 为相干光源, 其波长为  $0.6328 \mu\text{m}$ 。待成像物体如图 2(a) 所示, 其像元数为  $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ , 每个像元大小即物面抽样间隔为  $8 \mu\text{m}$ 。采用离轴全息, 平面参考光波  $R(x, y)$  与物光波  $O(x, y)$  在  $x$  轴方向的夹角为  $1.3^\circ$ , 在  $y$  方向的夹角为  $0^\circ$ ; 图 2(b) 所示是参考光波  $R(x, y)$  和物光波  $O(x, y)$  在 OASLM 写入面上形成的干涉条纹即全息图  $I_H(x, y)$ 。采用离轴数字全息再现算法<sup>[15-16]</sup>由全息图  $I_H(x, y)$  直接得到的待成像物体的再现像如图 2(c) 所示。上述过程模拟了传统离轴数字全息的记录与再现。

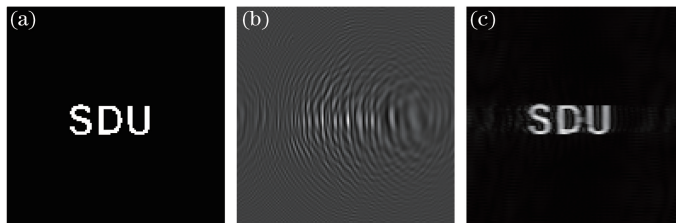


图 2 传统数字全息。(a)待成像物体;(b)全息图  $I_H(x, y)$ ;(c)物体的再现像

Fig. 2 Traditional digital holography. (a) Object under imaging; (b) hologram  $I_H(x, y)$ ; (c) reconstructed image

在计算幻影成像过程中, 图 2(b) 所示的全息图作为写入光写入到 OASLM 中。设 EASLM 的调制效率  $\alpha$  和 OASLM 的写入-读出转换效率  $\beta$  均为 1, EASLM 的刷新次数和单像素桶探测器 BD 的探测次数相等, 即取  $N=20000, N'=1$ 。输入参考矩阵  $M_n(x, y)$  为像元值在 0 到 1 之间取值的随机高斯矩阵, 其像元数为  $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ , 图 3(a) 所示是  $N$  个参考矩阵之一; 图 3(b) 和 (c) 所示分别是经 EASLM 纯相位调制和纯振幅调制后再衍射传播到 OASLM 读出面上的光场的强度分布  $|R''_{E,n}(x, y)|^2$ 。在纯相位调制和纯振幅调制情况下, 根据(6)式由计算幻影成像算法得到的重建全息图分别如图 4(a) 和 (b) 所示。图 4(c) 所示是将参考矩阵投影成像到 OASLM 读出面上、由计算幻影成像算法得到的重建全息图。由图 4(a)~(c) 所示的重建全息图并采用离轴数字全息再现算法得到的物体再现像分别如图 5(a)~(c) 所示, 图 5 所示结果证明了所提方法的可行性。为了进行定量比较, 表 1 给出了以上 3 种情况下的再现像相对于传统数字全息再现像[图 2(c)]的峰值信噪比 PSNR, 由此可见, 纯相位调制情况下再现像的质量最好, 这一点从图 5 中也可以直观地看出。

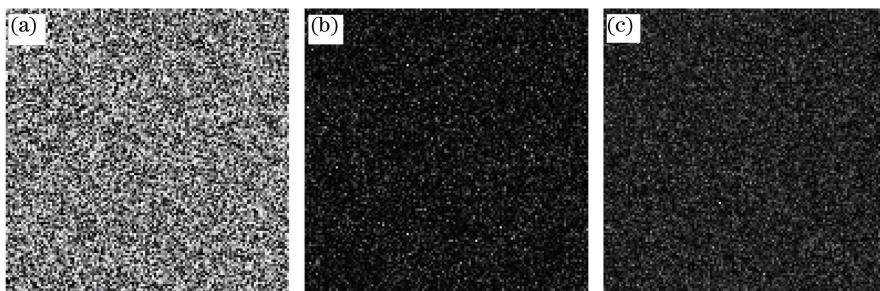


图 3 (a)  $N$  个参考矩阵之一;(b)纯相位和(c)纯振幅调制下 OASLM 读出面上的光强度分布

Fig. 3 (a) One of  $N$  matrixes; optical intensity distribution on read-out plane of OASLM with (b) phase-only modulation and (c) amplitude-only modulation



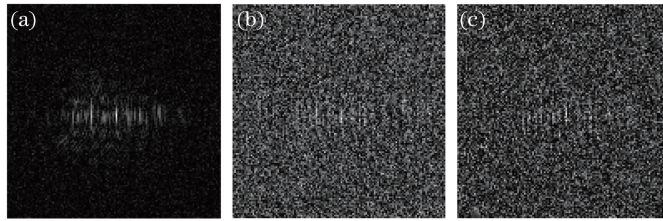


图 4 由计算幻影成像算法得到的重建全息图。(a)纯相位调制;(b)纯振幅调制;(c)参考矩阵投影成像  
Fig. 4 Reconstructed holograms by CGI method. (a) Phase-only modulation; (b) amplitude-only modulation;  
(c) projection imaging of reference matrixes

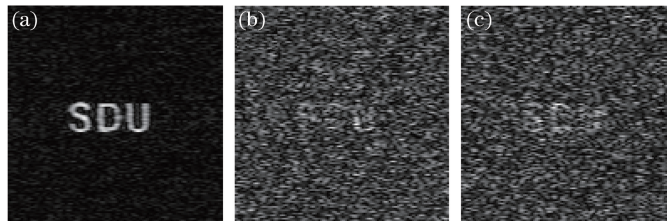


图 5 采用离轴数字全息再现算法得到的物体再现像。(a)纯相位调制;(b)纯振幅调制;(c)参考矩阵投影成像  
Fig. 5 Reconstructed image of object by off-axis digital holography reconstruction method.  
(a) Phase-only modulation; (b) amplitude-only modulation; (c) projection imaging of reference matrixes

表 1 再现像相对传统数字全息再现像的 PSNR

Table 1 PSNR of reconstructed image versus traditional digital holographic reconstruction

	Phase-modulation	Amplitude-modulation	Matrix projection
PSNR	23.7331	11.679	11.456

## 4 结 论

采用 OASLM 作为数字全息和计算幻影成像的中间连接与转换器件,结合两种技术的特点,提出了一种新的采用单像素桶探测器的数字全息成像方法。该方法不仅可以克服因面阵探测器靶面尺寸较小和像元较大给数字全息成像分辨率和视场造成的限制,而且可以解决某些波段因受材料和工艺限制导致的面阵探测器难以制作的问题;另外,基于 OASLM 写入光与读出光可以不同波长的特性,还可以实现记录与再现之间的波长转换。这些特点有助于提高数字全息成像的性能,并拓展数字全息技术的应用范围及灵活性。通过原理分析和模拟实验验证了该方法的可行性;在模拟实验中,分别采用计算幻影成像中常用的纯相位调制、纯振幅调制及参考矩阵投影成像 3 种方式,模拟实验结果验证了该方法的可行性,且当探测次数相同时,纯相位调制情况下物体再现像的质量最好。因受目前实验条件限制,没有给出实验验证结果,其实验研究将在后续工作中开展。

OASLM 作为数字全息与幻影成像的连接和转换器件,是本文方法中的关键器件,其分辨率、靶面大小及响应时间对物体再现像的成像质量具有非常大的影响。OASLM 没有像元结构,具有很高的分辨率和较大靶面<sup>[17-18]</sup>,响应速度普遍较快<sup>[19]</sup>,可以满足实现本文方法的需要。随着材料科学与光电技术的进一步发展,OASLM 的性能参数还将不断提升,本文方法的优点将得到更好的体现。

## 参 考 文 献

- Goodman J W, Lawrence R W. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. Appl Phys Lett, 1967, 11(3): 77-79.
- Schnars U, Jüptner W. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction[J]. Appl Opt, 1994, 33(2): 179-181.
- Javidi B, Tajahuerce E. Three-dimensional image processing and recognition[C]. SPIE, 2000, 4043: 2-10.
- Wang Yunxin, Wang Dayong, Yang Yishu, et al. Application and analysis in the biomedicine field using digital

- holographic technology[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209002.
- 王云新, 王大勇, 杨怡姝, 等. 数字全息技术在生物医学成像和分析中的应用[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209002.
- 5 Wu Yingchun, Wu Xuecheng, Cen Kefa. Development of digital holography in particle field measurement[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0601001.
- 吴迎春, 吴学成, 岑可法. 数字全息测量颗粒场研究进展[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0601001.
- 6 Santoyo F M, Pedrini G, Schedin S, *et al.* Multi-pulsed digital holography applied to full 3D measurements of dynamic events[C]. SPIE, 2001, 4420: 132-138.
- 7 Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector[J]. Phys Rev A, 2009, 79(5): 053840.
- 8 Shapiro J H. Computational ghost imaging[J]. Phys Rev A, 2008, 78(6): 061802.
- 9 Clemente P, Durán V, Tajahuerce E, *et al.* Single-pixel digital "ghost" holography[J]. Phys Rev A, 2012, 86(4): 041803.
- 10 Zhang L H, Liang D, Li B, *et al.* Study of key technology of ghost imaging via compressive sensing for a phase object based on phase-shifting digital holography[J]. Laser Physics Letters, 2015, 12(7): 075202.
- 11 Zhao S M, Wang B, Gong L Y, *et al.* Improving the atmosphere turbulence tolerance in holographic ghost imaging system by channel coding[J]. J Lightwave Technology, 2013, 31(17): 2823-2828
- 12 Huang D H, Fan W, Li X C, *et al.* Performance of an optically addressed liquid crystal light valve and its application in optics damage protection[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(7): 072301.
- 13 Loiseaux B, Huignarda J P, Chanteloup J C, *et al.* Optically addressed liquid crystal light valves for an adaptative control of amplitude and phase of laser beam[C]. SPIE, 1998, 3297: 37-43.
- 14 Ye Biqing. The characteristics of liquid-crystal spatial light modulator and its application in holographic measurement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- 叶必卿. 液晶空间光调制器特性研究及在全息测量中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- 15 Li Junchang, Song Qinghe, Picart Pascal, *et al.* Discussion of wavefront reconstruction algorithm of off-axis digital holography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209008.
- 李俊昌, 宋庆和, Picart Pascal, 等. 离轴数字全息波前重建算法讨论[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209008.
- 16 Picart P, Leval J. General theoretical formulation of image formation in digital Fresnel holography[J]. J Opt Soc Am A, 2008, 25(7): 1744-1761.
- 17 Shrestha P K, Chun Y T, Chu D. A high-resolution optically addressed spatial light modulator based on ZnO nanoparticles[J]. Light Science & Applications, 2015, 4(3): e259.
- 18 Zhao Rongsheng, Chen Xiangning, Xue Junshi, *et al.* Optical correlator with optically addressed liquid crystal light valve[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015, 36(12): 95-98.
- 赵融生, 陈向宁, 薛俊诗, 等. 将光寻址空间光调制器应用于光学相关器[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(12): 95-98.
- 19 Wang Mengyao, Pan Wei, Luo Bin, *et al.* Gray scale response of spatial light modulator incorporating ferroelectric liquid crystals[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(4): 461-465.
- 王梦遥, 潘 炜, 罗 斌, 等. 铁电液晶基空间光调制器的灰度响应特性[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(4): 461-465