

基于数字微镜器件的超振荡光场产生及实验验证

霍英东^{1,2,3}, 曹博³, 陈丹妮³, 田进寿^{1,2}, 于斌^{3*}, 屈军乐³

¹中国科学院西安光学精密机械研究所超快诊断技术重点实验室, 陕西 西安 710119;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³深圳大学光电工程学院, 广东 深圳 518060

摘要 介绍了光学超振荡的原理及设计方法, 利用纯振幅调制的空间光调制器(SLM)-数字微镜器件(DMD), 从实验上获得局部超分辨的超振荡光场, 并采用空间频谱分析的方法进行验证。实验结果表明, 产生的超振荡光场中超振荡区域的特征尺寸为衍射极限的 60%, 经空间频谱的分析可知, 所产生的超振荡光场中并没有超过衍射极限的高空间频率成分产生。

关键词 图像处理; 超分辨; 数字微镜器件; 超振荡; 空间滤波

中图分类号 TN911.73

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0107001

Experimental Generation and Verification of Superoscillatory Optical Field Based on Digital Micromirror Device

Huo Yingdong^{1,2,3}, Cao Bo³, Chen Danni³, Tian Jinshou^{1,2}, Yu Bin³, Qu Junle³

¹ Key Laboratory of Ultra-Fast Photoelectric Diagnostics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;

² University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100049, China;

³ College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract The principle and design method of optical super-oscillation are introduced. A superoscillatory optical field with a local superresolution is experimentally obtained by pure amplitude-modulated spatial light modulator (SLM) and digital micro-mirror device (DMD). The experimental results show that the characteristic size of the superoscillatory field in the generated superresolution optical field is sixty percent of diffraction limit. The analysis of the spatial spectra used to validate the experimental results shows that the superoscillatory optical field does not generate spatial high frequency components beyond the diffraction limit.

Key words image processing; superresolution; digital micro-mirror device; superoscillation; spatial filtering

OCIS codes 100.6640; 230.6120; 070.6110

1 引言

超振荡是指带限函数可以在任意大的区间上发

生相当快的振荡, 其局部振荡频率超过其最大傅里叶频谱分量。Slepian 等^[1]最早发现数学上的超振荡现象, 后来 Berry^[2]和 Aharonov^[3]基于量子力学

收稿日期: 2017-08-02; 收到修改稿日期: 2017-09-11

基金项目: 国家 973 计划(2015CB352005, 2012CB825802)、国家自然科学基金(61335001, 61178080, 61235012, 11004136)、国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ15009203)、广东省自然科学基金项目(2014A030312008, 2017A030310132)、广东高校优秀青年创新人才培养计划项目(2014KQNCX131)、深圳市科技计划项目(JCYJ20150324141711698)、深圳市基础研究项目(JCYJ20170412105003520)、国家留学基金

作者简介: 霍英东(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事超分辨成像方面的研究。E-mail: huoyingdong@email.szu.edu.cn

导师简介: 田进寿(1970—), 男, 博士, 研究员, 主要从事条纹相机和 X 射线分幅成像精密诊断技术方面的研究。

E-mail: tianjs@opt.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: yubin@szu.edu.cn

的原理提出了超振荡的这一概念,并证明光学的超振荡可以实现超分辨^[4]。自此,各种基于超振荡的光学超分辨方法被提出和证实^[5-11]。2007年,Huang等^[5]利用准周期排布的纳米孔阵列获得了半峰全宽为 0.44λ 的聚焦光斑,利用光学超振荡原理实现了超分辨聚焦。2012年,Rogers等^[8]利用环状结构的微器件实现了超分辨聚焦,并用该焦斑扫描样品,获得了基于光学超振荡的超分辨图像。事实上,利用光学超振荡实现超分辨的关键是产生超振荡的光场。前面提到的方法中用于获取超振荡光场的器件都是微纳结构的光学掩模,可以直接产生超振荡的超衍射聚焦。2013年,Wong等^[9]提出了基于空间光调制器(SLM)的超显微镜方案,他们利用频谱面放置的液晶空间光调制器实现了振幅和 π 相位的同时调制,获取了超振荡的点扩展函数,从而实现了实时超振荡超分辨成像。国内方面,严伟教授研究小组将基于微纳结构器件的光学超振荡用于亚波长聚焦和望远系统超分辨成像^[12-14]。

本文介绍了超振荡的原理,采用传输光叠加的方法设计纯振幅调制的超振荡波形,利用振幅型的空间光调制器-数字微镜器件(DMD)实现超振荡光场。通过空间滤波的方法证明其超振荡区域是局部超越超衍射极限的,并且没有超过衍射极限的高空间频率成分产生。

2 超振荡光场的原理及设计

任何一个光学系统的成像分辨率总是要受到衍射极限的限制,这一理论早在19世纪由德国物理学家阿贝提出并证明。阿贝理论认为,之所以存在衍射极限,是因为来自物体的高空间频率的信息不能以传输波的形式传播到远场,光学系统成像面最终接收到的只是物体的低空间频率的信息,从而限制

了系统的分辨率。因此,光学系统可以看成是一个低通的滤波系统,系统可以传输的频域范围在 X 方向上为 $[-k_{x_max}, k_{x_max}]$,其中 $k_{x_max} = k \cdot NA$, NA 为系统的数值孔径, k 为由波长 λ 决定的可传输的空间频率, $k = 2\pi/\lambda$ 。超振荡光场就是利用不同空间频率的可传输光的线性叠加,在感兴趣的区域(ROI)构造局部的超振荡,其频率超越衍射极限的限制(局部空间频率 k_{local} 大于 k_{x_max}),从而实现光学超分辨。

对于一个光学系统,数值孔径为 NA ,入射波长为 λ ,设所需的超振荡波形 $f(x)$ 由 $N+1$ 个不同频率 k_n ($n=0,1,2,\dots,N$)的余弦分量叠加而成,则可以表示为

$$f(x) = \sum_{n=0}^N a_n \cos(k_n x), \quad (1)$$

式中 $k_n = n \frac{2k_{x_max}}{N} - k_{x_max}$, $k_{x_max} = NA \cdot \frac{2\pi}{\lambda}$, a_n 为常系数。一个函数中零点的分布决定了其振荡的快慢,利用传输光的线性叠加来构造超振荡波形的关键就是确定零点的分布^[7],ROI的零点间距即为超振荡光场的特征尺寸。由 $f(x)=0$ 得到了一组关于 a_n 的齐次线性方程组,通过求解这个线性方程组就可以得到常系数 a_n 。实验验证中用到参数如下:光学系统数值孔径 NA 为0.00143,入射激光波长为640 nm,ROI特征尺寸设置为衍射极限的60%,总共用到了5个不同空间频率的传输波(为了使关于 a_n 的方程组有非零解,这里至少需要5个频率分量)。为了获得这样的超振荡波形,在ROI放置4个间距为60%的衍射极限的零点,以原点为中心对称分布;通过求解关于 a_n 的线性方程组得到系数 a_n 。进一步调整零频分量的大小使振幅全部为正,于是得到如图1(a)所示波形,图中的红色虚线表示

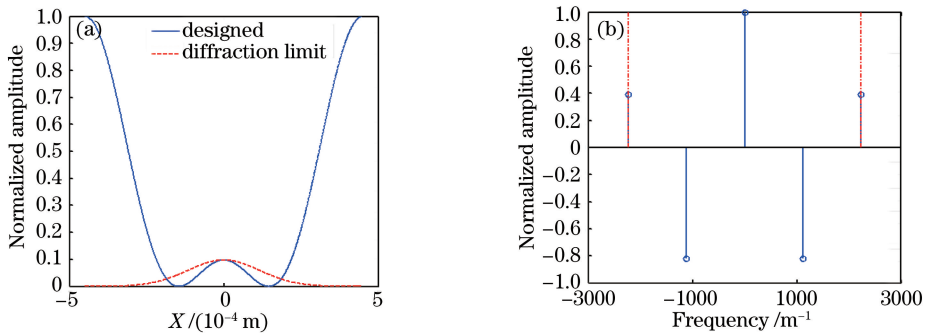


图1 (a)所设计的超振荡波形和衍射极限的对比;(b)构成超振荡的空间频率谱

Fig. 1 (a) Contrast between the designed superoscillatory waveform and diffraction limit; (b) spatial frequency spectrum of the superoscillation

衍射极限对应的艾里斑轮廓;其频率成分如图 1(b) 所示,表明该超振荡波形不含有任何高于衍射极限的频率成分,图中红色虚线表示衍射极限对应的空间频率。

3 实验验证

上面设计的超振荡波形可以在 DMD 上很方便地实现,从而获得超振荡的光场分布。DMD 是一种振幅型的空间光调制器,由多个微米级的振镜构成,振镜可以根据需要进行偏转,实现对入射光束的开 1 和关 0,同时通过 8 位编码的占空比调制可以实现 0~255 的灰度调制,其原理如图 2 所示。

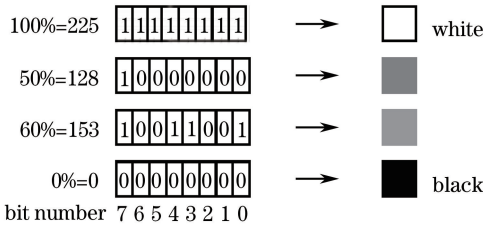


图 2 DMD 灰度调制原理

Fig. 2 Principle of DMD gray-scale modulation

为了分析超振荡光场的空间频谱,搭建了基于 DMD 的超振荡光场产生及 $4f$ 空间频谱分析的实验系统,如图 3 所示。其中,透镜 1 与透镜 2 构成扩束准直系统;透镜 3、透镜 4 以及狭缝构成 $4f$ 空间滤波系统。该系统仅允许空间频率在 k_{x_max} 以下的分量通过低通滤波系统。具体方法是:利用 DMD

产生不同空间频率的余弦条纹,通过调整狭缝宽度来控制可以通过的空间频率范围,如果某个空间频率的光可以通过,则在 CCD 上可以看到该频率对应的余弦条纹。在调整好的空间滤波系统上对超振荡光场进行测试,由 DMD 振幅调制后获得的超振荡光场经过空间滤波系统(加狭缝)后在 CCD 上成像,结果如图 4(a)所示。图 4(b)给出了图 4(a)白色方框中实际测得的强度分布和理论值的对比,可以看出两者在强度上略有差异,这和 DMD 本身的特性以及激光光斑质量有关,但是波谷的位置是基本吻合的。图 5 给出了 60% 的衍射极限对应的余弦条纹在加狭缝和不加狭缝两种情况下在 CCD 上的所成的像,可以看出 60% 的衍射极限对应的空间频率完全不能通过,CCD 上只能看到零频光的均匀背景。以上结果表明,所生成的超振荡光场不包含高于衍射极限的空间频率成分。

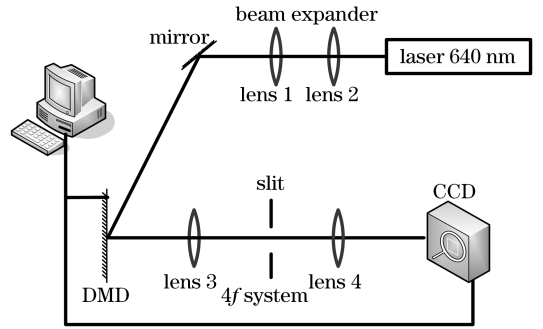


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup

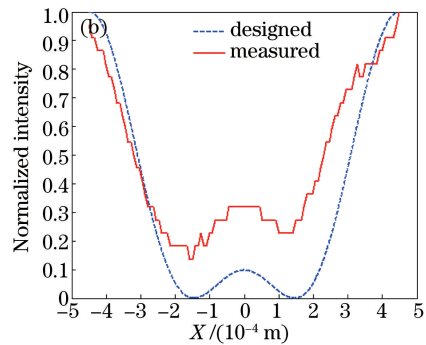
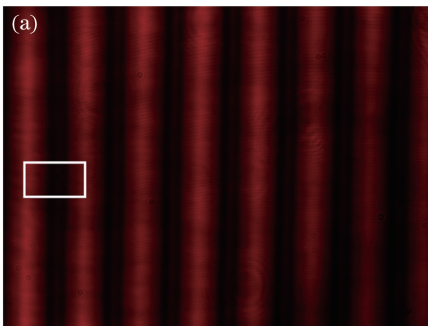


图 4 (a)超振荡光场在 CCD 上的像;(b)实测结果和理论设计的对比

Fig. 4 (a) Image of superoscillatory optical field on CCD; (b) contrast between measured result and designed value

4 结 论

采用零点布置的方法设计了局部超过衍射极限的超振荡波形,其特征尺寸为衍射极限的 60%;利用振幅调制的空间光调制器 DMD 实验上获得了超振荡光场,相比于微纳结构的掩模更加灵活可变,较

振幅相位同时调制的空间光调制器的产生方式更加简单;同时,用 $4f$ 系统构造的空间滤波装置进行的频谱分析,证明了超振荡光场的空间频率谱中并没有高于光学系统截止频率的成分产生。然而,从结果也可以看出 ROI 的能量较低,总的能量利用率也很低,这也是所有超振荡现象共有的特点,并且已经

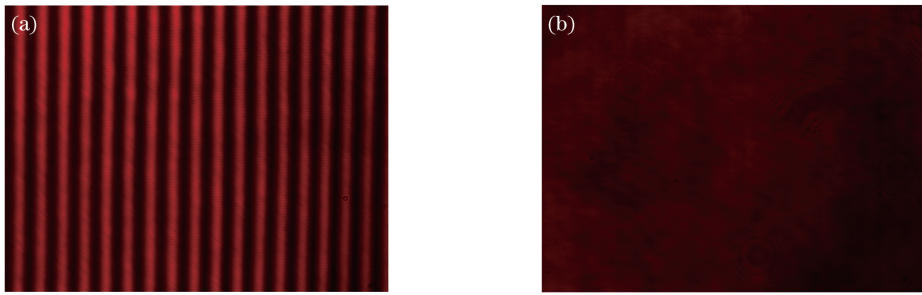


图 5 60%的衍射极限对应的余弦条纹在 CCD 上的像。(a)不加狭缝;(b)加狭缝

Fig. 5 Image of cosine fringe with frequency of 60% diffraction limit on CCD. (a) Without slit; (b) with slit

被证明 ROI 区域以外的能量会随着特征尺寸的减小而增大,如果把中心向外的第 1 暗区看成视场的话,外圈能量也会随着视场增大而增大。因此,在实际应用中还应当结合一些旁瓣抑制方法,综合考虑分辨率、视场和能量利用率。

参 考 文 献

- [1] Slepian D, Pollak H O. Prolate spheroidal wave functions, Fourier analysis and uncertainty: Principle I[J]. Bell Labs Technical Journal, 1961, 40(1): 43-63.
 - [2] Berry M V. Faster than Fourier in quantum coherence and reality [M]. Singapore: World Scientific, 1994: 55-65.
 - [3] Aharonov Y, Anandan J, Popescu S, *et al.* Superpositions of time evolutions of a quantum system and a quantum time-translation machine[J]. Physical Review Letters, 1990, 64(25): 2965-2968.
 - [4] Berry M V, Popescu S. Evolution of quantum superoscillations and optical superresolution without evanescent waves [J]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 2006, 39 (22): 6965-6977.
 - [5] Huang F M, Chen Y F, de Abajo F J G, *et al.* Optical super-resolution through super-oscillations [J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2007, 9(9): S285.
 - [6] Dennis M R, Hamilton A C, Courtial J. Superoscillation in speckle patterns [J]. Optics Letters, 2008, 33(24): 2976-2978.
 - [7] Makris K G, Psaltis D. Superoscillatory diffraction-free beams[J]. Optics Letters, 2011, 36(22): 4335-4337.
 - [8] Rogers E T F, Lindberg J, Roy T, *et al.* A superoscillatory lens optical microscope for subwavelength imaging [J]. Nature Materials, 2012, 11(5): 432-435.
 - [9] Wong A M H, Eleftheriades G V. An optical supermicroscope for far-field, real-time imaging beyond the diffraction limit[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 1715.
 - [10] Huang K, Ye H P, Teng J H, *et al.* Optimization-free superoscillatory lens using phase and amplitude masks[J]. Laser & Photonics Reviews, 2014, 8(1): 152-157.
 - [11] Rogers E T F, Zheludev N I, Optical superoscillations: Sub-wavelength light focusing and super-resolution imaging[J]. Journal of Optics, 2013, 15 (9): 094008.
 - [12] Wang C T, Tang D L, Wang Y Q, *et al.* Super-resolution optical telescopes with local light diffraction shrinkage [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 18485.
 - [13] Tang D L, Wang C T, Zhao Z Y, *et al.* Ultrabroadband superoscillatory lens composed by plasmonic metasurfaces for subdiffraction light focusing[J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 9 (6): 713-719.
 - [14] Tang D L. Investigation of far-field super-resolution imaging method based on super-oscillatory phenomenon [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 37-56.
- 汤东亮. 基于超振荡光场的远场超分辨成像原理和方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016: 37-56.