

热光非定域螺旋相衬成像 (特邀)

王花花¹, 马 健^{1,2}, 杨智新¹, 杜浩然^{1,2}, 高 禄^{1*}, 张 泽²

(1. 中国地质大学(北京)数理学院, 北京 100083;
2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094)

摘 要: 边缘增强作为一种图像处理技术,对于研究物体边界信息有着重要的应用。根据热光鬼成像的关联机制,将鬼成像与螺旋相衬成像技术相结合,把相位物体与涡旋滤光器非定域地放在热光鬼成像系统的探测光路和参考光路中,建立了相位物体边缘增强识别系统。实验结果表明,采用具有分数阶轨道角动量拓扑荷的涡旋滤光器可以实现轨道角动量值在 0~1 范围内的相位物体的边缘渐变增强效果。随着轨道角动量拓扑荷数的增加,相位物体的边缘增强效果会越来越明显。非定域螺旋相衬成像相较于传统的螺旋相衬成像方案,突破了被测物体和涡旋滤光器在同一光路,并且滤光器必须放置在频谱面的空间局域性限制,解除了对主动照明光源相干性的要求,增强了涡旋滤波相衬成像系统的泛化能力。

关键词: 涡旋光; 螺旋相衬成像; 热光关联; 轨道角动量

中图分类号: O43 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210450

Non-local spiral phase contrast imaging with thermal light (*Invited*)

Wang Huahua¹, Ma Jian^{1,2}, Yang Zhixin¹, Du Haoran^{1,2}, Gao Lu^{1*}, Zhang Ze²

(1. School of Science, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;
2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: As an image processing technology, edge enhancement has important applications for studying the boundary information of objects. According to the correlation theory of thermal light ghost imaging, a phase object edge enhancement recognition system was established by combining the ghost imaging with the spiral phase contrast imaging technology. The phase object and the vortex filter were placed in the signal and idle optical path of the ghost imaging system non-locally. The results prove that by using the vortex filter with the fractional orbital angular momentum (OAM) from 0 to 1, the gradual edge enhancement of the phase object can be realized. The higher the OAM topological charge, the more obvious edge enhancement effect will be. Compared with the traditional spiral phase contrast imaging scheme, the limitation of the filter in the spatial frequency spectrum in the spectral plane is broken by the non-local spiral phase contrast imaging scheme. In addition, the coherence requirement of the active illumination light source is released, and the generalization ability of the spiral phase contrast imaging system is enhanced.

Key words: vortex light; spiral phase contrast imaging; thermal light correlation; orbital angular momentum

收稿日期:2021-07-03; 修订日期:2021-08-29

基金项目:国家自然科学基金面上项目(12074350);中央高校基本科研业务费项目(2652018057)

作者简介:王花花,女,博士生,主要从事热光关联及轨道角动量应用方面的研究。

导师(通讯作者)简介:高禄,女,副教授,博士生导师,博士,主要从事量子光学及应用光学方面的研究。

0 引言

光学信息处理技术是利用透镜的傅里叶变换效应对光谱进行滤波,从而提取所需的物体信息。边缘增强是通过在 $4f$ 系统的傅里叶平面上放置适当的滤波器来使高频信号通过,去除低频信号,从而突出显示样本的边缘。涡旋光具有特殊的相位结构,其波阵面既非平面,也非球面,而是具有螺旋相位波前和相位奇点^[1],且奇点处光强为 0。通过将一束激光照射到螺旋相位板 (Vortex Phase Plate, VPP) 上是最常用的产生涡旋光的技术手段^[2]。在边缘增强技术中,将 VPP 充当频谱滤波器,把物体的傅里叶频谱与涡旋光做卷积处理然后输出是去除图像低频信号、产生高质量的边缘增强图像效果的一种有效方法。同时,螺旋相位滤波也可以实现定向选择性边缘增强^[3-4],该应用在生物医学、非定域遥感探测以及相位物体表征等领域具有重要应用价值,越来越多的学者致力于涡旋光滤波的研究,包括涡旋光产生、方向性滤波成像及提高边缘增强图像质量等方面的研究^[5-7]。2015 年,厦门大学陈理想教授研究团队^[8]利用加载在空间光调制器 (Spatial Light Modulator, SLM) 上的可连续变化的分数阶螺旋相位滤波器实现了纯相位物体的渐变边缘增强,并结合分数阶螺旋相位滤波器的轨道角动量谱给出了分数阶轨道角动量,边缘增强可看成是各整数阶螺旋相位滤波的相干叠加的原理解释。

1995 年,马里兰大学的史观华教授研究组通过利用激光泵浦非线性硼酸钡 (BBO) 晶体,通过参数下转换产生纠缠双光子对作为光源,首次实现了纠缠光子成像^[9]。2002 年,美国罗彻斯特大学的 Boyd 教授研究组^[10]使用更易获得的经典光作为光源,实现了经典光源的鬼成像,证明了纠缠光不是实现关联成像的必要条件。鬼成像 (Ghost Imaging, GI) 是一种通过探测光和参考光之间的强度二阶关联测量实现重建目标图像的一种新型的光学成像方法。该方法将物体与滤波器分别放置在探测光路和参考光路中,同时,携带物体信息的探测光由不具有任何空间分辨率的桶探测器记录,参考光由一个具有空间分辨率的面阵探测器搜集记录,因此鬼成像具有非定域性、无透镜、抗湍流等优点。

2008 年,麻省理工学院的 Shapiro 教授提出了计算鬼成像 (Computational Ghost Imaging, CGI) 理论^[11],并证明在 CGI 系统中参考光路在物理上是不必要的,使得单像素关联成像成为可能,推进了鬼成像的实际应用。

2009 年,Jack 等人^[12]将螺旋相位与鬼成像相结合,采用纠缠双光子源,使用两个 SLM 分别加载物体的相位图与产生轨道角动量的相位全息图,然后再进行关联测量,实现了非定域的螺旋相位成像。2020 年,高禄副教授在热光源非定域边缘增强成像方面取得了新进展^[13],实现了基于非相干热光源的螺旋相位成像方案,并且通过贝尔不等式的测量证明其系统在空间自由度上具有经典特性。

文中将螺旋相位成像技术应用于热光源鬼成像系统中,实现了被测物体与螺旋相位滤波器的空间分离,理论分析了分数阶螺旋滤波在该系统中产生边缘增强效果的原理,并通过实验进行证明。理论分析和实验结果显示,热光源非定域分数阶螺旋相位成像方案具有可行性,而且具有显著的优点,有望在实际应用中推广。

1 实验设计

实验装置如图 1 所示,图 1(a) 为传统的 $4f$ 傅里叶频谱滤波成像系统,由波长为 632.8 nm 的氦氖激光器产生的激光经平面镜 M_1 反射后,通过两个偏振片 P_1 、 P_2 调节光强,然后被扩束镜 N 扩束,再经由光阑 Iris 调整其光束尺寸,使得激光照射在物体上之后,光斑能正好覆盖整个物体。物体位于 $4f$ 系统中双凸透镜 L_1 的前焦平面,在 L_1 后焦平面位置放置 VPP。透镜 L_2 的前焦面与 L_1 后焦面重合,电荷耦合探测器 D_1 位于透镜 L_2 后焦面。两个双凸透镜焦距均为 15 cm, D_1 感光面尺寸为 575×767 pixel,每个像素大小为 $8.3 \mu\text{m}$ 。

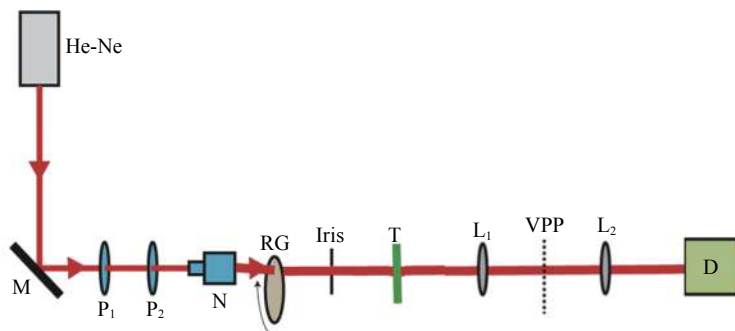
图 1(b) 为热光非定域边缘增强成像系统。由波长为 632.8 nm 的氦氖激光器产生的激光经平面镜 M_1 反射后通过两个光学偏振片 P_1 、 P_2 调节光强,被扩束镜 N 扩束,然后照射在一个缓慢旋转的角速度为 0.013 rad/s 的毛玻璃 (RG) 上产生赝热光,通过调节光阑限制光束尺寸来调整系统的分辨率,再由分束镜 (BS) 分成两路:探测光和参考光。在探测光路中,透镜 L_1 的作用是将毛玻璃产生的赝热光成像到物体所在横截面,透镜 L_2 的作用是将物体成像到电荷耦合探测器 D_1 上;在参考光路中,透镜 L_3 的作用是将毛玻璃产生的赝热光成像在涡旋滤波器横截面,透镜 L_4 的作用是将涡旋滤波器成像在电荷耦合探测器 D_2 上。

实验中采用的被测物体为振幅物体“C”与相位物体“CUGB”,如图 2 所示。振幅物体“C”是由玻璃基底与氧化铬遮光材料制成的元件,字母的尺寸大小为 $0.6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$,线宽为 $100 \mu\text{m}$,白色表示透光部分,

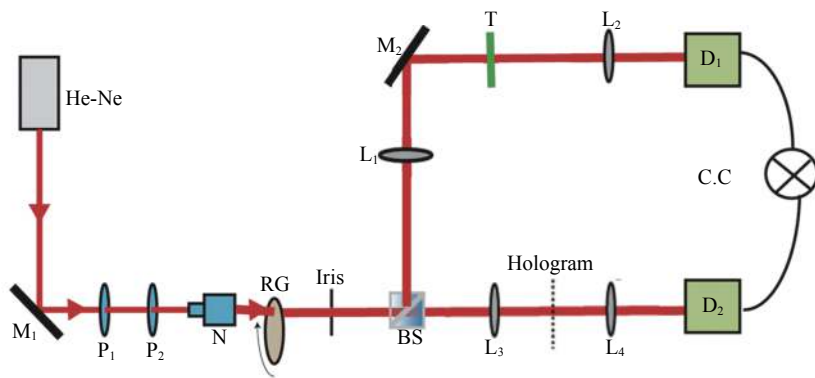
黑色表示不透光部分,如图 2(a)所示。相位物体是由折射率为 1.5163 的 K9 玻璃制成的元件,直径为 3.5 mm 圆上刻蚀“CUGB”字样的凹槽,线宽为 100 μm ,凹槽深度约为 610 nm,白色表示凹槽,黑色表示平面背景部分,如图 2(b)所示。光通过相位物体后,在黑色和白色部分光程不同而产生相位差。对于

波长为 632.8 nm 的氦氖激光通过相位物体“CUGB”,由相位差与光程差之间的关系^[4]可以得出,相位物体“CUGB”在字符与背景的边界正好有 π 的相位差。

首先,在振幅物体“C”上制造了一个缺陷,并将振幅物体“C”与相位物体“CUGB”放置在图 1(a)所示的实验装置中 T 所在位置,实验结果如图 3 所示。图 3(a)



(a) 传统的 4f 系统傅里叶频谱滤波成像系统示意图
(a) Schematic of the traditional 4f Fourier spectrum filtering imaging system



(b) 热光非定域边缘增强成像系统示意图
(b) Schematic of the thermal light non-local edge enhanced imaging system

图 1 边缘增强成像实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup of the edge enhanced imaging

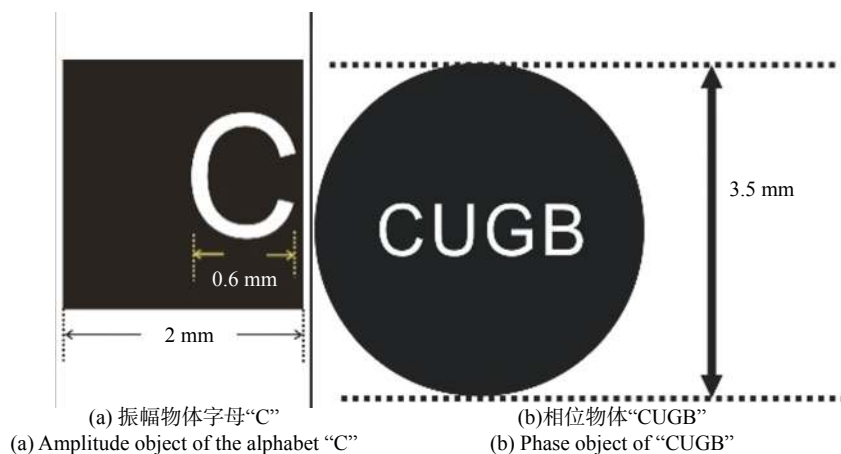


图 2 被测物体示意图

Fig.2 Schematic diagram of the detected objects

和 3(c) 分别为振幅物体与相位物体成像结果图, 图 3(b) 和 (d) 为涡旋光轨道角动量拓扑荷为 1 的傅里叶频谱滤波的边缘增强实验结果图。然后, 利用图 1(b) 所示的实验装置对同样的物体进行非定域热光边缘增强

实验。相位物体和携带分数阶轨道角动量的涡旋滤波器均是通过空间光调制器加载。最后, D_1 和 D_2 电荷耦合探测器采集光场信号, 采集帧数为 3000 帧。实验结果如图 4 所示。

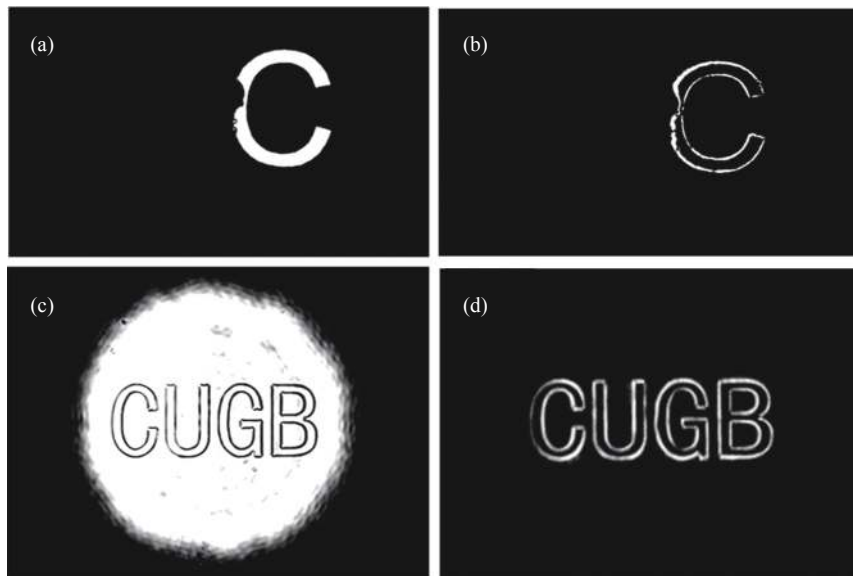


图 3 传统边缘增强成像实验结果。(a) 和 (c) 分别为振幅物体与相位物体成像结果; (b) 和 (d) 为涡旋光轨道角动量拓扑荷为 1 的傅里叶频谱滤波的边缘增强实验结果

Fig.3 Experimental results of the traditional edge-enhanced imaging. (a) and (c) are the traditional images of the amplitude object and phase object, respectively; (b) and (d) are the Fourier spectrum edge enhanced experimental results with orbital angular momentum topological charge of 1

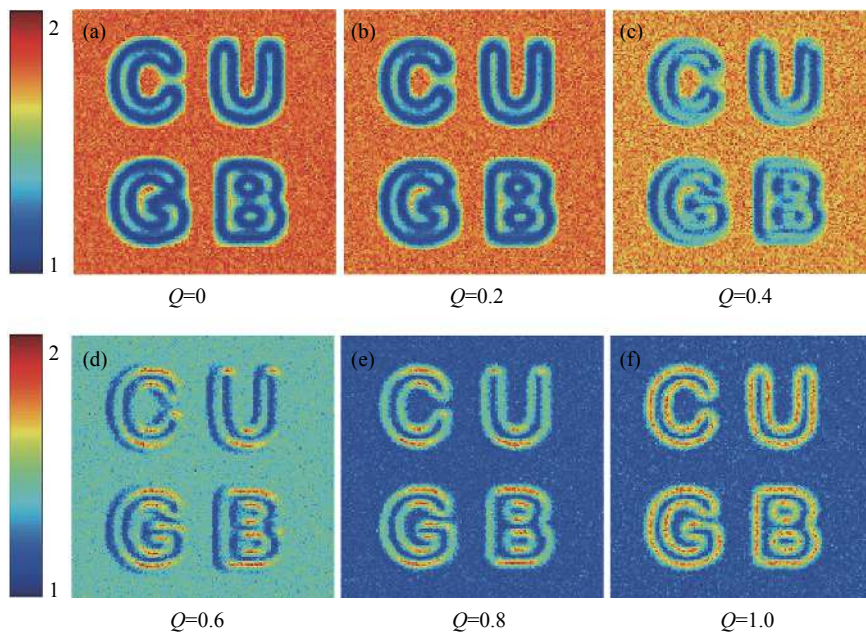


图 4 热光非定域渐变线性边缘增强成像结果。(a)~(f) 分别表示 OAM 滤波器拓扑荷 Q 为 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1 时的非定域渐变线性边缘增强成像结果

Fig.4 Experimental results of the thermal light non-local gradually edge enhanced imaging. (a)-(f) represent the results of the topological charges Q of 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1 respectively

2 实验结果

如图 3 所示,对于激光照射在振幅物体 C 上,边缘部分明显增强,可以看到有明显的缺陷。而对于相位物体,在没有相位变化的部分,光通过之后强度不会发生变化,在有相位变化的字符边缘,由于存在 π 的相位阶跃而发生干涉相消,形成暗的边界轮廓。对 $4f$ 系统的频谱面进行涡旋滤波,可以实现振幅物体与相位物体的边缘增强,这项技术对于识别物体的精细结构有着重要的应用。与透镜成像做对比,使用涡

旋滤波器进行实验,对于振幅物体 C,其边缘亮度明显比其余部分亮度高,物体边缘信息被凸显出来;对于相位物体 CUGB,可以看到非常清晰的字符轮廓,其余部分则比较暗。

如图 4 所示,尽管采用了非相干的热光源,并且被测物体与涡旋滤波器在空间上不在同一光路,依然实现了明显的边缘渐变增强效果。图 5 显示了渐变性边缘增强的结果分析曲线。随着分数阶拓扑荷从 0 增加到 1,其背景亮度逐渐降低,边缘信号的亮度逐渐升高,实现了背景值与边缘信号亮度值的反转。

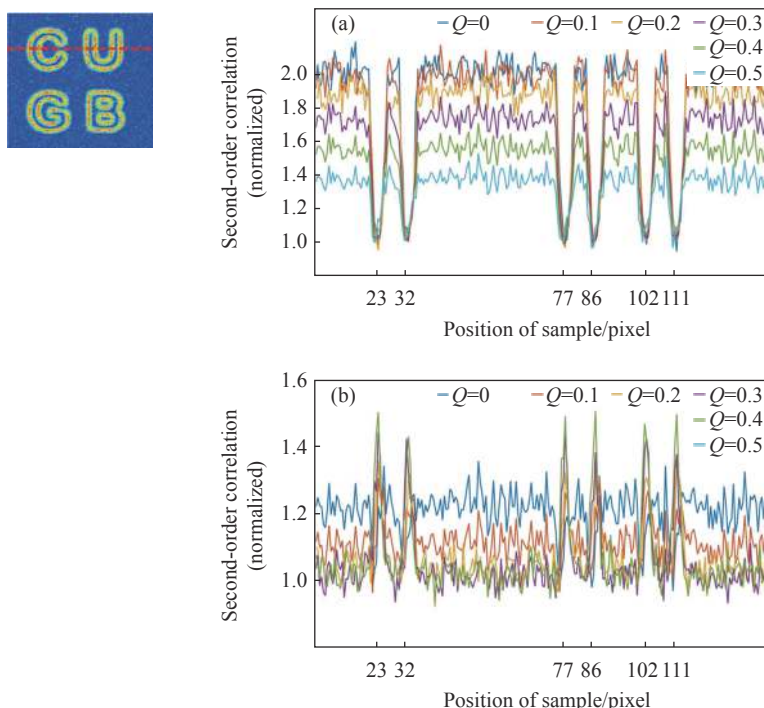


图 5 渐变性边缘增强一维曲线结果图

Fig.5 One-dimensional profiles of the gradually edge enhanced imaging

3 理论分析

以热光关联成像理论为基础,探测面上的二阶关联函数有如下形式^[15]:

$$\Delta G^{(2)} = \langle I_1(r_1)I_2(r_2) \rangle = \langle I_1(r_1) \rangle \langle I_2(r_2) \rangle + \left| \langle E_1^*(r_1)E_2(r_2) \rangle \right|^2 \quad (1)$$

式中: $E_1^*(r_1)$ 、 $I_1(r_1)$ 、 $E_2(r_2)$ 、 $I_2(r_2)$ 分别表示探测器 D_1 和 D_2 的光场复共轭函数和强度分布函数; $\langle \rangle$ 为平均值算符; $|\cdot|^2$ 为模方算符。

根据光场传递函数,热光非定域边缘增强成像方

案光路末端的探测面上的光场表示为:

$$E_i(r_i) = E_0(r_0) \exp\{ik[8f + 1/2f(r_i^2 + r_0^2) - i\pi]\} \times F_i(r_i) \delta(r_i - r_0) \quad (2)$$

式中: $E_0(r_0)$ 表示热光光场函数。当 $i=1$ 时, $F_i(r_i)$ 表示相位物体的传递函数, $F_1 = \exp[i\varphi(r_1)]$; 当 $i=2$ 时, $F_i(r_i)$ 表示分数阶涡旋滤波器的传递函数, $F_2 = \exp[iQ\varphi(r_2)]$, Q 表示分数阶滤波器的 OAM 拓扑荷值。将两个探测面的光场代入热光场二阶关联函数中即可得到相位物体的非定域边缘增强函数:

$$\Delta G^{(2)}(l_d, l_r) = I_0^2 \left\{ 1 + \sum_{l_d} \sum_{l_r} A_{l_d}^2 A_{l_r}^2 \delta(l_d - l_r) \right\} \quad (3)$$

式中: I_0 表示热光光场强度; l_d 、 l_r 分别表示物体和涡旋滤波器的轨道角动量谱的本征值; A_{l_d} 、 A_{l_r} 分别表示物体和分数阶涡旋滤波器在轨道角动量谱上的各个分量的权重, 如图 6 所示。由此可见, 分数阶热光

非定域螺旋相衬成像的二阶关联值可以看成是单独的整数阶涡旋滤波的相干叠加。在没有相位变化的部分, OAM 谱只有 $l=0$ 的低频成分, 因此二阶关联值在 $l=0$ 时最高, 随着分数阶 OAM 拓扑荷值 Q 从 0~1 变化, 在整数阶拓扑荷 $l=0$ 的分量逐渐减小, 因此, 其背景关联值逐渐降低; 相反, 在存在相位阶跃的

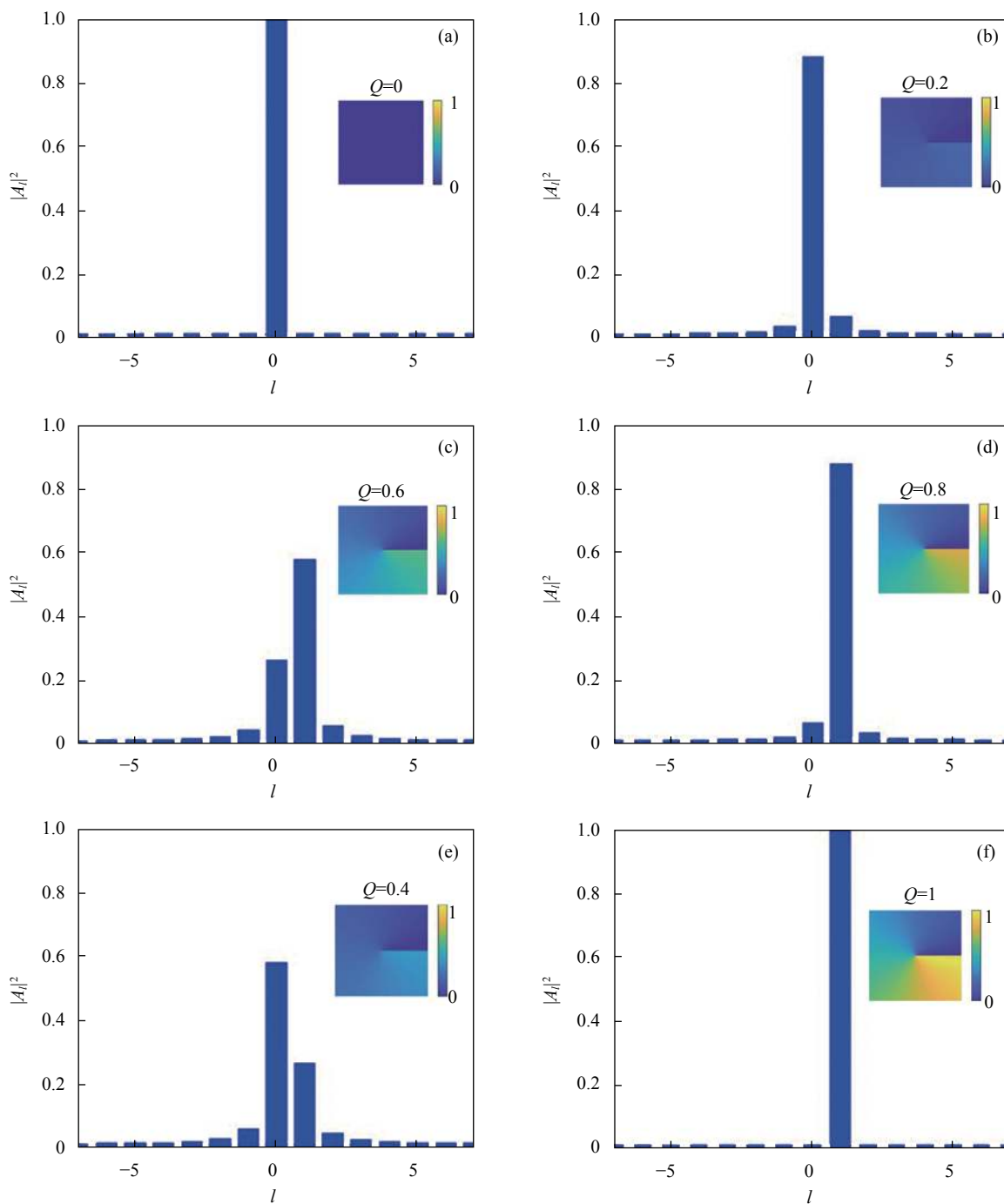


图 6 分数阶轨道角动量谱^[5]

Fig.6 Spectrum of fractional orbital angular momentum^[5]

边缘,二阶关联值在 $l=0$ 时最小,在 $l=1$ 时达到最大。因此出现了边缘信号与背景亮度的反转。

4 结 论

文中将经典的螺旋相衬方法与热光鬼成像方案相结合,设计并实现了相位物体的非定域渐变性边缘增强识别实验。实验结果表明,采用从 0~1 范围内变化的分数阶轨道角动量的涡旋滤波器进行滤波时可实现相位物体的渐变性边缘增强。随着轨道角动量拓扑荷数的增加,相位物体的边缘亮度会逐渐增加,同时背景值逐渐降低。热光非定域螺旋相衬成像方案突破了经典频谱面滤波的传统方法,解除了对主动照明光源的相干性要求,同时实现了涡旋滤波器和被测物体的空间分离探测。该技术对于光信息处理、生物医疗、遥感探测等领域有着重要的应用前景。

参考文献:

- [1] Xu Wenjun, Niu Sujian, Taximaiti Yusupu. Introduce of vortex beam [J]. *Science and Technology & Innovation*, 2019(23): 7-9. (in Chinese)
- [2] Fürhapter S, Jesacher A, Bernet S, et al. Spiral phase contrast imaging in microscopy [J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 689-694.
- [3] Sharma M, Joseph J, Senthilkumaran P. Selective edge enhancement using anisotropic vortex filter [J]. *Applied optics*, 2011, 50(27): 5279-5286.
- [4] Situ Guohai, Pedrini G, Osten W. Spiral phase filtering and orientation-selective edge detection/enhancement [J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2009, 26: 1788-1797.
- [5] Bernet S, Jesacher A, Fürhapter S, et al. Quantitative imaging of complex samples by spiral phase contrast microscopy [J]. *Optics Express*, 2006, 14(9): 3792-3805.
- [6] Guo Chengshan, Han Yujing, Xu Jianbo. Radial Hilbert transform with Laguerre-Gaussian spatial filters [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(10): 1394-1396.
- [7] Jeff S, Robert A, Solyman A. *Complex Light*[M]. Bristol: IOP Publishing, 2017.
- [8] Wang Jikang, Zhang Wuhong, Qi Qianqian, et al. Gradual edge enhancement in spiral phase contrast imaging with fractional vortex filters [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 15826-15826.
- [9] Pittman T, Shih Y, Strekalov D, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. *Physical Review A*, 1995, 52(5): R3429-R3432.
- [10] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(11): 3601.
- [11] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802(R).
- [12] Jack B, Leach J, Romero J, et al. Holographic ghost imaging and the violation of a Bell inequality [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(8): 83602.
- [13] Song Hanquan, Zhang Yingwen, Ren Yuhang, et al. Non-local edge enhanced imaging with incoherent thermal light [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(17): 1-5.
- [14] 张三慧. 大学物理学 [M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [15] 曹德忠. 宏观领域的光场经典关联与量子纠缠[D]. 北京: 北京师范大学, 2004.