

# 基于泵浦空间复振幅调控的目标边缘增强上转换探测

姜嘉琪<sup>1</sup>, 姚秀<sup>1</sup>, 李春宇<sup>1</sup>, 赵波<sup>1</sup>, 史保森<sup>2</sup>, 朱智涵<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院大珩量子调控协同创新中心, 黑龙江 哈尔滨 150080;

<sup>2</sup>中国科学技术大学中国科学院量子信息重点实验室, 安徽 合肥 230026

**摘要** 目标边缘增强上转换探测是一种通过非线性光学手段将红外(或太赫兹等)长波目标图像“上转换”到可见光波段的同时,强化目标图像几何边缘特征的新型上转换探测技术。基于准相位匹配的近红外上转换系统,理论结合实验进一步深入研究了泵浦空间复振幅结构对上转换目标图像特征的影响。通过对比研究定量分析了振幅带通滤波与螺旋相衬对目标图像边缘特征的增强效果,以及各自量子效率的差异。基于研究结论,针对几种典型场景给出了若干可实施的应用建议。

**关键词** 非线性光学; 边缘增强; 空间复振幅调制; 上转换探测; 傅里叶光学; 平顶涡旋光束

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231646

## 1 引言

图像边缘信息是图像最基本的特征信息,对边缘信息进行提取并检测,可以极大地减少图像处理所需的工作量,在机器视觉、生物成像等领域都有十分重要的意义<sup>[1-2]</sup>。光学图像边缘检测技术主要基于4f成像系统,通过在图像空间频谱面处放置合适的空间滤波器来实现成像,其复振幅分布可描述为目标图像与滤波器点扩散函数的卷积。通常情况下,图像中平坦均匀区域的信息主要集中在频谱中的低频区域,而具有较大振幅或相位阶跃的边缘信息则出现在频谱中的高频区域,因此可以在图像空间频谱处放置振幅型高通或者带通环状滤波器,通过滤除图像频谱中的低频部分来实现图像边缘增强。上述方法简单易用且效果显著,但容易丢弃其中含有大量能量的低频信息,导致其能量利用效率低下。

20世纪初,Zernike<sup>[3]</sup>提出了一种在显微镜下观察透明相位物体的方法,通过对图像频谱的零频分量进行振幅衰减并添加 $\pi$ 相位延迟,实现了将物体的相位分布转化为成像平面的振幅分布。该方法不仅提高了能量利用率,又因为相位变化与光的强度呈线性关系,故可以通过光的强弱直接判断物体相位或折射率的变化,开创了相衬技术的先河。但该方法中产生的光晕效应<sup>[4]</sup>会对相衬成像效果产生严重影响,因此需要进

一步完善。2000年,Davis等<sup>[5]</sup>提出了基于纯相位空间光调制的螺旋相衬(SPC)技术,通过在图像空间频谱面上加载拓扑荷 $\ell=1$ 的螺旋相位,实验演示了对一圆形小孔图像信息的无损边缘增强处理(即么正变换)。且随着研究的不断深入,螺旋相位中心奇点位置及分数涡旋对边缘增强效果的影响也得到了验证<sup>[6-7]</sup>。SPC原理可以简述为,携带图像信息的光场在其傅里叶面经螺旋相位调制,使图像中任意相邻两点的振幅或相位梯度为0,但由于存在 $\pi$ 相位差,两点处的光场相干相消。而在边缘及具有较明显振幅或相位梯度的区域,光场无法完美相消,使得边缘部分信号得到了增强。这种基于纯相位调制的SPC技术,具有能量利用率高、对振幅和相位梯度灵敏度高的优点。

上述SPC过程均发生在线性条件下,随着非线性光场调控研究的逐渐深入,非线性领域进展对推动现代光学发展起到至关重要的作用,成为近年来的前沿热点<sup>[8-10]</sup>。2018年,陈理想课题组<sup>[11]</sup>创造性地将SPC技术概念引入到非线性上转换探测领域中。该实验将泵浦光作为螺旋相位的载体,在II型非线性晶体中与信号图像发生和频(即非线性互相关<sup>[12]</sup>),同时实现了对红外图像的频率上转换与边缘增强处理。次年,史保森团队<sup>[13]</sup>将该方案推广到具有更高非线性效率的准相位匹配技术中,并利用0型准相位匹配的窄带特性实现了上转换图像的视场滤波。通过这种非线性物理

收稿日期: 2023-10-13; 修回日期: 2023-11-09; 录用日期: 2023-11-14; 网络首发日期: 2023-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(62075050,11934013,61975047)、黑龙江省自然科学基金(LH2022A016)

通信作者: \*zhuzhihan@hrbust.edu.cn

手段,不仅能够将红外(或太赫兹等)长波目标图像“上转换”到可见光波段,同时还能够强化目标图像的几何边缘特征,为非线性光学图像处理增添了有力的工具。

值得注意的是,在基于非线性的图像处理过程中,由于非线性过程发生在图像频谱面,所以泵浦光的空间振幅分布会对被转换图像频谱施加空间滤波作用。上述两项研究表明泵浦光在非线性和相互作用区域内均已具有中空高斯形空间振幅形貌,即超几何涡旋光束有限口径系统的成像形貌<sup>[14]</sup>。但这会对图像空间频谱施加振幅型带通滤波与螺旋相位调制,即实际物理过程比设想中的非线性 SPC 过程更加复杂。另一方面,由于非线性过程发生在图像频谱面,而信号图像的绝大部分能量均集中在空间频谱中心的低频处,所以泵浦光的中空高斯形振幅分布使得绝大部分信号光没有参与非线性过程,限制了非线性量子效率的上限。因此,基于泵浦光场空间结构调控的非线性 SPC 技术仍

需深化理论研究,特别是涡旋泵浦光场的“环形振幅分布”与“螺旋相位”这两种可能导致非线性边缘增强效果的因素,通过探讨这两种因素分别会对系统性能产生何种影响,进一步探究在原图像上施加不同的空间滤波效果会对非线性边缘增强效果及转换效率产生的影响。本文针对上述核心问题,结合理论和实验,系统性研究“纯振幅”“纯相位”“复振幅”调制对目标边缘增强上转换探测系统性能的影响。

## 2 基本原理

### 2.1 目标边缘增强上转换探测原理

SPC 边缘增强技术的原理如图 1(a)所示,在柱坐标系  $(r, \varphi)$  下,将图像  $E_{in}(r, \varphi)$  进行傅里叶变换得到其空间频谱后,在频谱面上加载拓扑荷  $\ell=1$  的螺旋相位,再对光场进行傅里叶逆变换即可得到边缘增强光场,其表达式为

$$E(r, \varphi) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \left\{ E_{in}(r, \varphi) \right\} \cdot \exp(i\varphi) \right\} = E_{in}(r, \varphi) * K(r, \varphi), \quad (1)$$

式中:  $K(r, \varphi) = ie^{i\varphi}/(2\pi r^2)$  为卷积运算 kernel 函数;  $\mathcal{F}\{\cdot\}$  为傅里叶变换;  $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$  为傅里叶逆变换。式(1)可理解为信号与 kernel 函数发生卷积,在笛卡儿坐标系  $(x, y)$  下可表示为

$$E(x', y') \propto \iint E_{in}(x, y) K(x' - x, y' - y) dx dy \propto \iint E_{in}(x' - r \sin \varphi, y' - r \cos \varphi) \frac{e^{i\varphi}}{r} dr d\varphi. \quad (2)$$

式(2)中  $e^{i\varphi}$  在 0 到  $2\pi$  的角向积分为 0, 导致信号图像光强或相位平坦区域的卷积为 0, 而非平坦区域积分后不为 0, 且强度或相位变化梯度越大, 卷积后光强越大, 由此便展现出空间振幅通过相干增强集中在图像边缘的效果<sup>[15]</sup>。

非线性 SPC 技术是利用光参量过程中的相位传递原理, 将结构泵浦光携带的螺旋相位传递给上转换图像光场。以小信号参量上转换系统为例, 如图 1(b)所示。非线性晶体放置于频率为  $\omega_1$  的入射信号光的频谱面, 即该处信号空间频谱光场  $E_s(r, \varphi; \omega_1) = \mathcal{F}\{E_{in}(r, \varphi; \omega_1)\}$ ; 另一束频率为  $\omega_2$  的涡旋泵浦光场  $E_p(r, \varphi; \omega_2) = R(r; \omega_2)e^{i\varphi}$  与信号光空间频谱在晶体中发生参量上转换并产生频率  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$  的上转换信号空间频谱。对该上转换空间频谱做傅里叶逆变换即可得到上转换边缘增强光场

$$E_{up}(r, \varphi; \omega_3) \propto \mathcal{F}^{-1} \left\{ E_s(r, \varphi; \omega_1) \cdot E_p(r, \varphi; \omega_2) \right\} \propto \mathcal{F}^{-1} \left\{ E_s(r, \varphi; \omega_1) \cdot R(r; \omega_2) \right\} * K(r, \varphi). \quad (3)$$

式(3)表明在非线性过程中, 泵浦场的空间振幅  $R(r; \omega_2)$  (泵浦光通常为空心光束) 会对信号空间频谱光场  $E_s(r, \varphi; \omega_1)$  施加空间滤波, 参与非线性互相关操作, 继而泵浦光场的螺旋相位  $e^{i\varphi}$  通过参量过程传递到滤波后的图像空间频谱处, 使其上转换图像呈现出如式(1)所示的边缘增强效果, 再完成非线性 SPC 处理。因此, 除螺旋相位所带来的相位调制外, 泵浦光场的空间形貌会对目标边缘增强上转换探测系统成像效果造成何种影响, 有待进一步探究。

通过实验逐个分析上述问题: 首先以同时具有环形振幅分布和螺旋相位且能够稳定传播的标准拉盖尔-高斯 (Laguerre-Gaussian) 模式  $LG_0^1$  光束作为泵浦光来复现过往的工作效果, 作为比对研究的基准。其次在转换效率相同的情形下, 将空心光束(具有与  $LG_0^1$  光束相同的振幅分布但不携带螺旋相位)作为泵浦光, 仅

对图像进行“环状振幅空间滤波”, 对比其与基准的成像效果, 探究螺旋相位对图像边缘有无增强效果。然后将携带螺旋相位  $\ell=1$  的高斯及超高斯涡旋光束<sup>[16-18]</sup>作为泵浦光, 探究具有不同空间振幅分布的涡旋光束对目标边缘增强上转换探测成像效果及转换效率的影响。

### 2.2 实验原理及结果分析

如图 2 所示, 本研究基于 type-0 准相位匹配小信号参量上转换 ( $1560 \text{ nm} + 780 \text{ nm} \rightarrow 520 \text{ nm}$ ) 非线性过程搭建实验系统。两束波长分别为  $1560 \text{ nm}$  及  $780 \text{ nm}$  的准连续高斯光束先后经四分之一波片 (QWP) 及半波片 (HWP) 调制为水平偏振后, 再由空间光调制系统制备成信号光及泵浦光<sup>[19]</sup>: 信号光入射至空间光调制器 SLM 1 (10 bit, Santec, 口径尺寸为  $15.36 \text{ mm} \times 9.6 \text{ mm}$ 、分辨率为  $1920 \text{ pixel} \times$

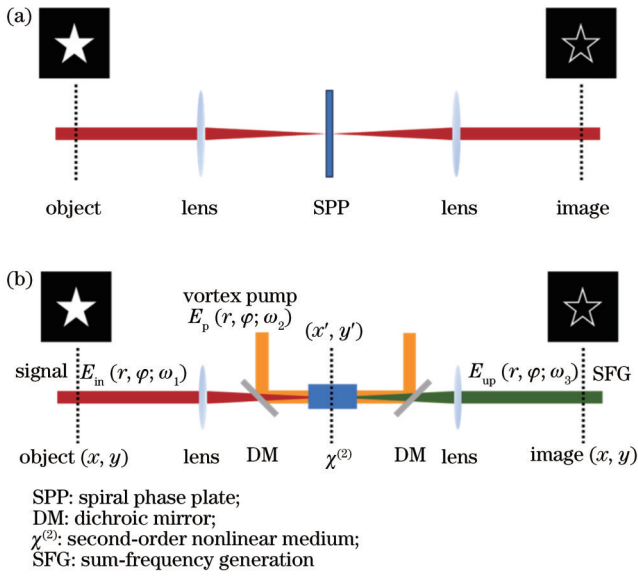


图 1 SPC 边缘增强成像原理。(a)线性光学情形下的 SPC；(b)非线性光学情形下的 SPC  
Fig. 1 Principle of SPC edge enhancement imaging. (a) SPC in linear optics; (b) SPC in nonlinear optics

1200 pixel、像素尺寸为  $7.8 \mu\text{m}$ ), 得到目标图像, 后由傅里叶透镜 L1~L2 所组成的  $4f$  成像系统成像, 傅里叶透镜 L6 将目标图像进行傅里叶变换, 使其空间频谱进入非线性晶体 ( $1 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  type-0 PPKTP, 周期极化磷酸氧钛钾) 中; 另一路水平偏振光入射至 SLM 2 (8 bit, Holoeye Pluto2. 1, 分辨率为  $1920 \text{ pixel} \times$

$1080 \text{ pixel}$ 、口径尺寸为  $15.36 \text{ mm} \times 8.64 \text{ mm}$ 、像素尺寸为  $8 \mu\text{m}$ ), 将泵浦光通过复振幅调制为所需的空域结构, 再经过 L3~L4、L5~L6 组成的两个透镜组后成像到晶体中, 经由二向色镜 DM 1 (透射波段为  $990 \sim 1600 \text{ nm}$ ) 与信号光合束, 发生二阶非线性和频, 产生波长为  $520 \text{ nm}$  的上转换光场, 并使用二向色镜 DM 2 (透射波段为  $350 \sim 650 \text{ nm}$ ) 将其分离出来, 通过傅里叶透镜 L7 进行傅里叶逆变换, 还原得到上转换图像。最后, 由电荷耦合器件 (CCD, Thorlabs, BC106N/VIS/M, 口径尺寸为  $8.8 \text{ mm} \times 6.6 \text{ mm}$ 、分辨率为  $1360 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 、像素尺寸为  $6.45 \mu\text{m}$ ) 接收并记录最终的上转换图像形貌。

实验以图 2 左上角小图为信号靶标, 并将该图像在频谱平面可透射  $98.5\%$  的能量的孔径半径  $w = 0.524 \text{ mm}$  标定为泵浦束腰半径。首先复现过往研究的结果来构建对比分析的基准<sup>[11,13]</sup>。将  $\text{LG}_0^1$  光束作为泵浦光, 对上述两工作的边缘增强效果进行了还原, 在  $w$  及  $2w$  束腰半径下的理论仿真结果及采集到的成像效果如图 3(a) 所示, 可以观察到,  $\text{LG}_0^1$  光束作为泵浦光时, 在其环形空间振幅分布施加的带通滤波处理与螺旋相位带来的 SPC 效果共同作用下, 上转换图像能量均集中在图像的轮廓部分, 且具有相对圆润的边缘分布。当增大束腰半径时, 所转换图像的低频成分更少, 高频成分更多, 导致上转换图像边缘更加锐利。

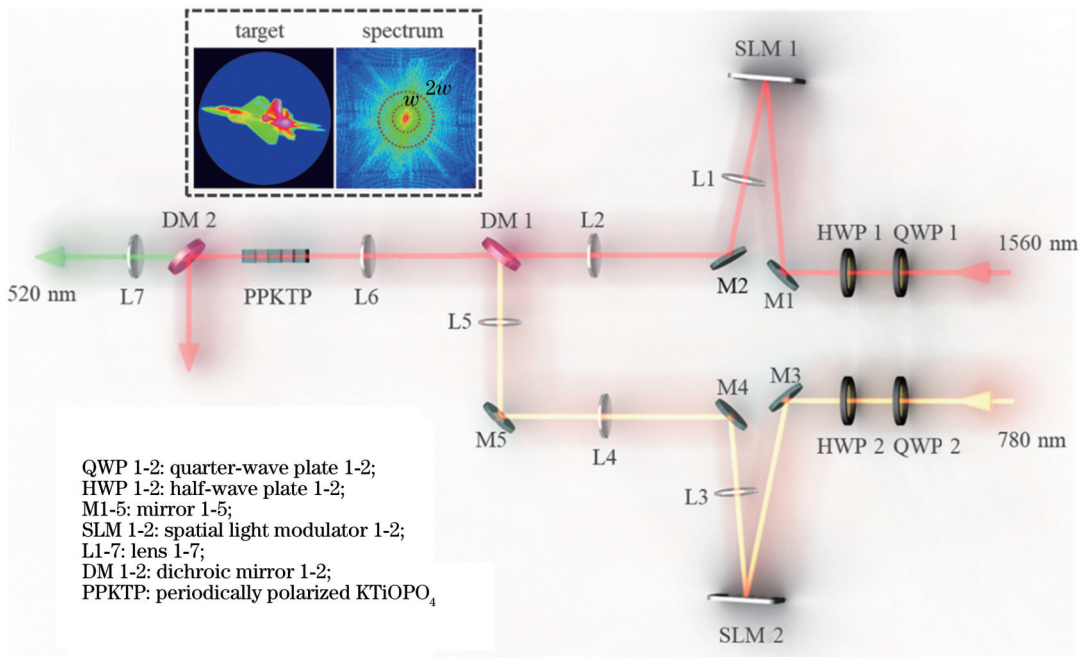


图 2 实验装置图  
Fig. 2 Experimental schematic diagram

在此基础上, 首先使用具有相同空间振幅分布的空心光束 (即剔除螺旋相位的  $\text{LG}_0^1$  光束) 作为泵浦光, 结果如图 3(b) 所示, 虽然无螺旋相位造成 SPC 效应,

但其环状分布的泵浦空间振幅会对上转换图像频谱起到低频陷波器的作用, 即信号图像空间频谱的中高频部分获得更高的非线性转换率, 这使得图像光强变化

较明显的边缘部分及光强有梯度的区域被保留下来。当泵浦光束腰半径增大时,空间频率更高的频谱部分被转化,这使得其边缘变得更加锐利。相较于使用  $LG_0^1$  光束,可以发现,使用空心无涡旋光束作为泵浦光能够在具有相同量子效率的情况下,保留更多易于辨认的图像细节且得到更为明显的边缘增强效果。

上述结果表明,除了螺旋相位会对图像频谱进行相位调制外,泵浦光的空间振幅分布也会对目标图像施加强度调制,从而影响最终的成像效果。为进一步验证该观点,将泵浦光空间振幅调制为高斯及超高斯分布并引入拓扑荷  $\ell=1$  的螺旋相位(后简称为高斯及超高斯涡旋光束),对图像频谱进行低通滤波处理及均匀转换,并对比分析其边缘增强效果。图 3(c)、(d)分

别为  $w$  及  $2w$  束腰半径的高斯与超高斯涡旋光束对应的上转换图像形貌。其中高斯涡旋光束光斑中心区域具有最高的能量密度且沿径向逐渐减小,所以在非线性过程中,图像低频部分相较于高频具有更高的转换效率,该低频增强的滤波效果会使得原图像光强阶跃处梯度变小,因此上转换图像也具有较为平滑的边缘轮廓。并且当束腰半径增大时,由于有更高的高频部分被转换,对原图像低通滤波效果被削弱,上转换图像的边缘也随之变得锐利。当使用具有拓扑荷  $\ell=1$  的螺旋相位的超高斯涡旋光束作为泵浦光时,在其均匀的空间振幅分布内,图像各空间频谱处具有相同的非线性转换效率,使得上转换图像的边缘增强效果十分接近于线性 SPC 的效果。

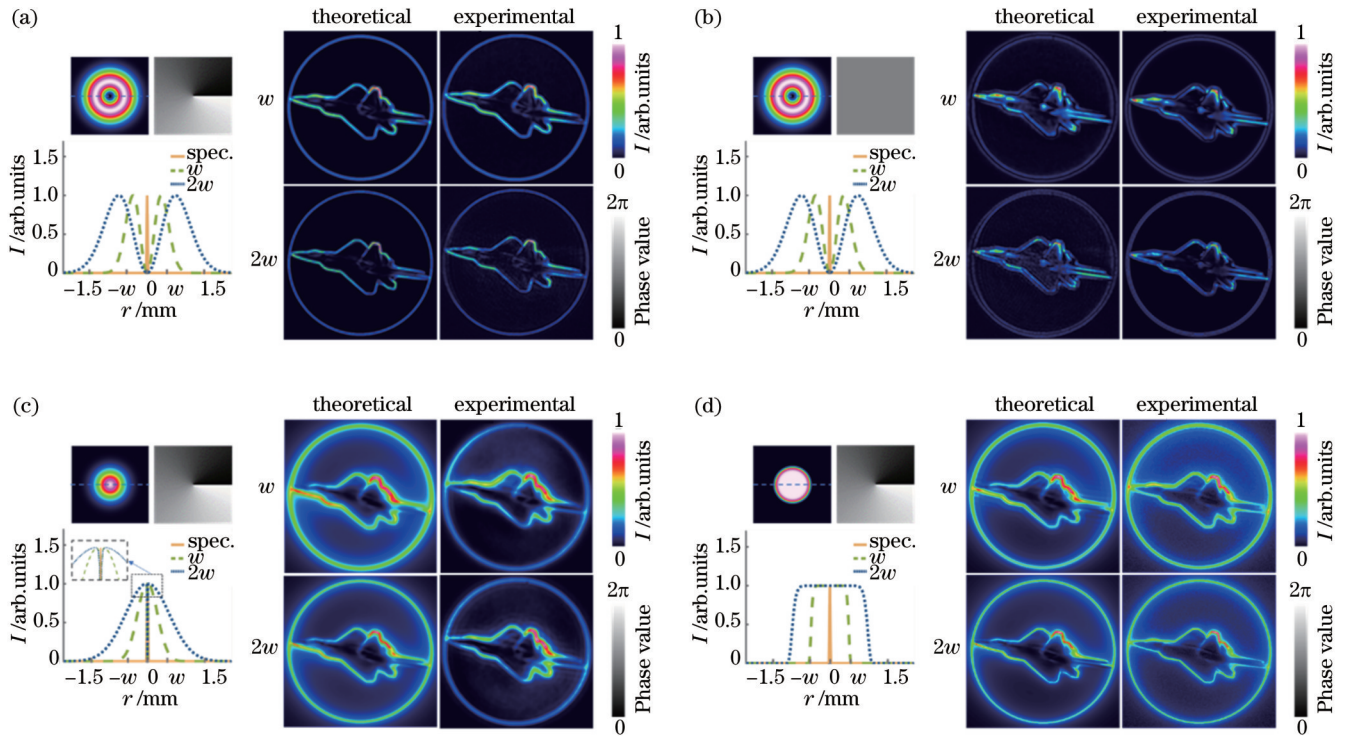


图 3 不同泵浦光束下的非线性边缘增强成像结果,其中曲线图为光束归一化强度  $I$  随径向距离的变化。(a)  $LG_0^1$  光束;(b)空心光束;(c)高斯涡旋光束;(d)超高斯涡旋光束

Fig. 3 Result of nonlinear edge enhancement under different pump beams and curve graph shows variable of normalized beam intensity  $I$  versus radial distance. (a)  $LG_0^1$  beam; (b) hollow beam; (c) Gaussian vortex beam; (d) super-Gaussian vortex beam

此外,相较于能量无损的线性 SPC,在过往非线性 SPC 工作中,泵浦光的环状空间振幅分布使得大部分信号频谱的低频部分都未得到转换,限制了系统量子效率的上限,削弱了 SPC 的优势。而高斯与超高斯涡旋光束同样具有拓扑荷  $\ell=1$  的螺旋相位,但高斯与超高斯涡旋光束和信号光低频部分的空间重叠面积更大,因此会具有更高的上转换量子效率。基频图像的量子效率的计算表达式为

$$\eta = \frac{P_{\text{SFG}}(L) \cdot \omega_s}{P_s(0) \cdot \omega_{\text{SFG}}}, \quad (4)$$

式中:  $P_{\text{SFG}}(L)$  和  $P_s(0)$  分别为实测的和频光场功率和

信号光场功率;  $L$  为使用的非线性晶体长度;  $\omega_{\text{SFG}}$  和  $\omega_s$  分别为和频光频率和信号光频率。

四种不同复振幅分布的泵浦光束在同峰值振幅及  $w$  和  $2w$  束腰半径的情况下,测得基频图像的量子效率,结果如图 4 所示。

由于图像频谱能量大量集中于低频部分,泵浦光在等峰值功率情况下,以  $LG_0^1$  光束作为泵浦光的非线性 SPC 转换效率较低,而超高斯涡旋光束与信号图像空间频谱的重叠面积最大,因而具有最高的非线性转换效率,高斯涡旋光束次之。上述结果证明,在目标边缘增强上转换探测系统中,可通过调整泵浦光的空

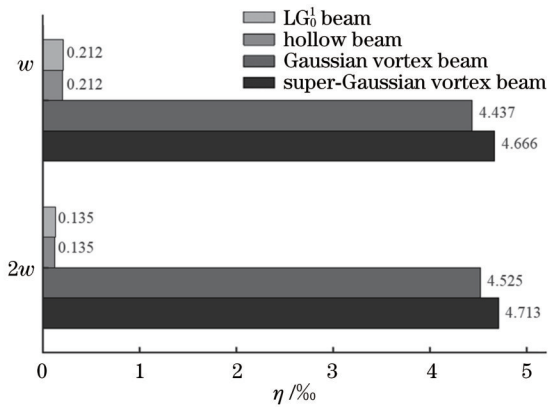


图 4 四种泵浦光束在  $w$  及  $2w$  束腰半径下对应的非线性量子效率

Fig. 4 Nonlinear quantum efficiency of four pump beams under  $w$  and  $2w$  waist radii

振幅分布来增大与信号图像频谱低频部分的空间重叠面积,从而获得更高的非线性转换效率与更优秀的边缘增强效果。此外,值得注意的是,具有超高斯振幅分布的强泵浦光可实现 100% 的理论极限量子效率<sup>[20-21]</sup>。

### 3 结 论

从 SPC 及二阶非线性的原理出发,进一步探索目标边缘增强上转换探测技术。当对同一信号图像频谱进行滤波调制时,发现空心光束相较于携带螺旋相位的环形光束(以  $LG_0^1$  光束为例)具有更好的边缘成像效果。此外,结合具有拓扑荷  $\ell=1$  的螺旋相位的高斯及超高斯涡旋光束的实验结果,证明了在目标边缘增强上转换探测过程中,泵浦光束的空间振幅分布会作为空间滤波器与螺旋相位共同影响成像效果,并可通过调控泵浦光空间振幅来提高目标边缘增强上转换探测的量子效率上限。

基于上述结论,为不同应用场景下的非线性图像边缘增强上转换探测提供以下思路:1)具有环状振幅分布即前言中的“复振幅”分布的涡旋光束(如  $LG_0^1$  光束),会使得上转换图像得到的边缘更加锐利、边缘增强效果分辨率更高,但其非线性上转换效率较低,可以在需要对图像边缘进行精确提取的情况下使用;2)将“纯振幅”分布的空心无涡旋光束作为泵浦光,会在目标几何边缘增强的基础上,实现目标内部微轮廓特征增强,保留更多目标图像的可识别特征;3)高斯型振幅分布的涡旋光束作为泵浦光时,可以得到较高的非线性转换效率,但因滤除了目标部分高频分量而导致上转换图像的边缘增强效果较为平缓,可在需要对图像锐利边缘进行“钝化”处理的场景得到应用;4)使用超高斯涡旋光束作为泵浦光,能够实现线性 SPC 边缘增强同等的效果,即为前言所述“纯相位”调制,且具有 100% 的理论极限量子非线性效率;5)由于高斯及超高斯涡旋光束为空间非本征模式,不能稳定传播<sup>[22]</sup>,因

此实验中将携带螺旋相位的泵浦光成像到信号图像频谱面,才可获得更好的目标边缘增强上转换探测效果。图形图像处理领域许多关键技术(例如图像分割与缺陷视觉检测)的实现都需要边缘增强探测的介入,而所述结论分析有望为该领域提供理论及实验支撑,并有望推动遥感、神经网络、数学形态学,以及临床医学等相关专业进一步发展。

### 参 考 文 献

- [1] Fua P, Leclerc Y G. Model driven edge detection[J]. Machine Vision and Applications, 1990, 3(1): 45-56.
- [2] Aquino A, Gegúndez-Arias M E, Marín D. Detecting the optic disc boundary in digital fundus images using morphological, edge detection, and feature extraction techniques[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2010, 29(11): 1860-1869.
- [3] Zernike F. Phase contrast, a new method for the microscopic observation of transparent objects[J]. Physica, 1942, 9(7): 686-698.
- [4] Fürhapter S, Jesacher A, Bernet S, et al. Spiral phase contrast imaging in microscopy[J]. Optics Express, 2005, 13(3): 689-694.
- [5] Davis J A, McNamara D E, Cottrell D M, et al. Image processing with the radial Hilbert transform: theory and experiments[J]. Optics Letters, 2000, 25(2): 99-101.
- [6] Sharma M K, Joseph J, Senthilkumaran P. Selective edge enhancement using shifted anisotropic vortex filter[J]. Journal of Optics, 2013, 42(1): 1-7.
- [7] Situ G H, 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(8): 1788-1797.
- [8] 刘世凯, 周志远, 史保森. 光学图像边缘检测技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 1011014.
- [9] Liu S K, Zhou Z Y, Shi B S. Progress on optical image edge detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011014.
- [10] 吴海俊, 于丙石, 姜嘉琪, 等. 光场空间结构全维度非线性调控理论及应用[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(8): 20230397.
- [11] Wu H J, Yu B S, Jiang J Q, et al. Nonlinear control of structured light in all spatial degrees of freedom[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(8): 20230397.
- [12] 周志远, 史保森. 基于频谱迁移的红外探测研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(5): 20230165.
- [13] Zhou Z Y, Shi B S. Progresses in infrared detection based on spectrum transducing(invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(5): 20230165.
- [14] Qiu X D, Li F S, Zhang W H, et al. Spiral phase contrast imaging in nonlinear optics: seeing phase objects using invisible illumination[J]. Optica, 2018, 5(2): 208-211.
- [15] Wu H J, Yang H R, Rosales-Guzmán C, et al. Vectorial nonlinear optics: type-II second-harmonic generation driven by spin-orbit-coupled fields[J]. Physical Review A, 2019, 100(5): 053840.
- [16] Liu S K, Yang C, Liu S L, et al. Up-conversion imaging processing with field-of-view and edge enhancement[J]. Physical Review Applied, 2019, 11(4): 044013.
- [17] Zhou Z Y, Zhu Z H, Shi B S. Diffractive theory study of twisted light's evolution during phase-only OAM manipulations[J]. Quantum Engineering, 2023, 2023: 4589181.
- [18] Ritsch-Marte M. Orbital angular momentum light in microscopy [J]. Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2017, 375(2087): 437.
- [19] Kotlyar V V, Kovalev A A. Family of hypergeometric laser beams[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2007, 25

- (1): 262-270.
- [17] De Silvestri S, Laporta P, Magni V, et al. Solid-state laser unstable resonators with tapered reflectivity mirrors: the super-Gaussian approach[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(6): 1172-1177.
- [18] 姜嘉琪, Rosales-Guzmán Carmelo, 朱智涵. 完美平顶涡旋光束[J]. 量子电子学报, 2022, 39(1): 136-141.  
Jiang J Q, Rosales-Guzmán C, Zhu Z H. Perfect flattop vortex beams[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2022, 39(1): 136-141.
- [19] Rosales-Guzmán C, Forbes A. How to shape light with spatial light modulators[M]. Bellingham: SPIE Press, 2017.
- [20] Wu H J, Yu B S, Zhu Z H, et al. Conformal frequency conversion for arbitrary vectorial structured light[J]. Optica, 2022, 9(2): 187-196.
- [21] Wu H J, Yu B S, Jiang J Q, et al. Observation of anomalous orbital angular momentum transfer in parametric nonlinearity[J]. Physical Review Letters, 2023, 130(15): 153803.
- [22] Sephton B, Dudley A, Forbes A. Revealing the radial modes in vortex beams[J]. Applied Optics, 2016, 55(28): 7830-7835.

## Edge-Enhanced Upconversion Detection Enabled by Spatial-Complex Amplitude Modulation on Pump Beams

Jiang Jiaqi<sup>1</sup>, Yao Xiu<sup>1</sup>, Li Chunyu<sup>1</sup>, Zhao Bo<sup>1</sup>, Shi Baosen<sup>2</sup>, Zhu Zhihan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Wang Da-Heng Collaborative Innovation Center for Quantum Manipulation and Control, College of Measurement and Control Technology and Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, Heilongjiang, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Quantum Information, Chinese Academy of Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China

### Abstract

**Objective** Edge-enhanced upconversion detection is a technique to enhance the geometric edges of a target and convert infrared (or terahertz, etc.) targets into the visible spectrum by nonlinear optics. Utilizing this technique for identifying and retrieving edge information within images can substantially mitigate computational burdens in image processing. This is of paramount significance in areas like machine vision, bio-imaging, and related disciplines. However, previous studies have predominantly focused on the "spiral phase contrast" resulting from nonlinear phase transfer and neglected the influence of nonlinear amplitude modulation on targets. The latter is determined by the pump amplitude distribution and the spatial overlap between the pumps and signals, both of which control the spatial spectrum distribution of upconversion images. We theoretically and experimentally investigate the effect of spatial-complex amplitude modulation of pumps on upconversion target based on edge-enhanced upconversion detection caused by amplitude bandpass filtering and spiral phase contrast, followed by analyzing quantum efficiency differences. Finally, based on research findings, we provide practical recommendations for multiple typical scenarios.

**Methods** The principle of edge-enhanced upconversion detection (Fig. 1) allows for spatial filtering operations on the signal spatial spectrum by utilizing the spatial amplitude distribution and spiral phase of the pump via parametric nonlinear interactions. This process influences the outcomes of edge-enhanced upconversion detection, thus bringing an improved and more refined detection method. The nonlinear optics platform described by us is based on non-degenerate sum-frequency generation with type-0 phase matching (Fig. 2). Initially, the Laguerre-Gaussian ( $LG_0^1$ ) beam is employed as the pump beam, which has circular amplitude distribution and spiral phase similar to previous research. Subsequently, a hollow beam with the same spatial amplitude distribution is adopted as the pump beam, and only amplitude spatial filtering is applied to the signal. By comparing the differences between the imaging results and a reference, we can investigate the effect of the spiral phase on edge enhancement. Additionally, Gaussian and super-Gaussian vortex beams carrying spiral phase are employed as pump beam sources to examine how different spatial amplitude distributions of vortex beams affect both imaging results and quantum efficiency in an upconversion detection system.

**Results and Discussions** Theoretical and experimental imaging results are compared and analyzed for the pump with four different spatial-complex amplitude distributions under two beam waist radii (Fig. 3). Specifically, when the  $LG_0^1$  beam is utilized as the pump beam, bandpass filtering, and spiral phase modulation are simultaneously applied to the target spatial spectrum, which leads to rounded edge distribution of the upconversion image. Additionally, an increase in the pump beam waist radius reduces the conversion of low-frequency components and sharper edges in the upconversion image. On the other hand, the hollow beam only applies amplitude bandpass filtering on the spatial spectrum of the target, enhancing regions with intensity gradients. In contrast, Gaussian vortex beams exhibit higher conversion efficiency for low-frequency

components compared to high-frequency ones, thereby bringing smoother edge profiles for upconversion images. When the waist of the Gaussian vortex beam expands, due to the conversion of a greater proportion of high-frequency components, the low-pass filtering effect on the original image is diminished. Consequently, the contour width of the upconversion image becomes more pronounced. Lastly, super-Gaussian vortex beam has uniform spatial amplitude distribution that converts all spectral components equally, leading to nonlinear spiral phase contrast results close to linear ones.

The quantum efficiency corresponding to these four pump beams at identical peak amplitudes and two beam waist radii is obtained (Fig. 4). Since the spectral energy of the image is predominantly concentrated in the low-frequency range, the super-Gaussian vortex beam overlaps most extensively with the spatial spectrum of the signal image, which brings the highest nonlinear conversion efficiency. Importantly, under intense pumping, a pump light characterized by super-Gaussian amplitude can attain the theoretical quantum efficiency upper limit of 100%. The quantum efficiency of the Gaussian vortex beam is surpassed only by the super-Gaussian vortex beam. In contrast, the nonlinear conversion efficiency of the  $LG_0^1$  pump light is comparatively inferior.

**Conclusions** The results indicate that the utilization of a circular beam with a spiral phase as the pump light can obtain an upconversion image with enhanced edge sharpness. This technique is particularly suitable for scenarios where precise extraction of the target edge is desired. Conversely, a hollow beam outperforms a circular beam with a spiral phase in preserving more image features. Super-Gaussian vortex beams exhibit the highest quantum efficiency and approach theoretical limits under intense pumping. As a result, when efficient conversion of weak signals is necessary, the utilization of super-Gaussian vortex beam is recommended. On the other hand, the Gaussian vortex beams can be employed to smooth the target edge. It is important to note that Gaussian and super-Gaussian vortex beams are not spatial eigenmodes, whose transverse structures are propagation variants. Thus, imaging should be conducted on the pump light carrying the spiral phase to the signal image spectrum plane and then achieve superior enhancement of the upconversion target edge.

**Key words** nonlinear optics; edge enhancement; spatial-complex amplitude modulation; upconversion detection; Fourier optics; flattop vortex beam