

利用非传统螺旋相位调控高阶涡旋光束的拓扑结构

王亚东 甘雪涛 俱沛 庞燕 袁林光 赵建林

Control of topological structure in high-order optical vortices by use of noncanonical helical phase

Wang Ya-Dong Gan Xue-Tao Ju Pei Pang Yan Yuan Lin-Guang Zhao Jian-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 034204 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.034204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于递归T矩阵的离散随机散射体散射特性研究

Investigation of the scattering characteristics from discrete random scatterers based on recursive aggregate T-matrix algorithm

物理学报.2014, 63(15): 154202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154202>

车载探地雷达信号在分层介质中的散射特性

Characteristics of electromagnetic scattering from the vehicle-mounted ground penetrating radar in layered media

物理学报.2014, 63(4): 044201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.044201>

层状介质上空展源瞬变电磁响应的计算方法研究

Study on the electromagnetic fields of an extended source over layered models

物理学报.2013, 62(23): 234201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.234201>

基于拉盖尔-高斯光束的通信系统在福olmogorov湍流中传输的系统容量

Average capacity of free-space optical systems for a Laguerre-Gaussian beam propagating through non-Kolmogorov turbulence

物理学报.2013, 62(21): 214201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214201>

随机光纤激光器中光纤与随机介质匹配问题的研究

Discussion on the problem of random media matching with the PCF for RFL

物理学报.2013, 62(21): 214202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214202>

# 利用非传统螺旋相位调控高阶涡旋光束的拓扑结构\*

王亚东 甘雪涛 俱沛 庞燕 袁林光 赵建林†

(西北工业大学理学院, 陕西省光信息技术重点实验室, 空间应用物理与化学教育部重点实验室, 西安 710072)

(2014年6月25日收到; 2014年8月10日收到修改稿)

本文提出一种利用非传统螺旋相位调控高阶涡旋光束拓扑结构的方法. 数值模拟并实验研究了具有不均匀旋转梯度的非传统螺旋相位对高阶涡旋光束的调控行为. 结果表明, 携带有非传统螺旋相位的高阶涡旋光束在传输过程中, 将退化为沿一条直线排列的多个一阶相位奇点, 并且, 这种非传统螺旋相位对高阶涡旋光束的调控特性, 可抑制相位噪声等扰动所引起的拓扑结构随机退化现象. 本文的结论为涡旋光束拓扑结构的调控提供了一种可行的新途径, 在基于涡旋光束的光学通信、光学操控等方面具有潜在应用.

**关键词:** 涡旋光束, 非传统螺旋相位, 拓扑结构, 相位噪声

**PACS:** 42.25.Dd, 42.25.Fx, 42.65.Jx

**DOI:** 10.7498/aps.64.034204

## 1 引言

涡旋光束是一种波前相位围绕光场中心呈螺旋变化的奇异光束, 其相位结构的数学表达式含有因子  $\exp(im\theta)$ , 其中  $\theta$  为方位角,  $m$  为拓扑荷, 表示相位围绕光束中心旋转一周变化为  $2m\pi$  [1-3]. 涡旋光束的这种螺旋相位结构, 导致其中心点与任意一点均在同一条等相位线上, 因而该点的相位无法定义, 称为相位奇点, 并且在该点的光场强度为零, 形成中空的环形光场分布. 涡旋光束的这种拓扑特性使其成为光学及其应用领域的一个研究热点 [4-13]. 具有多相位奇点以及不同拓扑荷值的涡旋光束还可以表现出类流体的线性旋转、湮没 [14,15] 以及非线性的高阶退化 [16,17] 等现象. 另外, 由于拓扑荷  $m$  可以取任意值, 由螺旋相位所决定的轨道角动量不存在理论上限, 从而使得涡旋光束在光学微操纵 [6]、量子计算 [9]、基于光学比特的光通信 [10] 等方面表现出独特的应用潜力.

另一方面, 涡旋光束的螺旋相位结构使其存在横向旋转能流, 在非均匀介质中传输时表现出方位

角调制非稳现象 [18-25]. 这种调制非稳性随着拓扑荷的增加而加剧 [20], 且高阶涡旋光束受到该调制后, 通常会出现拓扑结构的随机演化现象. 例如, 在克尔介质中, 高阶涡旋光束易劈裂成多个随机亮斑, 并且在非线性作用下形成多个亮孤子 [20,21]. 在大气湍流介质中传输时, 高阶涡旋光束虽然能够在一定程度上保持角动量和拓扑荷不变, 但湍流的不规则运动仍会使其发生明显非稳退化 [22-25]. 因此, 如果可以控制高阶涡旋光束在具有一定非均匀性介质中的传输演化行为, 不仅可以调控高阶涡旋光束随机退化后的相位奇点分布, 而且为涡旋光束的工程应用提供可能的新技术. 本文研究具有非传统螺旋相位的高阶涡旋光束在自由空间中的演化行为, 并通过引入随机相位噪声, 分析噪声影响下的非传统螺旋相位结构对高阶涡旋光束拓扑结构的调控作用.

## 2 非传统螺旋相位

涡旋光束所携带的传统螺旋相位结构在直角坐标系中可表示为  $\Phi = m \arctan(y/x)$ , 表明其相

\* 国家重点基础研究发展计划 (973) 计划 (批准号: 2012CB921900) 和国家自然科学基金 (批准号: 61377035, 61205001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jljzhao@nwpu.edu.cn.

位围绕中心旋转一周呈现均匀变化<sup>[26]</sup>. 如果围绕中心奇点的螺旋相位结构变化不均匀, 则由该涡旋光束所携带的光场强度分布、能流旋转规律以及光场传输特性等都会受到调制<sup>[27-29]</sup>. 这种非传统的螺旋相位结构可表示为  $\Phi = m \arctan(Ay/x)$ , 其中  $A$  为相位倾斜因子. 一般称携带有这种特殊相位结构的涡旋光束为非传统涡旋光束<sup>[28]</sup>. 这种非传统涡旋相位的数学表达式简单, 且充分反映沿角向相位不均匀旋转分布现象; 同时, 实验上结合该数学表达式可方便产生相应的计算全息图, 并通过空间光调制器加载在高斯光束上而产生非传统涡旋光束, 且所产生光束仍然呈环形分布, 与传统涡旋光束相类似. 通过改变  $A$  可以得到具有不同旋转梯度的螺旋相位. 对  $\Phi$  沿角向  $\theta$  求导数, 可得到非传统螺旋相位的梯度为

$$\frac{d\Phi}{d\theta} = \frac{mA}{\cos^2\theta + A^2 \sin^2\theta}. \quad (1)$$

显然, 该相位梯度与径向位置  $r$  无关, 仅仅是相位角  $\theta$  的函数. 由(1)式知, 当  $A = 1$  时, 相位梯度恒等于  $m$ ; 当  $A = A_0 > 1$  时, 相位梯度不再恒定, 并且随着  $\theta$  的增大, 其在  $0^\circ, 180^\circ, 360^\circ$  有最大值  $mA$ , 在  $90^\circ, 270^\circ$  有最小值  $m/A$ ; 当  $A = 1/A_0 < 1$  时, 对应  $A = A_0$  刚好沿  $\theta$  轴平移  $90^\circ$ ; 当  $A < 0$  时, 其情形与  $|A|$  相对应. 同时, 随着相位倾斜因子的增大, 涡旋光束的螺旋相位分布变化出现非均匀性地逐渐增强, 并且当  $|A| \rightarrow \infty$  时,  $x$  轴方向相位突变

为  $\pi$ <sup>[27]</sup>. 图 1(a) 给出了当  $m = 1, A = 1, 0.5, 2$  时相位梯度随相位角  $\theta$  的变化关系曲线. 可以看出,  $A = 2$  时, 沿角向变化的螺旋相位在  $\theta = n\pi$  时变化剧烈, 而在  $\theta = (n + 1)\pi/2$  时变化缓慢 ( $n$  为任意整数);  $A = 0.5$  时螺旋相位变化与前者刚好相反. 图 1(b), (c) 分别给出了  $m = 1, A = 1, 2$  时, 涡旋光束的相位分布, 其中每两条相邻线之间的相位差相同. 与图 1(b) 相对比, 图 1(c) 中的相位分布发生了非均匀变化, 从  $0^\circ$  到  $90^\circ$  相位角分布由密集到稀疏,  $90^\circ$  到  $180^\circ$  时再由稀疏变化到密集. 这种不恒定的相位梯度将决定涡旋光束在介质中演化的特殊性<sup>[28]</sup>.

### 3 数值模拟分析

数值模拟携带非传统螺旋相位结构  $\Phi$  的高斯光束在自由空间中的传输演化过程, 以观察相位倾斜因子  $A$  对高阶涡旋光束的调制作用. 取高斯光束的振幅表达式为  $B(r) = B_0 \exp(-r^2/\omega_0^2)$ , 其中  $B_0, \omega_0$  分别为光束中心处的振幅和束腰半径.

图 2 给出了  $\omega_0 = 0.2$  cm 的高斯光束在携带  $A = 2$  的非传统螺旋相位后, 在自由空间传输 40 cm 时的横向强度分布(上排)和相位分布(下排), 其中图 2(a)—(d) 分别对应拓扑荷为  $m = 1-4$  的情况. 可以看出, 与携带传统螺旋相位的涡旋光束不同, 一阶涡旋光束随传输距离演化后, 其强度分布呈现出两个分离的非均匀亮斑, 且亮斑中心暗核呈椭圆形(见图 2(a)). 类似地, 高阶涡旋光束演化后的强度分布亦产生非均匀亮环(见图 2(b1)—(d1)). 同时, 由于方位角调制的非稳性, 高阶涡旋光束的强度分布演化出多个分离暗核, 并且由演化后的光场相位分布可以看出, 在每一个暗核位置均出现拓扑荷为 1 的螺旋相位, 即  $m$  阶涡旋光场退化为  $m$  个一阶相位奇点, 满足拓扑荷守恒的演化规律<sup>[14]</sup>(见图 2(b2)—(d2)). 与传统高阶涡旋光束的演化过程<sup>[24]</sup> 不同, 携带有非传统螺旋相位的涡旋光束在演化过程中发生剧烈退化, 所形成的多个一阶涡旋均沿倾斜于坐标轴的一条直线规则排列, 并且其暗核位置相对于光场中心点呈对称分布. 涡旋奇点均携带有旋转能流, 并互相影响, 导致奇点沿着水平轴和垂直轴皆有一定的位移, 其总效应是各个暗核奇点围绕中心旋转. 因此, 退化后的多个奇点所形成的直线随着传输距离的增加不断发生旋转, 其构成的椭圆长轴与水平轴夹角也随着传输距离增大而逐渐变大, 但旋转速度逐渐变小

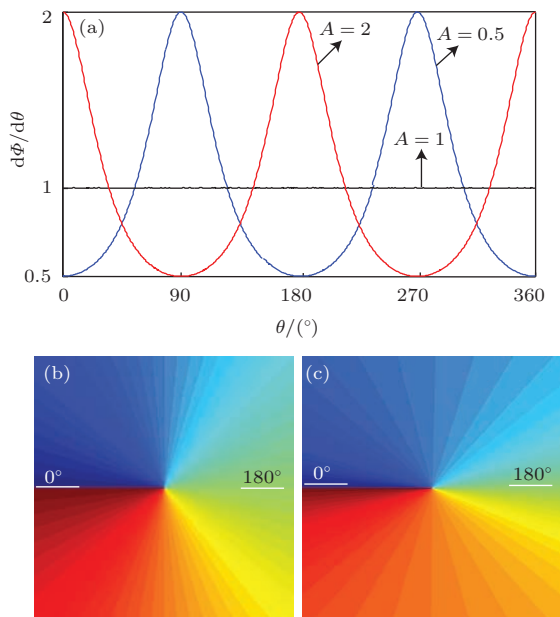


图 1 (网刊彩色) 传统与非传统螺旋相位结构的对比 (a)  $A = 1, 0.5, 2$  时相位梯度随旋转角的变化关系; (b), (c) 分别对应  $A = 1, 2$  时的相位分布



直到降为零, 此时涡旋奇点不再发生轴向位移, 多个奇点所构成的旋转椭圆不再旋转<sup>[28]</sup>.

对于取分数和负值的相位倾斜因子, 高阶涡旋光束的演化结果与图2不尽相同. 图3给出了携带不同非传统螺旋相位的高斯光束, 在自由空间传输40 cm时的横向强度分布和相位分布, 其中 $m = 4$ , 图3(a), (b)分别对应相位倾斜因子为 $A = 0.5, -2$ 的情况. 可知, 携带不同螺旋相位的高斯光束在传输演化后与图2中的结果相类似, 高阶涡旋退化为多个一阶涡旋奇点, 且这些一阶涡旋均沿倾斜于坐标轴的一条直线规则排列. 不同的是, 由

图1(a)知, 相位倾斜因子互为倒数时, 螺旋相位梯度刚好相对平移 $90^\circ$ , 相应地高阶涡旋光束退化后的暗核排列方向和能流方向与图2中的成 $90^\circ$ 夹角(如图3(a1)); 由相位分布(图3(a2))可以看出, 退化后的每个涡旋奇点相位均逆时针旋转, 说明此时的一阶涡旋奇点拓扑荷为正. 由(1)式知, 当相位倾斜因子取负值时, 其螺旋相位梯度也为负. 因此, 当 $A = -2$ 时, 其退化后的暗核排列和能流方向与图2的相反(如图3(b1)), 即相位分布(图3(b2))均顺时针旋转, 而此时的涡旋奇点的拓扑荷表现为负.

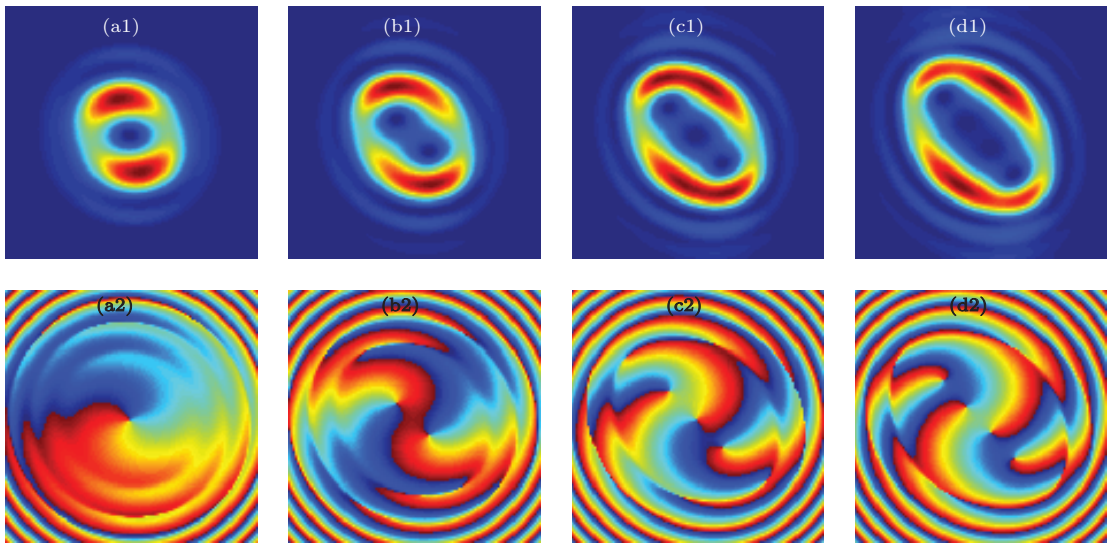


图2 (网刊彩色) 非传统( $A = 2$ ) 涡旋光场的演化结果, (a)—(d) 分别对应  $m = 1-4$ , 上排为强度分布, 下排为相位分布

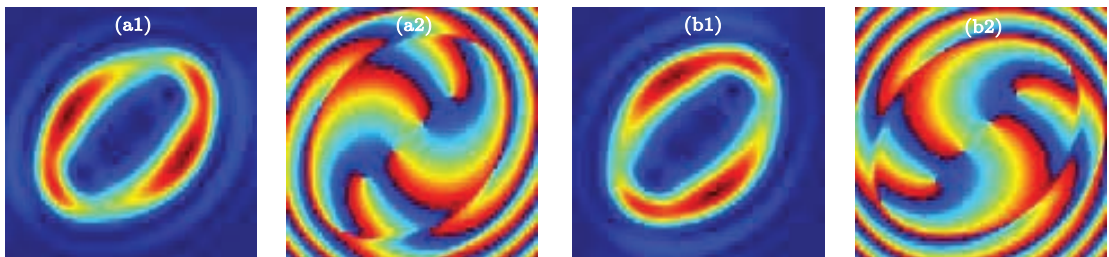


图3 (网刊彩色) 非传统涡旋光场( $m = 4$ )的演化结果 (a), (b) 分别对应  $A = 0.5, -2$ , (a1), (b1) 为强度分布, (a2), (b2) 为相位分布

以上所讨论的是涡旋光束在理想自由空间中的演化规律. 然而, 在实验上或实际应用中, 涡旋光场的传输会受到许多外界噪声扰动的影响, 如不均匀的背景光场、大气湍流<sup>[23]</sup>、光路系统的象散、各向异性的非线性<sup>[16]</sup>等. 下面通过对比传统和非传统高阶涡旋光场在噪声扰动下的演化行为, 进一步研究非传统螺旋相位对高阶涡旋光束的调制作用. 为构造随机噪声扰动, 在高斯背景光束中引入扰动相位因子  $\exp[iR(r)]$ , 其中  $R$  函数是均值为50,

方差为1的高斯随机函数.

选择携带随机相位噪声的背景高斯光束, 数值模拟传统和非传统涡旋光束的传输演化行为. 图4(a)—(d)给出了传统涡旋光束( $A = 1$ )在相位噪声干扰下的演化结果. 可以看出, 演化后的涡旋光束的暗核中心发生了不规则衍射增大, 其强度分布不再是均匀圆环. 由相位分布可知,  $m$ 阶涡旋光束退化为 $m$ 个不规则分布的相位奇点. 因此, 高阶涡旋光束在演化过程中发生了拓扑荷退化现象, 并

且退化后的相位奇点随机分布. 这是由于相位扰动因子导致传输介质不均匀, 加剧了高阶涡旋光束的拓扑荷退化, 且由于介质的非均匀性是随机的, 所退化的暗核奇点分布无规律. 图 4(e)—(h) 给出了  $A = 2$  时非传统涡旋光束演化的结果. 可以看出, 与传统涡旋光束的退化结果不同, 在非传统螺旋

相位的调制下, 高阶涡旋光束的演化结果与图 2 中结果相同, 退化后的多个一阶相位奇点仍然呈现直线分布. 因此, 对涡旋光束引入非传统螺旋相位后, 即当  $A > 1$  时, 非传统螺旋相位对涡旋光场的调制起主导作用, 抑制了随机相位扰动所引起的无序性.

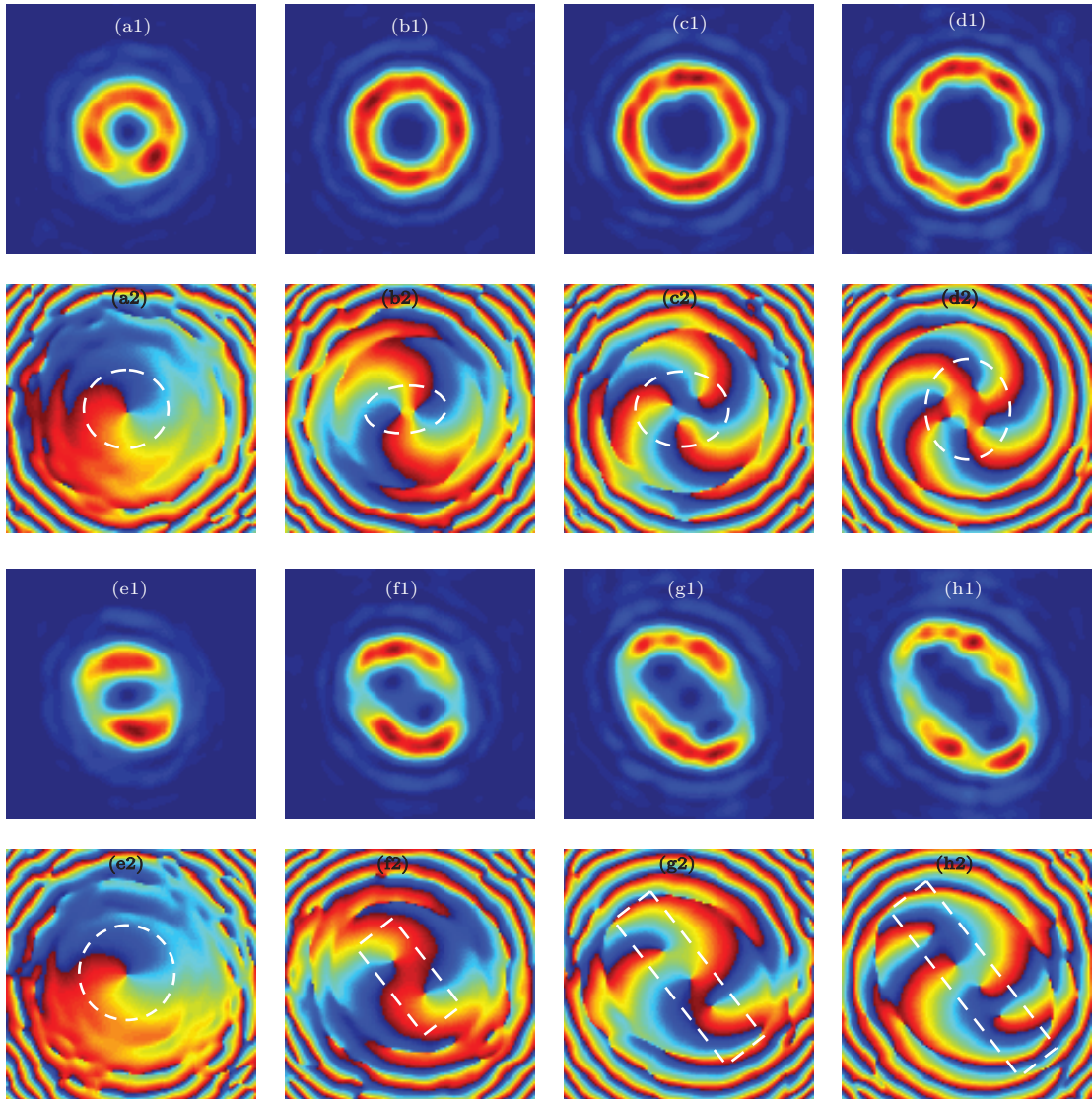


图 4 (网刊彩色) 携带随机相位噪声的非传统涡旋光场的演化结果 (a)—(d) 为  $A = 1$  时的强度分布 (上排) 和相位分布 (下排); (e)—(h) 为  $A = 2$  时的强度分布 (上排) 和相位分布 (下排)

#### 4 实验结果与分析

实验上, 利用计算全息原理并结合空间光调制技术产生涡旋光束, 通过观察涡旋光束与平面波干涉得到的干涉条纹确定其相位奇点的分布<sup>[30]</sup>. 将设计的含有相位噪声和螺旋相位结构的计算全息图加载到振幅型空间光调制器 (SLM) 上, 入射光束经 SLM 衍射后, 其衍射光即为所需要的涡旋

光束<sup>[31]</sup>. 图 5 给出了  $A = 1$ 、传输距离为 40 cm 时, 涡旋光束的横向强度分布 (上排) 及与平面波的干涉图样 (下排), 图 5(a)—(d) 对应拓扑荷分别为  $m = 1—4$ . 结果表明, 不同阶数涡旋光束均具有环状的强度分布, 且亮环随着拓扑荷的增大而变大. 从对应的干涉图样 (下排) 可以看出, 在亮环内存在多个由一条分为两条的叉形条纹, 说明存在彼此分离的多个一阶相位奇点. 由干涉图样中的叉形条纹数目发现,  $m$  阶涡旋光束退化为



$m$  个一阶涡旋奇点. 因此, 相位扰动因子的随机性和实验本身存在的噪声, 例如高斯光束强度分布不均匀等, 导致退化后形成的相位奇点随机分布. 同时可以看到, 图 5 (c2) 和 (d2) 中由于其他相

位奇点出现随机噪声因子而造成光场中具有一定的散射, 致使光场中额外出现一些奇点 [32,33]. 上述现象与涡旋光束在大气湍流中传输时的情形相类似 [34].

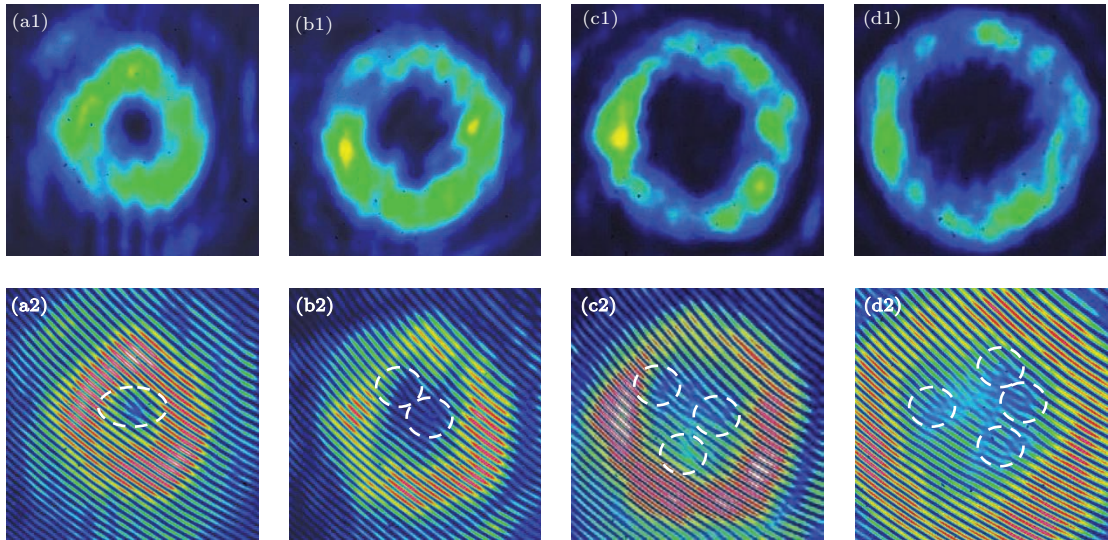


图 5 (网刊彩色) 实验得到的传统涡旋光场演化结果 (a) — (d) 分别为  $m = 1-4$  的强度分布 (上排) 和与平面波的干涉图样 (下排)

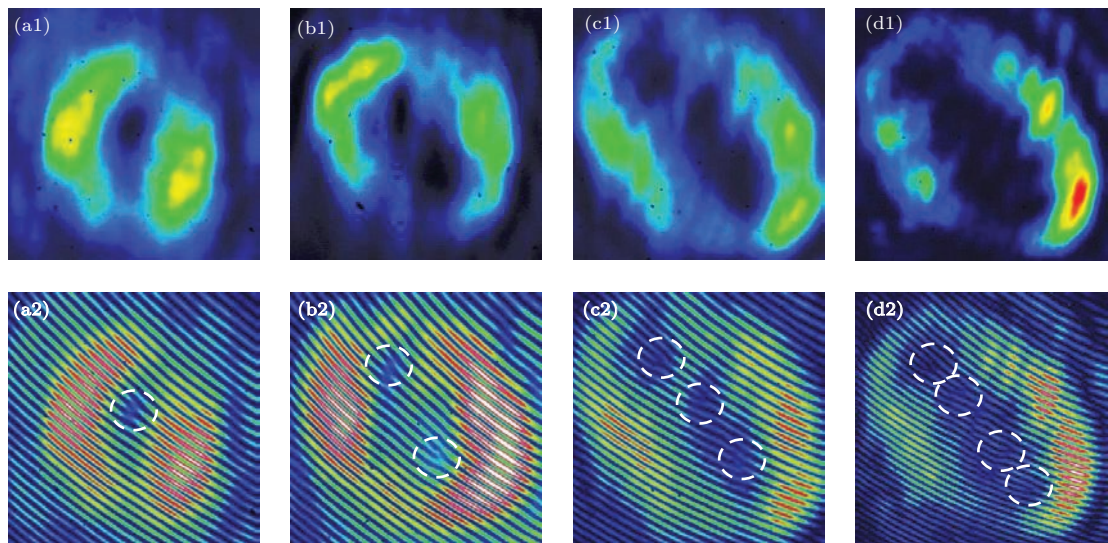


图 6 (网刊彩色) 实验得到的非传统涡旋光束演化结果 (a) — (d) 分别为  $m = 1-4$  的强度分布 (上排) 和与平面波的干涉图样 (下排)

在设计涡旋相位计算全息图中引入相位倾斜因子  $A$ , 可以产生携带有非传统螺旋相位的涡旋光束. 图 6 给出了实验得到的  $A = 2$  时不同阶数非传统涡旋光束的演化结果, 图 6 (a) — (d) 分别对应  $m = 1-4$  的情况. 对比图 5 可以发现, 携带有非传统螺旋相位的涡旋光束的演化结果明显不同, 其强度图样不再具有圆对称分布而呈椭圆状. 对于不同阶数的涡旋光束, 其亮环发生分裂的方向相同, 在

强度分布上出现了彼此分离的暗核分布. 另外, 在对应的干涉图样 (下排) 中, 具有  $m$  个一条分为两条的叉形条纹, 即高阶涡旋光束退化为  $m$  个一阶涡旋. 此时, 携带非传统螺旋相位的高阶涡旋光束发生了明显的退化. 值得注意的是, 退化后的涡旋光束形成了沿一条直线排列的多个一阶相位奇点. 上述实验结果与图 4 中的模拟结果符合得很好, 验证了非传统螺旋相位可以有效抑制高阶涡旋光束在

扰动介质中传输时所产生的随机退化现象.

## 5 结 论

提出了一种利用非传统螺旋相位调控高阶涡旋光束拓扑结构的方法. 数值模拟和实验结果表明, 在随机相位扰动介质中传输时, 相比传统高阶涡旋光束相位奇点的无序退化, 非传统螺旋相位结构可以有效地调制高阶涡旋光束, 并且使退化后光束的相位奇点沿一条直线分布, 避免了传统高阶涡旋光束相位奇点在扰动介质中的不规则分布. 这种在涡旋光场中加载非传统螺旋相位的方法十分简单, 且调制涡旋光场的效果明显, 有望为基于涡旋光场的光学通信、微操纵等领域提供一种可行的新途径.

## 参考文献

- [1] Cullet P, Gil L, Rocca F 1989 *Opt. Commun.* **73** 403
- [2] Kivshar Y S, Ostrovskaya E A 2001 *Opt. Photon. News* **12** 24
- [3] Nye J F, Berry M V 1974 *Phys. Engin. Sci.* **336** 165
- [4] Ding P F, Pu J X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 174201 (in Chinese) [丁攀峰, 蒲继雄 2012 物理学报 **61** 174201]
- [5] Fang G J, Sun S H, Pu J X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 064210 (in Chinese) [方桂娟, 孙顺红, 蒲继雄 2012 物理学报 **61** 064210]
- [6] Gecevičius M, Drevinskas R, Beresna M, Kazansky P 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 231110
- [7] Chen C R, Yeh C H, Shih M F 2014 *Opt. Express* **22** 3180
- [8] Dholakia K, Čžmár T 2011 *Nature Photon.* **5** 335
- [9] Fickler R, Lapkiewicz R, Plick W N, Krenn M, Schaeff C, Ramelow S, Zeilinger A 2012 *Science* **338** 640
- [10] Rodenburg B, Mirhosseini M, Malik M, Rodenburg B, Mirhosseini M, Malik M, Magaña-Loaiza O, Yanakas M, Maher L, Steinhoff N, Tyler G, Boyd R 2014 *New Journal of Phys.* **16** 033020
- [11] Lehmuskero A, Li Y, Johansson P 2014 *Opt. Express* **22** 434
- [12] Liu Y, Li H N, Hu Y, Du A 2014 *Chin. Phys. B* **23** 087501
- [13] Zhou Z H, Guo Y K, Zhu L 2014 *Chin. Phys. B* **23** 044201
- [14] Yarmchuk E J, Cordon M J V, Packard R E 1979 *Phys. Rev. Lett.* **43** 214
- [15] Gan X, Zhao J, Liu S, Fang L 2009 *Chin. Opt. Lett.* **7** 1142
- [16] Mamaev A V, Saffman M, Zozulya A 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2108
- [17] Gan X, Zhang P, Liu S, Zheng Y, Zhao J, Chen Z G 2009 *Opt. Express* **17** 23130
- [18] Vaity P, Singh R P 2012 *Opt. Lett.* **37** 1301
- [19] Denisenko V, Shvedov V, Desyatnikov A S, Neshev D, Krolikowski W, Volyar A, Soskin M, Kivshar Y S 2009 *Opt. Express* **17** 23374
- [20] Vuong L, Grow T, Ishaaya A, Gaeta A, Eliel E, Fibich G 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 133901
- [21] Ouyang S G 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 040504 (in Chinese) [欧阳世根 2013 物理学报 **62** 040504]
- [22] Malik M, O'Sullivan M, Rodenburg B, Mirhosseini M, Leach J, Lavery M P, Padgett M J, Boyd R W 2012 *Opt. Express* **20** 13195
- [23] Reddy S G, Prabhakar S, Aadhi A, Banerji J, Singh R P 2014 *JOSA A* **31** 1295
- [24] Anguita J A, Rodriguez H, Quezada C 2014 *Aerospace Conference IEEE* 2014 p1
- [25] Cui Q, Li M, Yu Z 2014 *Opt. Commun.* **329** 10
- [26] Dennis M R, O'Holleran K, Padgett M J 2009 *Progress in Opt.* **53** 293
- [27] Molina-Terriza G, Wright E M, Torner L 2001 *Opt. Lett.* **26** 163
- [28] Kim G H, Lee H J, Kim J U 2003 *JOSA B* **20** 351
- [29] Basistiy I V, Soskin M S, Vasnetsov M V 1995 *Opt. Commun.* **119** 604
- [30] Sacks Z S, Rozas D, Swartzlander G A 1998 *JOSA B* **15** 2226
- [31] Ostrovsky A S, Rickenstorff-Parrao C, Arrizon V 2013 *Opt. Lett.* **38** 534
- [32] Palacios D, Rozas D, Swartzlander Jr G A 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 103902
- [33] Nye J F, Berry M V 1974 *Mathematical and Physical Sciences* **336** 165
- [34] Cui Q, Li M, Yu Z 2014 *Opt. Commun.* **329** 10

# Control of topological structure in high-order optical vortices by use of noncanonical helical phase\*

Wang Ya-Dong Gan Xue-Tao Ju Pei Pang Yan Yuan Lin-Guang Zhao Jian-Lin<sup>†</sup>

(Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry, Ministry of Education, and Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

( Received 25 June 2014; revised manuscript received 10 August 2014 )

## Abstract

This paper proposes a method for controlling the topological structures in high-order optical vortices by employing a noncanonical phase structure. The control of the evolutions in high-order optical vortices by using a noncanonical phase structure with a nonuniform azimuthal gradient is studied numerically and experimentally. Results show that the propagation of high-order optical vortices along with a noncanonical phase structure becomes a decayed optical distribution with multiple one-charged singularities along a line. In addition, the control from the noncanonical phase structure can suppress random evolutions of topological structures resulted from the phase noise. These conclusions may indicate a new method to control the decay of high-order optical vortices, and promising potential applications in many fields, such as optical vortices-based optical communications and optical tweezers.

**Keywords:** optical vortex, noncanonical phase, topological structure, phase noise

**PACS:** 42.25.Dd, 42.25.Fx, 42.65.Jx

**DOI:** [10.7498/aps.64.034204](https://doi.org/10.7498/aps.64.034204)

---

\* Project supported by the 973 Program (Grant No. 2012CB921900), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61377035, 61205001).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [jlzhao@nwpu.edu.cn](mailto:jlzhao@nwpu.edu.cn).