

叠加态涡旋光束经旋转随机粗糙表面的频移特性

吕 宏, 党 磊, 贺 蕊

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘 要: 论文基于涡旋光束传输特性及光散射理论, 研究了叠加态涡旋光束经旋转随机粗糙表面的场分布及干涉特性. 对拓扑荷值大小相同、符号相反的两束涡旋光进行了叠加生成仿真及实验, 利用角谱衍射理论, 分析了旋转随机粗糙表面均方根粗糙度对光束传输的影响, 数值计算了不同拓扑荷值的叠加态涡旋光束经旋转随机粗糙表面后, 与参考光进行干涉得到不同转速下归一化强度值随时间变化的曲线, 并通过光强-时间函数间接求得频移量, 再反演得到旋转目标的转速. 结果表明: 通过仿真曲线的周期反演频率, 当转速 Ω 分别为 $2\pi/3$ rad/s, 2π rad/s, $10\pi/3$ rad/s 时, 对应的频移 Δf 分别为 2/3Hz, 2Hz, 10/3Hz. 研究结果可以为叠加态涡旋光的调控及应用提供理论参考.

关键词: 叠加态涡旋光束; 旋转随机粗糙表面; 频移; 场分布; 干涉

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2021)10-1969-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20201455

The Characteristics of Frequency Shift of Superposition Vortex Beams Passing through a Rotating Random Rough Surface

LÜ Hong, DANG Lei, HE Rui

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract: Based on the transmission characteristics of vortex beams and light scattering theory, the field distribution and interference characteristics of superposition vortex beams passing through the rotating random rough surface are studied. Two vortex beams with the same topological charge value and opposite signs are used for simulation and experiment of superimposition generation. Using angular spectrum diffraction theory, the influence of the root-mean-square roughness of the rotating random rough surface on the beam transmission is analyzed. As the superposition vortex beams with different topological charges pass through the rotating random rough surface and interfere with the reference light, the time-dependent curve of normalized intensity values at different rotational speeds can be obtained through numerical calculation. Then the frequency shift can be indirectly obtained by light intensity-time function and the speed of rotating target can be obtained through inversion. The results show that: the frequency is inverted by the period of the simulation curve, and when the rotational speed Ω is $2\pi/3$ rad/s, 2π rad/s, $10\pi/3$ rad/s, the corresponding frequency shift Δf is 2/3Hz, 2Hz, 10/3Hz, respectively. The results of this research can provide a theoretical reference for the regulation and application of superposition vortex beams.

Key words: superposition vortex beams; rotating random rough surface; frequency shift; field distribution; interference

1 引言

众所周知, 波源与观察者之间的相对运动会发生多普勒频移效应, 而物体的旋转也会产生多普勒频移, 当照射到旋转物体上的光发生反射或透射时, 物体的旋转会使探测器接收到的反射或透射光频率发生变化. 近年来, 随着对涡旋光束轨道角动量特性研究的逐

渐深入^[1-3], 基于涡旋光束轨道角动量的旋转多普勒效应也随之被人发现, 叠加态涡旋光束经旋转随机粗糙表面的传输特性研究也引起了学者的广泛关注. Lavery 等人^[4]利用涡旋光束的轨道角动量反映出多普勒频移, 进而分析了目标物体的自转信息. Phillips 等人^[5]研究了用于激光多普勒测速的旋转模拟技术, 利用旋转

对称的干涉模式来探测旋转目标的角速度. 付时尧等人^[6]利用衍射光栅探测了涡旋光束的轨道角动量态, 裴春莹等人^[7]提出了一种涡旋光束轨道角动量的新型干涉检测方法. Cvijetic 等人^[8]通过分析被运动物体遮挡的倾斜光束轨道角动量变化, 在不需要重建物体图像的情况下, 使用单一光束检测了物体任意方向的横向运动. Liu 等人^[9]通过推导携带轨道角动量涡旋光束探测目标回波的数学表达式, 证明了目标方位角分辨率与使用的涡旋光束轨道角动量态有关, 并与传统雷达进行了比较. 2016年, Zhou 等人^[10]从模式分解的角度解释了旋转多普勒效应. 齐倩倩等人^[11]基于数字螺旋成像理论, 研究了多重对称性物体反射光的轨道角动量谱, 提出了一种测量对称性物体旋转多普勒频移的新方法, 并对距离 120m 处的旋转物体进行了探测实验^[12]. 2019年, Qiu 等人^[13,14]研究了涡旋光束倾斜入射旋转物体表面时, 入射光束与法线的夹角与旋转多普勒效应的关系, 同时探索了涡旋光束光轴与旋转物体旋转轴之间的距离对旋转多普勒效应的影响. Zhai 等人^[15]对利用涡旋光束的旋转多普勒效应测量旋转物体的角加速度进行了研究. Zhou 等人^[16]研究了携带轨道角动量光束在旋转目标探测中的旋转多普勒分辨率, 发现角速度分辨率由轨道角动量指数和脉冲宽度决定, 提出利用高阶轨道角动量光束检测旋转目标的方法. Zhao 等人^[17]将涡旋光束的旋转多普勒效应扩展到射频无线电领域, 利用携带轨道角动量的无线电波进行了旋转目标转速的探测. Zhou 等人^[18]从模式分解的角度出发, 根据涡旋光束的旋转多普勒效应设计了基于旋转多普勒效应的轨道角动量复谱分析仪. 综上所述, 这些工作的开展, 为深入研究涡旋光束的空间传输特性及在旋转目标探测领域的应用提供了依据. 目前, 关于叠加涡旋光束在空间传输中对于目标的反射及散射特性, 特别是旋转目标对叠加涡旋光束传输及频移特性的影响研究还少见报道.

本文对拓扑荷值大小相同、符号相反的两束涡旋光进行了叠加仿真及实验, 利用角谱衍射理论, 分析了旋转随机粗糙表面均方根粗糙度对叠加涡旋光束传输特性的影响, 数值分析了叠加态涡旋光束经旋转随机粗糙表面的散斑场与参考光相干的结果, 并通过光强-时间函数分析了旋转目标转速对叠加态涡旋光束频移的影响.

2 基本原理

叠加态涡旋光束是由拓扑荷值不同的两束拉盖尔-高斯(Laguerre-Gaussian, LG)光束相叠加而成, 其光场表达式为^[19]

$$\begin{aligned} u^{l_1, l_2}(r, \phi) &= u^{l_1}(r, \phi) + u^{l_2}(r, \phi) \\ &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_0} \exp\left[-\frac{r^2}{w_0^2}\right] \sqrt{\frac{1}{|l_1|!}} \left[\frac{r\sqrt{2}}{w_0}\right]^{|l_1|} \exp(-il_1\phi) \\ &\quad + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_0} \exp\left[-\frac{r^2}{w_0^2}\right] \sqrt{\frac{1}{|l_2|!}} \left[\frac{r\sqrt{2}}{w_0}\right]^{|l_2|} \exp(-il_2\phi) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, r 为柱坐标的径向分量, ϕ 为方位角, l_1 和 l_2 为拓扑荷值, w_0 为束腰半径. 结合式(1)可得, t 时刻叠加态涡旋光束经随机粗糙表面散射后的信号光光场表达式为^[20,21]

$$U(r, \phi) = u^{l_1, l_2}(r, \phi) \exp(i l \Omega t) \cdot \exp[-ik(n-1)z(r, \phi)] \quad (2)$$

其中, $\exp(i l \Omega t)$ 为旋转因子, Ω 表示旋转目标的转速, k 是波数, l 为叠加态涡旋光束的拓扑荷值, n 和 $z(r, \phi)$ 分别表示折射率和随机粗糙表面的高度分布函数. 采用拓扑荷值大小相等、符号相反的涡旋光束叠加产生叠加态涡旋光束, 即 $|l_1| = |l_2|$. 在模拟非高斯粗糙表面的过程中, 对随机粗糙表面的高度分布函数 $z(r, \phi)$ 进行傅里叶变换可得^[22]

$$Z(\omega_x, \omega_y) = A(\omega_x, \omega_y) \sqrt{G_z(\omega_x, \omega_y)/C} \quad (3)$$

式(3)中, $A(\omega_x, \omega_y)$ 是由二维随机数列经傅里叶变换得到的功率谱密度函数, $G_z(\omega_x, \omega_y)$ 是对随机非高斯粗糙表面自相关函数 $R(x, y)$ 进行傅里叶变换后得到的功率谱密度函数, C 为常数. 随机粗糙表面的自相关函数 $R(x, y)$ 可以表示为^[23]

$$R(x, y) = \alpha^2 \exp\left\{-2.3 \left[\left(\frac{x}{\beta_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{\beta_y}\right)^2 \right]\right\} \quad (4)$$

式(4)中, α 为随机粗糙表面均方根粗糙度, β_x 和 β_y 分别表示不同方向上的相关长度, 标准差的平方(也称均方根粗糙度) α^2 是表征随机粗糙表面的参数, 用来评价概率分布的离散程度, 其表达式为^[24]

$$\alpha^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p(x) dx \quad (5)$$

若用离散点 Z_r 表示粗糙面, 则均方根粗糙度可以表示为

$$\alpha^2 = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} Z_r^2 \quad (6)$$

其中, 式(3)是对式(2)中的参数 $z(r, \phi)$ 进行傅里叶变换的结果, 式(4)说明了式(3)中的参数 $G_z(\omega_x, \omega_y)$, 式(5)和式(6)表述了式(4)中随机粗糙表面均方根粗糙度 α 的两种形式.

结合角谱衍射理论^[25], 得到经旋转随机粗糙表面

散射后的光场为

$$U(r, \phi, z) = F^{-1} \{ F \{ U(r, \phi) \} \cdot \exp[ikz \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}] \} \quad (7)$$

其中, f_x 和 f_y 为空间频率, $F\{\}$ 和 $F^{-1}\{\}$ 分别表示傅里叶变换和傅里叶逆变换.

为了分析不同转速下光场强度值随时间的变化情况, 利用波函数对涉及的光束进行展开. 在希尔伯特空间中, 任意一个态可由若干个基态线性组合表示, 其中基态 $|n\rangle$ 为单位矢量, 利用两个基态 $|n_1\rangle$ 和 $|n_2\rangle$ 可对任意的态进行展开, 其运算规则为 $\langle n_1 | n_2 \rangle = \langle n_2 | n_1 \rangle = 0$, $\langle n_1 | n_1 \rangle = \langle n_2 | n_2 \rangle = 1$. 而态的叠加是表示两个态的线性叠加, 其数学表达式为

$$\Psi = C_1 \Psi_1 + C_2 \Psi_2 + \dots + C_m \Psi_m \quad (8)$$

当空间中存在 m 个维度时, 可以表示为

$$|\Psi\rangle = \sum_n |n\rangle C_n \quad (9)$$

故参考光及叠加态涡旋光束的波函数表达式可以分别表示为

$$|\Psi_{\text{参}}\rangle = \sum_n |n_1\rangle C_0 \quad (10)$$

$$|\Psi_{\pm l}\rangle = \sum_n \frac{1}{\sqrt{2}} (|n_2 + l\rangle C_l + |n_2 - l\rangle C_{-l}) \quad (11)$$

叠加态涡旋光束经旋转目标散射后波函数表达式为

$$|\Psi_{\text{信}}\rangle = \sum_n \frac{1}{\sqrt{2}} (|n_2 + l\rangle C_l + |n_2 - l\rangle C_{-l}) \cdot \exp(i l \Omega t) \quad (12)$$

式(12)中, l 表示拓扑荷, C_0 , C_l 和 C_{-l} 分别为参考光和信号光的复振幅, $\exp(i l \Omega t)$ 是由物体旋转产生的附加旋转因子, Ω 为旋转目标转速, n 表示空间的维度. 当参考光与信号光相叠加, 可得叠加光场的光强-时间表达式为

$$\begin{aligned} I(t) &= \left(|\Psi_{\text{参}}\rangle + |\Psi_{\text{信}}\rangle \right)^2 \\ &= \left[\sum_n |n_1\rangle C_0 + \sum_n \frac{1}{\sqrt{2}} (|n_2 + l\rangle C_l + |n_2 - l\rangle C_{-l}) \exp(i l \Omega t) \right]^2 \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \left[C_{-l} \exp(-i l \Omega t) + C_l \exp(i l \Omega t) \right] \right\}^2 \end{aligned} \quad (13)$$

在信号光中, 拓扑荷值相等、符号相反的两束涡旋光束的复振幅 C_l 和 C_{-l} 的值相等, 引入欧拉公式 $\exp(i l \Omega t) = i \sin(i l \Omega t) + \cos(i l \Omega t)$ 以及倍角公式 $\cos 2\alpha = 2 \cos^2 \alpha - 1$, 化简式(13)得到

$$\begin{aligned} I(t) &= \frac{1}{2} \left\{ C_l \left[\exp(-i l \Omega t) + \exp(i l \Omega t) \right] \right\}^2 \\ &= 2 C_l^2 \left[\cos^2(i l \Omega t) \right] = C_l^2 \left[\cos(2 l \Omega t) + 1 \right] \end{aligned} \quad (14)$$

因此可得 $I(t) \propto [1 + \cos(2 l \Omega t)]$.

3 仿真及实验

在仿真过程中, 取光束波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 束腰半径 $w_0 = 5 \text{ mm}$, 传输距离 $z = 500 \text{ mm}$, 旋转目标的转速设置为固定值 $\Omega = 5 \text{ rad/s}$. 图 1 是拓扑荷值 l 分别为 $\pm 1, \pm 2, \pm 3$ 和 ± 10 叠加涡旋光束在自由空间传输的光强分布数值模拟结果.

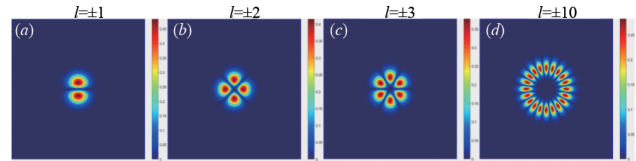


图 1 叠加态涡旋光束光强分布数值模拟图

从图 1 可以看出, 拓扑荷值大小相同符号相反的两束涡旋光, 叠加生成的叠加态涡旋光束的光强呈花瓣状分布, 花瓣的个数等于构成叠加态涡旋光束的每个涡旋光束拓扑荷值绝对值之和.

图 2(a)~(f) 表示拓扑荷值 l 分别为 $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5$ 和 ± 10 的叠加态涡旋光束经旋转目标散射后得到的信号光光强分布.

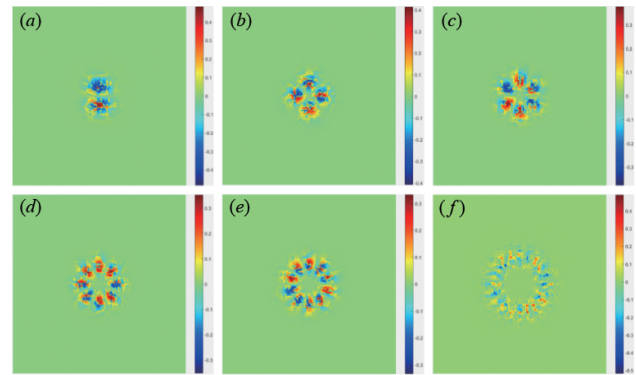


图 2 信号光的光强分布数值模拟图

从图 2 可以看出, 基模高斯光束经空间光调制器调制后得到叠加态涡旋光束, 由于旋转目标表面粗糙, 其上存在无数大小不同的颗粒状凸起, 光束照射在物体表面后会在局部发生散射, 从而造成入射光总能量的流失. 对比图 1 和图 2 的数值计算结果发现: 叠加态涡旋光束经旋转目标反射前后的光强分布差异明显, 反射前的光强分布均匀且连续, 然而经反射后的信号光携带了旋转目标的表面信息, 局部光强分布不连续, 光强分布总体呈衰弱趋势, 但花瓣状光强分布的特点仍保持不变.

图 3(a)~(f) 表示参考光和拓扑荷值 l 分别为 $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5$ 和 ± 10 的叠加态涡旋光束得到的信号光相叠加产生的结果, 其中参考光为基模高斯光束, 光强分布呈圆斑状, 连续且均匀.

对比图 2 和图 3 的数值计算结果发现: 参考光与信

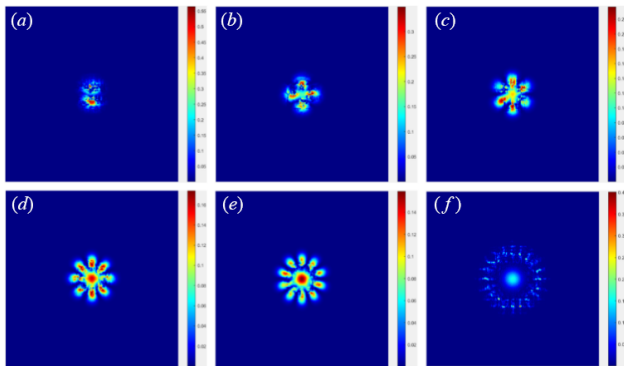


图3 参考光与信号光叠加的光强分布数值模拟图

号光发生叠加后的光强仍呈花瓣状分布,单个花瓣的强度得到补充,整体光强不再保持中空分布.

图4是涡旋光束探测旋转目标转速实验方案. He-Ne激光器(Laser)发出波长为632.8nm的基模高斯激光束,经扩束器(Beam Expander, BE)后被分光棱镜(Beam Splitter1, BS1)分为两束,一束光作为参考光,另一束光作为信号光,利用透镜L1(Lens1)将其汇聚至透射式空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)所加载的叉形光栅上,利用圆形光阑(Circular Aperture, CA)滤出一级衍射涡旋光束,随后光束照射至旋转目标(Spinning Object, SO)上,再经由反射镜(Reflecting Mirror, RM)到达分光棱镜(Beam Splitter2, BS2)处. 从BS1出射的参考光与经过旋转目标调制的涡旋光束在BS2处产生叠加,由电荷耦合元件(Charge Coupled Device, CCD)记录微弱的差频信号. 其中利用PC1(Personal Computer1)将叉形光栅计算全息图加载到空间光调制器上,用来产生涡旋光束;PC2(Personal Computer2)与CCD配合使用. 图5是叠加态涡旋光束光强分布实验结果图.

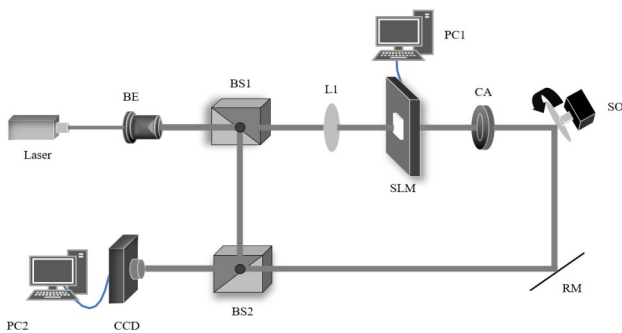


图4 涡旋光束探测旋转目标转速实验方案

如图5所示,位于中间的圆斑是经过空间光调制器衍射后的中央主极大,两侧呈花瓣状分布的光斑是经过空间光调制器调制后的一级衍射光,即不同拓扑荷值的叠加态涡旋光束. 对比图1发现实验与仿真结果

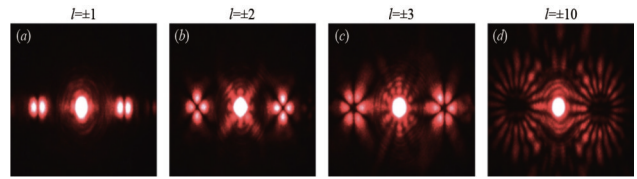


图5 叠加态涡旋光束光强分布实验结果图

保持一致.

4 旋转随机粗糙表面均方根粗糙度的影响

图6描述了随机粗糙表面均方根粗糙度 α 分别为20mm, 60mm, 100mm时,参考光与信号光(分别由拓扑荷值 l 为 ± 4 和 ± 10 的叠加态涡旋光束经旋转目标散射后得到)相叠加产生的不同结果.

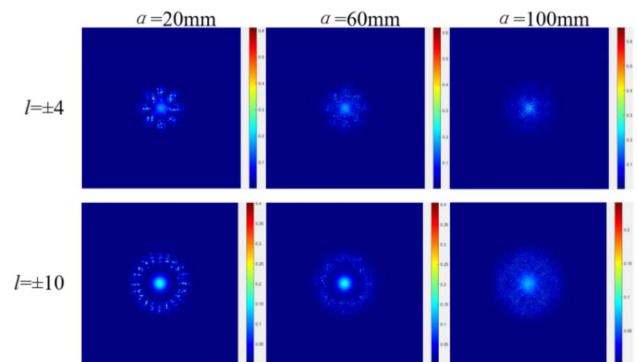


图6 随机粗糙表面不同均方根粗糙度对干涉图样光强分布的影响

由图6的数值计算结果可以看出:均方根粗糙度 α 越小,信号光与参考光叠加后的光强分布能保持花瓣状分布;反之,信号光与参考光叠加后的光强分布越离散,能量流失越严重,当均方根粗糙度 α 大于等于60mm时,则光强无法保持花瓣状分布.

图7是不同转速下归一化强度值的时域和频域曲线图. 将拓扑荷值 $l = \pm 1$ 的叠加态涡旋光束分别照射在转速 Ω 为 $2\pi/3\text{rad/s}$, $2\pi\text{rad/s}$, $10\pi/3\text{rad/s}$ 的旋转物体上,可以得到旋转目标在不同转速下,信号光与参考光叠加后的光强时域信号和频域信号变化曲线.

图7(a), (c), (e)表示当转速 Ω 分别为 $2\pi/3\text{rad/s}$, $2\pi\text{rad/s}$, $10\pi/3\text{rad/s}$ 时,叠加光场的光强随时间变化规律(在数值模拟的过程中,利用拓扑荷 $l = \pm 1$ 的叠加态涡旋光束得到信号光);图7(b), (d), (f)分别对应图7(a), (c), (e),将曲线图从时域变换至频域. 从频域信号中可以直观地看出,当叠加态涡旋光束拓扑荷数一定时,频率 Δf 随着转速 Ω 的增大而增大,两者成线性关系,即目标转速 Ω 分别为 $2\pi/3\text{rad/s}$, $2\pi\text{rad/s}$, $10\pi/3\text{rad/s}$ 时,对应的频率 Δf 分别为 $2/3\text{Hz}$, 2Hz , $10/3\text{Hz}$.

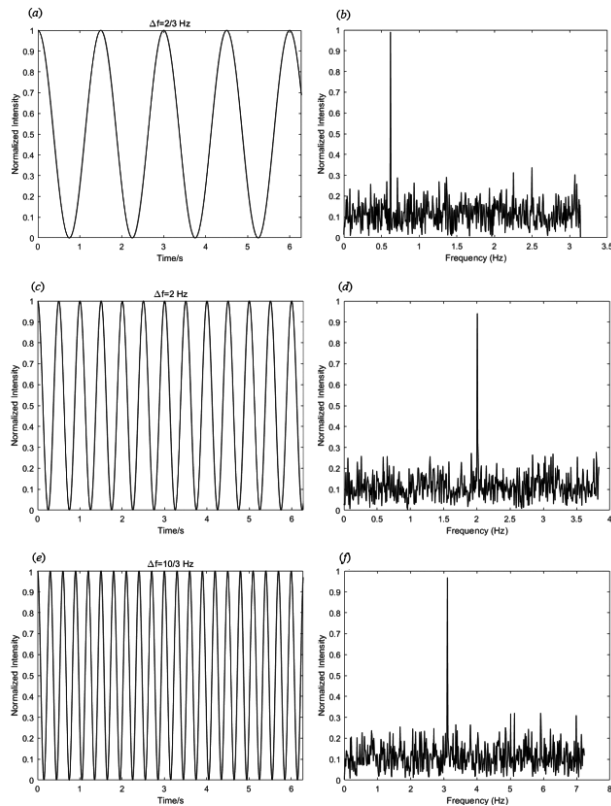


图7 不同转速下归一化强度值的时域和频域曲线图

5 结论

本文分析计算了叠加态涡旋光束的光场分布,通过实验产生了叠加态涡旋光束,推导了叠加态涡旋光束经旋转随机粗糙表面后的光场表达式,数值分析了随机粗糙表面不同均方根粗糙度对叠加态涡旋光束的影响.将相干探测原理与旋转多普勒效应相结合,研究了叠加态涡旋光束经旋转随机粗糙面的散斑场和频移特性,数值计算了叠加态涡旋光束经不同转速旋转随机粗糙表面的散斑场与参考光相干后,对应光场的归一化强度随时间变化的曲线,分析了旋转多普勒频移量与旋转目标转速之间的对应关系.研究表明:叠加态涡旋光束中心光强为零,光强呈花瓣状分布,参考光与散斑场相干后产生的光频差 Δf 为旋转多普勒频移,通过光强-时间函数间接求得频移量,利用涡旋光束的旋转多普勒频移公式反演出旋转目标的转速.当叠加态涡旋光束拓扑荷数一定时,频移量随着旋转目标转速的增加而不断增大,旋转目标的转速与频移量之间成线性关系.本文研究结果可为涡旋光束在旋转目标探测领域的研究提供一定参考.

参考文献

[1] 孙学宏,李强,庞丹旭,等.轨道角动量在无线通信中的研究新进展综述[J].电子学报,2015,43(11):2305-2314.

Sun X H, Li Q, Pang D X, et al. A summary of new research progress of orbital angular momentum in wireless communication[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(11): 2305 - 2314. (in Chinese)

[2] 柯熙政,薛璞.轨道角动量叠加态的产生及其检验[J].红外与激光工程,2018,47(4):1-6.

Ke X Z, Xue Pu. The production and test of the superposition state of orbital angular momentum[J]. Infrared & Laser Engineering, 2018, 47(4): 1 - 6. (in Chinese)

[3] 柯熙政,谢炎辰,张颖.涡旋光束轨道角动量检测及其性能改善[J].光学学报,2019,39(1):1-8.

Ke X Z, Xie Y C, Zhang Y. Orbital angular momentum measurement of vortex beam and its performance improvement[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 1 - 8. (in Chinese)

[4] Lavery M P, Speirits F C, Barnett S M, et al. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum [J]. Science, 2013, 341(6145): 537.

[5] Phillips D B, Lee M P, Speirits F C, et al. Rotational doppler velocimetry to probe the angular velocity of spinning micro-particles[J]. Physical Review A, 2014, 90(1): 011801.

[6] 付时尧,高春清.利用衍射光栅探测涡旋光束轨道角动量态的研究进展[J].物理学报,2018,67(3):1-9.

Fu S Y, Gao C Q. Progress of detecting orbital angular momentum states of optical vortices through diffraction gratings[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(3): 1 - 9. (in Chinese)

[7] 裴春萱,茅志翔,徐素鹏,等.涡旋光束轨道角动量的一种新型干涉检测方法[J].激光与光电子学进展,2019,56(14):1-7.

Pei C X, Mao Z X, Xu S P, et al. Interferometric detection method for orbital angular momentum of vortex beams[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(14): 1 - 7. (in Chinese)

[8] Cvijetic N, Milione G, Ip E, et al. Detecting lateral motion using light's orbital angular momentum[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 15422.

[9] Liu K, Cheng Y Q, Gao Y, et al. Super-resolution radar imaging based on experimental OAM beams[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(16): 164102.

[10] Zhou H L, Fu D Z, Dong J J, et al. Theoretical analysis and experimental verification on optical rotational doppler effect[J]. Optics Express, 2016, 24(9): 10050 - 10056.

[11] 齐倩倩,陈灿斌,徐天哲,等.基于物体对称性实现旋转多普勒效应的优化测量[J].厦门大学学报(自然科学版),2017,56(2):220-225.

Qi Q Q, Chen C B, Xu T Z, et al. Optimized measurement of rotational doppler effect based on object symme-

- try[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science Edition), 2017, 56(2): 220 – 225. (in Chinese)
- [12] Zhang W, Gao J S, Zhang D K, et al. Free-space remote sensing of rotation at the photon-counting level[J]. Physical Review Applied, 2018, 10(4).
- [13] Qiu S, Liu T, Ren Y, et al. Detection of spinning objects at oblique light incidence using the optical rotational doppler effect[J]. Optics Express, 2019, 27(17): 24781 – 24792.
- [14] Qiu S, Liu T, Li Z M, et al. Influence of lateral misalignment on the optical rotational doppler effect[J]. Applied Optics, 2019, 58(10): 2650 – 2655.
- [15] Zhai Y W, Fu S Y, Yin C, et al. Detection of angular acceleration based on optical rotational doppler effect[J]. Optics Express, 2019, 27(11): 15518 – 15527.
- [16] Zhou Z, Cheng Y, Liu K, et al. Rotational doppler resolution of spinning target detection based on oam beams[J]. IEEE Sensors Letters, 2019, 3(3): 1 – 4.
- [17] Zhao M Y, Gao X L, Xie M T, et al. Measurement of the rotational doppler frequency shift of a spinning object using a radio frequency orbital angular momentum beam[J]. Optics Letters, 2016, 41(11): 2549 – 2552.
- [18] Zhou H L, Fu D Z, Dong J J, et al. Orbital angular momentum complex spectrum analyzer for vortex light based on the rotational doppler effect[J]. Light Science & Applications, 2017, 6(2): 119 – 126.
- [19] Anguita J A, Herreros J, Djordjevic I B. Coherent multi-mode OAM superpositions for multidimensional modulation[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(2): 1 – 11.
- [20] 董洪成, 陶春先, 赵元安, 等. 高斯光束的合成特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(2): 171 – 176.
Dong H C, Tao C X, Zhao Y A, et al. Analysis of the synthesis characteristics of gaussian beams[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(2): 171 – 176. (in Chinese)
- [21] 刘曼. 涡旋光束形成的散斑场光强和相位的分布特性[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1 – 7.
Liu M. Distribution characteristics of intensity and phase of speckle field formed by vortex beams[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1 – 7. (in Chinese)
- [22] Hu Y Z, Tonder K. Simulation of 3-D random surface by 2-D digital filter and fourier analysis[J]. Int J Mach Tools Manuf, 1992, 32(1): 83 – 90.
- [23] Wu J J. Simulation of rough surfaces with FFT[J]. Tribology International, 2000, 33: 47 – 58.
- [24] Bakolas V. Numerical generation of arbitrarily oriented non-gaussian three-dimensional rough surfaces[J]. Wear, 2003, 254: 546 – 554.
- [25] Wang D D, Wang F M, Zou H, et al. Analysis of diffraction wavefront in visible-light point-diffraction interferometer[J]. Applied Optics, 2013, 52(31): 7602 – 7608.

作者简介



吕宏男, 1975年生, 山西运城人, 现为西安工业大学光电工程学院副教授, 主要研究方向为激光大气传输与测控技术.

E-mail: lvhong@xatu.edu.cn



党磊男, 1996年生, 陕西西安人, 现为西安工业大学在读硕士研究生, 主要研究方向为无线光通信与测控技术.

E-mail: 810446385@qq.com



贺蕊(通信作者)女, 1997年生, 陕西咸阳人, 现为西安工业大学在读硕士研究生, 主要研究方向为光场传输与调控.

E-mail: 2279443946@qq.com