

激光与光电子学进展

基于矢量光束空间偏振层析的相位精密测量

李春宇, 吴海俊, 姜嘉琪, Carmelo Rosales-Guzmán, 赵波*, 朱智涵**

哈尔滨理工大学黑龙江省量子调控重点实验室大珩协同创新中心, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 矢量光场独特的空间模式及偏振分布使其成为目前研究的热点问题, 模间相位的变化直接影响矢量光场的偏振分布, 使其在测量及传感领域具有巨大的应用潜力。提出并实验论证了一种由矢量光场注入的单频激光干涉仪技术: 首先将臂间微小位移映射为矢量传感光场的模间相位变化, 然后通过空间偏振层析实时监测、解算光场矢量模态, 进而可在任意相位变化区间(含相位不敏感区域)实现标准量子或海森堡(注入 N00N 态时)极限的相位测量精度。

关键词 矢量光束; 空间斯托克斯层析; 相位精密测量

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231119

Precision Phase Estimation Based on Spatial Stokes Tomography of Vector Beams

Li Chunyu, Wu Haijun, Jiang Jiaqi, Carmelo Rosales-Guzmán, Zhao Bo*, Zhu Zhihan**

Wang Da-Heng Collaborative Innovation Center, Heilongjiang Province Key Laboratory of Quantum Control, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, Heilongjiang, China

Abstract Vector light gains an increasing interest due to its exotic spatial polarization structure texture, which is governed by the intramodal phase of two orthogonal polarization components, and, in particular, has shown great potential in optical metrology. We present and demonstrate experimentally a novel laser interferometric technique fed by a vector sensing beam. The phase variation of the interferometer is first mapped into the intramodal phase of the sensing beam. Then, by *in-situ* characterizing the vectorial polarization state of the sensing beam via spatial Stokes tomography, a precision phase estimation approaching standard-quantum or Heisenberg (by feeding a N00N state) limit can be achieved in arbitrary phase ranges including insensitive regions.

Key words vector beam; spatial Stokes tomography; precision phase estimation

1 引言

现代光学干涉计量技术起源于 130 多年前著名的迈克耳孙-莫雷实验, 他们搭建的人类首台光学精密干涉仪否定了以太假说并助推了狭义相对论的发展^[1]。此后, 伴随着激光的诞生与发展, 光学干涉仪的性能实现了跨越式升级, 在基础研究领域发挥了重要作用(特别是证实了广义相对论预言的引力波)并助力了工业生产(特别是精密制造领域)的发展^[2]。在以迈克耳孙干涉仪为代表的单频双臂激光干涉仪中, 光场波函数具备典型的 SU(2) 代数结构^[3], 即 $\psi = E_1 + \exp(i\theta)E_2$, 其中: E_1 和 E_2 分别为干涉仪两臂的复振幅; 臂间相位变化 $\Delta\theta$ 可通过记录和分析干涉仪输出的

实振幅信号 ψ^2 估算, 进而实现光学波长尺度以下的关联参量如位置、加速度、频谱、温度、光谱和折射率等各类基础物理量以及表面形貌、机械结构形变、材料力学性能和薄膜厚度等微纳结构的测量^[4-5]。单频双臂激光干涉仪由于其非接触式、可溯源性等优势得到广泛应用。

激光干涉仪的性能取决于相位分辨率和相位敏感性, 且分别由光源波长和功率决定^[6]。由于探测器只能测量实数信息 ψ^2 , 使得对相位 $\Delta\theta$ 的估计存在相位敏感 $[\cos(\pi/2)]$ 与不敏感 $(\cos\pi)$ 区间^[7]。因此, 在任意相位区间内达到海森堡极限的相位估计需要通过相移操作实现对波函数 ψ 的无偏正交投影与态层析^[8-9]。近年来, 矢量光场在显微成像、微操控、光学通信传感

收稿日期: 2023-04-19; 修回日期: 2023-05-12; 录用日期: 2023-05-13; 网络首发日期: 2023-05-23

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: *zhaobo@hrbust.edu.cn; **zhuzhihan@hrbust.edu.cn

和量子信息传输等领域展现了巨大的应用价值^[10-15],其空间模式与偏振模式相互耦合形成的局域纠缠态在单频激光干涉仪精密测量中也存在着潜在优势。本文提出了一种基于矢量偏振传感光束的单频激光干涉仪,通过空间斯托克斯(Stokes)偏振层析技术在线监测传感光束的空间偏振形貌,并实现干涉仪臂间相位的实时解算,分析了具体原理然后通过实验进行验证。

2 基本原理

采用柱对称矢量偏振(CV)光束作为干涉测量的传感光束。该模型傍轴光场具有相对光轴旋转对称的空间偏振分布,其在柱坐标系 (r, φ, z) 下的傍轴模态结构(即波函数)可表述为典型的光学“自旋-轨道耦合(SOC)”态^[16]。

$$\begin{aligned} \psi_{CV}(r, \varphi, z) = & \sqrt{\alpha} \psi_L^{\pm l}(r, \varphi, z) \mathbf{e}_L + \\ & \exp(i\theta) \sqrt{1-\alpha} \psi_R^{\pm l}(r, \varphi, z) \mathbf{e}_R = \\ & A_{|l|}(r, \varphi, z) \left[\sqrt{\alpha} \exp(+i\varphi) \mathbf{e}_L + \right. \\ & \left. \exp(i\theta) \sqrt{1-\alpha} \exp(-i\varphi) \mathbf{e}_R \right], \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{e}_{L,R}$ 为正交、圆偏振态基矢; $\psi_{L,R}^{\pm l}(r, \varphi, z) = A_{|l|}(r, \varphi, z) \exp(\pm i\varphi)$ 是携带轨道角动量 $\pm \hbar l$ (l 又称

拓扑荷)、具有空间振幅 $A_{|l|}(r, \varphi, z)$ 的一对共轭涡旋光场; $\alpha \in [0, 1]$ 和 θ 分别为 $\mathbf{e}_{L,R}$ 偏振基矢分量的权重系数与模间相位。式(1)表明 CV 光场的模态构成与双臂干涉仪中的光场模态具有同样的(类量子比特)SU(2)代数结构。此外, CV 光场波前具有相对均匀的光强分布,经过干涉仪镜面时,能够在一定程度上降低引入的剪切损失,从而降低布朗热噪声^[17]。因此,如图 1(a)所示,将 SU(2)干涉仪的臂间相位映射到式(1) CV 光场的模间相位,对干涉仪臂长变化 $\Delta\theta$ 的参量估计问题就可转换为对 SOC 态的层析测量问题,即测定 SOC 态在单位球[也称高阶庞加莱球(HOPS)]赤道的位置及移动轨迹^[18]。由于测定的 SOC 态包含完整的波函数复参量信息,因此可在任意量程内实现相位敏感[即 $\cos(\pi/2)$ 邻域]区间的标准量子极限(或通过 N00N 矢量模式^[19]注入达到海森堡极限相位估计精度 $\Delta\theta = 1/n$ ^[20-21])。如图 1(b)所示,模间相位变化 $\Delta\theta$ 对于 CV 光场的影响体现在光束横截面各空间位置上“局域线偏振态”的旋转。因此,在已知拓扑荷的情况下(以 $l=1$ 为例),无须在 SOC 直积空间中做无偏正交投影测量确定 SOC 态,可利用空间分辨 Stokes 层析技术直接从光场偏振分布的变化中读取 $\Delta\theta$ ^[22]。

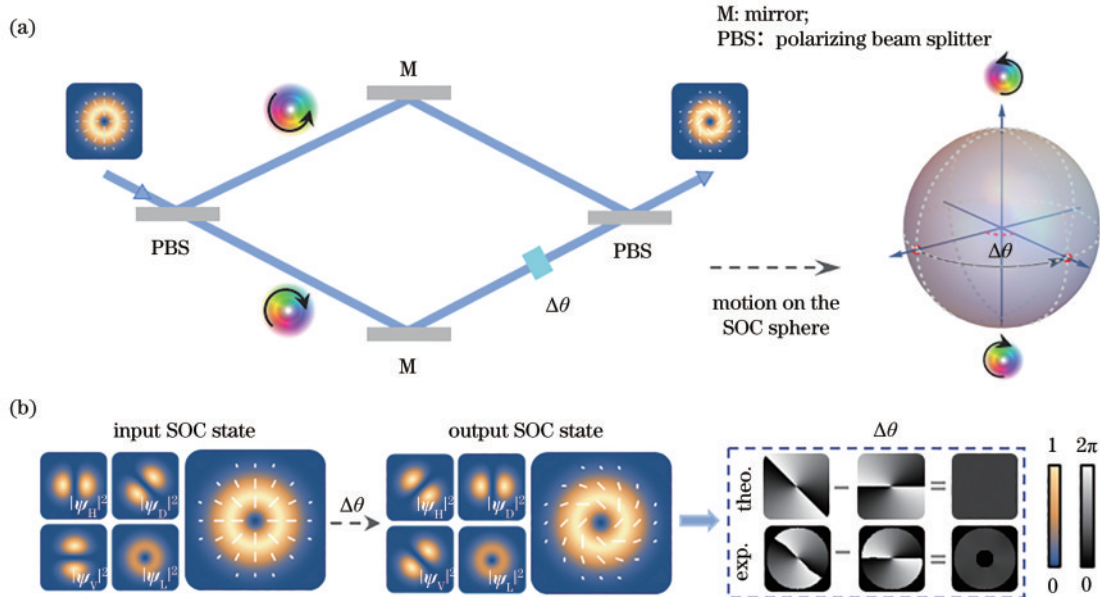


图 1 相位测量原理。(a) 矢量光 SU(2) 干涉仪; (b) 由 Stokes 层析测定的 SOC 态在干涉仪中的演化

Fig. 1 Schematic principle of precision phase estimation. (a) SU(2) interferometer fed by SOC state; (b) corresponding states transformation determined by spatial Stokes tomography

空间分辨的 Stokes 测量是指利用空间面阵光电探测器[如电荷耦合器件(CCD)或互补金属氧化物半导体器件(CMOS)相机]配合偏振态元件筛选实现空间分辨的 Stokes 层析,即 $\langle \psi_{CV}(r, \varphi) | \hat{\sigma}_{1-3}(r, \varphi) | \psi_{CV}(r, \varphi) \rangle$, 获取光场的空间 Stokes 分布 $S_{0-3}(r, \varphi)$, 以重构出被测光束的偏振空间

结构分布。如图 1(b)所示,实际操作中可只采集被测光场在水平、垂直、对角线及任一圆偏振基矢下的振幅分布 $\psi_{H,V,D,L}(r, \varphi)$ 。在此基础上,可以获得被测 CV 光场的横向二维偏振椭圆偏角分布,

$$\nu(r, \varphi) = \frac{1}{2} \text{atan2}[S_2(r, \varphi), S_1(r, \varphi)], \quad (2)$$

式中 atan2 为四象限反正切函数。需要指出的是, $2\nu(r, \varphi)$ 描述了 SOC 态中 $\psi_{L,R}^{\pm}(r, \varphi, z)$ 分量间相对相位差的空间分布[如图 1(b)所示], 即

$$2\nu(r, \varphi) = \arg[\psi_L^+(r, \varphi)] - \arg[\psi_R^-(r, \varphi)] = 2l\varphi + \theta + \delta(r, \varphi), \quad (3)$$

式中: $\arg(\cdot)$ 为复数的幅角函数; $\delta(r, \varphi)$ 为空间相位噪声, 主要受矢量光束制备纯度、干涉仪内部器件的波前平整度以及测量过程中的器件误差影响^[23]。理想情况 [$\delta(r, \varphi) \equiv 0$] 下 SOC 态的模间相位 $\theta = 2\nu(r, \varphi) - 2l\varphi$, 而实验中 CV 光束注入的干涉仪臂间相位变化量可由观测到的空间相位分布, 即 $\theta + \delta(r, \varphi)$, 取坐标平均求得,

$$\Delta\theta = 2\sqrt{[\nu(r, \varphi) - \nu'(r, \varphi)]}, \quad (4)$$

式中, $\nu'(r, \varphi)$ 为除模间相位外的系统初始状态。

与 SOC 直积空间中的基矢投影相比, 上述空间分辨偏振子空间投影法将 $\Delta\theta$ 的相位估计问题转换为光束横截面上每个位置的偏振方向的测量, 实现了全局模间相位 θ 的多次测量, 减小了测量误差。此外, 共轭轨道动量模式的衍射特性为干涉仪的校准提供了便利, 它剔除了“偏振混合态”对干涉可见度的影响, 有利于相位测量精度的提升。

3 实验结果与分析

实验原理如图 2 所示, 入射光源选取波长为 800 nm 的水平偏振 TEM_{00} 模式, 光源直径为 2.2 mm, 将其入射到 Q-plate ($q = 1/2$) 产生圆偏振基底的 CV

光束。光束由四分之一波片 QWP1 转换为线偏振基底后, 经由偏振分光棱镜 (PBS) 进入迈克耳孙干涉仪 (反射镜 M1、M2 所在干涉臂分别为测量臂与参考臂)。两臂内四分之一波片 QWP1、QWP2 慢轴均相对水平旋转 45° , 以完成两臂偏振状态的互换。干涉仪测量臂额外插入全波液晶延迟器 LCR (Thorlabs, LCC1113-B), 以模拟干涉仪相位变化。两臂中的光束由反射镜 M1、M2 反射后, 再次经过 PBS 完成合束, 通过 QWP3 完成偏振基底转换, 从而获得包含干涉仪相位信息的圆偏振矢量光束。为了实现相位变化的实时测量并减少测量误差, 实验中采用液晶几何相位元件实现四端口非偏振分束器 (NPBS) 功能。将干涉仪出射的矢量光场复制为完全相同的 4 束光, 光通过由波片和检偏器组成的偏振滤波器 (PF) 后, 水平、垂直、对角和左旋圆偏振投影测量同时完成, 光束质量分析仪 CCD (Thorlabs, BC106N-VIS/M, 口径为 $8.8 \text{ mm} \times 6.6 \text{ mm}$ 、分辨率为 $1360 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 、像素单元大小为 $6.45 \mu\text{m}$) 得以在同一帧内记录四个偏振投影, 完成单帧的矢量模式偏振层析。其中, 透镜 L1 收束 NPBS 分束后的光束指向, 以确保四个偏振投影同时被 CCD 记录 (集成中性衰减片确保到达芯片的光功率在 nW 以下)。利用 MATLAB 对采集到的 Stokes 层析结果及相应模间相位进行实时解算, 进而实现对 LCR 施加相位延迟量的超精密在线监测。此外, 径向矢量光入射时, 将干涉仪两臂锁定, 并将 CCD 沿光束轴向旋转一定角度, 偏振层析后计算所得全局模间相位 θ 与 CCD 旋转角度 β 满足 $\beta = \theta/2$ 。因此, 所述相位精密测量方法还可应用于旋转角度测量领域, 此时相

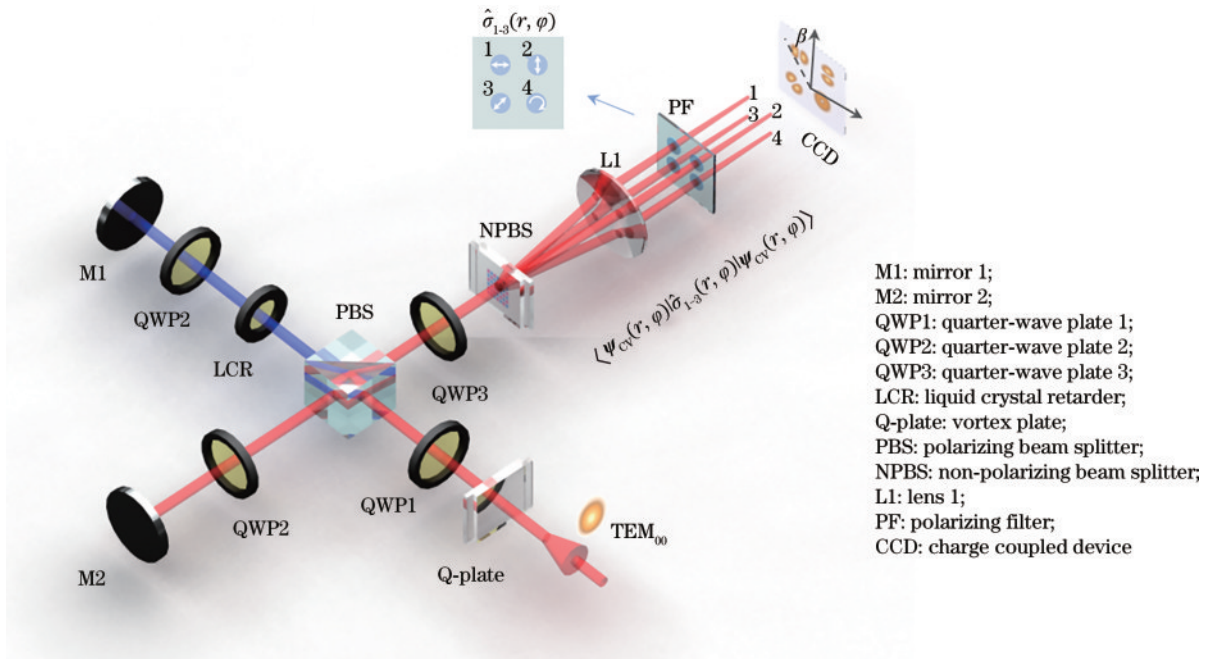


图 2 实验原理图

Fig. 2 Experimental schematic diagram

位分辨率将与拓扑荷 l 呈线性关系^[24]。

实验中,首先通过改变 M1 臂中 LCR 的控制电压,在 $0 \sim 2\pi$ 相位区间内构造 23 个等间隔的相位延迟步长,并利用上述原理进行相位估计。图 3(a) 为 23 个对应 SOC 态在 HOPS 上的位置,其中 $|a\rangle, |b\rangle, |c\rangle, |d\rangle$ 4 个相互无偏正交态的位置在图中标出;图 3(b) 为测得 23 个点位模间相位 θ 分布在相位视图下的等效振幅信号;图 3(c) 为计算所得相位的增长曲线。其中,LCR 调控的平均延迟步长 $\Delta\theta = 0.2786 \text{ rad}$,当前光源波长

条件下,干涉仪等效臂长变化为 35.4 nm。在此基础上,以 SOC 态 $|c\rangle$ (对应于角向 CV 偏振光束) 为中心相位,通过微调 LCR 的电压测试其相位调制分辨率(等步长延迟)上限。如图 3(d) 所示,最终测得 $\Delta\theta = 0.0277 \text{ rad}$ 的极限等步长平均相位延迟,此时对应 3.53 nm 的干涉仪等效臂长变化。上述纳米级相位调制在线超精密监测表明该迈克耳孙实验装置已具备亚纳米级相位测量精度。

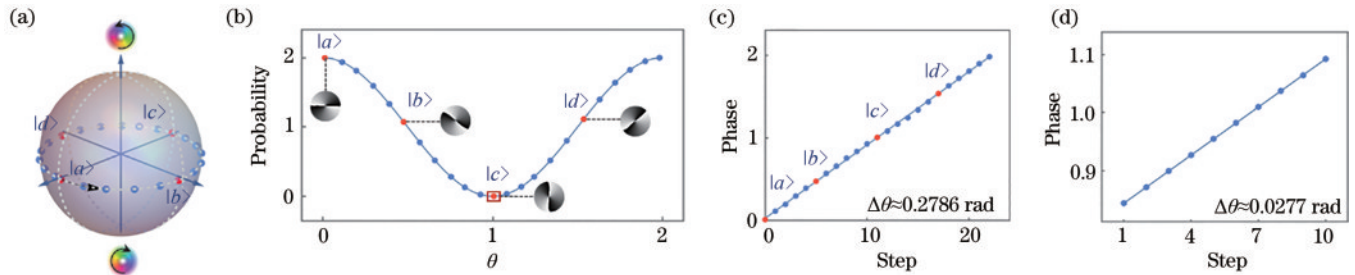


图 3 相位测量实验结果。(a)测得 SOC 态在 HOPS 上的位置分布;(b)等效干涉振幅信号;(c)等相位步进曲线;(d)LCR 的极限等相位步进分辨率

Fig. 3 Experimental results of phase measurement. (a) Measured SOC states on the HOPS; (b) equivalent interferometric amplitude signal; (c) corresponding equal phase steps; (d) measured minimum phase step of LCR

4 结 论

通过对 CV 矢量光束全局模间相位与激光干涉仪臂长之间的关系进行理论分析,给出了基于空间分辨偏振层析方法直接获得干涉仪的复相位信息的技术方案,并搭建迈克耳孙干涉仪对方案进行实验论证,在相位不敏感区间实现了纳米级等步长相位调制的实时在线测量。实验结果表明所提矢量光束干涉层析原理为亚纳米、皮米级干涉测量技术提供了一种有潜力的技术路线。该技术基于光场偏振形貌可视化在线监测方案在实现 SOC 模间相位信息实时解算的同时,还能有效抑制非线性误差。此外,该原理还可用于涡旋光场观测坐标系旋转效应实现旋转角度的精密测量,在光学干涉测量领域中具有广泛的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] Michelson A A, Morley E W. On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether[J]. American Journal of Science, 1887, 34(203): 333-345.
- [2] Abbott B P. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. Physical Review Letters, 2017, 116(6): 061102.
- [3] Yurke B, McCall S L, Klauder J R. SU(2) and SU(1, 1) interferometers[J]. Physical Review A, 1986, 33(6): 4033-4054.
- [4] Liu T, Zhang L, Zhang G Y, et al. A laser interferometric subnano-scale micro-displacement measurement system based on variable phase retardation[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(2): 377.
- [5] 施玉书, 张树, 连笑怡, 等. 毫米级纳米几何特征尺寸计量标准装置多自由度激光干涉计量系统[J]. 计量学报, 2020, 41(7): 769-774.
- [6] Shi Y S, Zhang S, Lian X Y, et al. Multi-DOF laser interferometry system for metrological standard device for nano-geometrical characteristic size in millimeter range [J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(7): 769-774.
- [7] Datta A, Zhang L J, Thomas-Peter N, et al. Quantum metrology with imperfect states and detectors[J]. Physical Review A, 2011, 83(6): 063836.
- [8] Dowling J P. Quantum optical metrology-the lowdown on high-N00N states[J]. Contemporary Physics, 2008, 49 (2): 125-143.
- [9] Holland M J, Burnett K. Interferometric detection of optical phase shifts at the Heisenberg limit[J]. Physical Review Letters, 1993, 71(9): 1355-1358.
- [10] Wiesniak M, Paterek T, Zeilinger A. Entanglement in mutually unbiased bases[J]. New Journal of Physics, 2011, 13(5): 053047.
- [11] Rosales-Guzmán C, Ndagano B, Forbes A. A review of complex vector light fields and their applications[J]. Journal of Optics, 2018, 20(12): 123001.
- [12] Simpson N B, Dholakia K, Allen L, et al. Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: an optical spanner[J]. Optics Letters, 1997, 22(1): 52-54.
- [13] Mao L W, Ding D S, Rosales-Guzmán C, et al. Propagation-invariant high-dimensional orbital angular momentum states[J]. Journal of Optics, 2022, 24(4): 044004.
- [14] 刘海达, 黑小兵, 杨洋, 等. 用于水下光通信高维调制与解调的轨道角动量叠加态[J]. 激光与光电子学进展,

- 2023, 60(9): 0901001.
- Liu H D, Hei X B, Yang Y, et al. Orbital angular momentum in a superposition state for high-dimensional modulation and demodulation in underwater optical communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(9): 0901001.
- [14] 唐若愚, 邱松, 刘通等. 基于双重傅里叶分析的光学旋转多普勒频移优化测量[J]. *光学学报*, 2023, 43(7): 0726002.
- Tang R Y, Qiu S, Liu T, et al. Optimized measurement of optical rotational doppler shift using dual Fourier analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(7): 0726002.
- [15] 马荣, 温虹, 曾理, 等. 轨道角动量复用光场的高斯量子关联[J]. *量子光学学报*, 2022, 28(2): 123-130.
- Ma R, Wen H, Zeng L, et al. Gaussian quantum discord of orbital angular momentum multiplexed optical fields [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2022, 28(2): 123-130.
- [16] Zhan Q W. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(1): 1-57.
- [17] Chelkowski S, Hild S, Freise A. Prospects of higher-order Laguerre-Gauss modes in future gravitational wave detectors[J]. *Physical Review D*, 2009, 79(12): 122002.
- [18] Milione G, Sztul H I, Nolan D A, et al. Higher-order Poincaré sphere, stokes parameters, and the angular momentum of light[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(5): 053601.
- [19] Hiekkamäki M, Bouchard F, Fickler R. Photonic angular superresolution using twisted N00N states[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 127(26): 263601.
- [20] Steuernagel O. De Broglie wavelength reduction for a multiphoton wave packet[J]. *Physical Review A*, 2002, 65(3): 033820.
- [21] Ou Z Y. Fundamental quantum limit in precision phase measurement[J]. *Physical Review A*, 1997, 55(4): 2598-2609.
- [22] Selyem A, Rosales-Guzmán C, Croke S, et al. Basis-independent tomography and nonseparability witnesses of pure complex vectorial light fields by Stokes projections [J]. *Physical Review A*, 2019, 100(6): 063842.
- [23] 杨军, 刘志海, 苑立波. 波片对偏振激光干涉仪非线性误差的影响[J]. *光子学报*, 2008, 37(2): 364-369.
- Yang J, Liu Z H, Yuan L B. Effects of wave plate on nonlinear errors in polarization laser interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(2): 364-369.
- [24] D'Ambrosio V, Spagnolo N, Del Re L, et al. Photonic polarization gears for ultra-sensitive angular measurements [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2432.