

基于压缩态光场的量子增强型光学相位追踪*

孙小聪¹⁾²⁾ 李卫²⁾ 王雅君²⁾ 郑耀辉^{2)†}

1) (太原科技大学应用科学学院, 山西省精密测量与在线检测装备工程研究中心, 山西省光场调控与融合应用技术创新中心, 太原 030024)

2) (山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

(2023 年 11 月 22 日收到; 2023 年 12 月 1 日收到修改稿)

量子增强型光学相位追踪作为高精度跟踪和测量光学相位的量子光学技术, 在目标定位、量子测距以及相控阵雷达和喷呐等领域中有着重要应用. 本文提出一种基于压缩态光场的量子增强型光学相位追踪协议. 采用中心波长为 1064 nm 的连续固体激光光源, 结合光学参量振荡器以及 Pound-Drever-Hall (PDH) 锁定技术, 制备得到初始压缩度为 (8.0 ± 0.2) dB 的相位压缩态光场. 通过信号调制及解调技术, 实现对压缩态光场相位的控制, 从而实现对光学相位 $0-2\pi$ 范围内的量子增强型追踪. 与经典协议相比, 这一协议可以将相位追踪的噪声起伏抑制至散粒噪声基准以下至少 6.27 dB, 实现了相位追踪精度至少 76.4% 的量子增强. 由于到达角估计、相控阵雷达、相控阵喷呐等应用领域对相位测量精度要求极高, 这一协议有望将相位估计的精度提高至突破散粒噪声极限, 为相关领域提供压缩光源, 也为更高精度的空间定位及量子测距技术提供理论和实验基础.

关键词: 光学参量振荡, 压缩态光场, 相位估计, 光学相位追踪**PACS:** 42.50.-p, 42.50.Lc, 42.50.Dv**DOI:** 10.7498/aps.73.20231835

1 引言

为了应对经典光学传感的灵敏度受量子噪声限制的问题, 量子计量利用非经典光场 (压缩态或纠缠态) 的量子关联特性, 将测量误差抑制为原来的 $1/\sqrt{n}$, 从而将测量精度提高至接近或达到海森堡边界 $1/n$ ^[1,2]. 自首次实现基于压缩光的量子传感^[3]以来, 利用量子态增强计量精度的技术已被广泛应用于引力波探测^[4]、磁场测量^[5]、生物测量^[6]和医学成像^[7]等传感设备中, 证明量子计量协议能够实现突破散粒噪声限制的测量灵敏度.

光学相位传感^[8]作为高精度相位测量的主要工具, 对于目标追踪^[9]、相控阵雷达和喷呐^[10]等领域都有着至关重要的意义. 目前相位传感主要是通

过分布式量子传感协议来实现多个传感节点联合相位的高精度测量. 2020 年, Guo 等^[11]采用连续变量四组分纠缠态光场, 对 4 个传感节点的平均相位进行测量, 证明利用分布式量子传感协议可以将相位的估计灵敏度提高至突破散粒噪声极限. 同年, Xia 等^[12,13]通过配置 3 个传感节点的最优权重, 探索了纠缠态网络与光学相位传感量子优势之间的关联特性, 解锁了基于连续变量三组分纠缠态的射频相位传感协议. 2022 年, Sun 等^[14]基于分布式传感网络提出了量子定位和量子测距协议, 开辟了相位传感在相控阵雷达方面的广泛应用.

本文提出一种量子增强型光学相位追踪 (quantum-enhanced optical phase tracking, QOPT) 协议, 旨在研究单节点光学相位传感对于压缩态光场与量子增强优势的关联特性, 这对于发展高精度

* 国家自然科学基金 (批准号: 62225504, 62027821, 62035015, U22A6003, 12174234, 12274275, 12304403)、国家重点研发计划 (批准号: 2020YFC2200402) 和山西省重点研发计划 (批准号: 202102150101003) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yzhzheng@sxu.edu.cn

目标追踪技术有着重要意义. 其基本过程如下: 利用工作在放大状态的光学参量振荡器, 制备得到初始的相位压缩态光场. 通过微弱信号调制技术实现压缩态光场的相位控制, 解调得到光学相位 $0-2\pi$ 范围内的追踪信号. 由于压缩态光场噪声起伏突破散粒噪声极限的特性, 最终实现相位追踪精度提高 76.4% 以上, 展示了本协议的量子增强优势. 这一协议有望将相位估计的精度提高至突破散粒噪声极限, 为目标追踪、相控阵雷达和喷呐等相关领域提供压缩光源, 也为更高精度的空间定位及量子测距技术提供理论和实验基础.

2 QOPT 理论模型

QOPT 协议主要是基于微弱信号的调制与解调技术, 当光学信号由于叠加的调制信号而发生微小变化时, 通过平衡零拍探测技术与解调压缩态光场的相位, 实现光学相位测量. 由于量子测不准原理, 压缩态光场的相位起伏低于散粒噪声极限, 使得解调出的光学相位噪声基底被抑制, 实现相位追踪精度的提高. 其基本原理如下: 采用自制宽带电光调制器^[15] (electro-optic modulator, EOM) 在相位压缩态光场上叠加一个正弦 RF 调制信号 $E_s \cos(\Omega t + \varphi_s)$, 其中 E_s , Ω 和 φ_s 分别为调制信号的幅度、载波频率和相位. 因此, 通过驱动 EOM 的相位 φ_s , 可以实现对压缩态光场的相位控制. 通过解调压缩态光场的相位, 最终平衡零拍探测器测量得到的相移 α_s 可以表示为

$$\alpha_s = \varepsilon_s E_s \sin \varphi_s, \quad (1)$$

其中, $\varepsilon_s = \pi\gamma/V_\pi$ 为射频-光子转换系数, 数值大小由 EOM 的半波电压 V_π 和压缩态光场的幅度 γ 决定. 由 (1) 式可知, 通过平衡零拍探测器得到的相移 α_s , 可以实现对压缩态光场相位 φ_s 的追踪. 由于相位压缩态光场的抑噪特性, 最终相移的估计方差可以表示为

$$\delta^2 \alpha_s = 1 - \frac{4\eta}{\left(1 + \sqrt{P/P_{th}}\right)^2 + 4(f/\kappa)^2}, \quad (2)$$

其中, $\eta = 0.98$ 为 QOPT 系统的探测效率, 与压缩态光场输出后光学元件的损耗有关, 直接决定了最终光学相位追踪的精度. $P/P_{th} = 0.8$ 表示光学参量振荡器的泵浦光功率与阈值的比值, 此时输出相位压缩态光场的压缩度最高. $f = 3$ MHz 为光学

信号追踪的测量频率, 实际中需要根据追踪光学相位的频率进行选择. $\kappa = 70$ MHz 为光学参量振荡器的线宽.

通过微弱信号调制解调技术对信号光场的相位进行控制, 经典协议和 QOPT 协议都可以实现光学相位追踪功能. 与经典协议相比, QOPT 协议主要是引入了噪声起伏突破散粒噪声极限的压缩态光场, 使追踪进度进一步提高.

3 实验系统

图 1 为基于压缩态光场的 QOPT 实验装置图, 整个系统由压缩态光场制备系统、光学相位估计系统以及数据后处理三部分组成. 采用全固态高功率低噪声连续 1064 nm 单频激光器输出的 2.5 W 激光光源, 将其分为两部分. 大部分激光进入倍频腔进行二次谐波转换过程, 用于为光学参量振荡器 (optical parametric oscillator, OPO) 提供 532 nm 的泵浦光源. 剩余激光作为信号光和本底探测光, 分别用于锁定 OPO 的腔长和位相, 并利用平衡零拍探测器对光学相位进行测量.

相位压缩态光场主要通过 OPO 参量下转换过程制备. 采用半整块 OPO 腔型结构设计^[16,17], 主体由尺寸为 1 mm×2 mm×10 mm 的 PPKTP 晶体和一片与压电陶瓷粘接的凹面镜组成. PPKTP 晶体凸面的曲率半径为 12 mm, 端面镀有 1064 nm 高反和 532 nm 减反膜; 平面的镀膜参数为 1064 nm 和 532 nm 增透膜. 输出耦合镜的曲率半径为 30 mm, 镀 532 nm 高反膜, 对 1064 nm 的透射率为 $12\% \pm 1.5\%$. 晶体与输出耦合镜的间隙为 27 mm. 镀膜参数选择 532 nm 泵浦光在腔内单次穿过, 1064 nm 基频光在腔内共振, 因此, OPO 是单共振腔. 另外, PPKTP 晶体对 1064 nm 激光的折射率为 1.8302, 计算可得 OPO 的自由光谱区为 3.3 GHz, 线宽为 70 MHz, 精细度约为 47^[18].

为了实现 QOPT 协议, OPO 应该工作在放大状态, 因此采用 PDH 锁定技术对 OPO 的腔长及位相进行锁定. 如图 1(a) 所示, 采用自制的双路平衡零拍探测器在 OPO 的反射端提取误差信号, 经过混频解调后, 一路反馈至 OPO 的压电陶瓷上, 用于锁定 OPO 的腔长, 使 1064 nm 基频光在 OPO 内共振; 一路反馈至泵浦光的移相器, 用于将信号光与泵浦光的相对位相锁定在 0 位相, 并补偿压缩

光场的正交位相分量结果如图 3(b) 所示, 平均幅度为 47.03 mV, 相位估计结果与经典协议一致. 但是由于压缩态光场正交位相分量噪声低于散粒噪声极限 8.0 dB, 光场起伏大幅度降低, 此时标准差降低为 (5.69 ± 0.02) mV, 仅为经典协议的 48.55%. 结果表明, QOPT 协议与经典协议通过微弱信号调制与解调技术, 均可以由正交位相分量对光学相位进行估计, 从而可以实现光学相位追踪功能. 与

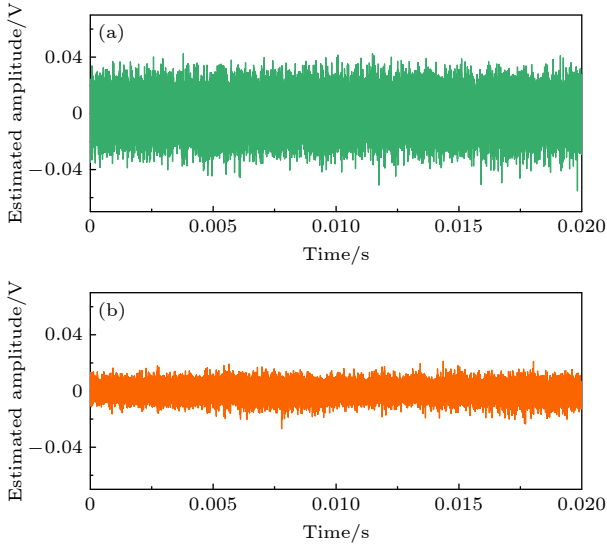


图 2 无调制相位时示波器采集到的正交位相分量信号 (a) 基于相干光的测量结果; (b) 基于压缩光的测量结果

Fig. 2. Phase quadrature components acquired by oscillator without phase modulation: (a) Measured results via coherent state; (b) measured results via squeezed state.

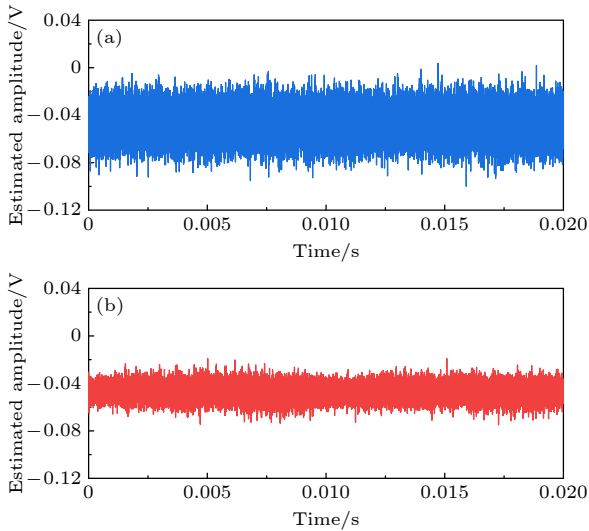


图 3 调制相位为 $-\pi/2$ 时示波器采集的正交位相分量 (a) 基于相干光的测量结果; (b) 基于压缩光的测量结果

Fig. 3. Phase quadrature components acquired by oscillator with phase modulation of $-\pi/2$: (a) Measured results via coherent state; (b) measured results via squeezed state.

经典协议相比, QOPT 协议的优势在于相位估计的噪声起伏降低了 6.27 dB, 意味着相位测量精度提高 76.4%.

为了验证 QOPT 协议对光学相位的实时追踪功能, 通过调节 EOM 的调制相位, 对 EOM 的相位结果进行一一对应分析. 图 4(a) 为 BHD 测量的光学相位结果, 其中数据点为实测结果, 蓝色实线为正弦拟合结果, 浅绿色和深绿色阴影区域分别代表基于相干态与压缩态的光学相位的噪声起伏. 结果显示, 当压缩态光场的调制相位从 0° 改变到 360° 时, 实际测量追踪的光学相位呈现出正弦变化趋势, 与理论预估结果一致. 与经典协议相比, 基于压缩态光场的 QOPT 协议呈现出大幅度噪声起伏降低.

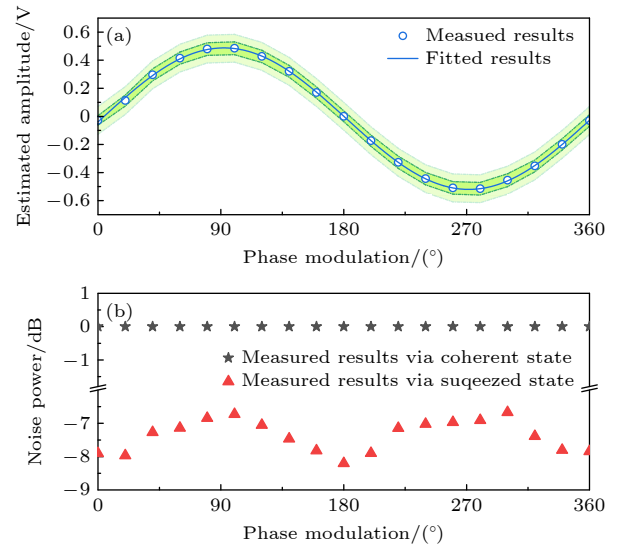


图 4 光学相位的追踪结果 (a) 调制相位与测量相移的依赖关系; (b) 基于相干光与压缩光两种状态下, 光学相位的噪声方差

Fig. 4. Optical phase tracking results: (a) Dependence of measured phase amplitude on phase modulation; (b) noise variance of optical phase via coherent state and squeezed state.

为了清楚地表征压缩态光场的量子增强特性, 对每个调制相位的噪声方差进行计算. 图 4(b) 给出了不同调制相位下, 基于相干态与压缩态的噪声方差结果, 其中黑色星点和红色三角分别代表基于相干光与压缩光的测量结果. 当调制相位为 0° , 180° 和 360° 时, 光学相位的噪声起伏可降低至散粒噪声基准以下 8.0 dB, 追踪精度可提高 84.2%. 然而, 由于调制相位的微弱变化会造成正交位相分量的噪声起伏, 使得最终结果的噪声方差起伏较大.

即便如此,与经典协议相比,QOPT协议也可以将光学相位的噪声直接抑制至散粒噪声基准以下至少 (6.23 ± 0.2) dB,相位估计精度提高至少 76.4%.

5 结 论

本文提出一种 QOPT 协议,探索压缩态光场在单节点相位传感任务中的应用.结合工作在放大状态的 OPO 和 PDH 锁定技术,制备得到初始压缩度为 (8.0 ± 0.2) dB 的相位压缩态光场.通过调制压缩态光场的相位,实现 $0-2\pi$ 范围内光学相位的实时测量,最终呈现为正弦变化趋势,与理论预估结果一致.为了表征 QOPT 协议的量子增强特性,对基于相干光与压缩光两种方案下光学相位的噪声方差进行计算.与经典协议相比,当调制相位为 0° , 180° 和 360° 时,光学相位的噪声起伏可降低至散粒噪声基准以下 8.0 dB,追踪精度可提高 84.2%.当调制相位在 $0^\circ-360^\circ$ 变化时,QOPT 协议将光学相位的噪声直接抑制至散粒噪声基准以下至少 (6.23 ± 0.2) dB,相位估计精度提高至少 76.4%.这一协议将为更高精度的空间定位及量子测距技术提供理论和实验基础.

参考文献

- [1] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L 2011 *Nat. Photon.* **5** 222
- [2] Pezze L, Smerzi A, Oberthaler M K, Schmied R, Treutlein P 2018 *Rev. Mod. Phys.* **90** 035005
- [3] Caves C M 1981 *Phys. Rev. D* **23** 1693
- [4] Tse M, Yu H, Kijbunchoo N, et al. 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 231107
- [5] Li B B, Blek J, Hoff U B, Madsen L S, Forstner S, Prakash V, Schäfermeier C, Gehring T, Bowen W P, Andersen U L 2018 *Optica* **5** 850
- [6] Taylor M A, Janousek J, Daria V, Knittel J, Hage B, Bachor H A, Bowen W P, 2013 *Nat. Photon.* **7** 229
- [7] Low G H, Yoder T J, Chuang I L 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 100801
- [8] Xu H, Chen S X, Wu H, Chen K, Hong L 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 024204 (in Chinese) [徐涵, 陈树新, 吴昊, 陈坤, 洪磊 2019 物理学报 **68** 024204]
- [9] Li T C, Song Y, Fan H Q 2023 *Signal Process.* **205** 108883
- [10] Shi C, Wang Y, Salous S, Zhou J, Yan J 2022 *IEEE T. Aero. Elec. Sys.* **58** 2762
- [11] Guo X, Breum C R, Borregaard J, Izumi S, Larsen M V, Gehring T, Christandl M, Neergaard-Nielsen J S, Andersen U L 2020 *Nat. Phys.* **16** 281
- [12] Xia Y, Li W, Clark W, Hart D, Zhuang Q T, Zhang Z S 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 150502
- [13] Xia Y, Li W, Zhuang Q T, Zhang Z S 2021 *Phys. Rev. X* **11** 021047
- [14] Sun X C, Li W, Tian Y H, Li F, Tian L, Wang Y J, Zheng Y H 2022 *Photonics Res.* **10** 2886
- [15] Tian L, Zheng L A, Zhang X L, Wu Y M, Wang Q W, Qin B, Wang Y J, Li W, Shi S P, Chen L R, Zheng Y H 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 148502 (in Chinese) [田龙, 郑立昂, 张晓莉, 武奕森, 王庆伟, 秦博, 王雅君, 李卫, 史少平, 陈力荣, 郑耀辉 2023 物理学报 **72** 148502]
- [16] Zhang X L, Wang Q W, Yao W X, Shi S P, Zheng L A, Tian L, Wang Y J, Chen L R, Li W, Zheng Y H 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 184203 (in Chinese) [张晓莉, 王庆伟, 姚文秀, 史少平, 郑立昂, 田龙, 王雅君, 陈力荣, 李卫, 郑耀辉 2022 物理学报 **71** 184203]
- [17] Sun X C, Wang Y J, Tian L J, Zheng Y H, Peng K C 2019 *Chin. Opt. Lett.* **17** 072701
- [18] Shi S P, Wang Y J, Yang W H, Zheng Y H, Peng K C 2018 *Opt. Lett.* **43** 5411
- [19] Zhou H J, Wang W, Chen C, Zheng Y H 2015 *IEEE Sens. J.* **15** 2101
- [20] Zhou H J, Yang W H, Li Z X, Li X F, Zheng Y H 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 013111

Quantum-enhanced optical phase tracking via squeezed state*

Sun Xiao-Cong¹⁾²⁾ Li Wei²⁾ Wang Ya-Jun²⁾ Zheng Yao-Hui^{2)†}

1) (*Shanxi Province Engineering Research Center of Precision Measurement and Online Detection Equipment, Shanxi Center of Technology Innovation for Light Manipulations and Applications, School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China*)

2) (*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(Received 22 November 2023; revised manuscript received 1 December 2023)

Abstract

Quantum-enhanced optical phase tracking is a quantum optical technique for tracking and measuring optical phases with high accuracy. It has important applications in laser interferometry, spectral analysis, and optical measurements. In this study, we propose a quantum-enhanced optical phase tracking protocol based on squeezed state optical fields. By using a continuous solid-state laser source with a central wavelength of 1064 nm, combining second harmonic generation, optical parametric oscillator, and PDH (Pound-Drever-Hall) locking technology, we prepare an initial squeezed state with a squeezing level of (8.0 ± 0.2) dB. Through signal modulation technique and demodulation technique, we control the phase of the squeezed state optical field, thereby realizing the quantum-enhanced tracking of optical phases within the range of $0 - 2\pi$. Compared with classical protocols, this protocol can suppress the noise fluctuations of phase tracking to at least 6.27 dB below the shot noise limit, improving the phase tracking accuracy by more than 76.4%. Because of the high requirements for phase measurement accuracy in applications such as angle estimation, phased array radar, and phased array sonar, this protocol is expected to improve the phase estimation accuracy beyond the shot noise limit. It provides compressed light sources for relevant fields, laying a theoretical and experimental foundation for higher-precision spatial positioning and quantum ranging techniques. The probe is made of amino acids arranged in a linear chain and joined together by peptide bonds between the carboxyl and amino groups of adjacent amino acid residues. The sequence of amino acids in a protein is determined by a gene and encoded in the genetic code. This can happen either before the protein is used in the cell, or as part of control mechanism.

Keywords: optical parametric oscillation, squeezed state, phase estimation, optical phase tracking

PACS: 42.50.-p, 42.50.Lc, 42.50.Dv

DOI: 10.7498/aps.73.20231835

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62225504, 62027821, 62035015, U22A6003, 12174234, 12274275, 12304403), the National Key R&D Program of China (Grant No. 2020YFC2200402), and the Key R&D Program of Shanxi Province, China (Grant No. 202102150101003).

† Corresponding author. E-mail: yhzheng@sxu.edu.cn

基于压缩态光场的量子增强型光学相位追踪

孙小聪 李卫 王雅君 郑耀辉

Quantum-enhanced optical phase tracking via squeezed state

Sun Xiao-Cong Li Wei Wang Ya-Jun Zheng Yao-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 054203 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231835

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231835>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

宽频带压缩态光场光学参量腔的设计

Design of optical parametric cavity for broadband squeezed light field

物理学报. 2020, 69(23): 234204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200890>

基于级联光参量放大器的碱金属原子跃迁线波段压缩光源分析

Analysis of squeezed light source in band of alkali atom transitions based on cascaded optical parametric amplifiers

物理学报. 2022, 71(7): 074202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212131>

低分析频率压缩光的实验制备

Generation of squeezed states at low analysis frequencies

物理学报. 2018, 67(2): 024207 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171767>

明亮压缩态光场的操控及量子层析

Manipulations and quantum tomography of bright squeezed states

物理学报. 2021, 70(15): 154203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210318>

相位可变压缩相干态的高阶光子反聚束效应

Higher-order photon antibunching of phase-variable squeezed coherent state

物理学报. 2022, 71(19): 194202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220574>

基于量子增强型光纤马赫-曾德尔干涉仪的低频信号测量

Measurement of low-frequency signal based on quantum-enhanced fiber Mach-Zehnder interferometer

物理学报. 2018, 67(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181335>