量子光学学报 30(2):020202, 2024
Journal of Quantum Optics

DOI:10.3788/JQO20243002.0202

基于相位压缩态的到达角估计

孙小聪†， 田亚莉， 宫廷， 周月婷， 郭古青， 和小虎， 邱选兵， 李传亮

（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，山西 太原 030024）

摘要：到达角估计作为高精度追踪的关键光学技术，在目标定位、量子测距以及相控阵雷达等领域中有着重要应用。本文提出一种基于相位压缩态的到达角估计协议，采用中心波长为1 064 nm的连续固体激光光源、光学参量振荡器及可变分束器，实现最高纠缠度为(6.1±0.2) dB的纠缠态光场制备。通过调控传感节点的调制相位，实现对两个传感节点0～2π相位的精准扫描，从而可以实现突破散粒噪声极限的到达角估计。与经典协议相比，这一协议可以将到达角估计的噪声起伏抑制至散粒噪声基准以下至少5.9 dB，使得到达角精度提高74.1%以上。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；纠缠态光场；相位估计

中图分类号：O431.2 **文献标识码：**A

Angle of Arrival Estimation via Entangled State

SUN Xiao-cong†, TIAN Ya-li, GONG Ting, ZHOU Yue-ting, GUO Gu-qing,
HE Xiao-hu, QIU Xuan-bing, LI Chuan-liang

(*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*)

Abstract: **Objective** As the primary tool for high-precision phase measurement, optical phase sensing has an important application in fields such as target tracking and phased-array radar. Currently, phase sensing primarily relies on distributed quantum sensing protocols to achieve high-precision phase measurement across multiple sensing nodes. Research indicates that utilizing entangled state networks can further improve phase estimation accuracy, reaching measurement sensitivities beyond the shot-noise limit. However, as the number of sensing nodes increases, system losses also increase, leading to a decrease in the precision

收稿日期：2024-01-30； **接受日期：**2024-04-02

基金项目：国家自然科学基金（U1810129；52076145；12304403）；山西省留学人员科技活动项目（20230031）；山西省省筹资金资助回国留学人员科研资助项目（2023-151）；山西省基础研究计划（202203021222204；202303021212224）；太原科技大学科研启动基金（20222124；20232035）

作者简介：孙小聪（1996–），女，山西运城人，研究方向为量子光学与光量子器件。

†**通信作者：**孙小聪，E-mail: sunxiaocong@tyust.edu.cn

of optical phase sensing. This becomes a major factor constraining the practical application of quantum sensing. To investigate the potential application of optical phase sensing with fewer nodes, exploration of the angle of arrival (AoA) in dual-node optical sensing is conducted.

Method This paper presents an AoA estimation protocol based on phase squeezed states. AoA estimation is transformed into a phase difference estimation problem between two sensing nodes. By deriving the phase difference between two sensing nodes under the beam splitter model, it is found that the measurement accuracy of phase difference is not only limited by the squeezing degree of the phase squeezed state, but also related to the vacuum fluctuations introduced by the beam splitter network. To explore the application of AoA in dual-node optical sensing, an experimental setup for AoA estimation based on phase squeezed states is constructed. The preparation of phase squeezed state is carried out using an optical parametric oscillator (OPO). The OPO adopts a single-resonator structure, allowing the 532 nm pump light to pass through the cavity twice and the 1 064 nm fundamental light to resonate inside the cavity. To achieve stable output of phase squeezed state, the OPO should operate in an amplification state. Therefore, the Pound-Drever-Hall (PDH) locking technique is employed to lock the relative phase between the seed light and the pump light. In order to realize dual-node optical phase sensing, a variable beam splitter is used to split the squeezed state light into two sensing nodes, resulting in entanglement between the two sensing nodes. By controlling the splitting ratio between the two sensing nodes, the response characteristics of the entanglement degree of the dual sensing nodes with respect to the reflectance R of the variable beam splitter are investigated.

Results and Discussions To maximize the quantum enhancement advantage of phase squeezed states in AoA estimation, the entanglement degree of the dual sensing nodes is measured with the reflectance R varied. The results indicate that when R is 0.5, the quantum entanglement properties between the two sensing nodes are maximized. As R deviates from 0.5, the entanglement decreases due to the vacuum fluctuations introduced by the beam splitter. To validate the feasibility of phase estimation based on phase squeezed states, the optical phase shift is measured for different modulation phases. The results demonstrate a sinusoidal trend in the phase shift as the modulation phase varies from 0 to 2π, consistent with theoretical predictions. Furthermore, compared to classical protocols, the noise fluctuations in phase difference estimation based on phase squeezed states exhibit a significant reduction, highlighting the quantum enhancement advantage of arrival angle estimation protocols based on non-classical states.

Conclusion This paper proposes an AoA estimation protocol based on entangled state optical fields. A continuous solid-state laser source with a central wavelength of 1 064 nm, an optical parametric oscillator, and a variable beam splitter are used to prepare entangled state optical fields with a maximum entanglement of (6.1±0.2) dB. By controlling the optical phase of the sensing nodes, precise scanning of the $0\sim2\pi$ phase for two sensing nodes is achieved, enabling AoA estimation beyond the shot noise limit. Compared to classical protocols, this protocol can suppress the fluctuations of noise in AoA estimation to at least 5.9 dB below the shot noise baseline, increasing the accuracy of AoA estimation by over 74.1%. This protocol is expected to improve the precision of phase estimation beyond the shot noise limit, providing a theoretical and experimental basis for higher-precision spatial positioning and quantum ranging technologies.

Keywords: optical parametric oscillation;　entangled state;　phase estimation

0　引言

为了克服经典光学传感受量子噪声限制的问题，量子计量利用非经典光场噪声低于散粒噪声极限的特性，将测量误差抑制到原来的$1/\sqrt{N}$，甚至接近或达到海森堡边界，从而提高光学传感的测量精度[1-2]。因此，采用压缩态或纠缠态以增强测量精度[3]的方案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]等领域，用以提供更高的灵敏度和精确性，为更高精度的量子精密测量提供机会。结合2.2 dB的相位压缩态光场和基于硅片的光机械磁力计，可以实现磁场的量子增强测

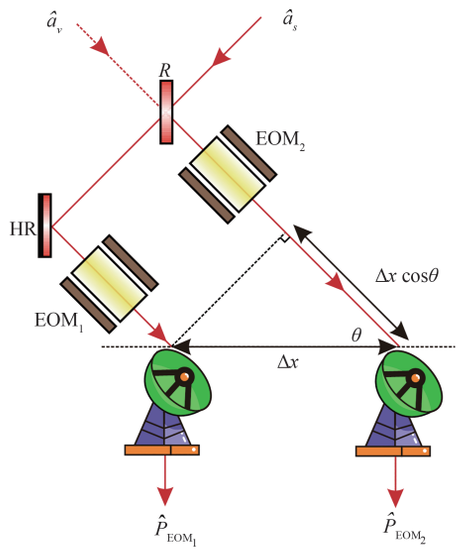
量，磁场灵敏度可提高20%[8]。通过明亮压缩态光场来降低量子噪声，可以提高引力波探测系统的灵敏度[9]。此外，一对单模压缩态在50:50分束器上耦合即可制备得到纠缠态光场，可以应用于更大的信息容量和基于测量的量子计算[10-11]。

作为高精度相位测量的主要工具，光学相位传感[12]对于目标追踪[13]、相控阵雷达[14]等领域具有至关重要的意义。目前，相位传感主要采用分布式量子传感协议以实现多个传感节点联合相位的高精度测量。研究表明，利用纠缠态网络可以进一步提高相位估计精度，达到突破散粒噪声极限的测量灵敏度。2020年，丹麦技术大学U. L. Anderson教授团队采用连续变量四组分纠缠态光场，对四个传感节点的平均相位进行测量，证明了这种方法的有效性[15]。同年，美国亚利桑那大学Zheshen Zhang教授通过配置三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，并解锁了基于连续变量三组分纠缠态的射频相位传感协议[16-17]。随后，山西大学郑耀辉教授基于分布式传感网络提出量子定位和量子测距协议，开辟了量子传感在相控阵雷达领域应用的可能性[18]。这些研究为量子传感技术在实际应用中发挥更大的作用提供了重要的理论和实验基础。然而，随着传感节点数量的增加，系统损耗也随之增加，从而导致光学相位传感的精度下降，这成为制约量子传感实用化的主要因素[19]。

为了探究到达角在双节点光学传感中的应用，本文提出一种基于相位压缩态的量子增强型到达角估计协议，探究双传感节点的纠缠度在到达角估计精度的量子增强优势。提出到达角估计理论模型，分析分束器网络对相位估计精度的影响。通过改变传感节点的光学相位，实现对光学相位0～2π范围内的量子增强型相位差估计。通过标定相位差估计的噪声方差，验证纠缠态光场在到达角估计的量子增强优势，探索基于纠缠态的到达角估计协议的可行性。

1 到达角估计原理

基于相位压缩态的到达角估计协议原理示意图如图1所示。光的量子态可以用电磁场的湮灭算符$\hat{a}=\hat{X}+\mathrm{i}\hat{P}$表示，其中正交振幅分量$\hat{X}$与正交相位分量$\hat{P}$满足对易关系$\left[\hat{X},\hat{P}\right]=\mathrm{i}(\hbar=1)$。假设输入相位压缩态光场表示为$\hat{a}_s=\hat{X}_s+\mathrm{i}\hat{P}_s$，则正交相位分量的噪声起伏为$\delta^2\hat{P}_s=\mathrm{e}^{-2r}$。采用反射率为$R$的可变分束器将压缩态光场分为两个传感节点，则两个传感节点之间具有正交关联特性，此时每个传感节点的正交位相分量可以表达为



HR: high-reflectivity mirror; EOM: electro-optic phase modulator

Fig. 1 The schematic diagram of angle of arrival estimation via phase squeezed state

HR：高反镜；EOM：电光相位调制器

图1 基于相位压缩态的到达角估计协议原理示意图

$$\hat{P}_1=\sqrt{R}\,\hat{P}_\mathrm{v}+\sqrt{1-R}\,\hat{P}_s\,, \tag{1}$$

$$\hat{P}_2=\sqrt{1-R}\,\hat{P}_\mathrm{v}-\sqrt{R}\,\hat{P}_s\,, \tag{2}$$

其中$\hat{P}_\mathrm{v}$为由真空波动引入的正交位相分量信息。采用电光相位调制器给每个传感节点叠加一个固定频率的正弦信号，用于模拟雷达反射信号，则

$$\hat{P}_1=\sqrt{R}\,\hat{P}_\mathrm{v}+\sqrt{1-R}\,\hat{P}_s+\hat{P}_{\mathrm{EOM}_1}\,, \tag{3}$$

$$\hat{P}_2=\sqrt{1-R}\,\hat{P}_\mathrm{v}-\sqrt{R}\,\hat{P}_s+\hat{P}_{\mathrm{EOM}_2}。 \tag{4}$$

平衡零拍探测系统测量得到的光场可以表达为

$$\hat{P}_1-\hat{P}_2=\left(\sqrt{R}+\sqrt{1-R}\right)\hat{P}_s+\left(\sqrt{R}-\sqrt{1-R}\right)\hat{P}_\mathrm{v}+\left(\hat{P}_{\mathrm{EOM}_1}-\hat{P}_{\mathrm{EOM}_2}\right)。 \tag{5}$$

由于压缩态光场与真空波动的平均值为0，则两个传感节点的相位差为

$$\hat{P}_1-\hat{P}_2=\hat{P}_{\mathrm{EOM}_1}-\hat{P}_{\mathrm{EOM}_2}。 \tag{6}$$

此时到达角估计θ的值可以表达为

$$\theta=\arccos\frac{\left(\hat{P}_{\mathrm{EOM}_1}-\hat{P}_{\mathrm{EOM}_2}\right)\lambda}{2\pi\Delta x}。\tag{7}$$

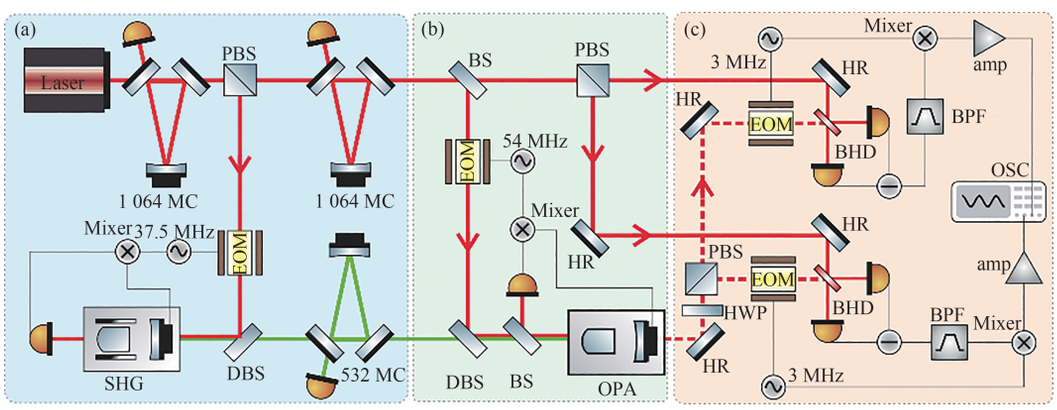
到达角估计可以转化为两个传感节点之间的相位差估计问题。由于给光场施加相位调制只会改变光场在相空间的位移，而不影响其噪声起伏，故$\delta^2\hat{P}_{\mathrm{EOM}_1}=\delta^2\hat{P}_{\mathrm{EOM}_2}=0$，此时相位差的正交位相分量噪声可以表达为

$$\delta^2\left(\hat{P}_1-\hat{P}_2\right)=\left(\sqrt{R}+\sqrt{1-R}\right)^2\delta^2\hat{P}_s+\left(\sqrt{R}-\sqrt{1-R}\right)^2。\tag{8}$$

相位差的测量精度除了受限于相位压缩态光场的压缩度以外，还与分束器网络引入的真空波动有关。当$\sqrt{R}-\sqrt{1-R}=0$，即$R=1/2$时，真空波动被完全消除，此时相位差估计的噪声起伏仅与输出场的压缩度有关，然而，受分束器噪声传递特性影响，此时两个传感节点之间的纠缠度要低于原来的压缩度。

2　实验装置

图2为基于相位压缩态进行到达角估计的实验装置图，整个实验系统由激光制备、压缩态光场制备以及到达角估计三部分组成。在激光制备部分，采用连续变量1 064 nm单频激光器输出最大功率为2.5 W的激光光源，随后利用模式清洁技术，为下游实验提供空间模式过滤、偏振纯化的激光光源[20]。三个模式清洁器不仅可以为到达角估计提供达到散粒噪声极限的激光光源，还可以结合辅助腔技术实现光学参量振荡器（optical parametric oscillator，OPO）的高效模式匹配。达到散粒噪声极限的激光分为三部分，其中大约100 mW和30 mW的透射光被分别用于信号光和本底探测光，剩余激光注入二次谐波振荡器，用于为光学参量腔提供532 nm泵浦光场。



MC: mode cleaner; OPO: optical parametric oscillator; DBS: dichroic beam splitter; SHG: second harmonic generation; BHD: balanced homo-dyne detection; PBS: polarization beam splitter; HWP: half-wave plate; BPF: band-pass filter; amp: amplifier

Fig. 2 Experimental setup of angle of arrival estimation

注：MC：模式清洁器；OPO：光学参量振荡器；DBS：双色镜；SHG：二次谐波振荡器；BHD：平衡零拍探测器；PBS：偏振分束器；HWP：半波片；BPF：带通滤波器；amp：放大器

图2 到达角估计实验装置图

为了最大化非经典光场在到达角估计中的量子增强优势，采用OPO进行相位压缩态光场的制备。实验采用半整块腔型结构的OPO，它由尺寸为1 mm × 2 mm × 10 mm的PPKTP晶体和凹面镜组成。PPKTP晶体一端为凸面，曲率半径为12 mm，镀膜参数为1 064 nm高反和532 nm减反，作为输入耦合镜；另一端为平面，镀膜参数为1 064 nm和532 nm双增透膜，与输出耦合镜的空气间隙为27 mm。输出耦合镜为凹面镜，镀膜参数为532 nm高反，1 064 nm有12% ± 1.5%的透射率，背面粘接压电陶瓷，用于锁定OPO的腔长。由于OPO为单共振腔，因此532 nm泵浦光在腔内双次穿过，1 064 nm基频光在腔内共振。考虑PPKTP晶体对1 064 nm的折射率为1.830 2，光学参量腔的自由光谱区为3.3 GHz，线宽70 MHz，精细度约为47。为了输出稳定运转的相位压缩态光场，OPO应该工作在放大状态，因此

采用PDH锁定技术对种子光与泵浦光的相对位相进行锁定。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1 064 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，并补偿压缩角与探测位相各自的失谐量，实现压缩度的无偏测量，抑制相位抖动的影响，输出稳定的相位压缩态光场，最终压缩度为−9.2 dB。

为了实现双节点的光学相位传感，利用可变分束器将压缩态光分成两个传感节点，两个传感节点之间具有纠缠特性。该可变分束器由半波片和偏振分束器组成，通过调节可变分束器的反射率，可以探究纠缠度随反射率R变化的响应特性。每个传感节点加载一个电光相位调制器（electro-optic phase modulator，EOM），由正弦信号发生器进行驱动，幅度为100 mV，频率为3 MHz，通过控制EOM的相位，实现对两个传感节点0～2π相位的精准扫描。通过将压缩态光场与本底探测光的相位锁定在π/2，探索纠缠态光场在光学相位估计中的量子增强优势。BHD具有75 dB的共模抑制比和超过99%的量子效率，以提供更高的探测效率。BHD采集的探测信号经过1.8～4.5 MHz的带通滤波器筛选出信号，然后与3 MHz的正弦调制信号进行混频解调，经过前置放大器放大后使用示波器对测量结果进行数据采集和分析，以得到压缩态光场的相移信息。

3 实验结果

为了最大化相位压缩态在到达角估计的量子增强优势，利用可变分束器产生双路传感节点，测量双传感节点的纠缠度随可变分束器反射率R的响应特性，结果如图3所示。红色圆点为反射率不同的纠缠度测量结果，黑色实线为理论计算结果。结果表明，当反射率R为0.5时，两个传感节点之间对应的量子纠缠特性最高，对应的纠缠度为(−6.1±0.2) dB。当反射率R偏离0.5时，纠缠度的降低变得越来越明显。由于实验中测量误差和可变分束器的不理想，保证两个传感节点为完全相等的分束极为困难，理论纠缠度应该高于实测的纠缠度。在实际应用中，可选择R的取值范围为0.4～0.6，该范围内纠缠度偏差仅为0.2 dB，对相位差估计的精度影响小于2%。

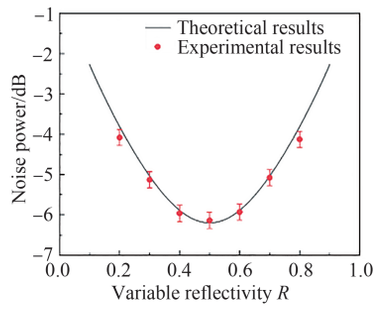


Fig. 3 The response of entanglement with respect to the reflectivity R of the variable beam splitter

图3 纠缠度随可变分束器反射率R变化的响应特性

此外，由于纠缠态光场由单个压缩态光场利用可变分束器制备而来，真空通道引入的真空噪声将传递给纠缠态光场，使得两个传感节点间的噪声起伏增大，纠缠度降低。与标准的EPR纠缠态光场相比，该方案会浪费部分非经典资源，但系统中只包含单个OPO及其相对位相的锁定，从而缓解了经典纠缠态光场制备过程中多路级联位相锁定的技术难度[21]，简化实验装置。

到达角估计可以转化为两个传感节点之间的相位差估计问题。为了验证基于相位压缩态进行相位估计的可行性，测量不同调制相位时光学相位的相移，实验结果如图4（a）所示，其中数据点为实测结果，黑色实线为正弦拟合结果，浅绿色和深绿色

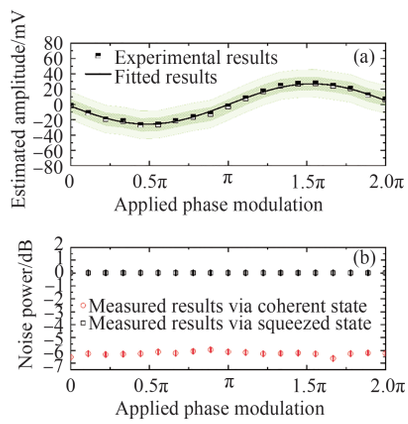


Fig. 4 Optical phase tracking results

(a) Dependence of measured phase amplitude on phase modulation; (b) Noise variance of optical phase via coherent state and squeezed state.

图4 不同调制相位的测量结果

注：（a）调制相位与测量相移的依赖关系；（b）基于相干态与压缩态时相位差的噪声方差。

阴影区域分别代表基于相干态与纠缠态的光学相位的噪声起伏。结果显示，当调制相位从0变化到2π时，相移呈现出正弦变化趋势。通过最终相移，实现不同调制相位的相位差估计，与理论预估结果一致。此外，与经典协议相比，基于相位压缩态进行相位差估计的噪声起伏呈现出大幅度降低，显示出基于非经典态进行到达角估计协议的量子增强优势。

为了清楚地表征相位压缩态光场引入后的量子增强特性，计算不同调制相位时相位差的噪声方差。图4（b）为不同调制相位时基于相干态与压缩态两种光源下相位差的噪声方差，其中黑色方点和红色圆点分别表征基于相干态与压缩态的测量结果。当调制相位从0变化到2π时，相位差的噪声起伏可抑制至散粒噪声基准以下至少(5.9±0.2) dB，此时相位差估计的噪声起伏仅为原来的25.9%，由于其噪声起伏直接决定到达角估计的精度，因此到达角估计灵敏度可随之提高74.1%；最大为(6.6±0.2) dB，此时到达角估计的精度提高可达到78.2%。理论上相位差估计的噪声起伏不受调制相位变化影响，实验中噪声方差的波动主要是由于调制相位的微弱变化所导致的正交位相分量噪声起伏。结果表明，平均可抑制至散粒噪声基准以下6.2 dB，对应到达角估计的灵敏度可提高76.2%。此处量子增强优势优于纠缠度的测量结果，可能是由于光学元件的不理想所导致的测量误差。

4　结论

为了探究基于双节点光学传感进行到达角估计协议的可行性，本文提出一种基于纠缠态光场的到达角估计协议，探究纠缠态光场的纠缠度在到达角估计精度的量子增强优势。采用中心波长为1 064 nm的连续固体激光光源，结合单个OPO以及可变分束器，制备得到两个具有量子关联特性的双路光学传感节点。通过优化可变分束器的分束比，双路光学传感节点的最高纠缠度可以达到(6.1±0.2) dB，该方案缓解了传统纠缠态光场制备过程中级联锁定多路相位的技术难度。通过控制传感节点的调制相位，实现对传感节点相位0～2π范围内的量子增强型相位差估计。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5.9 dB，使得到达角精度提高74.1%以上。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[22]。

参考文献

[1] GIOVANNETTI V, LLOYD S, MACCONE L. Advances in quantum metrology[J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**:222−229. DOI:10.1038/nphoton.2011.35.

[2] PEZZÈ L, SMERZI A, OBERTHALER M K, *et al*. Quantum metrology with nonclassical states of atomic ensembles[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2018, **90**(3):035005. DOI: 10.1103/RevModPhys.90.035005.

[3] CAVES C M. Quantum-mechanical noise in an interferometer[J]. *Physical Review D*, 1981, **23**(8):1693−1708. DOI: 10.1103/PhysRevD.23.1693.

[4] TSE M, YU H, KIJBUNCHOO N, *et al*. Quantum-enhanced advanced LIGO detectors in the era of gravitational-wave astronomy[J]. *Physical Review Letters*, 2019, **123**(23):231107. DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.231107.

[5] WOLFGRAMM F, CERÈ A, BEDUINI F A, *et al*. Squeezed-light optical magnetometry[J]. *Physical Review Letters*, 2010, **105**:053601. DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.053601.

[6] TAYLOR M, JANOUSEK J, DARIA V, *et al*. Biological measurement beyond the quantum limit[J]. *Nature Photon*, 2013, **7**: 229–233. DOI: 10.1038/nphoton.2012.346.

[7] LOW G H, YODER T J, CHUANG I L. Quantum imaging by coherent enhancement[J]. *Physical Review Letters*, 2015, **114**(10):100801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.100801.

[8] LI B, BÍLEK J, HOFF U B, LARS S, *et al*. Quantum enhanced optomechanical magnetometry[J]. *Optica*, 2018, **5**:850−856. DOI: 10.1364/OPTICA.5.000850.

[9] AASI J, ABADIE J, ABBOTT B P, *et al*. Enhanced sensitivity of the LIGO gravitational wave detector by using squeezed states of light[J]. *Nature Photonics*, 2013, **7**:613–619. DOI: 10.1038/nphoton.2013.177.

[10] CHEN H, LIU J. Teleportation of a two-particle four-component squeezed vacuum state by linear optical elements[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, **7**:440–442. DOI: 10.3788/COL20090705.0440.

[11] CAI C, MA L, LI J, *et al*. Generation of a continuous-variable quadripartite cluster state multiplexed in the spatial domain[J]. *Photonics Research*, 2018, **6**:479–484. DOI: 10.1364/PRJ.6.000479.

[12] HAN X, CHEN S X, WU H, *et al*. Coherent state phase estimation based on digital nonlinear phase-locked loop[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, **68**(2):024204. DOI: 10.7498/aps.68.20181602.

[13] LI T, SONG Y, FAN H. From target tracking to targeting track: A data-driven yet analytical approach to joint target detection and tracking[J]. *Signal Processing*, 2023, **205**:108883. DOI: 10.1016/j.sigpro.2022.108883.

[14] SHI C, WANG F, SELLATHURAI M, *et al*. Power minimization based robust OFDM radar waveform design for radar and communication systems in coexistence[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, **66**(5): 1316−1330. DOI: 10.1109/TSP.2017.2770086.

[15] GUO X, BREUM C R, BORREGAARD J, *et al*. Distributed quantum sensing in a continuous-variable entangled network[J]. *Nature Physics*, 2020, **16**:281–284. DOI: 10.1038/s41567-019-0743-x.

[16] XIA Y, LI W, CLARK W, *et al*. Demonstration of a reconfigurable entangled radio-frequency photonic sensor network[J]. *Physical Review Letters*, 2020, **124**(15):150502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.150502.

[17] XIA Y, LI W, ZHUANG Q, *et al*. Quantum-enhanced data classification with a variational entangled sensor network[J]. *Physical Review X*, 2021, **11**(2):021047. DOI: 10.1103/PhysRevX.11.021047.

[18] SUN X, LI W, TIAN Y, *et al*. Quantum positioning and ranging via a distributed sensor network[J]. *Photonics Research*, 2022, **10**:2886–2892. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1659827/v1.

[19] ZHUANG Q, ZHANG Z, JEFFREY H S. Distributed quantum sensing using continuous-variable multipartite entanglement[J]. *Physical Review A*, 2018, **97**:032329. DOI: 10.1103/PhysRevA.97.032329.

[20] ZHANG W, YANG W, SHI S, *et al*. Mode matching in preparation of squeezed field with high compressibility[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **11**:1112001. DOI: 10.3788/CJL201744.1112001.

[21] ZHANG W, JIAO N, LI R, *et al*. Precise control of squeezing angle to generate 11 dB entangled state[J]. *Optics Express*, 2021, **29**:24315. DOI: 10.1364/OE.428501.

[22] ZANG J W, ALVAREZ-MELCON A, GOMEZ-DIAZ J S. Nonreciprocal phased-array antennas[J]. *Physical Review Applied*, 2019, **12**:054008. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.12.054008.