

基于量子增强型光纤马赫-曾德尔干涉仪的低频信号测量*

成健¹⁾ 冯晋霞^{1)2)†} 李渊骥¹⁾²⁾ 张宽收¹⁾²⁾

1) (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)

2) (山西大学, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2018年7月10日收到; 2018年10月30日收到修改稿)

利用低频光通信波段真空压缩态光场可实现基于光纤的量子精密测量. 本文利用简并光学参量振荡器实验制备出 1550 nm 低频真空压缩态光场. 在分析频段 10—500 kHz 范围内压缩态光场的压缩度均达 3 dB. 用实验制备的 1550 nm 真空压缩态光场填补光纤马赫-曾德尔干涉仪的真空通道, 实现了量子增强型光纤马赫-曾德尔干涉仪, 完成了突破标准量子极限的相位调制频率为 500 kHz 的低频信号测量. 与光纤马赫-曾德尔干涉仪相比, 测量信噪比提高了 2 dB.

关键词: 量子精密测量, 低频真空压缩态光场, 光纤马赫-曾德尔干涉仪, 光通信波段

PACS: 42.50.-p, 42.87.Bg

DOI: 10.7498/aps.67.20181335

1 引言

在光学测量中, 由于受到电磁场真空起伏引起的量子噪声的影响, 待测量的测量精度存在一个标准量子极限 (standard quantum limit, SQL), 即利用经典光源进行测量所能达到的最大测量精度. 理论和实验研究表明, 利用正交分量噪声起伏低于散粒噪声基准 (shot noise level, SNL) 的压缩态光场可实现突破 SQL 的量子精密测量^[1-5]. 1981年, Caves^[1]在理论上提出将压缩态光场注入激光干涉仪的真空通道可以实现突破 SQL 的相位测量. 1987年, Xiao等^[2]在实验上把压缩态光场注入激光干涉仪用于相位测量, 将测量的信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 提高了 3 dB. 随后利用压缩态光场也实现了对光的偏振^[3]、磁场^[4]、空间位移^[5]等物理量的量子精密测量. 在上述研究工作中, 所用的压缩态光场的分析频率都在 MHz. 但在位移测量、压力传感以及引力波探测等精密测

量中, 压缩态光场的分析频率需要位于 kHz、甚至 Hz 量级. 近年来随着低频段压缩态光场产生技术的发展, 低频段的量子增强型精密测量也有所突破^[6-8]. 2011年, LIGO 引力波探测研究团队把压缩态光场注入基于迈克耳孙干涉仪的引力波探测器 (GEO600), 在 kHz 频率处将测量的 SNR 提高了 3.5 dB^[6]. 2013年, 上述研究团队又把压缩态光场注入 LIGO 引力波探测器, 在 150—300 Hz 频段将探测的 SNR 提高了 2.15 dB^[7]. 2017年, 闫子华等^[8]把压缩态光场注入自由空间的马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI), 在 19 kHz 频率处将相位测量的 SNR 提高了 3 dB.

由于光纤干涉仪具有结构灵巧、抗干扰能力强、可高度集成等优点^[9-11], 基于光纤干涉仪的突破 SQL 的量子精密测量也引起人们的广泛关注^[12,13]. 2010年, Mehmet等^[12]把光通信波段的压缩态光场注入光纤萨尼亚克干涉仪, 在 6 MHz 频率处将相位测量的 SNR 提高了 4.5 dB. 2017年, Liu等^[13]把 1080 nm 压缩态光场注入光纤马赫-

* 国家重点研发计划 (批准号: 2016YFA0301401) 和山西省“1331工程”重点学科建设计划 (批准号: 1331KSC) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fengjx@sxu.edu.cn

曾德尔干涉仪 (fiber Mach-Zehnder interferometer, FMZI), 通过将高频段压缩态光场调制搬移至低频段, 在 30 kHz 频率处将相位测量的 SNR 提高了 2 dB. 波长位于光通信波段的 1550 nm 压缩态光场在光纤中传输损耗最低, 且与现有的光纤通信系统高度兼容, 所以是基于光纤实际应用的重要量子资源. Schonbeck 等^[14] 和孙志妮等^[15] 分别在实验上制备出 1550 nm 压缩态光场, 但压缩态光场的分析频率都在 MHz 频段. 在实验上制备出低频光通信波段压缩态光场, 并将其注入光纤干涉仪的真空通道, 可进行实用化的量子增强型精密测量.

本文首先利用简并的光学参量振荡器 (degenerate optical parametric oscillator, DOPO) 实验制备低频光通信波段真空压缩态光场. 然后将制备压缩态光场注入到 FMZI 的真空通道, 进行突破 SQL 的低频相位调制信号测量的实验研究.

2 利用量子增强型 MZI 进行相位测量的理论模型

量子增强型 MZI 理论模型如图 1 所示. 输入光场 a 为相干态光场, 输入光场 b 为真空压缩态光场. 光场 a, b 经过 50/50 分束器 (beam splitter, BS) BS1 分为功率相等的两束光, 即 MZI 的两臂, 光束经过两臂后的相位差为 φ . 在其中一臂引入待测的微小物理量, 待测物理量的变化会引起 φ 变化. MZI 的两臂光束在 BS2 上干涉后输出光束 c 和 d, 分别由两个光电探测器进行探测.

由两个光电探测器输出的光电流信号相减后可以表示为^[16]

$$n_{cd} = \hat{c}^\dagger \hat{c} - \hat{d}^\dagger \hat{d} = (\hat{a}^\dagger \hat{a} - \hat{b}^\dagger \hat{b}) \cos \varphi + i \sin \varphi (\hat{b}^\dagger \hat{a} e^{-i\theta} - \hat{a}^\dagger \hat{b} e^{i\theta}), \quad (1)$$

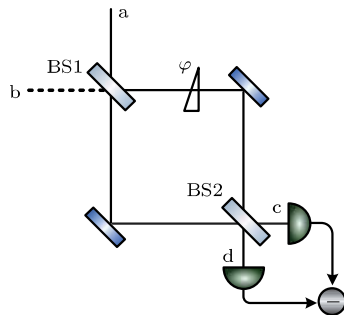


图 1 量子增强型 MZI 的理论模型

Fig. 1. Theoretical model of quantum-enhanced MZI.

其中, \hat{a} , \hat{b} 和 \hat{c} , \hat{d} 分别为 MZI 输入光束 a, b 和输出光束 c, d 的湮灭算符; θ 为输入光束 a 和 b 之间的相对相位.

将 \hat{a} , \hat{b} 算符进行线性化处理: $\hat{a} = \alpha + \delta\hat{a}(t)$, $\hat{b} = \delta\hat{b}(t)$, 其中 α 表示相干态光场的平均场, $\delta\hat{a}(t)$ 和 $\delta\hat{b}(t)$ 分别表示两个光场的量子起伏. 代入 (1) 式, 可以得到

$$n_{cd} = (\alpha^2 + \alpha\delta\hat{X}_a) \cos \varphi + \alpha \sin \varphi \delta\hat{Y}_b, \quad (2)$$

其中 $\delta\hat{X}_a = \delta\hat{a} + \delta\hat{a}^\dagger$ 表示相干态光场 a 的正交振幅分量起伏, $\delta\hat{Y}_b = \delta\hat{b}^\dagger e^{-i\theta} - \delta\hat{b} e^{i\theta}$ 表示真空压缩态光场 b 的正交相位分量起伏. 假设 φ' 是待测量的微小相位变化量, 当且仅当 $\varphi = (2n+1)\frac{\pi}{2} + \varphi'$ 且 $\varphi' \ll 1$ 时, (2) 式可简化为

$$n_{cd} = \alpha^2 \sin \varphi' + \alpha \sin \varphi' \delta\hat{X}_a + \alpha \delta\hat{Y}_b. \quad (3)$$

测量的 SNR 定义为待测量信号和噪声的比值, 可表示为

$$SNR = \frac{\alpha^2 \sin \varphi'}{\alpha e^{-r}} = e^r \sqrt{N} \varphi', \quad (4)$$

其中 $N = \alpha^2$ 为相干态光场的平均光子数, $\delta\hat{Y}_b = e^{-r}$ 为真空压缩态光场的正交相位起伏, r 为压缩因子. 当注入场为真空时, $r = 0$; 当注入场为真空压缩态光场时, 随着压缩度的增加 r 增大, 测量的 SNR 也随之增大. 因此将真空压缩态光场注入 MZI 的真空通道, 可以实现量子增强型 MZI, 得到更高的测量 SNR.

3 实验装置

低频光通信波段真空压缩态光场的制备及利用量子增强型 FMZI 测量低频相位调制信号的实验装置如图 2 所示.

为了进行突破 SQL 的相位测量, 首先需要制备出光通信波段 1550 nm 真空压缩态光场. 图 2 左半部分为实验产生真空压缩态光场的装置. 激光光源为连续单频光纤激光器 (NP Photonic Inc.), 最大输出功率为 2.2 W, 中心波长为 1550 nm. 实验中利用模式清洁剂 (mode cleaners, MC) 降低光纤激光器输出激光的额外噪声. 1550 nm 激光通过 MC1 后分成两部分: 一部分注入由周期极化铌酸锂晶体构成的倍频器, 倍频产生 775 nm 连续单频激光; 另一部分经过 MC2 再次过滤后, 作为注入 FMZI 的相干态光场. 775 nm 激光经过 MC3 进一步过滤其额外噪声后, 作为 DOPO 的抽运光场. DOPO 为周

期极化磷酸氧钛钾 (periodically poled KTiOPO_4 , PPKTP) 晶体和凹面镜组成的半整块结构光学谐振腔. PPKTP 晶体的一个端面为曲率半径为 12 mm 的凸面, 作为 DOPO 腔的腔镜, 镀抽运光和下转换光高反膜 ($R_{1550 \text{ nm} \& 775 \text{ nm}} > 99.9\%$); 晶体的另一端面镀抽运光和下转换光减反膜 ($R_{1550 \text{ nm} \& 775 \text{ nm}} < 0.01\%$). PPKTP 晶体的尺寸为 $1 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$. 凹面镜的曲率半径为 25 mm, 镀抽运光和下转换光部分反射膜 ($T_{1550 \text{ nm}} = 13\%$, $R_{775 \text{ nm}} < 20\%$). 凹面镜固定在压电陶瓷 (piezoelectric ceramic transducer, PZT) 上, 通过驱动 PZT 实现对 DOPO 腔长的控制. 当 DOPO 运转于阈值以上时, 由 DOPO 产生的频率和偏振均简并的信号光和闲置光在腔中同时共振, 抽运光在腔内双次穿过, DOPO 处于双共振状态. 当 DOPO 运转于阈值以下时, DOPO 输出的下转换场为真空压缩态光场. 实验中采用相干控制的技术控制真空压缩态的压缩角, 使 DOPO 输出的是正交相位真空压缩态^[17]. 将该压缩态光场注入 FMZI 的真空通道, 可实现量子增强型 FMZI, 进行突破 SQL 的相位测量.

图 2 右半部分为利用量子增强型 FMZI 测量低频相位调制信号的实验装置. FMZI 由 1 个 50/50 的 2×2 单模保偏的光纤分束器 (BS1)、两根长度为 10 m 的分别缠绕在 PZT2 和 PZT3 上的单模光纤和 1 个 50/50 的 2×2 单模保偏的光纤分束器 (BS2)

构成. PZT 的尺寸为 $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ (外径 \times 内径 \times 高), 可加载的最大频率为 550 kHz. 利用光纤偏振控制器 (fiber polarization controller, FPC) 通过挤压 FMZI 的两臂单模光纤实现对光场偏振的控制. 经过 MC2 过滤强度噪声的 1550 nm 相干态光场, 作为相位调制信号的测量光场经过光纤耦合器 (fiber coupler, FC) 耦合进入 BS1 的输入端口 A, 分成功率相等的两束光. 真空压缩态光场经过 FC 耦合进入 BS1 的输入端口 B. PZT1 用来控制两输入光束的初始相位. 经过 FMZI 两臂传输后的相干态测量光场和真空压缩态光场耦合进 BS2 后由输出端口 C 和 D 输出, 输出光场分别由两个光电探测器 (PD1 和 PD2) 进行探测. PD1 和 PD2 输出的光电流相减后的交流信号由频谱分析仪 (spectrum analyzer, SA) 记录, 分析测量其噪声功率特性. PD1 和 PD2 输出的光电流相减后的直流部分作为误差信号, 经过比例积分微分 (proportional integrator differentiator, PID) 控制器和高压放大器 (high voltage, HV) 反馈至 PZT2, 使用 Pound-Drever-Hall (PDH) 技术^[18] 精确锁定 FMZI 两臂的相对相位. 将信号发生器 (signal generator, SG) 输出低频相位调制信号加载在 PZT3 上实现对光纤长度的拉伸, 从而在 FMZI 一臂的光场中引入微小的相对相位. 在实验中, 将利用量子增强型 FMZI 对低频相位调制信号进行突破 SQL 的测量.

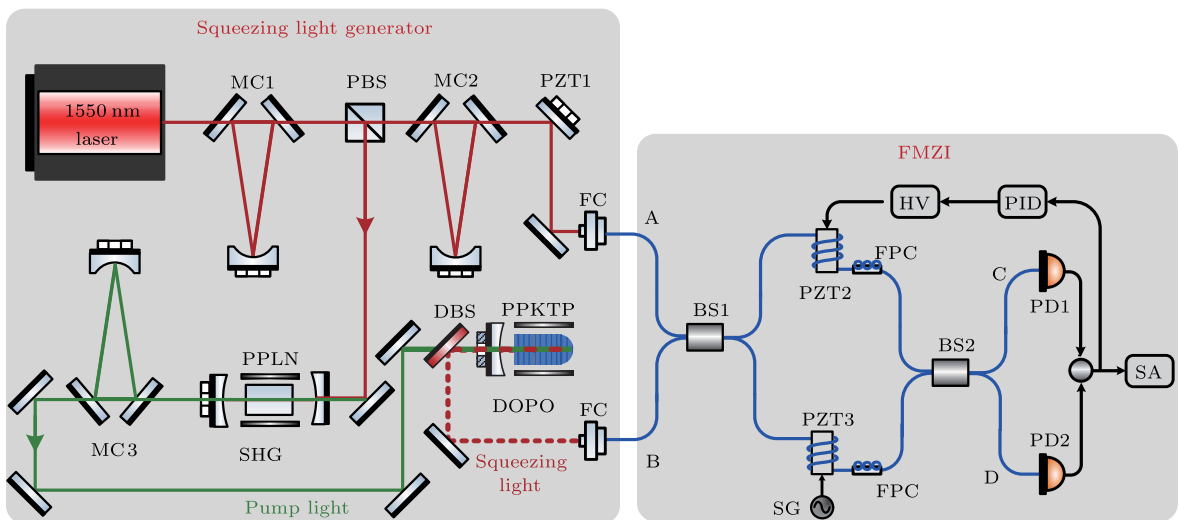


图 2 低频光通信波段压缩态光场的制备及利用量子增强型 FMZI 测量低频相位调制信号的实验装置

Fig. 2. Experimental setup for generation of vacuum squeezed states at 1550 nm and measurement of phase modulation signal by quantum-enhanced FMZI at low frequency.

4 实验结果及分析

实测的DOPO的阈值抽运功率为270 mW. 当控制PPKTP晶体的工作温度为34.8 °C、抽运光功率为120 mW时, DOPO运转于阈值以下, 输出的下转换光场为真空场. 当利用PDH技术锁定DOPO的腔长后, 采用平衡零拍探测系统测量输出真空场的噪声起伏. 实验中所用本底振荡光功率为55 μW, 平衡零拍探测器的共模抑制比为67 dB. 为了更清楚地探测由DOPO输出的真空场的噪声功率谱, 将分析频率10—500 kHz的范围分成10—20 kHz, 20—40 kHz, 40—60 kHz, 60—100 kHz, 100—500 kHz五个快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)窗口. 前三个FFT窗口对应的SA分辨率带宽(resolution band width, RBW)和视频带宽(video band width, VBW)分别为2.7 kHz和20 Hz. 第四个FFT窗口对应的RBW和VBW分别为4.3 kHz和20 Hz. 第五个FFT窗口对应的RBW和VBW分别为10 kHz和47 Hz. 图3为DOPO腔输出真空场在分析频率10—500 kHz的噪声功率谱, 该功率谱为将噪声功率做归一化处理后的五个FFT窗口的组合. 图3中的曲线(i)是真空压缩态光场的归一化噪声功率谱, 曲线(ii)为SNL, 曲线(iii)是反压缩归一化噪声功率谱. 由图3可以看出, 在分析频率10—500 kHz的范围内, 实验产生了压缩度达3 dB的1550 nm真空压缩态光场.

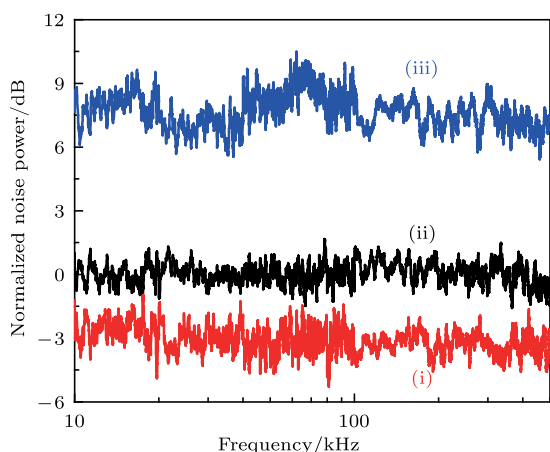


图3 1550 nm真空压缩态光场归一化噪声起伏谱, 其中曲线(i)为压缩态光场的归一化噪声功率谱, 曲线(ii)为SNL, 曲线(iii)为反压缩归一化噪声功率谱

Fig. 3. Normalized noise power spectra of squeezing light at 1550 nm. Curve (i), squeezed noise; curve (ii), SNL; curve (iii), anti-squeezed noise.

在实验制备低频段1550 nm正交相位真空压缩态光场的基础上, 进行加载在FMZI一臂上的低频相位调制信号的测量研究. 1550 nm相干态测量光场通过FC耦合进入FMZI输入端口A, 耦合效率为87%. 当将真空压缩态光场通过FC耦合进入FMZI输入端口B时, 同时通过控制PZT1, 将两输入光场的初始相对相位锁定在 π . 通过控制PZT2, 将FMZI两臂光场的相对相位锁定在 $\pi/2$, 进行突破SQL低频相位调制信号的测量. 当加载到PZT3上的低频信号为500 kHz时, 由FMZI输出的光场经过平衡零拍测量后得到的相位调制信号的噪声功率谱如图4所示. 图4曲线(i)为无真空压缩态光场填补FMZI真空通道时的测量结果, 其中噪声基底是由相干态光场给出的, 因而是SNL. 图4曲线(ii)为在FMZI输入端B注入真空压缩态光场时的测量结果. 可以看出, 调制频率位于500 kHz的低频相位调制信号的峰顶没有降低, 但噪声基底降低了2 dB. 当用实验制备的低频光通信波段正交相位真空压缩态光场填补FMZI的真空通道时, 实现了量子增强型FMZI, 完成了突破SQL的相位调制频率为500 kHz的低频信号测量. 与FMZI相比, 测量SNR提高了2 dB.

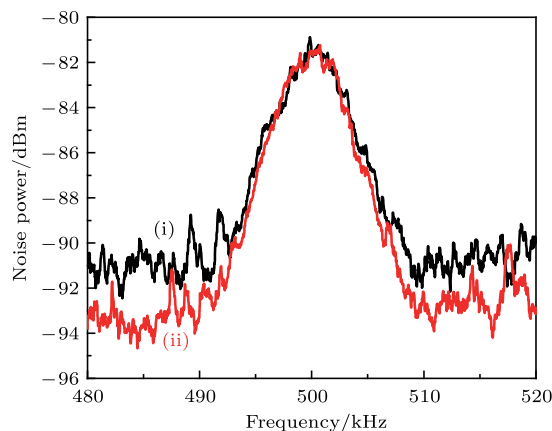


图4 利用FMZI测量低频相位调制信号的噪声功率谱, 其中曲线(i)对应无真空压缩态注入, 曲线(ii)对应有真空压缩态注入

Fig. 4. Measured noise power spectra of low frequency phase modulation signal using FMZI. Curve (i), without vacuum squeezed states; curve (ii), with vacuum squeezed states.

尽管在分析频率10—500 kHz的范围内实验制备的1550 nm真空压缩态光场的压缩度都达到了3 dB, 但当分析频率小于500 kHz时, 实验上均观察不到低频相位调制信号测量SNR的提高. 这可能是由于受到FMZI引入的额外噪声的影响.

图5曲线(i)为只有1550 nm激光耦合进入FMZI,由FMZI输出端的两个探测器光电流相减后测量记录的噪声功率谱.图5曲线(ii)为1550 nm激光在自由空间由平衡零拍探测系统的两个探测器光电流相减后测量记录的噪声功率谱.图5曲线(iii)为电子学噪声(electronic noise level, ENL).采用相同功率的白光场对SNL进行了校准,在分析频率大于6 kHz时与曲线(ii)重合.因此,图5曲线(ii)在分析频率大于6 kHz范围为SNL,并高于ENL 20 dB.图5曲线(i)在分析频率大于500 kHz时与SNL重合,但在分析频率小于500 kHz范围内有着高于SNL的额外噪声.因此,由于受到FMZI引入的额外噪声的影响,尽管有真空压缩态填补FMZI的真空通道,但在分析频率小于500 kHz范围内,无法实现突破SQL的低频相位调制信号测量.FMZI引入的额外噪声可能是由于在光纤系统中注入激光后产生的非线性效应以及系统中相位抖动等原因引起的.为在更低频率处实现突破SQL的相位测量,需要进一步在技术上抑制由FMZI引入的额外噪声,使之达到SNL.

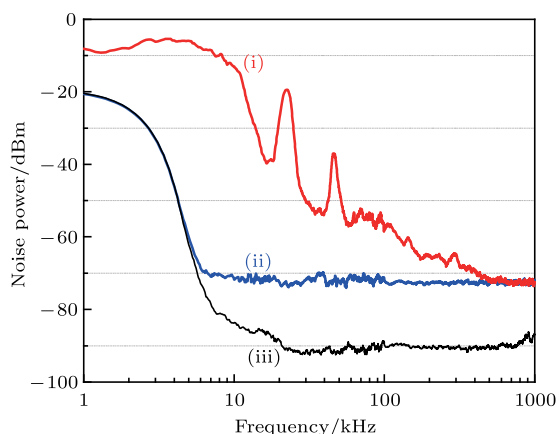


图5 1550 nm激光的噪声功率谱,其中曲线(i)为经过FMZI耦合输出的,曲线(ii)为没有经过FMZI耦合输出的,曲线(iii)为ENL

Fig. 5. Noise power spectra of 1550 nm laser. Curve (i), output after FMZI; curve (ii), without FMZI; curve (iii), ENL.

5 结 论

本文利用1550 nm连续单频光纤激光器作为抽运光源,在采用MC降低激光额外噪声的基础上,抽运由PPKTP晶体和凹面镜构成的半整块结构DOPO,实验制备出低频光通信波段真空压缩态光场.在分析频段10—500 kHz范围内,压缩态光场的压缩度均达3 dB.用实验制备的1550 nm真空压缩态光场填补FMZI的真空通道,并在FMZI的一

臂加载500 kHz的相位调制信号.利用量子增强型FMZI,完成了突破SQL的低频相位调制信号测量.与FMZI相比,测量SNR提高了2 dB.量子增强型FMZI可用于研制低频段微弱信号的全光纤传感测量系统,进行温度、折射率、电流及加速度等物理量的突破SQL的精密测量.下一步我们将通过提高非线性转换效率、降低内腔损耗等措施进一步提高压缩度光场的压缩度,并将其分析频段拓展到更低频段.理论研究表明^[19,20],MZI用于微小相位信号精密测量时,两注入光场的初始相对相位、光功率,干涉仪两臂的损耗等因素影响MZI的相位测量精度.目前我们是按理想情况将两注入光场的初始相对相位锁定在 π ,下一步将通过对干涉仪两臂损耗的研究优化初始的相对相位,提高FMZI测量精度.

参考文献

- [1] Caves C M 1981 *Phys. Rev. D* **23** 1693
- [2] Xiao M, Wu L A, Kimble H J 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 278
- [3] Grangier P, Slusher R, Yurke B, LaPorta A 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 2153
- [4] Horrom T, Singh R, Dowling J P, Mikhailov E E 2012 *Phys. Rev. A* **86** 023803
- [5] Sun H X, Liu Z L, Liu K, Yang R G, Zhang J X, Gao J R 2014 *Chin. Phys. Lett.* **31** 084202
- [6] The L I G O Scientific Collaboration 2011 *Nature Phys.* **7** 962
- [7] The L I G O Scientific Collaboration 2013 *Nat. Photon.* **7** 613
- [8] Yan Z H, Sun H X, Cai C X, Ma L, Liu K, Gao J R 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 114205 (in Chinese) [闫子华, 孙恒信, 蔡春晓, 马龙, 刘奎, 郗江瑞 2017 物理学报 **66** 114205]
- [9] Arditty H J, Lefevre H C 1981 *Opt. Lett.* **6** 401
- [10] Li L C, Li X, Yu J, Xie Z H 2012 *Opt. Express* **20** 11109
- [11] Sun H, Yang S, Zhang X L 2015 *Opt. Commun.* **340** 39
- [12] Mehmet M, Eberle T, Steinlechner S, Vahlbruch H, Schnabel R 2010 *Opt. Lett.* **35** 1665
- [13] Liu F, Zhou Y Y, Yu J, Guo J L, Wu Y, Xiao S X, Wei D, Zhang Y, Jia X J, Xiao M 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 021106
- [14] Schonbeck A, Thies F, Schnabel R 2018 *Opt. Lett.* **43** 110
- [15] Sun Z N, Feng J X, Wan Z J, Zhang K S 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 044203 (in Chinese) [孙志妮, 冯晋霞, 万振菊, 张宽收 2016 物理学报 **65** 044203]
- [16] Paris M G A 1995 *Phys. Lett. A* **201** 132
- [17] Vahlbruch H, Chelkowski S, Hage B, Franzen A, Danzmann K, Schnabel R 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 011101
- [18] Black E D 2001 *Am. J. Phys.* **69** 79
- [19] Liu J, Jing X X, Wang X G 2013 *Phys. Rev. A* **88** 042316
- [20] Yu X, Zhao X, Shen L Y, Shao Y Y, Liu J, Wang X G 2018 *Opt. Express* **26** 16292

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

Cheng Jian¹⁾ Feng Jin-Xia^{1)2)†} Li Yuan-Ji¹⁾²⁾ Zhang Kuan-Shou¹⁾²⁾

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

2) (Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 10 July 2018; revised manuscript received 30 October 2018)

Abstract

Generation of squeezed state at telecommunication wavelength has been recently a very interesting issue due to the lowest optical power attenuation of light at a wavelength of 1550 nm in a standard telecommunication fiber. The low-frequency vacuum squeezed state at 1550 nm in combination with fiber based interferometer offers the possibility to implement quantum precision measurement beyond standard quantum limit (SQL). In this paper, we experimentally realize a quantum-enhanced fiber Mach-Zehnder interferometer (FMZI) for measuring the low-frequency phase modulation signal by using low-frequency vacuum squeezing at 1550 nm. Firstly, the low-frequency vacuum squeezed state at the telecommunication wavelength of 1550 nm is generated by using a degenerate optical parametric oscillator (DOPO). The DOPO is a semi-monolithic construction based on a type I periodically poled KTiOPO₄ (PPKTP) crystal and a concave mirror. The pump threshold of DOPO is 270 mW. When the pump power is 120 mW that is below the pump threshold of DOPO and the temperature of PPKTP is controlled at 34.8 °C, a vacuum squeezing of 3 dB is generated at an analysis frequency range from 10 kHz to 500 kHz. The quadrature phase vacuum squeezing is obtained by locking the squeezed quadrature angle through using a coherent control scheme, in which two acousto-optic modulators are used to shift the frequency and produce the auxiliary beam acting as a coherent control field. Based on the constructed FMZI, a quantum-enhanced FMZI is realized by injecting the generated low-frequency vacuum squeezed state at 1550 nm into the vacuum channel of FMZI. The relative phase between two injected light fields is locked at π by using the Pound-Drever-Hall (PDH) locking technology, and the relative phase between light fields of its arms in FMZI is also locked at $\pi/2$ by using the PDH locking technology. When a phase modulation signal at the frequency of 500 kHz is loaded in the signal arm of FMZI, the noise power spectrum of the output from FMZI is measured by a balance homodyne detect system. A 2 dB quantum improvement beyond shot-noise-level at the frequency of 500 kHz is obtained experimentally by using the quantum-enhanced FMZI. The experimental results demonstrate a potential application in quantum precision measurement beyond the SQL based on fiber sensor technique.

Keywords: quantum precision measurement, low-frequency vacuum squeezed light, fiber Mach-Zehnder interferometer, telecommunication wavelength

PACS: 42.50.-p, 42.87.Bg

DOI: 10.7498/aps.67.20181335

* Project supported by the National Key Research and Develop Program of China (Grant No. 2016YFA0301401) and the Fund for Shanxi "1331 Project" Key Subjects Construction, China (Grant No. 1331KSC).

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