

基于低频压缩光的声频信号测量

闫子华 孙恒信 蔡春晓 马龙 刘奎 郜江瑞

Measurement of audio signal by using low-frequency squeezed light

Yan Zi-Hua Sun Heng-Xin Cai Chun-Xiao Ma Long Liu Kui Gao Jiang-Rui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 114205 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.114205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.114205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用共振无源腔分析和抑制飞秒脉冲激光噪声的理论和实验研究

[A broadband passive cavity for analyzing and filtering the noise of a femtosecond laser](#)

物理学报.2016, 65(13): 134203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134203>

基于 Walsh-Hadamard 变换的单像素遥感成像

[Single-pixel remote imaging based on Walsh-Hadamard transform](#)

物理学报.2016, 65(6): 064201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064201>

低频标准真空涨落的测量

[Measurement of standard vacuum noise at low frequencies](#)

物理学报.2016, 65(4): 044211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044211>

基于阿秒抖动光纤锁模激光器的时钟同步

[Timing synchronization based on mode-locked fiber lasers with attosecond timing jitter](#)

物理学报.2015, 64(22): 224209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224209>

光纤激光经过模清洁剂后的强度噪声分析

[Intensity noise analysis of a fibre laser after passing through an optical mode cleaner](#)

物理学报.2014, 63(19): 194203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194203>

基于低频压缩光的声频信号测量*

闫子华 孙恒信 蔡春晓 马龙 刘奎† 郜江瑞

(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, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2017年1月17日收到; 2017年4月8日收到修改稿)

低频信号测量在引力波探测、生物成像及磁场测量等方面具有重要的应用价值. 本文利用非简并光学参量放大器获得了低频压缩态光场, 在频率 19 kHz 处直接测到的压缩度为 (7.1 ± 0.1) dB; 将产生的正交位相压缩态光场注入到马赫-曾德尔干涉仪中, 实现了超越散粒噪声极限 (3.0 ± 0.4) dB 的声频相位信号的测量. 本实验的开展为低频压缩光的产生及基于低频压缩光的声频信号测量提供了一定技术支撑, 并且此技术有望扩展到磁场、空间小位移等其他物理量的量子精密测量方案中.

关键词: 低频压缩, 马赫-曾德尔干涉仪, 声频信号测量

PACS: 42.50.Lc, 07.60.Pb, 42.87.Bg, 95.55.Ym

DOI: 10.7498/aps.66.114205

1 引言

精密测量物理作为物理学中极其重要的学科, 提供了新的测试手段和研究方法, 其作用已深入到我们生活的各个领域. 测量精度的提升推动着技术的革新和科学前沿的快速发展, 揭示出新的物理规律和现象, 其中光学精密测量又是重要的组成部分. 随着测量技术的发展, 测量精度主要受限于探针光源噪声. 基于经典探针光场的测量过程, 测量精度受到标准量子极限的限制; 而通过采用非经典光场作为系统测量探针的量子测量方案, 其测量精度可以突破标准量子极限的限制, 甚至达到海森伯极限^[1,2].

光场压缩态作为一种连续变量量子态, 自产生以来就成为提高量子测量精度的良好光源. 随着研究人员对压缩态研究的不断深入, 压缩光的压缩度也有了不断提高. 2016年, 德国马普所的一个研究小组利用光学参量过程产生了目前压缩度最高 (15.3 dB) 的压缩态光场^[3]. 目前压缩被扩展到不

同类型的压缩态, 例如空间压缩态、轨道角动量压缩态和时间多模压缩态等. 基于压缩态可以实现各种物理量的超越标准量子极限的精密测量^[4], 例如空间位移测量^[5]、磁场测量^[6]等.

高频段的压缩态已经有了大量的研究及重要的进展. 在低频段^[7], 光场的随机起伏、杂散光的存在、寄生干涉以及光学元件的机械振动等因素都不可避免地会增加低频压缩光的测量难度. 直到2004年才首次在声频段^[8]观测到了压缩光, 2007年德国马普所的研究小组测到了频率低至1 Hz的压缩光^[9], 2011—2012年华东师范大学研究人员^[10,11]基于原子系统中四波混频过程制备了低频强度差压缩光, 2016年山西大学研究人员^[12]利用参量过程获得了2 dB的低频压缩光. 虽然低频压缩光的测量十分困难, 但是低频压缩光却有着极其重要的应用, 可以用于生物粒子位移测量^[13]、低频磁场测量等, 而最为重要和突出的成果是将频率在10 Hz到10 kHz的压缩光注入到引力波干涉仪中来提高引力波的测量精度^[14].

本文利用300 mW的540 nm绿光抽运运转

* 国家自然科学基金(批准号: 61405108, 11674205, 11604189)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 91536222)、国家重点研发计划(批准号: 2016YFA0301404)、国家高技术研究发展计划(批准号: 2015AA8112008)和山西省高校科技创新项目(批准号: 2015103)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liukui@sxu.edu.cn

于阈值 (400 mW) 以下的非简并光学参量放大器 (NOPA), 产生了 1080 nm 的双模压缩态光场. 通过平衡零拍探测装置对压缩态光场进行测量, 在分析频率 19 kHz 处直接测到了 (7.1 ± 0.1) dB 的压缩. 然后将产生的正交位相压缩态光场注入到马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder, MZ) 干涉仪实现了超越散粒噪声极限的声频信号测量, 信噪比提高了 (3.0 ± 0.4) dB.

2 声频信号的测量分析

我们基于 MZ 干涉仪测量声频信号 [15,16], 其原理如图 1 所示. 激光经过 50/50 分束器分为功率相同的两束光, 其中一束加载由声频振动信号引起的相位变化信号 $\Delta\phi$, 实验上通过低频信号源驱制压电陶瓷 (PZT) 来模拟声频振动信号, 然后两束光在第二个分束器上耦合输出, 分别进入两个探测器中, 将两探测器的光电流信号相减输入谱仪进行测量. 用 \hat{a}_{in} , \hat{b}_{in} 分别表示干涉仪入射光束, 用 \hat{a}_{out} , \hat{b}_{out} 分别表示干涉仪的出射光束.

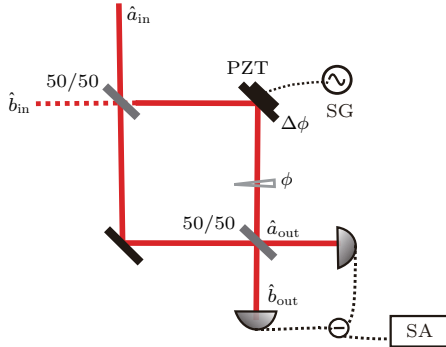


图 1 声频信号测量原理图 PZT, 压电陶瓷; SG, 信号发生器; SA, 频谱分析仪

Fig. 1. Schematic of audio signal measurement: PZT, piezoelectric transducer; SG, signal generator; SA, spectrum analyzer.

当其中一路的入射光场为真空态时, 例如入射光束 b , 有 $\langle \hat{b}_{in}^\dagger \hat{b}_{in} \rangle = 0$, 此时干涉仪输出端光子数差可以表示为

$$\langle \hat{a}_{out}^\dagger \hat{a}_{out} \rangle - \langle \hat{b}_{out}^\dagger \hat{b}_{out} \rangle = |\alpha|^2 \cos(\phi + \Delta\phi), \quad (1)$$

ϕ 表示干涉仪两臂原有的相对相位.

当干涉仪两臂的相对相位 $\phi = \pi/2$ 时, 可以测到加载的相位变化量 $\Delta\phi$, 此时干涉仪输出端的信号可以表示为

$$|\langle \hat{a}_{out}^\dagger \hat{a}_{out} \rangle - \langle \hat{b}_{out}^\dagger \hat{b}_{out} \rangle| = N\Delta\phi, \quad (2)$$

其中 $N = |\alpha|^2$ 表示平均光子数, $\Delta\phi \ll 1$.

噪声起伏可以表示为

$$\langle (\hat{a}_{out}^\dagger \hat{a}_{out} - \hat{b}_{out}^\dagger \hat{b}_{out})^2 \rangle^{1/2} = N^{1/2}, \quad (3)$$

从而得到真空态注入情况下的信噪比 (SNR) 为

$$\text{SNR} = \frac{\text{Signal}}{\text{Noise}} = N^{1/2} \Delta\phi. \quad (4)$$

当入射光场 b 由真空态光场变为压缩态光场时, 有 $\langle \hat{b}_{in}^\dagger \hat{b}_{in} \rangle = \sinh^2 r$ (r 表示压缩因子), 此时信号可表示为

$$\begin{aligned} & |\langle \hat{a}_{out}^\dagger \hat{a}_{out} \rangle - \langle \hat{b}_{out}^\dagger \hat{b}_{out} \rangle| \\ &= \Delta\phi (|\alpha|^2 - \sinh^2 r). \end{aligned} \quad (5)$$

噪声起伏可以表示为

$$\begin{aligned} & \langle (\hat{a}_{out}^\dagger \hat{a}_{out} - \hat{b}_{out}^\dagger \hat{b}_{out})^2 \rangle^{1/2} \\ &= (|\alpha|^2 e^{-2r} + \sinh^2 r)^{1/2}. \end{aligned} \quad (6)$$

由于 $|\alpha|^2 \gg \sinh^2 r$, 故得到压缩态光场注入情况下的信噪比为

$$\text{SNR} = \frac{\text{Signal}}{\text{Noise}} = N^{1/2} \Delta\phi e^r. \quad (7)$$

对比 (7) 式和 (4) 式可以看出采用压缩态光场比采用真空态光场获得了更高的信噪比, 也就是说采用压缩态光场能够提高测量精度.

3 实验过程

实验装置如图 2 所示. 全固化的单频激光器 (Main Laser, 宇光公司 YG-DPSS FG-VIB), 双波长输出 540 nm 的绿光 (3 W) 及 1080 nm 的红外光 (600 mW). 540 nm 的绿光作为 NOPA 的抽运光, 用于产生 1080 nm 的压缩光. 红外光分为两部分, 一部分作为校准光, 用于输出压缩光的光路准直; 另一部分红外光作为平衡零拍系统 (BHD) 的本地光. NOPA 腔用于压缩光的产生; 平衡零拍测量装置 BHD1 用于对注入 MZ 干涉仪压缩光的测量; BHD2 用于获得锁定本地光与压缩光相位的噪声信号; MZ 干涉仪用于声频信号的测量.

NOPA 腔采用半整块腔设计, 由输出耦合镜及非线性 KTP 晶体构成. 输出耦合镜为曲率半径 $R = 20$ mm 的凹面镜, 其透射率对于 1080 nm 的红外为 5%, 对于 540 nm 的绿光大于 99%. 非线性晶体为二类 KTP, 尺寸为 $3 \times 3 \times 10$ mm³, 晶体一端镀 540 和 1080 nm 双高反膜, 另一端镀 540

和1080 nm双减反膜,且晶体的温度通过温度控制仪精确的控制控制在 $(71 \pm 0.02)^\circ\text{C}$ 范围内. 由于半整块腔结构简单,因此可以避免许多额外低频振动的干扰,有利于产生低频压缩光. 为了避免注入光低频噪声对低频压缩的影响,实验上利用一台波长可调谐的光纤激光器(Aux laser)作为锁腔的注入光,并精确锁定辅助激光器频率与输出压

缩态光场频率的频率差为NOPA腔的一个自由光谱区(7.5 GHz). 利用EOM1给频率为 $\omega + \omega_0$ 的辅助激光上加载19.7 MHz的调制信号,经调制的光经NOPA腔及50/50分束镜到达PD2探测器,将获得的光电流和调制信号经混频器获得锁腔的误差信号,经反馈加载到PZT1上实现对NOPA腔的锁定^[17].

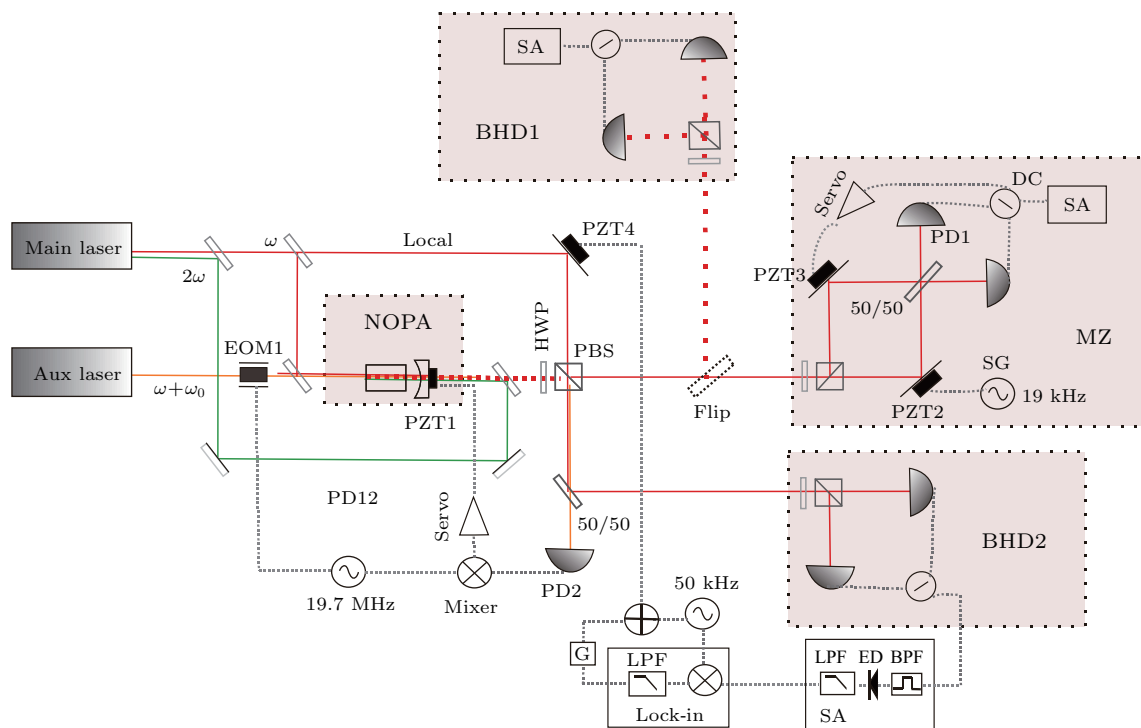


图2 (网刊彩色)实验原理图 HWP,半波片;NOPA,非简并光学参量放大器;MZ,马赫曾德干涉仪;BHD,平衡零拍测量装置;PZT,压电陶瓷;SA,频谱分析仪;SG,信号发生器;Servo,反馈;DC,直流信号;PD,探测器;Lock-in,锁相放大器;EOM,电光调制器;Mixer,混频器;LPF,低通滤波器;ED,包络探测器;BPF,带通滤波器
Fig. 2. (color online) Schematic of the experiment: HWP, half wave plate; NOPA, non-degenerate optical parametric amplifier; MZI, Mach-Zehnder interferometer; BHD, balanced homodyne detector; PZT, piezoelectric transducer; SA, spectrum analyzer; SG, signal generator; servo, feedback; DC, direct-current signal; PD, detector; Lock-in, lock-in amplifier; EOM, electro-optic modulator; Mixer, mixer; LPF, law pass filter; ED, envelope detector; BPF, band pass filter.

由于实验上采用二类OPA,输出场为频率简并而偏振不同的纠缠光场^[18-22]. 其45°方向上的耦合模为压缩态光场,实验上通过将OPA输出场经半波片HWP(与光轴成22.5°)来实现. NOPA腔的输出光经半波片HWP与PBS分为亮模压缩态与暗模压缩态,分别对应正交振幅压缩与正交位相压缩.

首先将暗模压缩态和本地光通过flip的反射一起注入到平衡零拍测量装置BHD1中,通过扫描本地光的相位就可以得到暗模压缩态噪声功率谱. 然后打开flip使得暗模压缩态和本地光一同注入MZ

干涉仪中,进行声频信号的测量. 实验中,通过信号源(19 kHz)驱动干涉仪一臂的压电陶瓷PZT2来模拟声频信号. 利用MZ干涉仪探测器输出(差)的直流部分作为误差信号,反馈到另一臂的压电陶瓷PZT3上,并且使得两臂的相位锁定到 $\pi/2$. 将MZ干涉仪探测器输出(差)的交流部分注入谱仪,就得到基于压缩光的声频信号的测量结果.

另外,为了实现低于散粒噪声极限的声频信号测量,需要严格控制注入本地光与压缩光之间的相对位相为0,实验上通过噪声锁定的方法进行相位控制. 由于双模压缩态的两臂的相位相差 $\pi/2$,因

此通过PZT4将亮模与本地光相对位相锁定到 $\pi/2$ (此时亮模表现为反压缩), 就能够完成对注入MZ干涉仪的本地光与压缩光相对相位锁定^[23]. 实验上具体为: 利用平衡零拍探测装置BHD2测量到的噪声经带通滤波器滤去多余的频率部分, 然后经过包络探测器提取包络信号, 随后经低通滤波器获得低频信号, 接着将获得的低频信号与调制信号(50 kHz)混频, 最后再经另一个低通滤波得到误差信号, 将得到的误差信号和调制信号通过交直流耦合器加载到PZT4, 来实现本地光与压缩光之间相位的锁定^[24].

4 实验结果

图3为利用平衡零拍测量装置BHD1测到的压缩光随本地光相位变化的归一化噪声功率曲线, 横轴表示扫描时间, 纵轴表示归一化的噪声功率. 结果表明有 (5.6 ± 0.1) dB的真空压缩. 测量时的参数如下: 平衡零拍探测器的干涉可见度为98.1%, 光电二极管的探测效率为90.5%, 光路损耗2.4%, 总效率为86.7%, 扣除损耗后, NOPA腔直接输出压缩为 (7.8 ± 0.3) dB; 谱仪的分析频率为1 MHz, 分辨率带宽(RBW)为300 kHz, 视频带宽(VBW)为10 kHz.

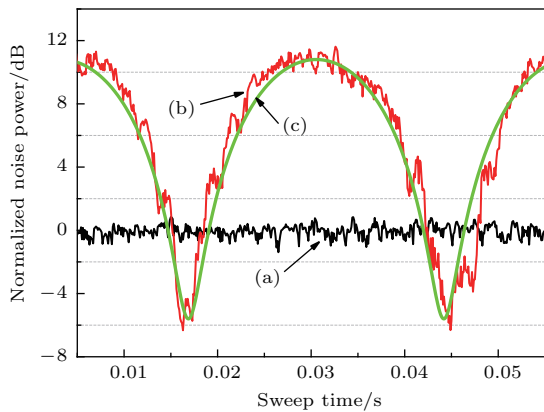


图3 (网刊彩色) 1 MHz处压缩光测量结果 (a) 散粒噪声基准曲线(黑线); (b) 压缩光噪声曲线(红线); (c) 拟合曲线(绿线)

Fig. 3. (color online) Results of measurement on squeezed light at 1 MHz: (a) Squeezed noise (black line); (b) shot noise (red curve); (c) curve fitting (green curve).

在低频范围内测量压缩会受到更多噪声的影响, 比如寄生干涉、杂散光场带来的噪声, 此外还会受到声频振动噪声的影响. 通过使得反射镜、耦合透镜、光电二极管与入射光成一定夹角来减少寄生

干涉带来的影响, 并且将整个探测系统及光路中的测量部分进行隔音隔震处理, 减小由空气流动及环境中的声音振动对测量造成的影响. 此外, 增加光学吸收体吸收杂散光. 在采取了以上优化措施后, 19 kHz处测到的归一化噪声功率曲线如图4, 横轴表示扫描时间, 纵轴表示归一化的噪声功率. 实际直接测得 (7.1 ± 0.1) dB的真空压缩, 扣除损耗后, NOPA腔直接输出压缩为 (11.5 ± 0.3) dB. 曲线的抖动比起1 MHz处测量曲线更加明显, 是由于在低频段相位更容易受到环境中噪声的影响. 谱仪的分析频率为19 kHz, RBW为9 kHz, VBW为160 Hz.

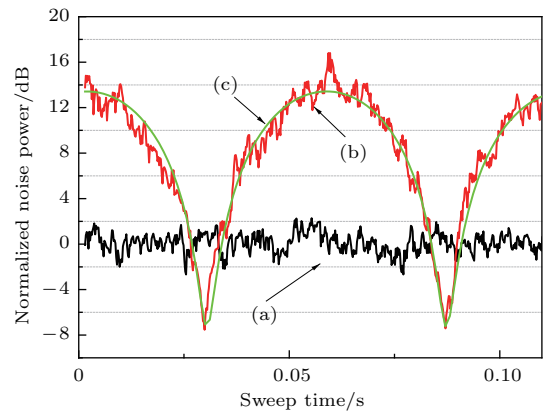


图4 (网刊彩色) 19 kHz处压缩光测量结果 (a) 散粒噪声基准曲线(黑线); (b) 压缩光噪声曲线(红线); (c) 拟合曲线(绿线)

Fig. 4. (color online) Results of measurement of squeezed light at 19 kHz: (a) Squeezed noise (black line); (b) shot noise (red curve); (c) curve fitting (green curve).

将获得的压缩光注入到MZ干涉仪中, 得到的光电流之交流部分经过减法器相减注入谱仪就得到了声频信号的归一化噪声功率谱, 测量结果如图5, 横轴表示扫描频率, 纵轴表示归一化噪声功率. 图5(a)为无压缩注入时获得的噪声曲线; 图5(b)为注入压缩光时的噪声曲线. 图中峰为测到的声频调制信号, 峰底部的平坦部分为相应噪声基准, 由于图5(a)为相干态输入, 因此其峰的底部的平坦部分为散粒噪声基准. 从图中可以看出, 曲线(b)相对于曲线(a)的信号大小没变, 但是相应噪声基底降低, 相应信噪比提高了 (3.0 ± 0.4) dB. 另外, 由于曲线(a)为相干态输入, 其峰的底部的平坦部分为散粒噪声基准, 因此我们实现了超越散离噪声基准的声频信号测量. 与产生的压缩大小7.1 dB相比, 信噪比只提高了3.0 dB, 这是由于干涉仪中低频信号振动噪声仍然较大, 影响了测量精度.

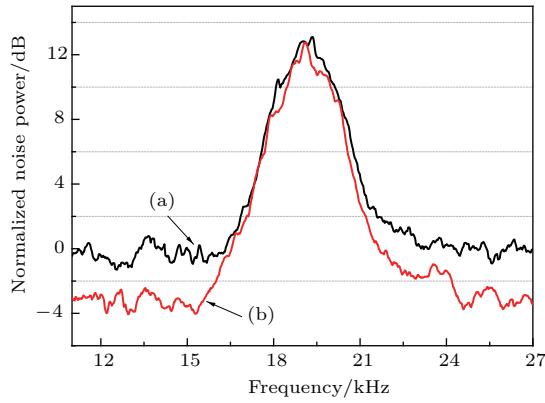


图5 (网刊彩色) 音频信号测量结果 (a) 散粒噪声基准曲线(黑线); (b) 压缩光噪声曲线(红线)

Fig. 5. (color online) Results of measurement of audio signal: (a) Shot noise (black curve); (b) squeezed noise (red curve).

5 结 论

本文基于光学参量放大器产生了低频段的压缩态光场, 在 19 kHz 处直接探测到的压缩度为 (7.1 ± 0.1) dB; 基于产生的低频压缩光, 完成了低频信号的模拟探测实验, 探测精度超越散粒噪声基准 (3.0 ± 0.4) dB. 目前低频处各种噪声源的影响是阻碍进一步提高压缩度和信号测量精度的主要因素, 比如寄生干涉、光学元件的机械振动、声频振动等. 本实验的开展为低频压缩光的产生及基于低频压缩光的声频信号的测量提供了一定技术支撑, 并且此技术有望扩展到其他物理量, 例如磁场、空间小位移等的量子精密测量方案中.

参考文献

[1] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L 2011 *Nat. Photon.* **5** 222
 [2] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 010401
 [3] Vahlbruch H, Mehmet M, Danzmann K, Schnable R 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 110801
 [4] Sun H X, Liu K, Zhang J X, Gao J R 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 234210 (in Chinese) [孙恒信, 刘奎, 张俊香, 郟江瑞 2015 物理学报 **64** 234210]

[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] Horrom T, Singh R, Dowling J P, Mikhailov E E 2012 *Phys. Rev. A* **86** 023803
 [7] Stefszky M S, Mow-Lowry C M, Chua S S Y, Shaddock D A, Buchler B C, Vahlbruch H, Khalaidovski A, Schnable R, Lam P K, McClelland D E 2012 *Class. Quant. Grav.* **29** 145015
 [8] McKeenize K, Grosser N, Bowen W P, Whitcomb S E, Gray M B, McClelland D E, Lam P K 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 161105
 [9] Vahlbruch H, Chelkowski S, Danzmann K, Schnabel R 2007 *New J. Phys.* **9** 371
 [10] Liu C J, Jing J T, Zhou Z F, Pooser R C, Hudelist F, Zhou L, Zhang W P 2011 *Opt. Lett.* **36** 2979
 [11] Qin Z Z, Jing J T, Zhou J, Liu C J, Pooser R C, Zhou Z F, Zhang W P 2012 *Opt. Lett.* **37** 3141
 [12] Liu Z J, Zhai Z H, Sun H X, Gao J R 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 060401 (in Chinese) [刘增俊, 翟泽辉, 孙恒信, 郟江瑞 2016 物理学报 **65** 060401]
 [13] Taylor M A, Janousek J, Daria V, Knittel J, Hage B, Hachor H A, Bowen W P 2013 *Nat. Photon.* **7** 229
 [14] Abbott B P, et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 061102
 [15] Bachor H A, Ralph T C 2004 *A Guide to Experiment in Quantum Optics* (2nd Ed.) (Berlin: Wiley-Vch) pp115–119
 [16] Barnett S M, Fabre C, Maitre A 2003 *Eur. Phys. J. D* **22** 513
 [17] Black E D 2001 *Am. J. Phys.* **69** 79
 [18] Ou Z Y, Pereira S F, Kimble H J 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 3663
 [19] Ma Y Y, Feng J X, Sun Z N, Wan Z J, Zhang K S 2016 *J. Quant. Opt.* **22** 1 (in Chinese) [马亚云, 冯晋霞, 孙志妮, 万振菊, 张宽收 2016 量子光学学报 **22** 1]
 [20] Zhang Y, Su H, Xie C D, Peng K C 1999 *Phys. Lett. A* **259** 171
 [21] Li X Y, Jing J T, Zhang J, Pan Q, Xie C D, Peng K C 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 966 (in Chinese) [李小英, 荆杰泰, 张靖, 潘庆, 谢常德, 彭堃堦 2002 物理学报 **51** 966]
 [22] Yang S R, Li Y M, Zhang S J, Zhang K S 2006 *Acta Phys. Sin. Quant. Opt.* **2** 92 (in Chinese) [杨树荣, 李永民, 张苏净, 张宽收 2006 量子光学学报 **2** 92]
 [23] Zhang Y, Yu X D, Di K, Li W, Zhang J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084204 (in Chinese) [张岩, 于旭东, 邸克, 李卫, 张靖 2013 物理学报 **62** 084204]
 [24] Kirk M K, Eugeniy E M, Keisuke G, Ping K L, Nicolai G, Malcolm B G, Nergis M, David E M 2005 *J. Opt. B* **7** 421

Measurement of audio signal by using low-frequency squeezed light*

Yan Zi-Hua Sun Heng-Xin Cai Chun-Xiao Ma Long Liu Kui[†] Gao Jiang-Rui

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

(Received 17 January 2017; revised manuscript received 8 April 2017)

Abstract

Measurement of audio signal plays a significant role in many applications, such as gravitational wave detection, bio-particle imaging and magnetometer. In this paper, low-frequency squeezed light is generated by a non-degenerate optical parametric amplifier. In order to avoid the effect of injected light on low-frequency squeezing, an auxiliary laser is used to lock the length of non-degenerate optical parametric amplifier and a method of locking quantum noise is employed to lock the phase between the local light and the squeezed light. By isolating the vibration noises at low-frequency and reducing back action of parasitic interference, the squeezing of (7.1 ± 0.1) dB takes place at 19 kHz. Then the squeezed light is injected into the Mach-Zehnder interferometer to measure an audio signal which drives a piezoelectric transducer to generate a small phase variation between two arms of Mach-Zehnder interferometer. According to the low-frequency squeezing, we realize experimentally the measurement of phase signal at audio frequency which exceeds the shot-noise limit of (3.0 ± 0.4) dB. The experiment provides technical supports for the generation of low-frequency squeezed light and the measurement of audio signal. Furthermore it can be extended to other quantum measurements, such as high-precision magnetometer and measurement of small-displacement.

Keywords: low-frequency squeezed state, Mach-Zehnder interferometer, measurement of audio signal

PACS: 42.50.Lc, 07.60.Pb, 42.87.Bg, 95.55.Ym

DOI: 10.7498/aps.66.114205

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61405108, 11674205, 11604189), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 91536222), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFA0301404), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2015AA8112008), and the University Science and Technology Innovation Project in Shanxi Province, China (Grant No. 2015103).

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