

低频标准真空涨落的测量

薛佳 秦际良 张玉驰 李刚 张鹏飞 张天才 彭堃墀

Measurement of standard vacuum noise at low frequencies

Xue Jia Qin Ji-Liang Zhang Yu-Chi Li Gang Zhang Peng-Fei Zhang Tian-Cai Peng Kun-Chi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 044211 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.044211

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044211>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

双光子失谐对慢光和光存储影响的实验研究

Experimental study of the effects of two-photon detuning on slow light and light memory

物理学报.2016, 65(1): 014205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014205>

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器后的强度噪声分析

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>

自旋相干态变换和自旋-玻色模型的基于变分法的基态解析解

Spin coherent-state transformation and analytical solutions of ground-state based on variational-method for spin-Bose models

物理学报.2013, 62(11): 114205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.114205>

低频标准真空涨落的测量*

薛佳¹⁾ 秦际良¹⁾ 张玉驰^{2)†} 李刚¹⁾ 张鹏飞¹⁾ 张天才^{1)‡} 彭堃堃¹⁾

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, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

2)(山西大学物理电子工程学院, 太原 030006)

(2015年12月11日收到; 2015年12月29日收到修改稿)

采用自平衡零拍方案, 对低频段的标准量子真空涨落进行了测量. 实验确定了该系统的饱和光功率约为 3.2 mW. 在 10 Hz—400 kHz 的频率范围内, 系统的共模抑制比平均为 55 dB, 在 100 Hz 处高达 63 dB, 对激光经典技术噪声具有很强的抑制作用. 当入射光功率为 400 μ W 时, 真空涨落噪声达到 11 dB. 此低频量子真空噪声探测系统可广泛应用于量子计量和量子光学等研究领域.

关键词: 低频, 量子噪声, 平衡零拍探测, 共模抑制比

PACS: 42.50.Lc, 42.50.-p

DOI: 10.7498/aps.65.044211

1 引言

确定平均量子数为 0 的真空态对应的标准量子极限 (SQL), 即真空涨落, 是量子光学中的重要内容. 该极限的测量为确定量子光源的质量提供了参考基准, 故对 SQL 进行精确测量显得尤为重要. 特别是对低频范围真空波动的测量在许多研究领域, 如引力波探测^[1-3]、超弱磁场测量^[4-6]和量子计量^[7]等方面, 都占有十分重要的地位. 自 1985 年压缩态光场产生以来^[8], 目前人们已经获得了高于 12 dB 的压缩光^[9], 证明通过使用量子光源可以突破 SQL, 提高测量的精度和灵敏度. 然而, 对压缩光的产生和测量^[10-12]主要集中在射频范围 (\sim MHz), 原因是射频范围中光的经典技术噪声比较小, 系统噪声容易达到量子噪声极限, 量子噪声易于测量^[13,14]. 在用于引力波探测的迈克耳孙干涉仪^[15-19]或弱磁场检测^[5,6]等实验中, 其检测范围一般在 10 Hz—10 kHz, 在如此低的频率下, 常规的射频测量系统由于受到环境、机械振动、电磁等因素的干扰而无法达到直接测量的要

求. 要实现直接探测低频真空噪声, 需要抑制各种声频噪声, 降低各种振动以及来自机械和电子学噪声的干扰. 因此, 在非常低的频率处测量真空噪声具有一定难度, 因为随着测量时间的增加, 稳定和控制各种低频经典噪声的难度加大. 这些低频噪声包括机械系统的噪声、激光系统的噪声、环境的干扰、电子暗噪声和散射光子诱发寄生干涉导致的波动等. 另一方面是电子元器件噪声限制以及电路设计上的不完美. 2008 年, Goda 等^[2]在 50 kHz 处测得了噪声压缩, 随后在激光干涉引力波观测站 (LIGO) 所进行的实验中, 压缩光的测量频率低至 1 kHz^[20]. McKenzie^[15]制作的零拍探测系统可在 280 Hz 到 100 kHz 范围内对压缩光进行测量. 2012 年, Horrom 等^[6]在 100 Hz 附近获得了压缩光. 同年, Stefszky 等^[18]在 10 Hz 处测到了压缩光. Vahlbruch 等^[16]利用低频探测器, 在 1 Hz 处测得了压缩光. 这些实验的前提都要在低频处确定标准量子涨落.

自 20 世纪 80 年代以来, 平衡零拍探测系统一直是有效探测量子噪声的手段. 本文利用一个自制的低频真空噪声探测系统, 实现了几十赫兹

* 国家自然科学基金 (批准号: 91336107, 61227902, 61275210) 和山西省自然科学基金 (批准号: 2014021011-2) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yczhang@sxu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: tczhang@sxu.edu.cn

到 400 kHz 内真空噪声的测量, 当入射光功率为 400 μW 时, 真空涨落噪声高出电子学噪声 11 dB. 该系统包括一个低频低噪声探测器和一个光学平衡分束器. 该探测器采取将两个光电二极管串联的自相减的设计方案, 避免了分别测试两个光电二极管的直流分量, 从而消除了经典技术噪声的影响, 可保证探测器具有较高的共模抑制比 (CMRR) 与饱和功率. 我们得到在 10 Hz—400 kHz 的低频范围内, 系统的 CMRR 最大为 63 dB, 平均在 55 dB. 这意味着此探测器对上述频率范围的经典激光噪声有很强的抑制作用. 在低于饱和功率 3.2 mW 的测试范围内, 从 80 Hz—400 kHz 真空噪声的功率随着本地振荡光功率的增加而线性增加. 该低频真

空噪声探测器性能稳定、结构简单, 在量子光学和量子计量研究方面有着非常广泛的应用.

2 低频探测器的电路设计

测量真空噪声的方法通常是使用一个标准的平衡零拍探测系统, 如图 1 (a) 所示. 它是由一个半波片 (HWP) 和一个偏振分束器 (PBS) 构成 50/50 的分束器, 两个相同的低噪声放大光探测器, 一个减法器 (或加法器) 和一个本地振荡器构成. 一束强的本地振荡光在 50/50 的分束器上分成两束, 这两束光分别经过两个光电探测器放大并输出, 光电流的差即为标准真空噪声 [21].

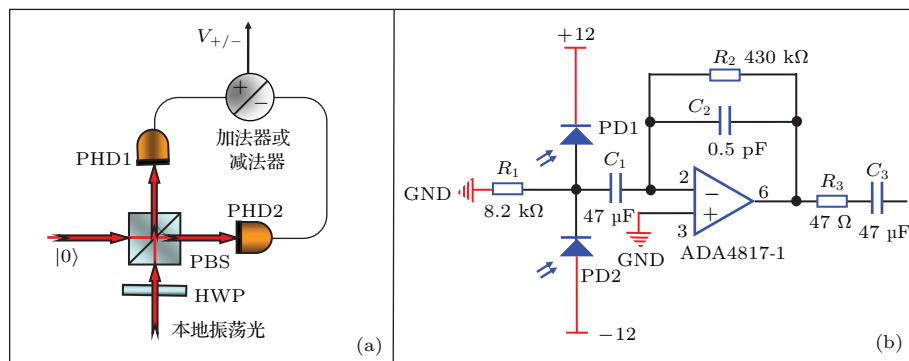


图 1 (网刊彩色) (a) 平衡真空噪声探测方案 (PBS, 偏振分束棱镜; HWP, 半波片; PHD, 光电探测器); (b) 自相减零拍探测器电路原理图 (PD, 光电二极管; R , 电阻; C , 电容)
 Fig. 1. (color online) (a) Scheme of the balanced vacuum noise detection (PBS, polarization beam-splitter; HWP, half wave plate; PHD, photoelectric detector); (b) circuit schematic of self-subtraction homodyne detector (PD, photodiode; R , resistance; C , capacitance).

光电流的差分电路是平衡零拍探测系统中的关键部分. 若采取图 1 (a) 所示的结构设计探测器, 由于流经两个光电二极管的光电流在各自放大过程中会引入额外的噪声且存在失衡的问题, 本文采取将两个性能尽可能相近的光电二极管 (Hamamatsu S5971) 串联的设计方案, 如图 1 (b) 所示. 由基尔霍夫定理可知从串关节点输出的信号即为两个光电二极管的光电流差, 不仅避免了两路光电流信号分别放大引入的失衡, 也提高了探测器对于光场共模噪声的抑制能力.

为降低电源噪声对探测器的影响, 实验采用 $\pm 12\text{ V}$ 的电池供电. 滤波后的交流噪声信号经过电容 C_1 耦合后, 经过电阻 R_3 和电容 C_3 后输入到频谱分析仪 (Agilent 4396 B) 中进行测量. 其中电容

C_1 的选取非常关键, 理论上 C_1 的值越大, 低频噪声进入放大器的信号越强, 但是过大的 C_1 自身会引入电子学等额外噪声, 实验最后选择 C_1 为 47 μF .

图 2 为实验装置示意图. 来自钛宝石激光器 (M squared SolsTiS) 的 852 nm 的激光作为入射本地光, 经过 HWP1 和 PBS1 后, 激光的入射功率调节到适合的水平. 激光功率稳定器 (Thorlabs, LCC3111H) 的作用是稳定激光器功率, 降低激光中的低频经典噪声. 强度调制器 (Photline, NIR-MX800-LN-10) 用来测试系统的 CMRR. HWP2 和 PBS3 构成的分束器来调节注入探测器的激光强度分束比. 探测器使用了两个短焦透镜以保证光束尽可能全部处于光电二极管的光敏面内, 探测器输出的交流信号由频谱分析仪进行分析.

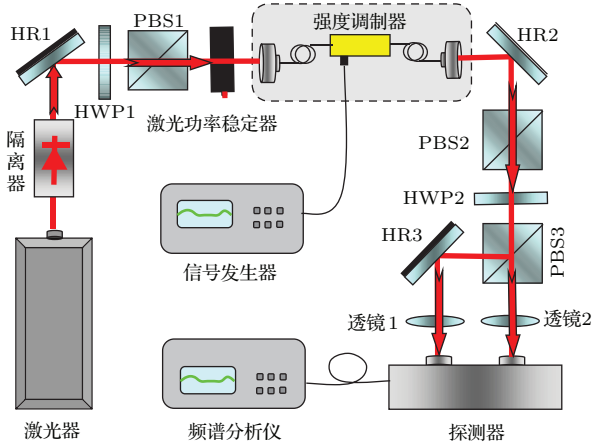


图2 (网刊彩色) 实验装置图 (HR, 高反镜)

Fig. 2. (color online) Diagram of experiment setup (HR, high reflective mirror).

3 实验结果与性能分析

3.1 噪声分析

本文所采用的低频量子噪声探测器, 其噪声来源主要为运算放大器的电子学噪声、电阻热噪声、光电散粒噪声、光电二极管的暗电流噪声和 $1/f$ 噪声. 流经探测器的等效电流 I 为

$$I = \sqrt{i_1^2 + i_2^2 + i_3^2 + i_4^2 + i_5^2}, \quad (1)$$

这里

$$i_1 = \sqrt{I_{eN}^2 + (E_N/R)^2 + (E_N 2\pi C f)^2 / 3}$$

为运算放大器电子学噪声电流, 其中, I_{eN} 和 E_N 分别为运算放大器 (ADA4817-1) 本身输入端的电流噪声和电压噪声, 它们与频率 f 有关; R 为探测器等效电阻, 其为跨阻放大反馈电阻 R_2 与取样电阻 R_1 的并联; C 为总电容, 包括反馈电容、二极管结电容和运算放大器上同相端、反相端的输入电容.

$$i_2 = \sqrt{4k_B T \Delta f / R_1 + 4k_B T \Delta f / R_2}$$

为电阻热噪声电流, 其中, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为电阻所处环境的绝对温度, Δf 为分析带宽. $i_3 = \sqrt{2eI_{dc}\Delta f}$ 为光电散粒噪声电流, 其中, $I_{dc} = (e\eta P\lambda)/(hc)$ 为流过探测器的直流电流, e 为电子电荷, η 为探测器效率, P 为入射光功率, λ 为入射光波长, h 为普朗克常数, c 为光速. i_4 为光电二极管的暗电流噪声. $i_5 = \sqrt{AI_s^m \Delta f / f^n}$ 为 $1/f$ 噪声电流经验公式, 其中, A 为与具体探测器相关

的比例系数, 可由 1 kHz 以内的实测噪声功率谱推算得到; 由于计算 i_1 时所使用的 I_{eN} 和 E_N 直接取自运算放大器的数据手册, 已经包含了 $1/f$ 噪声, 故此时 $I_s = \sqrt{i_2^2 + i_3^2 + i_4^2}$ 近似为流过探测器的等效电流; m 和 n 则与探测器的元件、电路结构以及电路板印刷版的电磁特性密切相关.

由等效电流 I , 易得到等效输入噪声电压 $R_2 I$, 于是频谱分析仪上的电压为 $R_2 I R_s / (R_3 + R_s)$, 探测器的噪声 D 为

$$D = 10 \lg \left[\left(\frac{R_s}{R_3 + R_s} R_2 I \right)^2 / R_s \right], \quad (2)$$

其中, R_s 为频谱分析仪等效阻抗, R_3 为探测器的交流输出阻抗.

利用 (1) 和 (2) 式便可得到入射功率分别为 0 和 400 μW 时的噪声谱线 D_1 与 D_2 , 如图 3 所示. 相应的参数为: $i_4 = 7 \times 10^{-15} \text{ A}/\sqrt{\text{Hz}}$, $R_2 = 430 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 8.2 \text{ k}\Omega$, $C = 7.3 \text{ pF}$, $T = 290 \text{ K}$, $\Delta f = 1 \text{ Hz}$, $R = 8 \text{ k}\Omega$, $R_s = 50 \Omega$, $R_3 = 47 \Omega$, $\eta = 90\%$, $\lambda = 852 \text{ nm}$, $A = 6000$, $m = 2$, $n = 1.5$.

将频谱分析仪的分辨率带宽 (resolution bandwidth, RBW) 设为 1 Hz, 视频带宽 (video bandwidth, VBW) 设为 300 mHz, 实验测到入射光功率为 0 时的电子学噪声与入射光功率为 400 μW 的噪声功率谱分别如图 3 中 $D_{1\text{exp}}$ 和 $D_{2\text{exp}}$ 曲线所示.

由 $D_{1\text{exp}}$ 与 $D_{2\text{exp}}$ 噪声谱线可知: 当频率高于 200 kHz 左右时, 噪声功率输出由于探测器带宽的限制而衰减下降; 当频率为 400 kHz 左右时, 噪声功率较原来下降了约 3 dB, 从而确定探测器的 -3 dB 带宽约为 400 kHz. 对比 D_1 与 $D_{1\text{exp}}$ 的结果可知, 当入射光为 0 时, 理论与实验基本重合, 但在 30—120 kHz 范围内, 电子学噪声出现非常明显的尖峰, 主要原因是电路在 100 kHz 附近产生了共振. 比较 D_2 和 $D_{2\text{exp}}$ 可知, 两谱线基本重合, 但是在 30—100 Hz 频率范围内 $D_{2\text{exp}}$ 谱线出现了一些尖峰和扰动, 说明此时 $D_{2\text{exp}}$ 中引入了其他的额外噪声, 光源在低频处的不稳定以及测试条件随环境低频噪声与温度起伏的变化等诸多因素是导致这一现象的主要原因. 图 3 内插图显示当频率高于 70 Hz 左右时, 入射光功率为 400 μW 的理论噪声谱线相对于电子学噪声谱线趋于平稳且维持在高于 11 dB 的水平.

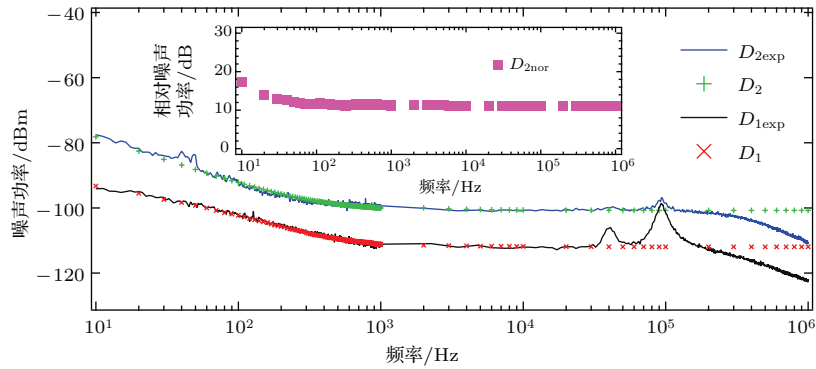


图3 (网刊彩色) 探测器实际噪声与理论噪声对比, 其中 10 Hz—1 kHz 的范围内, 得到 $D_{1\text{exp}}$ 与 $D_{2\text{exp}}$ 的频谱分析仪参数设定为 RBW = 1 Hz, VBW = 300 mHz, Avg = 16; 1 kHz—1 MHz 的范围内, 频谱分析仪参数设定为 RBW = 300 Hz, VBW = 100 Hz, Avg = 16; 将 1 kHz—1 MHz 范围内的噪声曲线全部归一化至 10 Hz—1 kHz 噪声曲线上, 便得到 10 Hz—1 MHz 范围内完整的噪声曲线; 插图为 D_2 曲线归一化至 D_1 曲线图

Fig. 3. (color online) Theoretical and experimental noise levels below 1 MHz. The parameters of the spectrum analyzer for $D_{1\text{exp}}$ and $D_{2\text{exp}}$ in the regime of 10 Hz to 1 kHz are: RBW = 1 Hz, VBW = 300 mHz and Avg = 16, while in the regime of 1 kHz to 1 MHz: RBW = 300 Hz, VBW = 100 Hz and Avg = 16. We have normalized the noise spectrum in the regime of 1 kHz to 1 MHz to the regime of 10 Hz to 1 kHz, and the $D_{1\text{exp}}$ and $D_{2\text{exp}}$ in the regime of 10 Hz to 1 MHz are obtained. The inset shows the normalization noise level of D_2 to D_1 .

3.2 CMRR 的分析

CMRR 是衡量一个探测器共模噪声抑制能力的非常重要的参数之一. 实验中我们通过 $CMRR = P_i/|P_1 - P_2|$ ($i = 1, 2$) 来获得探测器的 CMRR, 其中 P_i 为两臂单独测试时输出的交流噪声功率. 在频谱分析仪中采用分贝毫瓦 (dBm) 来表示交流噪声功率, 则 $CMRR = 10 \lg P_i -$

$10 \lg |P_1 - P_2|$ ($i = 1, 2$). 入射到差分探测器的光功率由图 2 中的强度调制器调制, 分别记录探测器的单臂非平衡测量下的光电流噪声功率与两臂平衡测量时的光电流噪声功率, 两者相减即得到 CMRR 的频率特性, 如图 4 所示. 可以看出, 在 10 Hz—400 kHz 范围内, 探测器的 CMRR 为 40 dB 以上, 平均可达 55 dB, 最高的 CMRR 为 100 Hz 处 63 dB, 如图 4 内插图所示.

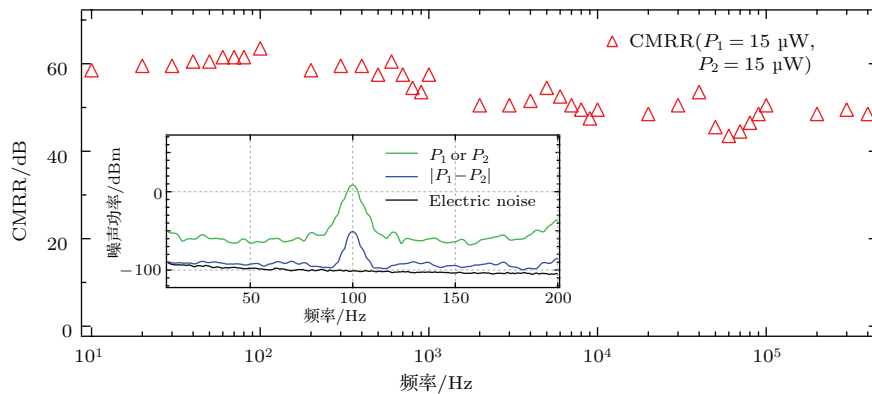


图4 (网刊彩色) 探测器在 10 Hz—400 kHz 范围内的 CMRR, 插图为探测器在 100 Hz 处的 CMRR, 其中频谱分析仪的参数设置为: RBW = 3 Hz, VBW = 1 Hz, Avg = 16

Fig. 4. (color online) CMRR of the detector in the regime of 10 Hz to 400 kHz. The inset shows the CMRR of the homodyne detectors at 100 Hz with parameters of the spectrum analyzer: RBW = 3 Hz, VBW = 1 Hz and Avg = 16.

3.3 探测器线性响应分析

该测量系统在音频范围内对于输入光场具有良好的线性响应特性. 如图 5 所示, 探测器的交流

饱和光功率约为 3200 μW , 当入射光为 400 μW 时, 80 Hz 处噪声谱线与电子学谱线间隔为 11 dB. 当频率在 80 Hz 附近至 400 kHz 范围内时, 入射光功率每增加一倍或减少一半, 噪声谱线相应地增加或

减少约 3 dB, 说明噪声功率与入射光功率成正比. 当频率低于 80 Hz 时, 入射光功率每增加一倍或减少一半, 噪声谱线就相应地增加或减少约 4—6 dB, 噪声功率与入射光功率不成正比. 如图 6 所示, 我们分别选取 50, 80 和 500 Hz 作为特征频率, 可知, 当频率为 80, 500 Hz 时, 其入射光功率与噪声功率均成正比且保持良好的线性关系——表征线性

拟合程度的校正决定系数 (adjusted R square) 均大于 0.9999, 说明该探测器探测的量子噪声能够反映入射光的量子噪声起伏. 而在频率为 50 Hz 时, 其校正决定系数只有 0.93587, 说明其入射光功率与探测器输出的噪声功率不再呈线性, 该频率处的实验数据已经不能正确反映入射光的量子噪声起伏.

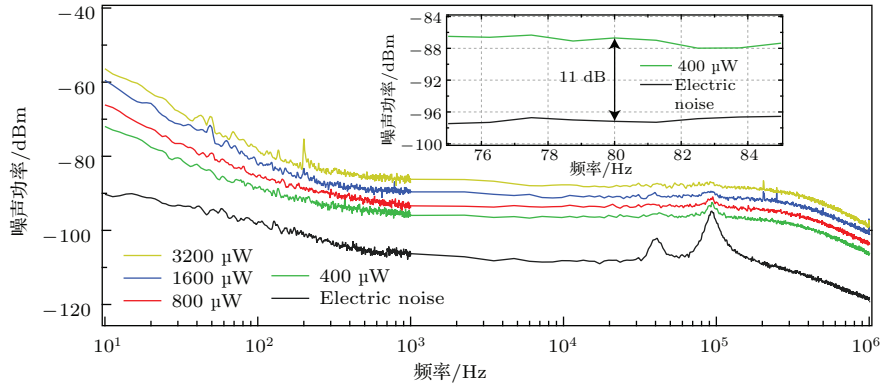


图 5 (网刊彩色) 不同频率下探测器的噪声谱线, 其中, 10 Hz—1 kHz 频谱分析仪的参数设置为: RBW = 3 Hz, VBW = 1 Hz, Avg = 16, 其余参数设置及数据处理同图 3; 图 5 中插图表示当入射光为 400 μW 时, 在 80 Hz 处输出噪声谱线高出电子学噪声谱线 11 dB

Fig. 5. (color online) Noise spectra of the homodyne detectors at different frequencies. The parameters of the spectrum analyzer in the regime of 10 Hz to 1 kHz are: RBW = 3 Hz, VBW = 1 Hz and Avg = 16. Other parameters and the data processing are the same as in Fig. 3. The inset shows the vacuum noise level when the incident light is 400 μW, which is about 11 dB above the electronic noise level at the frequency of 80 Hz.

探测器在几十赫兹的低频处所探测到的真空涨落除散粒噪声之外还含有额外噪声, 这些额外噪声具有明显的非平稳特性. 除了平衡零拍探测系统光路中某些低频干扰(如寄生干涉、空气扰动)在时域上对光束的非关联散射导致非平稳特性外^[15], 其他额外噪声也导致了非平稳特性. 探测器与周围环境的热损失导致探测器内部热导率变化引起的热扰动噪声、探测器温度与环境温度辐射热交换所引起的背景扰动噪声以及振动引起的线缆接头导电性能的起伏等都对探测器最终的性能有着重要的影响^[22]. 这些低频的非平稳额外噪声成为实验上对该频段标准真空涨落测量的主要技术障碍. 实际测量过程中, 探测器的接地和屏蔽效果也决定了探测器的性能. 虽然使用了激光功率稳定器等稳定手段, 但是激光器在更低的频段内的不稳定性仍很显著. 除此之外, PIN 光电二极管电容的性质和宽带的约翰逊噪声等都导致了谱线低频处 $1/f$ 噪声的特性, 电路中使用的是高速场效应管运算放大器, $1/f$ 噪声在此种运算放大器中的作用更加明显,

再加上电路元件带来的噪声等都对更低频处的噪声产生了明显的影响.

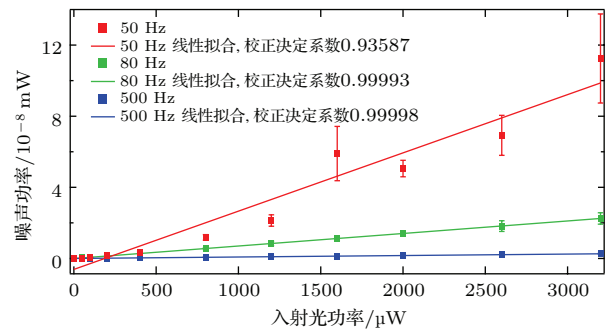


图 6 (网刊彩色) 特定频率下噪声功率随入射光的变化, 其中, 谱仪参数设定为: RBW = 3 Hz, VBW = 1 Hz, 图中每个实心数据点对应特定频率下的散粒噪声功率(已扣除掉电子学噪声, 并且取 30 次的均值), 实线为线性拟合结果

Fig. 6. (color online) Noise power for different input light intensities at specific frequencies. The parameters of the spectrum analyzer are set as RBW = 3 Hz, VBW = 1 Hz. Each solid data point is the measured net shot noise power after 30 times measurements and the solid lines are the linear fittings.

4 总 结

本文介绍了一种低频差分探测系统, 并应用其对饱和功率为 3.2 mW 内的标准真空涨落进行了测量. 当入射波长为 852 nm, 光强为 400 μ W 的探测光时, 在 80 Hz 处输出量子噪声功率高于电子学噪声约 11 dB. 在 -3 dB 带宽范围内, 探测器的 CMRR 平均为 55 dB, 最高可达 63 dB. 该探测系统其对经典噪声有良好的抑制, 可以广泛应用于量子光学与量子计量等研究领域.

参考文献

- [1] Caves C M 1981 *Phys. Rev. D* **23** 1693
- [2] Goda K, Miyakawa O, Mikhailov E E, Saraf S, Adhikari R, McKenzie K, Ward R, Vass S, Weinstein A J, Mavalala N 2008 *Nat. Phys.* **4** 472
- [3] Chelkowski S 2007 *Ph. D. Dissertation* (Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität)
- [4] Koschorreck M, Napolitano M, Dubost B, Mitchell M W 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 093602
- [5] Wolfgramm F, Cerè A, Beduini F A, Predojević A, Koschorreck M 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 053601
- [6] Horrom T, Singh R, Dowling J P, Mikhailov E E 2012 *Phys. Rev. A* **86** 023803
- [7] Banaszek K, Demkowicz-Dobrzański R, Walmsley I A 2009 *Nat. Photon.* **3** 673
- [8] Slusher R E, Hollberg L W, Yurke B, Mertz J C, Valley J F 1985 *Phys. Rev. Lett.* **55** 2409
- [9] Mehmet M, Ast S, Eberle T, Steinlechner S, Vahlbruch H, Schnabel R 2011 *Opt. Express* **19** 25763
- [10] Zhang T C, Zhang J X, Xie C D, Peng K C 1998 *Acta Phys. Sin.* **7** 340 (Overseas Edition)
- [11] Zhang T C, Li T Y, Effenterre D V, Xie C D, Peng K C 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1498 (in Chinese) [张天才, 李廷鱼, Effenterre D V, 谢常德, 彭堃堦 1998 物理学报 **47** 1498]
- [12] Dong R F, Zhang J X, Zhang T C, Zhang J, Xie C D, Peng K C 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 462 (in Chinese) [董瑞芳, 张俊香, 张天才, 张靖, 谢常德, 彭堃堦 2001 物理学报 **50** 462]
- [13] Zhou Q Q, Liu J L, Zhang K S 2010 *Acta Sin. Quantum Opt.* **16** 152 (in Chinese) [周倩倩, 刘建丽, 张宽收 2010 量子光学学报 **16** 152]
- [14] Wang J J, Jia X J, Peng K C 2012 *Acta Opt. Sin.* **31** 0127001 (in Chinese) [王金晶, 贾晓军, 彭堃堦 2012 光学学报 **31** 0127001]
- [15] McKenzie K 2008 *Ph. D. Dissertation* (Canberra: Australian National University)
- [16] Vahlbruch H, Chelkowski S, Danzmann K, Schnabel R 2007 *New J. Phys.* **9** 371
- [17] Vahlbruch H 2008 *Ph. D. Dissertation* (Hannover: The Albert Einstein Institute and the Institute of Gravitational Physics of Leibniz Universität Hannover)
- [18] Stefszky M S, Mow-Lowry C M, Chua S S Y, Shaddock D A, Buchler B C, Vahlbruch H, Khalaidovski A, Schnabel R, Lam P K, McClelland D E 2012 *Class. Quantum Grav.* **29** 145015
- [19] Dwyer S E 2013 *Ph. D. Dissertation* (Cambridge: Massachusetts Institute of Technology)
- [20] The LIGO Scientific Collaboration 2011 *Nat. Phys.* **7** 962
- [21] Stefszky M S 2012 *Ph. D. Dissertation* (Canberra: Australian National University)
- [22] Rogalski A (translated by Zhou H X, Cheng Y F) 2014 *Infrared Detectors* (Beijing: China Machine Press) pp47, 48 (in Chinese) [罗格尔斯基 A 著 (周海宪, 程云芳 译) 2014 红外探测器 (北京: 机械工业出版社) 第 47, 48 页]

Measurement of standard vacuum noise at low frequencies*

Xue Jia¹⁾ Qin Ji-Liang¹⁾ Zhang Yu-Chi^{2)†} Li Gang¹⁾ Zhang Peng-Fei¹⁾
Zhang Tian-Cai^{1)‡} Peng Kun-Chi¹⁾

1) (*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*)

2) (*College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(Received 11 December 2015; revised manuscript received 29 December 2015)

Abstract

Vacuum fluctuation at audio frequencies is very important and interesting in many research fields, such as the gravitational wave detection, ultra-weak magnetic field measurement, and the research of quantum metrology, etc. Since the generation of squeezed light in 1985, most of the squeezed light have been generated and measured at radio frequencies (\sim MHz) as there has not been much technical noise at higher frequencies. In the Michelson-interferometer-based gravitational wave detection, the detection band has frequencies from a few to tens of thousands Hz. Measuring vacuum noise at such low frequencies is a challenge since we have to stabilize and control all the audio noises and the interferences from a variety of mechanical and electronic noises, therefore a very high classical noise suppression is needed when the measurement time increases. In order to measure the squeezed light of low frequencies, the standard vacuum noise at audio frequencies must be measured. In this paper, a balanced homodyne detection system for measuring the low-frequency quantum vacuum noises is reported. It is not trivial to extend the detected frequency to very low analysis frequencies. Through a self-made self-subtraction balanced homodyne configuration, which can eliminate the DC component of each photocurrent from the photodiode and the classical common-mode technical noise, the standard vacuum noise has been detected. The linearity of the vacuum noise power has been validated by varying the local oscillator power, showing that the saturation power of light incidence is about 3.2 mW. When the incident-light power is 400 μ W, the standard vacuum noise is 11 dB higher than the electronic noise at 80 Hz. In the regime of about 80 Hz to 400 kHz, the linearity of the standard noise power as a function of incident laser power is verified. However, when the measurement is carried out at even lower frequencies, for example, 50 Hz, we may encounter some excess and non-stationary noises and find that the measured noise power is not proportional to the incident light power any more. These non-stationary noises are the main technical obstacle at low frequencies. The average common mode rejection ratio in the test frequency range from 10 Hz to 400 kHz is 55 dB and its maximum 63 dB at 100 Hz is obtained, implying a high suppression of the technical noise. This self-made homodyne vacuum noise detector can be widely used for precision measurement in quantum metrology and quantum optics.

Keywords: low frequency, quantum vacuum noise, balanced homodyne detection, common mode rejection ratio

PACS: 42.50.Lc, 42.50.-p

DOI: 10.7498/aps.65.044211

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91336107, 61227902, 61275210) and the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 2014021011-2).

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

‡ Corresponding author. E-mail: tczhang@sxu.edu.cn