

非稳散粒噪声相位依赖特性的实验研究*

郭旭进 黄 涛 肖连团 贾锁堂

(山西大学量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学物理电子工程学院, 太原 030006)

摘 要 为了抑制相位调制引起的散粒噪声, 实验研究了通过调制二极管激光器输出光强度, 使用相位解调技术得到的不同解调相位下非稳散粒噪声的功率谱. 在最小散粒噪声处, 得到了相比于无调制情况下的散粒噪声减小 3 dB 的灵敏测量结果. 实验结果表明, 选择合适的调制相位可以在一定程度上抑制散粒噪声. 研究结果与理论分析一致.

关键词 量子光学; 非稳散粒噪声; 傅里叶变换; 相位依赖特性; 强度调制

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

0 引言

现代科学技术的进展, 使光学测量和光学通信的准确度已经接近标准量子极限(真空涨落)的水平^[1]. 由于量子噪声的存在从根本上限制了光学测量和光学通信准确度的进一步提高, 因此, 减少甚至完全抑制光场量子噪声已经成为理论和实验物理学家近 30 年来十分关心和感兴趣的研究课题. 在精确光测量中, 相位调制解调探测是一种有效的技术, 广泛应用于 Pound-Drever 方法稳频、干涉引力波探测^[2~6]等领域. 但是, 调制光会导致非稳散粒噪声的产生^[3]. 使用特定的相位解调可以抑制非稳散粒噪声对信号的影响. Niebauer, et al. 发现非稳散粒噪声具有相位依赖特性, 改变相位可以增加或者减小解调噪声的功率谱强度^[2]. Meers 和 Strain 分析了不同调制系统下散粒噪声的产生^[3]. Winzer 研究了滤波函数对于散粒噪声的影响^[7]. Malik 使用谐波测量的方法实现了任意波形解调^[8]. 国内的许多实验室也对于散粒噪声进行了相应的研究^[9,10]. 但是, 已有的关于非稳散粒噪声的测量大多是在迈克尔逊干涉系统中进行的, 由于迈克尔逊干涉系统的特点, 噪声的成分比较复杂, 观察到的噪声抑制不能完全用非稳散粒噪声来解释.

本文对于二极管激光器发出的激光进行强度调制, 使用相位调制解调探测的方法, 对于非稳散粒噪声的功率谱进行测量. 研究结果表明, 非稳散粒噪声具有相位依赖特性, 研究结果与理论预测一致.

1 实验装置

实验装置如图 1. 外腔式连续可调谐二极管激光

器(New Focus Model 6017)发出的激光, 经过声光调制器(Crystal Technology 3080-122)强度调制后, 使用分光棱镜(大恒 GCC-403112 分光比 50/50)将声光调制器 0 级衍射光分为两束, 分别进入两个 Si 光电探测器. 两个探测器的输出信号通过减法器实现信号相减, 得到散粒噪声信号. 减法器的输出信号经过带通滤波器(SRS Model SR 640)滤波后, 进入锁相放大器(SRS Model SR 830)进行解调, 通过计算机接口电路实现数据采集. 射频函数发生器(Fluke 6061A)产生的射频信号作为声光调制器的驱动源. 任意波形函数发生器(HP 33120A)产生低频正弦调制信号, 作为激光强度调制源, 加载到射频信号发生器的外部调制端口, 对输出光进行强度调制. 任意波形函数发生器的同步信号经过分频器, 产生 2 分频信号, 作为锁相放大器的参考信号进行一次谐波解调. 为了减小稳定强度噪声对于非稳散粒噪声信号测量的影响, 实验中采用了较大的积分时间常量 30 ms. 使用 Labview 软件进行编程, 实现锁相放大器解调相位的控制、输出信号的采集、快速傅里叶变换以及散粒噪声功率谱的多次平均.

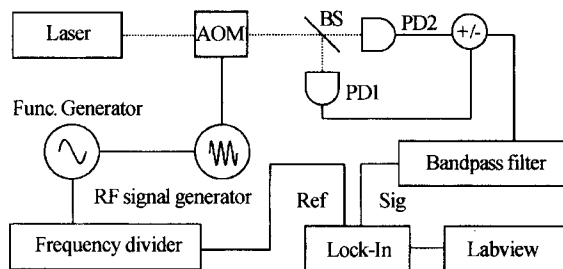


图 1 实验装置
Fig. 1 Experimental setup

外腔式连续可调谐二极管激光器的工作温度为 26°C, 输出功率为 7.4 mW. 输出激光在短时间内的线宽小于 300 kHz(50 ms 内), 激光器压电陶瓷的预置直流偏压为 80 V 左右, 输出激光的中心波长为 852.11 nm(空气中). 任意波形函数发生器输出低

* 国家自然科学基金(60378004)和山西省归国留学基金资助项目

Tel: 0351-7018489 Email: guoxj@sxu.edu.cn

收稿日期: 2005-01-14

频信号的频率为 40.4 kHz. 射频信号发生器输出的振幅调制波的载波为 65 MHz, 功率为 -6.1 dBm. 声光调制器工作于 65 MHz 时, 一级衍射光失谐 80.3 MHz. 光电探测器是两个同型号的 Si APD (HAMAMATSU S3884) 探测器. 带通滤波器截止频率为 30.3 kHz. 输入增益为 20 dB.

2 测量原理与实验结果分析

对于一个调制光的功率进行测量, 测量时间为 T , 采样时间间隔为 Δt . 假设, Δt 相对于调制周期足够短, 每个采样时间内的平均功率可以近似表示为 $P(t)$. 测量时间 T 为调制周期和 Δt 的整数倍. 噪声的相关函数可表示为

$$\langle P_n(t)P_n(t') \rangle = \frac{h\nu}{\Delta t} P(t) \delta_{t,t'} \quad (1)$$

式中, $h\nu$ 为激光器发射的单个光子的能量, $\delta_{t,t'}$ 为 δ 函数, 在 $t=t'$ 时等于 1, 在 $t \neq t'$ 时等于 0.

对于调制信号进行离散傅里叶变换, 得到噪声谱的均方期望值

$$\langle |\tilde{P}_n(\omega)|^2 \rangle = \frac{h\nu}{T} \overline{P(t)} \quad (2)$$

式中, $\overline{P(t)}$ 为测量时间 T 内的平均功率. 经过解调信号 $D(t)$ 解调后, 解调噪声谱的均方期望值为

$$\langle |\tilde{P}_D(\omega)|^2 \rangle = \frac{h\nu}{T} \overline{D(t)^2 P(t)} \quad (3)$$

式中, 调制光功率和解调信号的表达式分别为

$$P(t) = P_{av} - \Delta P \cos \omega_P t \quad (4)$$

P_{av} 为平均光功率, ΔP 对应于不同的调制深度, ω_P 为功率调制频率.

$$D(t) = \sqrt{2} \sin(\omega t + \theta) \quad (5)$$

ω 为解调频率, θ 为解调相位.

将式(4)、(5)代入式(3), 得到解调噪声谱的均方期望值为

$$\langle |\tilde{P}_D(\omega)|^2 \rangle = \begin{cases} \frac{h\nu}{T} (P_{av} + \frac{1}{2} \Delta P \cos 2\theta) & \omega = \omega_P / 2 \\ \frac{h\nu}{T} P_{av} & \omega = \text{others} \end{cases} \quad (6)$$

从式(6)可以看出, 当解调频率 ω 不等于功率调制频率 ω_P 的 1/2 时, 噪声信号基本不受调制频率变化的影响, 与无调制情况下得到的噪声一致, 为通常情况定义的散粒噪声, 强度为 $(h\nu/T) P_{av}$; 当解调频率 ω 等于功率调制频率 ω_P 的 1/2 时, 噪声信号在通常散粒噪声的基础上, 增加了随解调相位 θ 变化的非稳散粒噪声项, 非稳散粒噪声强度为 $(h\nu/2T) \Delta P \cos 2\theta$. 在实验过程中, 使用 2 分频电路得到了功率调制信号的 2 分频信号作为解调信号. 对于 100% 调制的情况, 非稳散粒噪声的变化范围最大,

从通常散粒噪声强度的 1/2 到 3/2 变化. 非稳散粒噪声强度变化的周期为 180° , 相应的最大值点和最小值点间的相位间隔为 90° . 在实验过程中, 声光调制器输出光具有 93.5% 的强度调制, 选择合适的解调相位, 可以将散粒噪声功率减小到无调制情况散粒噪声功率的 53.25%.

为了减小调制光信号对噪声信号测量的影响, 得到更纯粹的噪声信号, 实验中使用了两个相同型号的探测器, 两个探测器工作于 24 V 的工作电压附近. 使用相同功率的光照射探测器, 改变其中一个探测器的工作电压, 使两个探测器工作于相同的光电转换效率, 工作电压差值小于 1%. 两个探测器输出的电压信号经过减法器, 得到最高剩余信号为相减前探测器输出信号的 0.9%. 选择带通滤波器的截止频率为 30.3 kHz, 使其低于功率调制频率 40.4 kHz, 减小调制光信号对于噪声信号的影响; 同时保证截止频率高于解调频率 20.2 kHz, 避免噪声信号待测频谱的损失. 使用 Labview 软件与 Sr830 Lock-in 的数据采集端口通讯, 得到离散的散粒噪声时域信号, 如图 2.

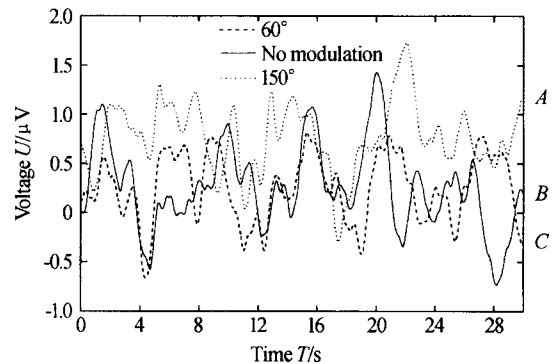


图 2 包含散粒噪声的时域信号

Fig. 2 Noise signal of time domain

图 2 中的信号是在三个典型的解调相位连续监视 30 s 得到的噪声信号, 信号的波动不超过 2 微伏. 曲线 A 对应于 150° 解调相位时得到的噪声时域信号; 曲线 B 对应于无调制情况; 曲线 C 对应于 60° 解调相位. 从图中可以看出, 不同的解调相位对应的噪声信号强度在时域中基本相近, 不能明显进行区分. 在不同的解调相位下, 噪声信号都表现为白噪声, 噪声信号各不相同, 但噪声强度无法进行比较. 为了分析不同解调相位对于噪声功率谱的影响, 这里将时域噪声信号转化为频域噪声信号, 比较不同频率下噪声信号的分布.

通过 Labview (Version 6.1) 软件中的 FFT Power Spectrum 控件, 进行噪声时域信号到频域功率谱的转换, 可以实现功率谱的多次累加. 同时, 借助 Labview 软件强大的仪器控制功能, 可以将数据

的采集和处理同时进行. 改变不同的解调相位, 对于采集到的噪声信号进行傅里叶变换, 经过多次平均后得到噪声功率谱如图 3.

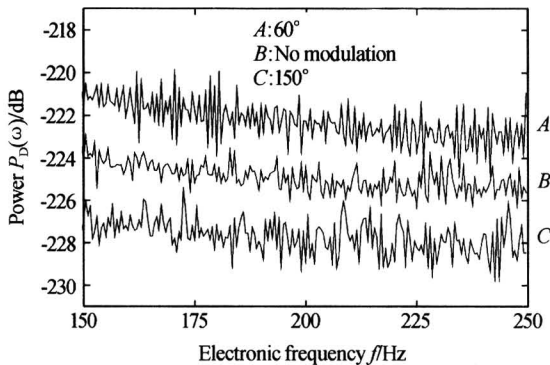


图 3 噪声功率谱
Fig. 3 Power spectrum of noise

图 3 中的信号是经过 75 次平均后不同解调相位下的噪声功率谱. 受锁相放大器采样速度的限制, 选择的频率范围为 150 Hz 到 250 Hz 的低频范围. 曲线 A、C、B 分别对应于 60° 、 150° 解调相位和无调制情况. 从图中可以看到使用不同的解调相位得到的噪声功率谱都表现为白噪声, 但是噪声功率谱强度经过 75 次平均后可以明显区分开来. 改变不同的解调相位, 噪声的功率谱强度也随之呈周期性变化. 曲线 A 对应于功率谱强度最大值, 相应的解调相位为 60° ; 曲线 C 对应于最小值, 解调相位为 150° . 最大、最小值间解调相位间隔为 90° , 与理论预测的结果吻合. 曲线 B 为无调制情形得到的功率谱, 处于功率谱强度最大值和最小值之间, 与曲线 A、C 的平均间隔分别为 2.6 dB 和 3 dB. 本实验中, 与无调制情况相比, 使用相位调制解调探测的方法, 最多可以将噪声强度减小 3 dB. 相位调制解调探测的方法可以减小噪声强度.

3 结论

通过调制二极管激光器输出光强度, 使用相位解调技术, 对于非稳散粒噪声的功率谱进行了测量. 在解调相位为 60° 时, 得到最大散粒噪声. 而对应其相位间隔为 90° 的 150° 时, 散粒噪声减小了 5.6 dB. 在最小散粒噪声处, 得到了相比于无调制情况下的

散粒噪声减小 3 dB 的灵敏测量结果. 实验结果验证了选择合适的调制相位可以在一定程度上抑制散粒噪声. 研究结果与理论分析一致.

参考文献

- 1 彭堃堉. 光场压缩态的产生及其在亚散粒噪声光学测量和量子信息中的应用. 物理, 2001, **30**(5): 300~305
Peng K C. *Physics*, 2001, **30**(5): 300~305
- 2 Niebauer T M, schilling R, Danzmann K, et al. Non-stationary shot noise and its effect on the sensitivity of interferometers. *Phys Rev A*, 1991, **43**(9): 5022~5029
- 3 Brian J M, Kenneth S. Modulation, signal, and quantum noise in interferometers. *Phys Rev A*, 1991, **44**(7): 4693~4703
- 4 王廷云. 用压电陶瓷实现的光纤相位调制理论与实验分析. 光子学报, 1999, **28**(2): 134~137
Wang T Y. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(2): 134~137
- 5 Li Z G, Qiu K. Study on wavelength converter based on XPM in optical fiber. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 714~717
- 6 徐永钊, 徐文成, 于丙涛, 等. 色散平坦渐减光纤中交叉相位调制对超连续谱产生的增强效应. 光子学报, 2004, **33**(4): 431~434
Xu Y Z, Xu W C, Yu B T, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 431~434
- 7 Peter J W. Shot-noise formula for time-varying photon rates: a general derivation. *J Opt Soc Am B*, 1997, **14**(10): 2424~2429
- 8 Malik R. Demodulation of intensity and shot noise in the optical heterodyne detection of laser interferometers for gravitational waves. *Appl Opt*, 2001, **40**(36): 6596~6605
- 9 张云, 张天才, 李廷鱼, 等. 法布里-珀罗腔对相位噪声测量的影响. 光学学报, 2000, **20**(4): 465~471
Zhang Y, Zhang T C, Li T Y, et al. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(4): 465~471
- 10 钱芸生, 常本康, 童默颖, 等. 像增强器噪声频谱特性测试技术研究. 光学学报, 2003, **23**(1): 67~70
Qian Y S, Chang B K, Tong M Y, et al. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 67~70

Experimental Investigation of Phase Dependence of Non-stationary Shot Noise

Guo Xujin, Huang Tao, Xiao Liantuan, Jia Suotang

*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Device, College of Physics and Electronics Engineering,
Shaanxi University, Taiyuan 030006*

Received date: 2005-01-14

Abstract In order to reduce the impact of shot noise induced by phase modulation, intensity modulation and Phase sensitivity demodulation is used to measure power spectrum of noise with different demodulation phase. The minimum intensity of power spectrum was decreased about 3 dB compare with the intensity with no modulation. It is shown that the influence of non-stationary shot noise can be restrained with a special demodulation phase. Experimental data is in good agreement with theoretical forecast.

Keywords Quantum optics; Non-stationary shot noise; Fourier transformation; Phase dependence property; Intensity modulation



Guo Xujin was born in 1980 in Shanxi Province. Now he is pursuing the master degree of optics in Shanxi University. His research topics concern single molecule spectroscopy and quantum cryptography.