

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.03.08

量子外差精密测量及微弱信号感知技术综述

关策, 张子静, 岑龙柱, 王志远, 赵远*

(哈尔滨工业大学 物理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 单光子探测技术和激光外差探测技术是探测微弱光信号的重要手段, 通过微弱光信号提取目标多维信息是目前激光感知的重要领域。但是在实际应用中背景噪声以及信号光的退相干, 会严重影响单光子探测技术以及外差探测技术对于目标多维信息的感知。在探测微弱光信号时的这些问题通过传统方案很难被有效的解决。量子外差精密测量方法是在单光子探测的基础上结合外差探测的一种新测量方法, 可以解决单光子探测探测灵敏度受背景噪声限制的缺点。并且量子外差对本振光强度要求极低, 可以有效降低大阵列外差探测对于本振强度的要求。文中进一步总结并分析了量子外差精密测量方法的研究动态。通过现有研究成果的梳理和分析有助于深入理解和把握目前量子外差精密测量方法的研究现状和问题, 为量子外差精密测量方法未来发展奠定基础。

关键词: 多维信息提取; 单光子探测; 激光外差; 量子外差; 微多普勒探测

中图分类号: TB939

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)03-0091-08

Survey of quantum heterodyne precision measurement and weak signal sensing technology

GUAN Ce, ZHANG Zijing, CEN Longzhu, WANG Zhiyuan, ZHAO Yuan*

(School of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Single photon detection and laser heterodyne detection are important tools for detecting weak echo light, and the extraction of multidimensional information from weak echo light is currently an important area of laser sensing. However, in practice, background noise and decoherence of the echo light can seriously affect the perception of multidimensional information from single photon detection and heterodyne detection techniques. These problems in the detection of weak echo light are difficult to solve effectively by using conventional solutions. The quantum heterodyne precision measurement method is a new measurement method based on single-photon detection combined with heterodyne detection, which can overcome the shortcomings of single-photon detection sensitivity limited by background noise. In addition, the quantum heterodyne has extremely low requirement for local oscillation intensity, which can effectively reduce the requirement for local oscillation intensity in large array heterodyne detection. This paper further summarises and analyses the research developments in quantum heterodyne precision measurement methods. The review and analysis of the existing research results will help to understand and grasp the current research status and problems of quantum heterodyne precision measurement method, and lay the foundation

收稿日期: 2022-11-16; 修回日期: 2022-12-27

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (FRFCU5710050722, AUEA5770500522); 国家自然科学基金项目 (62075049)

引用格式: 关策, 张子静, 岑龙柱, 等. 量子外差精密测量及微弱信号感知技术综述[J]. 计测技术, 2023, 43 (3): 91-98.

Citation: GUAN C, ZHANG Z J, CEN L Z, et al. Survey of quantum heterodyne precision measurement and weak signal sensing technology[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(3):91-98.



for the future development of quantum heterodyne precision measurement methods.

Key words: multidimensional information extraction; single photon detection; laser heterodyne; quantum heterodyne; micro Doppler detection

0 引言

激光主动探测因灵敏度高、探测精度高,受到了民用和国防科技领域的广泛关注。近年来,随着激光器、探测器的高速发展,器件可靠性大幅提升,激光主动探测的探测性能及稳定性均已满足应用要求。以激光雷达为代表的激光主动探测在自动驾驶、遥感、制导等领域均得到了广泛的应用,并且在部分领域实现了产业化。目前,国内外激光主动探测领域的研究热点为:目标多维信息的实时获取、复杂环境下目标信息获取、体积功耗限制下远距离探测导致的微弱回波信号的目标信息获取。其中,单光子探测技术和量子探测技术均是上述研究领域重点开展的工作。

量子外差精密测量可以兼顾实现微弱光信号信息感知和目标多维信息的获取,是目前最有价值的研究工作之一。本文将重点介绍量子外差精密测量的国内外动态、技术价值以及本单位的一些工作。

1 单光子激光雷达发展现状

2021年,中国科技大学的徐飞虎等人^[1]展示了一种紧凑型同轴单光子激光雷达系统,能够在最远201.5 km的距离内实现静止目标的3D成像。针对大气的后向散射噪声和远距离探测导致的信号光衰减,开发了高效率的光学系统以提高信号光的收集效率,提升回波信号的强度。对传统的时间门控方案进行了改进,更高效的抑制了近程大气的后向散射噪声。最终通过优化设计后的探测系统提升了远距离探测的信噪比,从而保证百公里级的静止目标测距准确性。

2022年,南京理工大学的李志坚等人^[2]提出了一种基于单光子探测器死时间的激光脉冲序列编码方法,并且通过实验证明了该方法可以有效提升探测信噪比与探测实时性。该编码方法将宏脉冲内相邻子脉冲之间的时间间隔进行优化设计,时间间隔被设计为略长于单光子探测器的死时间。

此设计使得响应子脉冲后,探测器产生的死时间可以“阻止”传入的噪声光子被检测。降低了因噪声光子被检测而导致“下一个子脉冲的探测损失”的概率,提升了下一个子脉冲的探测概率,抑制了噪声,提升了探测信噪比。

2022年,英国格拉斯哥大学的Murray R和Ashley L^[3]提出了一种基于量子干涉效应的激光雷达测距方法,使用基于强度相关性的干涉测量法,测距分辨力可以达到70 μm 。相比传统飞行时间测距方法,该方法的测距分辨力不受激光脉宽的限制,能够为3D面部识别、小特征检测/跟踪以及更复杂的飞行时间(如通过遮蔽和非视线成像进行成像)探测应用开辟新的途径。

2022年,瑞士的ZHAO JX(赵久轩)等人^[4]提出了一个基于空间纠缠光子对的激光雷达抗干扰成像系统,通过时间分辨双光子联合探测,可以滤除包括背景光和干扰光在内的其他杂散源的干扰。实验表明:基于纠缠光子对的抗干扰雷达系统,可以在存在同步和异步杂散信号的情况下提取所需的激光飞行时间信息的能力。

目前,单光子探测激光雷达系统虽然可以支撑远距离静止目标的测距需求,但是对于光子级的微弱回波光信号,其信噪比受环境噪声影响较大,需要通过统计探测才能获取目标距离信息,探测实时性较低。在发射端采用脉冲编码方案和基于量子纠缠的噪声滤除方案,一定程度上可以对背景噪声进行滤除。然而对于目标的运动信息进行探测,需要在连续测距后通过计算获得目标的速度,无法对运动目标的速度信息进行直接探测,目标的运动信息探测实时性较差。

2 激光外差探测

外差探测技术可以从信号光与本振光干涉后产生的中频光电流中获得信号光的强度、相位和光频率等信息,扩展了信号光的探测维度,可以实现目标的多维运动信息的直接获取^[5]。通过时频分析技术对外差探测到的信号进行数据处理,

可以实现目标的多维运动特征探测。但是在激光雷达的应用场景中,大气湍流和粗糙的目标表面会使信号光发生退相干。退相干效应会导致外差探测产生的中频光电流相互抵消,从而降低信噪比,退相干效应极大地限制了外差探测系统的探测灵敏度^[6]。

2021年,燕山大学的LIU Y T(刘玉涛)等人^[7]开发了一种基于高速相机的阵列外差探测系统。通过遗传算法对相机各个像元产生的中频光电流的相位进行调整,最终将调整相位后各个像元产生的光电流求和作为外差探测最终输出中频光电流。此探测方案通过相位调整防止了各个像元产生的中频光电流相互抵消,通过原理验证实验,证明了该探测系统在信号光发生退相干时可以有效的提升外差探测的信噪比。基于此探测系统,该团队于2022年采用真实的粗糙目标进行了验证试验^[8]。

2021年,西安电子科技大学的GENG J N(耿金妮)等人^[9]针对阵列外差探测中计算各个像元的光电流的相位所需时间较长的问题,提出了一种基于频域分析和时域平移的退相干补偿算法,该算法取消了遗传算法^[7]中的迭代过程,直接计算了各像元中频光电流信号的相位差。仿真结果表明:该算法的速度远高于其他算法,处理时间与检测器阵列单元数呈正相关,与原始信号的信噪比无关,具有较好的实时性能和稳定性。通过对8个不同的粗糙度目标进行实物实验,验证了该算法的实时性。

目前能够有效解决信号光退相干导致的外差探测信噪比下降的方法是阵列探测方法。通过对每个阵列元产生的中频光电流的相位进行调整,提升退相干情况下的外差探测信噪比,信噪比提升与阵列元个数呈正相关。但是采用阵列外差探测时需要控制入射到每个阵列元的本振光强,意味着系统要将过多的能量分配给本振。在激光雷达的应用场景中意味着降低系统的激光发射功率。随着发射功率的降低,目标的回波功率也会下降,反过来又会导致信噪比与实时性的下降。

3 量子外差探测

传统的激光外差探测需要通过提升本振强度增加外差探测系统的增益,从而达到量子噪声或

散粒噪声的探测极限,但是阵列外差探测本振强度将会随着阵列单元数量的增加而增加,在激光雷达的应用场景中极大限制激光发射功率。量子外差探测利用量子干涉效应对微弱光信号的光谱进行探测,可以在本振功率降低至1 pW时,实现极高的探测灵敏度,解决了阵列外差探测中本振强度与发射功率之间的矛盾,为激光雷达应用场景中目标多维运动信息的探测提供了新的思路。

3.1 量子外差探测研究进展

2006年,林肯实验室的LUU J X.和JIANG L A首次报道了使用盖革模式雪崩光电二极管阵列进行外差探测的实验系统^[10],实验系统简图如图1所示,并且基于光探测的半经典理论推导了阵列单元数量限制导致的光通量探测的饱和效应与信噪比和多普勒分辨力的关系。2008年,该团队基于该探测系统进行了实物验证实验^[11],将本振强度扩展到每个相干探测积分时间内只有几个光子的情况,推导了该探测系统对于镜面目标和漫反射目标的探测信噪比,并通过实验进行了验证。

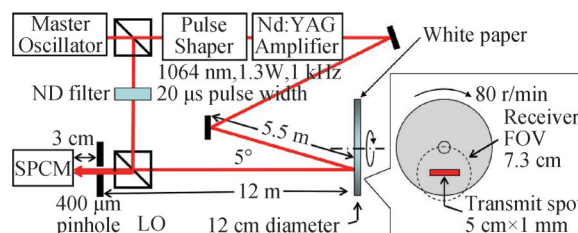


图1 应用盖革模式雪崩光电二极管阵列进行外差探测的实验系统简图^[11]

Fig.1 Sketch of an experimental system for heterodyne detection using Geiger-mode avalanche photodiode arrays^[11]

2011年,长春光学精密机械与物理研究所的LIU L S(刘立生)等人^[12]基于光探测的半经典理论对信号光与本振光外差后光子的时间分布进行分析,提出了一种利用光子时间间隔进行外差探测的光子外差探测新方法,并利用MPPC单光子阵列探测模块进行了原理验证实验,如图2所示,验证了该方法的有效性。

2016年,莫斯科国立师范大学的LOBANOV Y等人^[13]研究了一种超导纳米线单光子探测器,通过实验展示了1 pW左右的本振功率就可以达到量子噪声极限的探测灵敏度,如图3所示,K为热力学温度。

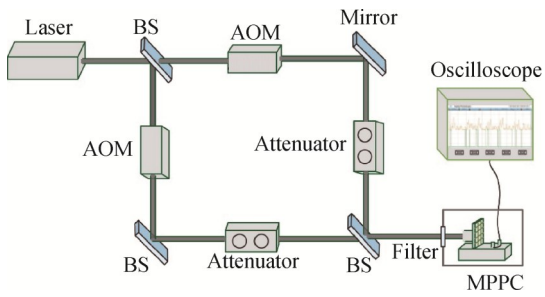


图2 利用MPPC单光子阵列探测器,验证利用时间间隔统计方法实现外差探测的原理验证实验简图^[12]

Fig.2 A sketch of the proof-of-principle experiment using MPPC single-photon array detectors to verify heterodyne detection using time-interval statistics^[12]

2017年,日本东京大学的OKAWA Y等人^[14]利用单光子源对极微弱的信号光与本振光的外差探测机理进行了理论分析与实验研究,如图4所示,采用一种基于后选择的单光子源产生单光子态,

单光子态经过声光频移器后分为两束,变为频率叠加态(频率差对应外差频率),此时光频率信息与传播路径信息相纠缠,两束光经过合束器合束,并采用单光子探测器在合束器的一个输出端口进行探测。由于单光子探测器没有分辨光子能量的能力,光子的路径信息被抹除。最终单光子探测器产生的计数脉冲信号会在时间域上产生干涉现象,通过分析单光子探测器产生的计数信号在时间域上的分布,即可获取外差频率,完成外差探测。该实验证明了光子探测并不会破坏光场的一阶干涉效应,即光子探测与相干探测并不矛盾。

2020年,巴西的国家计量、质量和技术研究所光学计量处的Thiago Ferreira da Silva^[15],提出一种基于HOM干涉仪的时间相关光子计数外差探测系统,对两个低发射功率激光的光源之间的光频率差异进行探测,如图5所示。

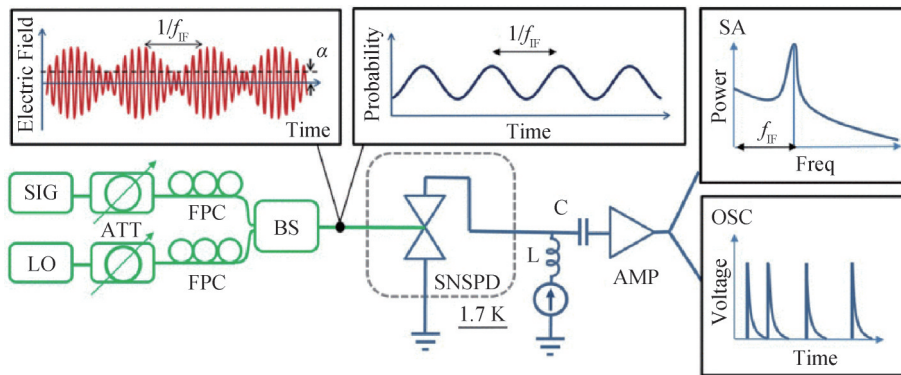


图3 利用超导纳米线单光子探测器进行基于弱本振的外差探测实验系统简图^[13]

Fig.3 A sketch of the experimental system for weak fundamental oscillation-based heterodyne detection with a superconducting nanowire single-photon detector^[13]

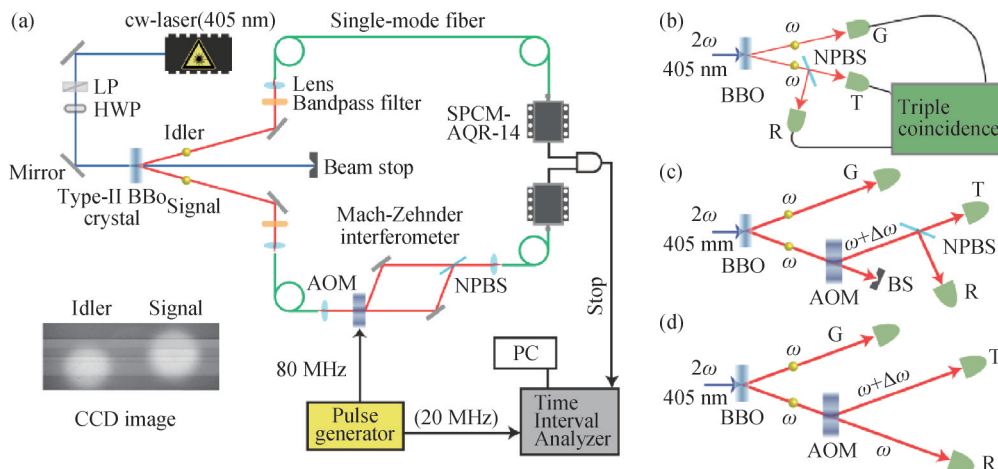


图4 利用单光子源开展光子级强度的微弱信号光与本振光的外差探测机理验证的实验系统简图^[14]

Fig.4 Schematic diagram of experimental system for heterodyne detection mechanism verification of weak signal light and local oscillator light using single photon source^[14]

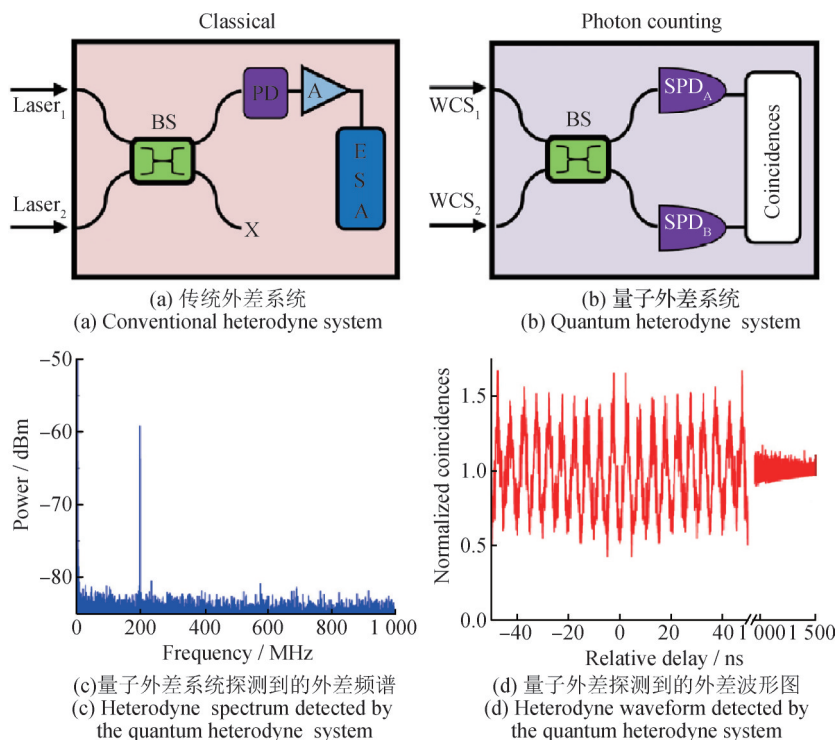


图5 利用HOM干涉仪进行外差探测的系统简图^[15]

Fig.5 Sketch of the system for heterodyne detection using HOM interferometer^[15]

2021年，中国科学院光电精密测量光学研究所的CHEN Z (陈臻) 等人^[16]提出一种基于压缩采样的量子外差数据处理方法。实验证明，该方法与传统的直接FFT恢复频谱的方法相比，可以将信噪比提高15 dB。该团队于2022年对量子外差探测技术在中不同计数速率下的探测带宽进行了探索^[17]。

2021年，美国戴顿大学的Maureen E. Szyman-ski 等人对GM-APD阵列的异步和同步工作模式下的量子外差探测性能进行研究^[18]，通过分析GM-APD阵列提取外差信息的过程，定义光子探测概

率与光子阻塞损失概率（死时间导致探测器无法响应光子的概率），分析了两种工作模式下的外差探测性能。

3.2 量子外差探测系统

如图6所示，激光器发射的窄线宽激光经过光纤分束器（FBS1）分束：其中一束激光经过发射光学系统后作为探测光照射到目标表面，目标散射后的光携带目标的运动信息（光频率发生改变），经接收光学系统接收后作为信号光；另一束激光经过声光调制器（AOM）调制并经过可调光

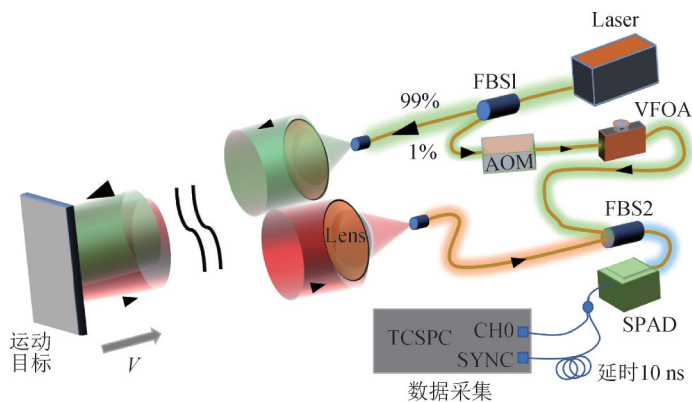


图6 量子外差探测系统简图

Fig.6 Schematic diagram of quantum heterodyne detection system

纤衰减器 (VFOA) 衰减作为本振光。本振光和信号光经过光纤合束器 (FBS2) 合束, 合束后的光经过单光子探测器 (SPAD) 探测, SPAD探测光信号产生的计数脉冲电信号经过功分器分为两路: 一路经过 10 ns 的延时接入光子时间采集模块 (TCSPC) 的同步端 (SYNC); 另一路电脉冲信号接入 TCPCSC 的信号采集端 (CH0)。通过这种信号接入方式 TCSPC 可以直接对 SPAD 产生的两个相邻计数脉冲之间的时间间隔进行统计探测。

量子外差探测系统与传统外差探测系统的区别在于光信号探测与数据处理。采用 SPAD 代替原有的线性探测器, 通过 TCSPC 对 SPAD 产生计数脉冲的时间间隔进行记录, 最终对时间间隔的统计

分布进行傅里叶变换即可获取外差频率, 完成外差探测, 该系统方案极易与现有的单光子激光雷达融合。

3.3 量子外差探测机理

量子外差探测系统以及数据采集和处理示意图如图 7 所示, (a) 为量子外差探测系统中信号光与本振光通过 FBS2 后入射到 SPAD 的等效光路图; (b) 为量子外差探测产生的计数脉冲在时间域上的分布以及 TCSPC 采集的时间间隔的示意图; (c) 为 TCSPC 采集到的时间间隔的统计分布的示意图。SPAD 响应光子后产生的计数脉冲在时间域上的分布 $\{t_i | i = 1, 2, \dots, N+1\}$ 受信号光与本振光的频率差 (外差频率) 所调制。

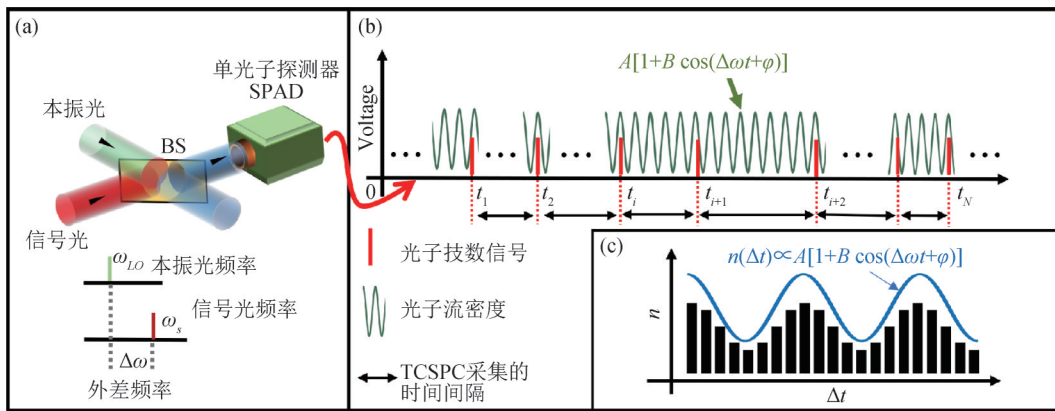


图 7 量子外差探测系统以及数据采集和处理示意图

Fig.7 Schematic diagram of the quantum heterodyne detection system and data acquisition and processing

如图 7 (a) 所示, 量子效率为 η 的 SPAD 在 t_i 时刻产生计数信号后经过 $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ 再次产生计数信号的概率为

$$P(\Delta t_i | t_i) = \left\{ - \int_{t_i + t_d}^{t_i + \Delta t_i} A [1 + B \cos(\Delta \omega t + \varphi)] dt \right\} \times A [A [1 + B \cos[\Delta \omega(t_i + \Delta t_i) + \varphi]]] \quad (1)$$

式中: A 为平均光子流密度, $A = (P_s + P_{Lo} + P_B) \eta / hv$; B 为量子相干效率, $B = 2 \sqrt{P_s P_{Lo}} / (P_s + P_{Lo} + P_B)$; P_s , P_{Lo} 和 P_B 分别为信号光、本振光和背景光的平均功率; hv 为单光子能量。定义 $P(\Delta t_i | t_i) = 0$ 当 $\Delta t_i < t_d$ 时, 表征探测器在死时间 t_d 内不进行探测; $\Delta \omega$ 为外差频率, 是信号光与本振光的频率差; φ 为信号光相与本振光的相对相位。

通过分析式 (1) 可知, 对 SPAD 产生的计数信号的时间间隔的统计分布进行傅里叶变换即可

获取外差频率, 完成外差探测。

3.4 量子外差微多普勒探测

目标多维运动特征是指目标在运动过程中伴随在目标平衡点附近的周期性运动, 多表现为振动, 其探测对应外差探测中的微多普勒探测。时频分析是微多普勒探测数据处理的有力工具之一, 通过时频分析可以直观地观察到目标运动速度随时间的变化, 对目标的运动特征进行分析和探测, 要求系统的测速范围足够大。通过分析式 (1) 可知, SPAD 的时间分辨力是限制量子外差探测测速范围的唯一因素。对于 ns 级时间分辨力的 SPAD 所对应的测速范围, 传统外差探测系统需要 GHz 量级的采样率对光电信号进行连续采集。而光子级微弱信号通常需要较长探测时间才能收集到足够的信号光子以保证探测信噪比, 会导致传统外差

探测系统对光子级微弱信号的探测数据量极大，不适合数据的实时存储与处理。量子外差探测通过 TCSPC 对探测数据进行 0/1 采集（只有在光子存在时才会产生探测数据），在保证探测灵敏度与测速范围的同时可以极大地减少数据量。这在进行远距离光子级回波的目标多维运动特征的探测与数据实时处理方面具有极大优势。

图 8 展示了采用量子外差探测系统对一个振动模拟器进行多维运动特征探测的结果。图 8 (a) 和 (b) 分别为 34 Hz 频率的三角波信号和正弦波信号驱动下振动模拟器的量子外差探测的时频分析图，图中 70 MHz 为量子外差探测系统中声光频移器提供的基底频移。实验中，目标回波的平均计数率为 100 kcps，振动模拟器的振动幅度为 3 mm，时频分析图的时间分辨率为 1/300 s，总探测时长为 0.5 s。

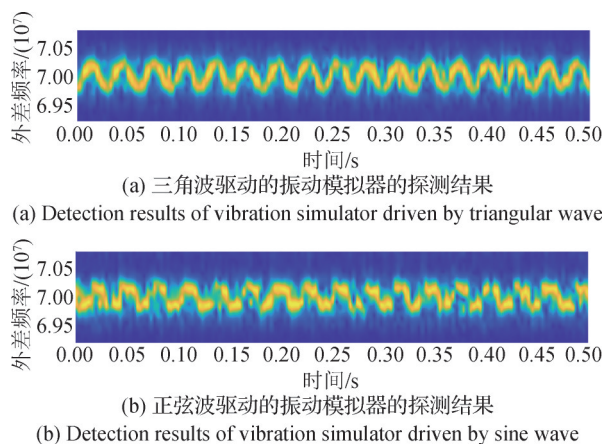


图 8 基于量子外差探测系统对频率为 34 Hz 的三角波信号和正弦波信号驱动下的振动模拟器进行运动特征探测的探测结果图

Fig.8 Detection results of motion characteristics of vibration simulator driven by 34 Hz triangle wave signal and sine wave signal based on quantum heterodyne detection system

通过时频图可以明确地看出外差频率随时间的变化规律，根据多普勒效应可知，外差频率对应着振动模拟器的速度。通过分析可知振动模拟器的平均速度为 0，但是振动模拟器围绕自身的目标平衡点做周期性的运动。通过分析时频图中外差频率的变化周期可以确定：振动模拟器的振动周期为 34 Hz，这与驱动信号的周期一致。图 8 (a) 中外差频率随时间线性变化，与驱动振动模拟

器的三角波信号电压随时间的变化特征一致。图 8 (b) 中外差频率随时间非线性变化，这与驱动振动模拟器的正弦波的电压随时间变化的特性一致。总之，通过时频分析可以有效地区分两种振幅与振动周期相近的微运动，基于量子外差的微多普勒探测可以满足目标多维运动特征的探测需求。

4 结论

量子外差探测是利用量子干涉效应进行微弱光信号多维信息探测的新探测方法，解决了单光子激光雷达获取目标信息维度单一的问题。量子外差探测打破了经典外差探测技术对本振强度的限制，应用 pW 级的本振强度即可获得经典外差探测的探测灵敏度，这解决了阵列外差探测中对于本振强度要求过高的限制，有利于体积功耗限制下的远距离外差探测系统的应用。并且量子外差的系统方案极易与现有的单光子激光雷达融合，这为复杂环境下非合作目标外差探测的远距离应用提供了一条实际可行的解决思路。

量子外差探测刚刚兴起，还需对探测系统的发射端和接收端的光场所携带信息的调制与解调进行探索，以实现更多维度信息的探测及传输。并且目标多维信息在目标反射以及传输过程中演变的规律及理论也同样是至关重要的。未来量子外差探测的发展需要各个相关专业的科研工作者共同努力。

参考文献

- [1] LI Z P, YE J T, HUANG X, et al. Single-photon imaging over 200 km[J]. *Optica*, 2021, 8(3): 344.
- [2] LAI J, WU Z, WANG C, et al. Dead-time-based sequence coding method for single-photon lidar ranging[J]. *Optics Communications*, 2022: 517.
- [3] MURRAY R, ASHLEY L. Two-photon interference lidar imaging[J]. *Optics Express*, 2022, 30(15): 27164–27170.
- [4] ZHAO J X, LYONS A, ULKU A C, et al. Light detection and ranging with entangled photons[J]. *Optics Express*, 2022, 30(3): 3675–3683.
- [5] SHANG J H, ZHAO S G, HE Y, et al. Experimental study on minimum resolvable velocity for heterodyne laser Doppler vibrometry[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(8): 3.
- [6] DONG X, HU Y H, XU S L. Analysis of coherent laser echo characteristics back scattered from rough Gaussian

- target[J]. *Optic*, 2022: 253.
- [7] LIU Y T, GAO M, ZENG X, et al. Factors influencing the applications of active heterodyne detection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 146(22): 106694.
- [8] LIU Y, ZHENG M W, XU M, et al. Parallel array signal processing technology for spatial phase distortion correction in heterodyne detection[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 1651.
- [9] GENG J N, FENG Z J, CAO C Q, et al. Spatial decoherence compensation algorithm for a target speckle field in heterodyne detection based on frequency analysis and time translation[J]. *Optics Express*, 2021, 29(24): 39016–39026.
- [10] LUU J X, JIANG L A. Saturation effects in heterodyne detection with Geiger-mode InGaAs avalanche photodiode detector arrays[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(16): 3798–3804.
- [11] JIANG L A, LUU J X. Heterodyne detection with a weak local oscillator[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): 1486–1503.
- [12] LIU L, ZHANG H, JIN G, et al. Photon time-interval statistics applied to the analysis of laser heterodyne signal with photon counter[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(18): 3820–3826.
- [13] LOBANOV Y, MICHAEL S, ALEXANDER S, et al. Superconducting nanowire single photon detector for coherent detection of weak signals[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, 27(4): 1–5.
- [14] OKAWA Y, OMURA F, YASUTAKE Y, et al. Photon heterodyning[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20156–20161.
- [15] THIAGO F D S. Photon-counting-based optical frequency metrology[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(36): 11232–11239.
- [16] CHEN Z, LIU B, GUO G M, et al. Photon counting heterodyne with a single photon avalanche diode[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(17): 931–934.
- [17] CHEN Z, LIU B, LI Z K. Wideband spectrum estimation for photon counting heterodyne[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(6): 313–316.
- [18] SZYMANSKI M, WATSON E, RABB D. Coherent sensing performance comparison of framed and asynchronous GMAPD arrays[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(25): G55–G63.

(本文编辑: 田艳玲)



第一作者: 关策 (1993—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为微弱信号探测、微多普勒探测。



第一作者: 张子静 (1986—), 男, 教授, 博士, 长期从事量子探测以及新体制量子激光雷达等领域的研究。



通讯作者: 赵远 (1963—), 男, 教授, 博士, 长期从事光子学光电探测、激光雷达、量子探测、微波光子学等领域的研究。哈尔滨工业大学联合创新中心主任, 中国光学工程学会理事, 国家级主题专家。