

量子激光雷达研究综述 (特邀)

张子静, 谢佳衡, 黄明维, 赵 远*

(哈尔滨工业大学 物理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 激光雷达由于探测精度高、功耗低、体积小、易于装备等特点, 近年来广泛地应用于预警探测、制导、引信等技术中。但随着实战应用遇到的问题, 如各种复杂化场景、敌方对抗干扰, 以及新型作战技术的出现, 激光雷达遇到了一系列急需解决的难题。文中总结了目前激光雷达在实际应用中遇到的急待解决的问题以及未来激光雷达发展的迫切需求。针对这些难题人们开始了各种探索, 但是传统的探测方法和探测技术均遇到了发展瓶颈, 很难有效地解决这些问题。因此人们在传统激光雷达基础上结合量子等新技术进行升级, 探索下一代新体制量子激光雷达, 文中进一步总结了国内外现有多种新型量子激光雷达的工作。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激光雷达的研究现状和问题, 为量子激光雷达未来发展奠定基础。

关键词: 量子激光雷达; 量子增强; 鬼成像; 量子照明

中图分类号: N93; TN241 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211102

Overview of quantum LiDAR (*Invited*)

Zhang Zijing, Xie Jiaheng, Huang Mingwei, Zhao Yuan*

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

Abstract: LiDAR has been widely used in early warning detection, guidance, fuze and other technologies in recent years because of the advantages of high detection accuracy, low power consumption, small size and easy equipment. However, with the various complex scenarios encountered in actual combat applications, complex conditions such as enemy confrontation, jamming, and the emergence of new combat technologies, LiDAR has encountered a series of problems that need to be solved urgently. The urgent problems of LiDAR encountered in the practical applications and the urgent needs for the development of LiDAR in the future were summarized. To solve these problems, plenty effort had been devoted to various exploration, but the conventional detection methods and technologies had encountered the bottleneck of development. It was difficult to effectively solve above problems. Therefore, based on the conventional LiDAR, combined with quantum and other new technologies, LiDAR had been upgrading to the next generation of new quantum LiDAR. The work of a variety of new quantum LiDAR systems of domestic and overseas was summarized. Analyzing the research results will help to deeply understand and grasp the current research status and problems of quantum LiDAR, and lay a foundation for the future development of quantum LiDAR.

Key words: quantum LiDAR; quantum enhancement; ghost imaging; quantum illumination

收稿日期: 2021-12-24; 修订日期: 2022-01-05

基金项目: 国家自然科学基金 (62075049)

作者简介: 张子静, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光雷达、量子激光雷达、精密测量等方面的研究。

通讯作者: 赵远, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光雷达、量子激光雷达、精密测量等方面的研究。

0 引言

量子激光雷达是传统激光雷达和新兴的量子调控技术融合产生的新型激光雷达体制,主要针对目前传统激光雷达遇到的发展瓶颈,例如探测信噪比探测灵敏度限制、探测成像分辨率限制、复杂环境探测性能下降、更多维度特征信息的探测获取等问题而受到关注。笔者总结了目前激光雷达在实际应用中遇到急待解决的问题以及未来激光雷达发展的迫切需求:

(1) 超远距离高灵敏度探测需求:伴随着高超隐身技术的广泛应用,高超飞行器速度越来越快,为了有足够的反应时间,需要超远距离探测,达到百公里级的探测距离,解决这个问题关键在于超远距离回波微弱信号的探测灵敏度;此外隐身目标由于独特外形设计和隐身涂层的应用致使回波信号十分微弱,解决这个问题的关键也是提高探测灵敏度。因此,未来激光雷达发展主要方向就是进一步提高探测灵敏度。

(2) 抗干扰探测需求:伴随着激光探测灵敏度越来越高,受各种噪声干扰影响也就越来越突出,各种噪声主要可以分为两类:即主动干扰和被动干扰,被动干扰主要包括背景噪声干扰、战场烟雾后向散射干扰、复杂天气云雾后向散射干扰;主动干扰包括敌方对抗主动干扰。目前,窄带滤光片等传统滤噪手段虽然能有效滤除大量非工作波长的背景噪声,但是“同波长”噪声仍然无法滤除。背景噪声包含大量传统方法无法滤除的同波长噪声,此外战场烟雾后向散射干扰、复杂天气云雾后向散射干扰、以及敌方对抗主动干扰都是同波长噪声,这些同波长噪声导致回波探测信噪比急剧下降,甚至致使探测器饱和无法工作。因此急需新的激光主动探测抗干扰方法。

(3) 更多维特征信息获取:目前激光雷达一般只能获取目标距离、速度强度等信息,无法满足未来战场全信息感知的需求,无法配合未来新型作战模式和作战需求。例如目前出现的多目标集群作战模式,其中真目标可以在若干假目标掩护下完成作战任务,真假目标具有相同外形,单独依靠传统的距离、速度、强度等信息无法有效地区分真假目标。如何区分真假目标,这需要目标的多维特征信息,例如目标微动信息,真假目标虽然有相同的外形,但其内部结构和材料都不相同,因此,在运动过程中会产生不同的振

动特征,大家可以根据不同的振动特征进行真假目标分辨。更多维特征信息获取也是未来量子激光雷达发展的主攻方向。

文中进一步分类整理了现有新型量子激光雷达工作,主要包括量子偏振安全量子激光雷达、量子关联成像即鬼成像、量子照明探测、量子增强激光探测,以及基于其他调控的新体制量子激光雷达,并对量子激光雷达未来发展进行了总结和展望。

1 量子偏振安全量子激光雷达方案

2012年,美国罗切斯特大学 Mehul Malik 等人^[1]根据光子偏振特性提出一种能够抗干扰的量子安全成像方案,它们利用光子偏振特性实现目标探测。类似于量子密钥分发原理,当成像光路中存在窃听者,且窃听者试图窃听时会改变光子偏振特性从而暴露窃听行为。该量子安全成像方案能够探测隐形飞机,并具有不被干扰的优点。量子安全成像方案的基本原理如图 1 所示。

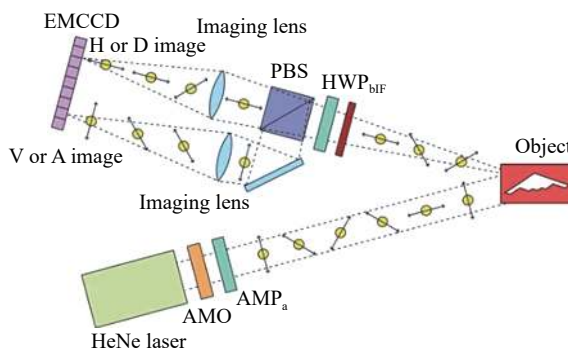


图 1 量子安全成像系统方案^[1]

Fig.1 Scheme of quantum security imaging system^[1]

由 Mehul Malik 等人提出的量子安全成像方案采用 He-Ne 激光器作为光源、EMCCD 作为探测器。激光器出射激光由声光调制器调制成 0°、45°、90°和 135°四种偏振状态。具有不同偏振状态的激光信号经过远距离传输后衰减为平均每脉冲仅含一个光子的脉冲序列。回波脉冲序列经过极化分束器分成多路,最终通过透镜汇聚于 EMCCD 探测器上。由 EMCCD 给出目标不同偏振方向下的成像结果,通过不同偏振方向的错误率分析整个成像过程是否受到干扰。

图 2 展示的是不存在和存在成像欺骗干扰情况下各偏振状态成像结果。每一幅成像结果下边给出了该成像结果对应的误码率。第 1、2 列为不存在干

扰情况时回波图像,第 3、4 列为存在干扰时回波图像。干扰者截获光子后以水平偏振返回光子,可以看出存在干扰情况下水平偏振图像的偏振误码率最高,

而其他偏振误码率较低。量子安全成像方案根据偏振误码率的大小判断回波图像是否存在干扰,保证安全成像。

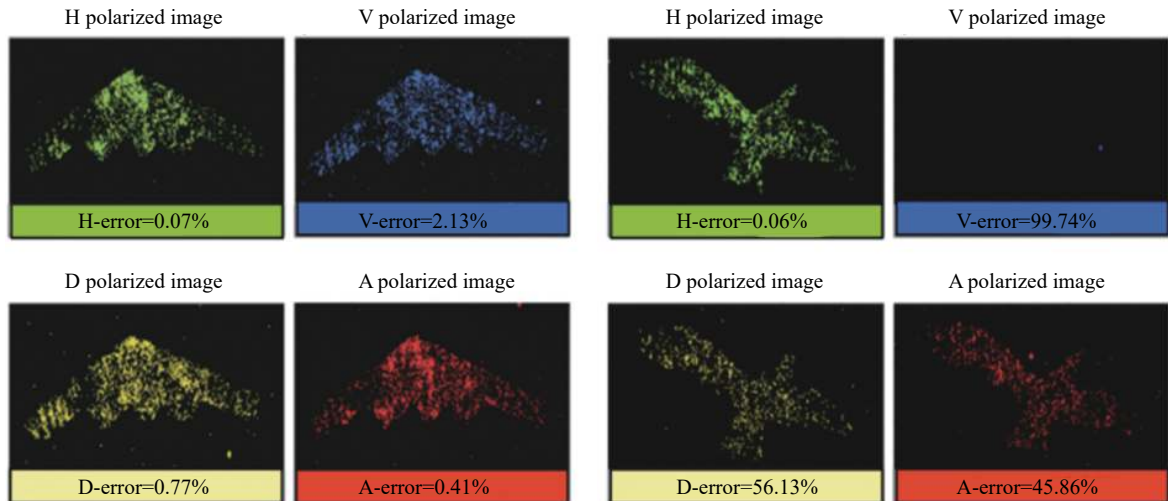


图 2 不存在和存在欺骗时各偏振状态下成像结果^[1]

Fig.2 Imaging results in each polarization state with or without deception^[1]

其他相关典型的研究主要包括:

2002 年,美国麻省理工大学 Vittorio Giovannetti 等人^[2]受量子通信协议启发设计了一种基于纠缠双光子的安全密码测距协议。该协议可在 Alice 和 Bob 之间建立安全的测距链路,只有可信任的 Bob 能够获得 Alice 的距离信息。窃听器 Eve 不管使用任何方式进行窃听都无法获得 Alice 的位置信息,从而实现安全定位和安全测距。

2012 年,美国罗切斯特大学 Mehul Malik 等人^[3]在前人基础上提出一套新的量子安全成像激光雷达方案。量子安全成像激光雷达方案原理如图 3 所示。该方案基本原理同样使用光子偏振特性实现安全成像。该方案的创新在于系统发射使用了四种偏振态不同的激光二极管,不同偏振光子由光纤耦合器反射至 DMD 微镜阵列上。由 DMD 对四种偏振态光子进行随机选择照射目标。回波信号经过对应四个偏振状态的检测,分析给出的目标距离信息。

相较于国外的量子激光雷达进展,国内相关研究报道较少。2012 年,中国科学技术大学王晓飞等人^[4]使用光子偏振特性实现了量子目标探测。他们理论预言了相干态偏振光和量子最优探测能够实现量子目标探测。且得出纠缠态和压缩态探测极限能够突

破标准量子极限 (SQL) 而达到量子极限 (QL),传统探测手段的探测极限由光场二阶相干性决定,相干态二阶相干性 $g^{(2)} = 1$ 对应的探测极限为 SQL。而纠缠态和压缩态二阶相干性 $g^{(2)} < 1$,探测极限对应于 QL。此外,他们开展了量子目标探测实验,实验原理和装置如图 4 所示。

2020 年,中国科学院大学石冬松等人^[5]提出基于波长、时间和量子态的随机交织光脉冲序列的多维数据目标检测方法。多维数据目标检测方法的仿真系统如图 5 所示。通过发射不同波长激光与量子态在时间序列分布上的随机交织检测实现安全成像。首先系统通过多波长激光发射检测探测区域内是否存在目标,对于有目标存在的情况,规避干扰并选择合

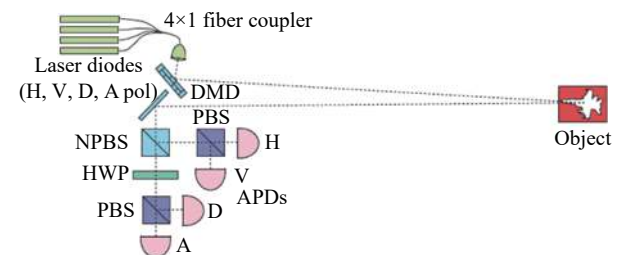


图 3 量子安全激光雷达方案^[3]

Fig.3 Scheme of quantum security LiDAR^[3]

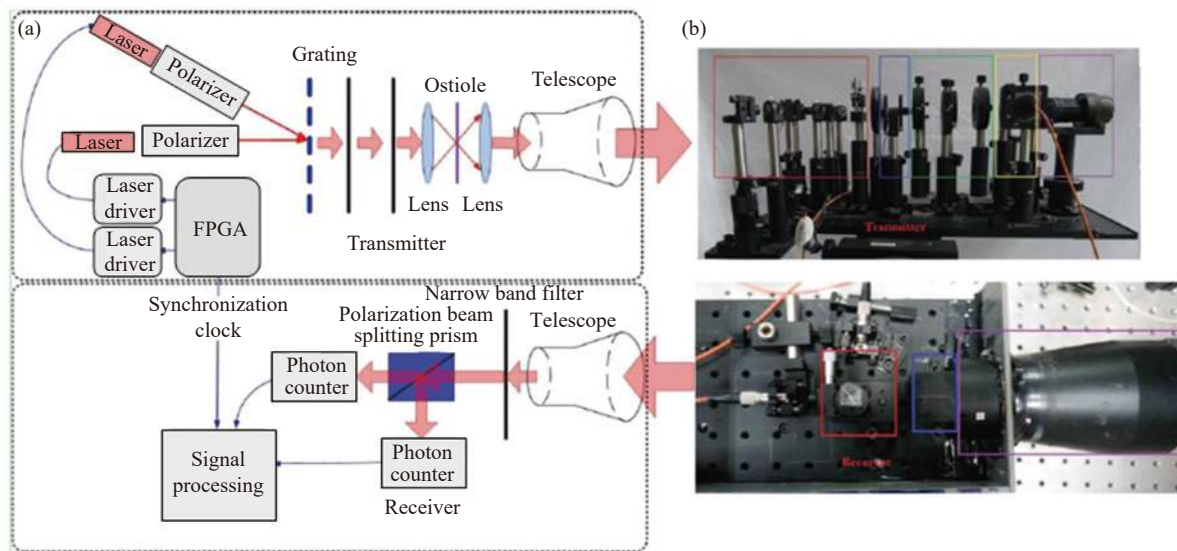


图 4 量子目标探测的原理 (a) 和实验装置 (b)^[4]

Fig.4 Principle (a) and experimental device (b) of quantum target detection^[4]

适的探测波长进行探测。结合不同量子态的光子和高灵敏度单光子探测器识别目标表面散射特性,实现基于波长、时间和量子态的量子安全成像。

量子偏振安全量子激光雷达方案充分利用了发

射光子的偏振维度信息实现了安全量子成像,具有抗欺骗和干扰的优点;但是目前的量子激光雷达方案仅利用了光子的偏振信息,没有分析存在传输损耗等较为苛刻工作环境下的性能表现。

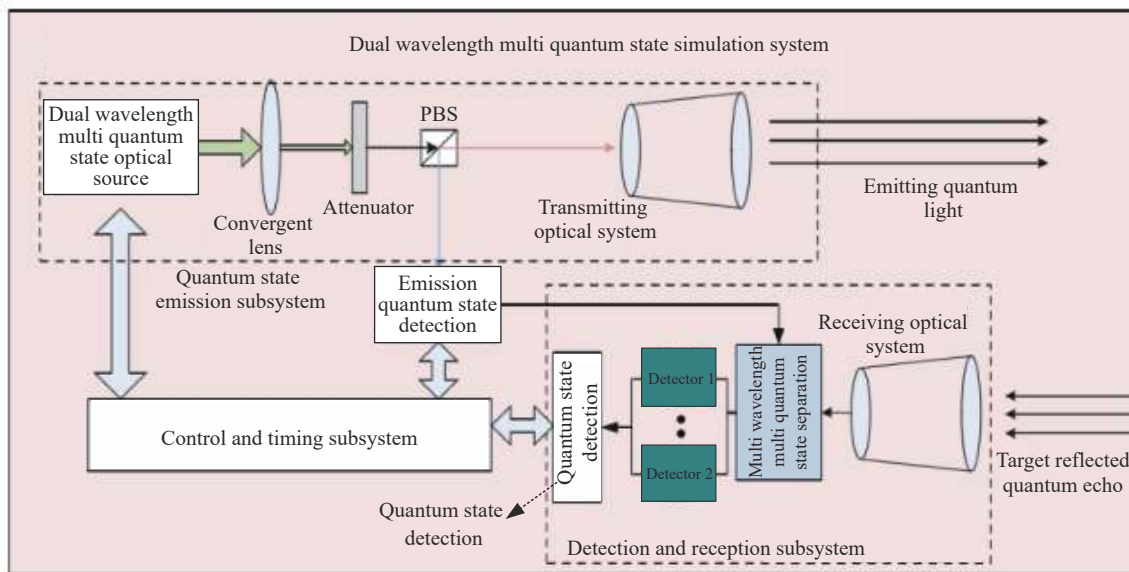


图 5 光量子雷达仿真系统示意图^[5]

Fig.5 Schematic diagram of optical quantum LiDAR simulation system^[5]

2 量子关联成像

量子关联成像(即鬼成像)源于对量子纠缠对的相关性研究。最早的量子关联成像使用纠缠光源之间的

高阶关联性进行关联成像。20 世纪 80 年代前苏联莫斯科大学 Klyshko 等人^[6]根据纠缠光子对的量子纠缠特性首次提出使用纠缠光子对进行关联成像的理论方案。

1995 年,美国马里兰大学的 T. B. Pittman 等人^[7]

首次对关联成像进行了实验验证,该实验系统结构如图 6(a) 所示。系统包括泵浦光源、非线性硼酸钡晶体 (BBO)、色散棱镜、偏振分束器、位移扫描光纤、透镜、桶探测器以及符合测量电路。泵浦光源为中心波长 351.1 nm 的氩离子激光器,出射激光泵浦 BBO 产生纠缠光子对,纠缠光源由偏振分束器分成两路,一路称为信号光经物体透射后携带物体的强度信息;另一路称为参考光留在系统本地由多模光纤接收器探测。对两路探测器的探测数据进行关联计算即可得到目标的强度像分布。实验成像结果如图 6(b) 所示。

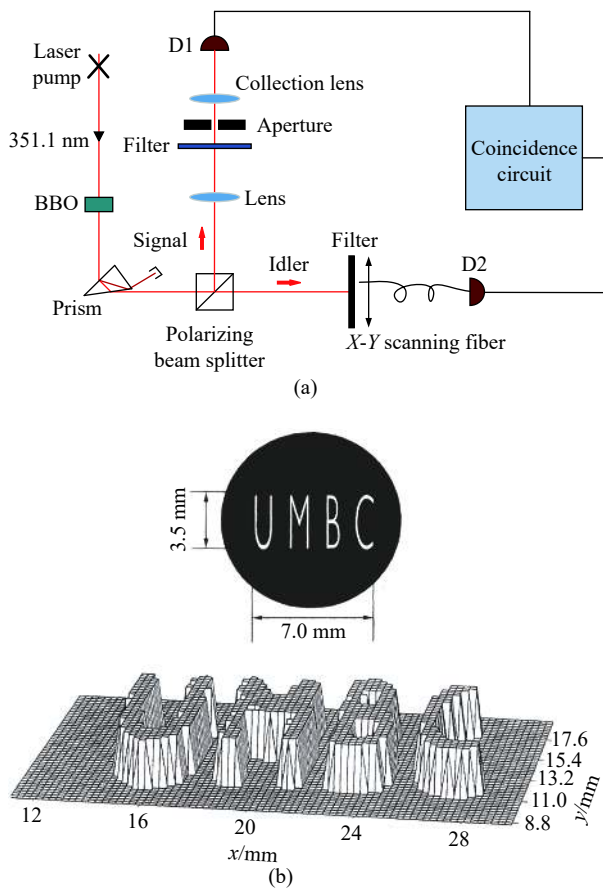


图 6 首次量子关联成像实验系统和成像结果^[7]

Fig.6 Experimental system and imaging results of the first quantum correlation imaging^[7]

其他相关典型研究成果主要包括:

2002 年,美国罗切斯特大学 Bennink R S 等人^[8]设计采用经典光源的关联成像实验打破了当时纠缠光源是实现关联成像必要条件的认知。基于经典光源的关联成像实验系统和成像结果如图 7 所示。激光器出射的激光通过斩波器后由设定伪随机摆动平

面镜反射。反射后光束由分束器分成两路,模拟之前的纠缠光源。其中一路经过物体透射携带物体强度信息后由桶探测器接收;另一路直接由 CCD 相机采集成像。通过两路采集信号之间的关联计算目标强度信息,所成目标强度像如图 8 所示。该经典光源关联成像具有里程碑式的意义。

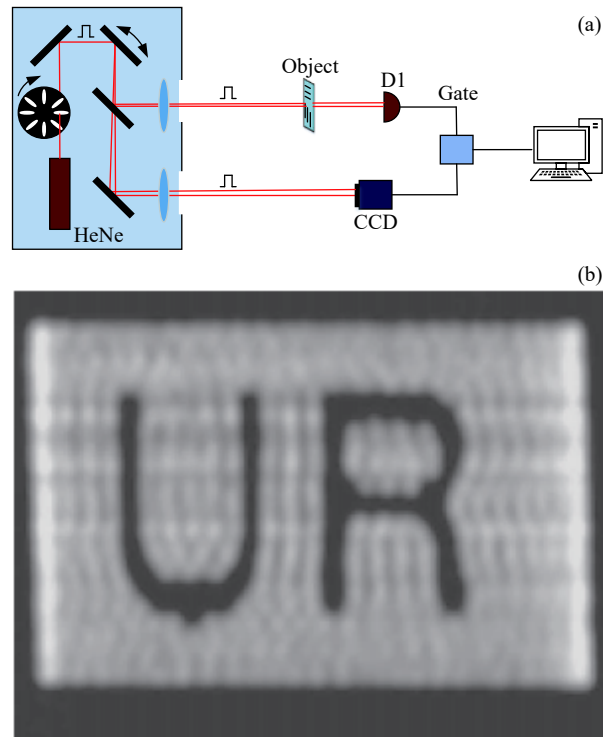


图 7 经典光源关联成像实验系统 (a) 和成像结果 (b)^[8]

Fig.7 Experimental system (a) and imaging results (b) of classical light source correlation imaging^[8]

2008 年,美国麻省理工学院 Shapiro J H 提出计算关联成像体制^[9]。计算关联成像体制由连续激光器、空间光调制器、桶探测器、相关器构成。计算关联成像体制省略了传统的参考光路,由已知衍射光场分布的空间光调制器和激光器实现目标场景照明,仅需一个单点探测器即可实现计算关联成像。由已知空间光调制器衍射光场强度分布和桶探测器的探测信号计算目标强度信息。

2010 年,美国麻省理工学院 Nicholas D. Hardy 等人^[10]对计算式关联成像体制的成像分辨率、信噪比、对比度等性能参数进行了计算,并得出反射型目标下计算关联成像性能高于传统关联成像体制的结论。

2012 年,芬兰坦佩雷理工大学 Vladimir Katkovnik

等人^[11]提出将稀疏成像 (Sparse imaging) 和压缩感知技术 (Compressed sensing) 引入计算关联成像中, 实现少帧探测即可得到高对比度关联成像结果。

2016 年, 英国格拉斯哥大学 D. B. Phillips 等人^[12]提出使用无衍射热光散斑实现计算关联成像。由于无衍射光斑传播一定距离后散斑模式几乎没有变化, 在成像景深以及横向分辨率上较传统计算关联成像更有优势。

对于国内的关联成像相关研究, 2004 年中国科学院上海光学精密机械研究所韩申生等人^[13]设计了非相干光光源无透镜关联成像实验。该项研究通过经典理论推导了经典光源用于关联成像的理论模型, 阐述了傅里叶变换实现无透镜关联成像的设想, 并将理论结果推广至 X 射线衍射成像以及三维关联成像应用。

2005 年, 中国科学院物理研究所吴令安等人^[14]开展了使用空心阴极灯发出的真热光进行双光子关联成像的实验。空心阴极灯发出的真热光源相干时间比传统激光散射光相干时间短得多。由于热光源相比相干光源更易获得和测量, 因此可在特殊应用背景下采用真热光源的双光子关联成像。

2009 年, 华南理工大学程静^[15]分析了湍流大气中关联成像的成像质量。基于扩展惠更斯-菲涅耳积分, 理论推导关联成像的解析成像公式。该项研究将关联成像看成原始目标和系统成像点扩散函数的卷积。分析了湍流强度、传播距离、光源尺寸以及系统点扩散函数等因素对关联成像质量的影响。

2014 年, 中国科学院物理所吴令安等人^[16]在空心阴极灯真热光关联成像基础上, 展示了使用窄谱线滤波后的太阳光进行无透镜关联成像原理演示实验。太阳光源具有相干时间短且易于获得的优点, 因而该项研究是关联成像实际应用的一项进步。

蔡阳健^[17]、吴自文^[18]以及赵生妹^[19]等人分别在 2018 年、2020 年以及 2021 年从不同角度对关联成像的原理和研究进展进行了综述, 并对关联成像未来发展进行了展望。

量子关联成像借助光场高阶关联特征计算恢复物体的空间强度分布, 具有低功耗、小体积、小型化系统优点、不受瑞利衍射极限限制、抗干扰能力强、能够有效抑制大气湍流干扰的优点; 使用纠缠光源的关联成像对实验环境要求较高、且存在纠缠光源制备

难度高的限制; (赝) 热光关联成像则存在成像分辨率和对比度互相限制的问题。

3 量子照明探测

量子照明激光雷达或称为量子照射激光雷达, 采用量子态的激光对目标场景进行照射, 能够实现探测信噪比的大幅提升, 在嘈杂以及较大损耗的传输环境中实现目标探测增强效果。

量子照明激光雷达体制最早由麻省理工学院 Seth Lloyd 等人^[20]于 2008 年提出。他们提出使用制备的量子纠缠光子对进行量子照明, 该量子照明系统结构示意图如图 8 所示。其中一路纠缠光子发射照亮物体, 另一路纠缠光子保留在本地作为辅助信号。系统通过回波光子和本地光子的纠缠测量实现探测信噪比提升。理论研究表明: 具有 m 比特纠缠的量子照明可以有效提高信噪比 2^m 倍。即使在噪声和损耗很强的环境下、探测器上不存在纠缠时, 量子增强效果仍然存在。

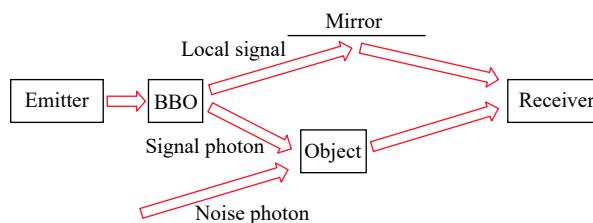


图 8 量子照明激光雷达结构示意图^[20]

Fig.8 Structure diagram of quantum illumination LiDAR^[20]

其他相关典型研究主要包括:

2008 年, 麻省理工学院 Si-Hui Tan 等人^[21]提出基于多光子纠缠的高斯态量子照明技术。基于多光子纠缠的高斯态量子照明技术通过对从目标区域返回的信号光以及系统本地保留的自发参量下转换闲频光束做最佳联合测量, 相比于相干态照明方法探测出错概率降低了 6 dB。

2013 年, 意大利都灵理工学院 E. D. Lopaeva 等人^[22]基于 Seth Lloyd 和 Si-Hui Tan 等人提出量子照明激光雷达方案, 使用光子数关联的方法开展了量子照明的实验。实验装置和实验结果如图 9 所示。该系统将纠缠光子对作为光源, 其中一个纠缠光子发射照明目标, 另一个的纠缠光子由探测器探测。该系统借助纠

缠光子对高关联性特征,对噪声和损耗具有很强的鲁棒性。

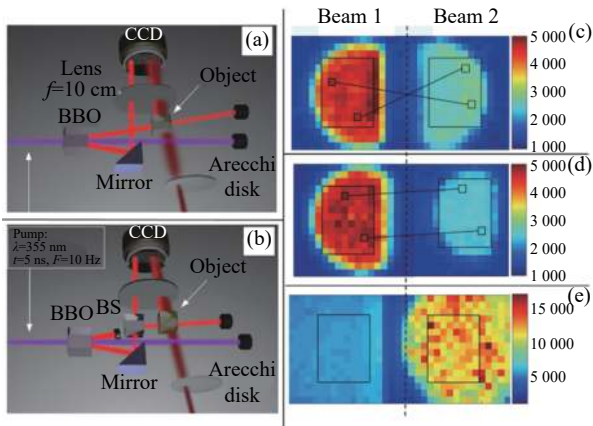


图 9 量子照明激光雷达实验装置及结果^[22]。(a) 量子照明实验装置图; (b) 经典照明实验装置图; (c) 孪生光束的探测结果, 无热噪声背景; (d) 无热噪声下目标的探测结果; (e) 强热噪声背景下的探测结果

Fig.9 Experimental setup and results of quantum illuminated LiDAR^[22].

- (a) Experimental device diagram of quantum illumination;
- (b) Diagram of classical lighting experimental device;
- (c) The detection result of twin beam without thermal noise background;
- (d) Target detection results without thermal noise;
- (e) Detection results under strong thermal noise background

2016 年, 脉冲功率激光技术国家重点实验室的徐世龙等人^[23]针对量子照明中高信噪比条件下 N00 N 态目标探测概率低于非纠缠 Fock 态的问题, 理论推导了 M&M' 态的探测错误概率的边界。通过仿真证明了 M&M' 态作为量子照明光源, 相比于非纠缠 Fock 态可以在更大信噪比范围内得到更优的目标探测性能。

2017 年, 西班牙巴斯克国家大学 M. Sanz 等人^[24]提出使用量子参数估计的方法来测量目标的反射率参数。该方法与经典的局部测量方法相比, 信噪比提升了 3 dB。并通过 Fisher 信息理论推导了该方法的错误概率上限, 将量子照明原型拓展至非高斯态, 展示了使用薛定谔猫态的量子照明方法。

2020 年, 英国格拉斯哥大学的 T. Gregory 等人^[25]针对背景光和探测器噪声导致成像对比度降低的问题, 提出一种基于增强探测协议的量子照明全场成像系统。实验装置如图 10 所示。该实验实现了 5.8 倍

的背景光和杂散光抑制, 并将图像对比度提升了 11 倍, 展示了量子增强雷达系统在环境噪声和传输损耗存在时的高适应能力。

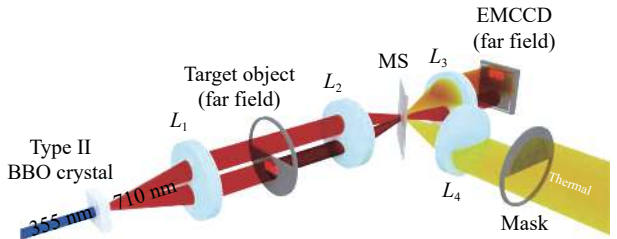


图 10 量子照明实验装置示意图^[25]

Fig.10 Schematic diagram of quantum illumination experimental device^[25]

用于 II 型下转换的 BBO 晶体被紫外激光泵浦, 通过 SPDC 产生纠缠光子对。探针光束与晶体远场中目标作用, 参考光束为自由传输。

2021 年, 中国科学技术大学陶志炜等人^[26]研究了纠缠相干态 (ECS 态) 的量子照明方式。纠缠相干态在噪声环境下具有纠缠鲁棒性强的优点。对比传统双模压缩态 (TMSV) 和相干态作为照明光源的探测性能, 结果表明: 低反射率目标且发射光子数远小于背景噪声时 ECS 态的探测性能比相干态好, 比 TMSV 态差。量子照明系统的探测性能由量子纠缠度大小决定。

量子照明探测由于使用非经典光源 (纠缠光源) 进行探测, 具有抗敌方干扰、可解决隐身目标探测问题以及相位测量精度高等优点; 但是该探测体制存在使用光子信息维度少、纠缠光源制备难度高、实验环境要求高等问题。

4 量子增强激光雷达

量子增强激光雷达基于干涉测量原理, 通过测量干涉光路中两条光路的相位差得到目标信息。如图 11 所示为 2008 年意大利波沃特伦托大学 L. Pezzé 和 A. Smerzi 提出基于相干态和压缩真空态输入的相位测量方案^[27]。该方案基于马赫-曾德尔干涉仪, 其中 a 、 b 为相干态和压缩真空态的输入端, 第二路光束由目标引入 θ 的相位延迟, c 、 d 为系统的输出端。通过探测器检测输出端 c 、 d 输出光强以及干涉条纹的变化规律, 计算目标引入的相位延迟量 θ 。输入端 a 、 b 的

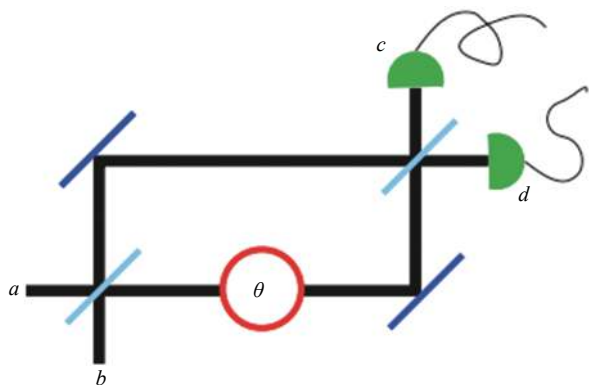


图 11 马赫-曾德尔干涉仪示意图^[27]。输入模式 a 、 b 为相干态和压缩真空态

Fig.11 Schematic diagram of Mach Zehnder interferometer^[27]. The input modes a and b are coherent state and squeezed vacuum state

输入光场分别为相干态和压缩真空态。

理论和仿真研究表明相干态端和压缩真空态端的平均光子数相等时系统相位灵敏度最佳并可接近于海森堡极限。对于任意平均光子数情况实现海森堡极限的测量次数均为 30 次。研究表明光子数分辨的测量策略比直接光强探测测量策略相位灵敏度更高。

其他相关典型研究成果主要包括：

2006 年，意大利比萨高等师范学校 V. Giovannetti 等人^[28]总结了探测领域四种最基本的参数估计体制，如图 12 所示。四种参数估计体制分别为经典输入态结合经典测量策略、经典输入态结合量子测量策略、量子输入态结合经典测量策略、量子输入态结合量子测量策略。经典输入态的测量灵敏度极限均为 $1/\sqrt{N}$ (N 为输入态中的粒子数)；量子输入态的测量灵敏度极限均为 $1/N$ 。因此可以得到输入态的有效制备是提高测量灵敏度的关键因素。

2010 年，路易斯安那州立大学 P. M. Anisimov 等人^[29]研究了双模压缩真空马赫-曾德尔干涉仪相位测量的灵敏度和分辨率。理论推导了使用奇偶测量实现超分辨率以及实现亚海森堡极限的相位灵敏度。通过计算该测量方案的量子 Fisher 信息，证明了亚海森堡极限相位灵敏度的合理性。

2017 年，哈尔滨工业大学^[30]针对干涉型激光雷达受相干态激光的限制而导致相位探测灵敏度无法超越标准量子极限的问题，提出基于压缩真空态注入

的相位超灵敏度干涉型量子激光雷达方案。该方案使用压缩真空态替换传统相干态方法，实现了系统测距精度的提升、相位探测灵敏度突破标准量子极限。该压缩真空态注入干涉激光雷达系统框图见图 13。

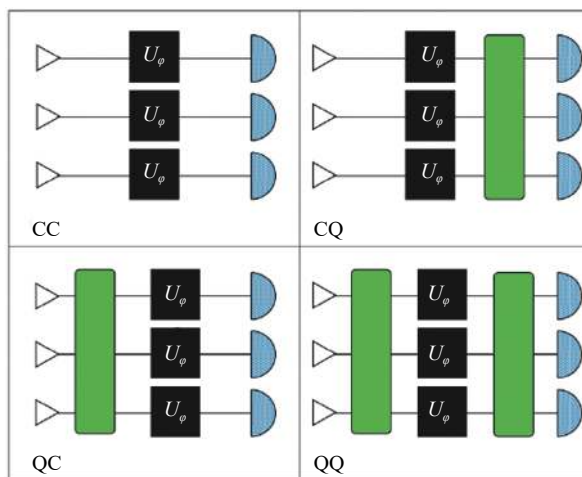


图 12 四种输入态和参数估计体制方法示意图^[28]

Fig.12 Schematic diagram of four input states and parameter estimation systems and methods^[28]

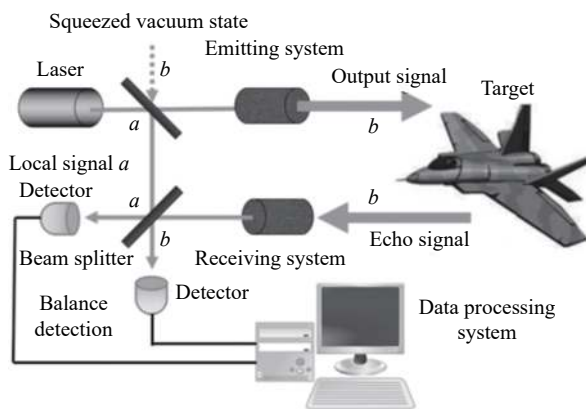


图 13 压缩真空态注入干涉激光雷达系统框图^[30]

Fig.13 Block diagram of compressed vacuum injection interferometric LiDAR system^[30]

2018 年，丹麦科技大学的 C. Schäfermeier 等人^[31]通过高斯态和零差测量的实验系统验证了超越量子散粒噪声极限的相位超灵敏以及干涉条纹小于输入波长一半的超分辨。基于高斯态和零差测量的实验结果如图 14 所示。在输入的相干态和压缩真空态的平均光子数为 430 个的情况下，获得了一个超过衍射极限 22 倍的超分辨输出，以及散粒噪声极限 1.7 倍的

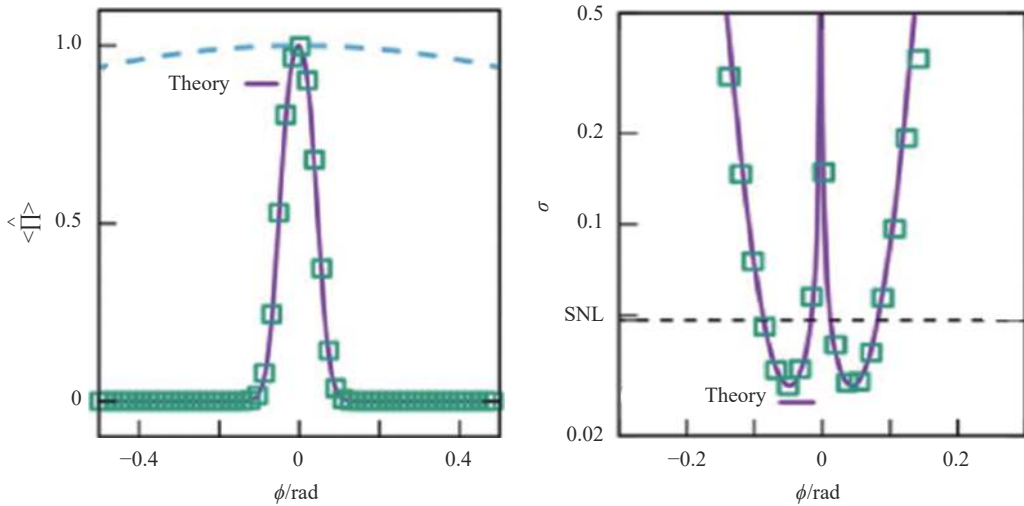


图 14 相干态和压缩真空态输入的相位测量方案输出信号及其相位灵敏度^[31]

Fig.14 Output signal and phase sensitivity of phase measurement scheme of coherent state and squeezed vacuum state input^[31]

相位灵敏度。

2018 年,南京大学的王帅等人^[32]推导了马赫-曾德尔干涉仪中奇偶算符期望值的一般表达式,输入端输入的为 Fock 态和一个任意态。通过误差传递法从零附近相移的奇偶校验探测中得到量子 Crámer-Rao 界。通过分析 Fock 态、相干态和压缩真空态三种输入态在奇偶测量策略下,且输入态平均光子数相同情况时的表现,得出三种量子态测量方案相位灵敏度相同的结论。

2021 年,山西大学的高丽等人^[33]提出基于集成

量子压缩光源的量子增强多普勒激光雷达探测方法,使用量子压缩态光场作为多普勒激光雷达的本振信号以提高系统的探测精度。图 15 为该项研究的实验系统示意图。相较于传统相干多普勒激光雷达系统,该方法的多普勒信息探测灵敏度提升了 3 dB。

量子增强激光雷达使用非经典的纠缠光源进行发射,接收探测使用相干探测等手段,可以克服标准量子极限限定的相位测量极限,具有相位灵敏度高、信噪比高、抗干扰等优点;和量子照明探测体制类似,面临着纠缠光源制备困难、实验环境要求高等困难。

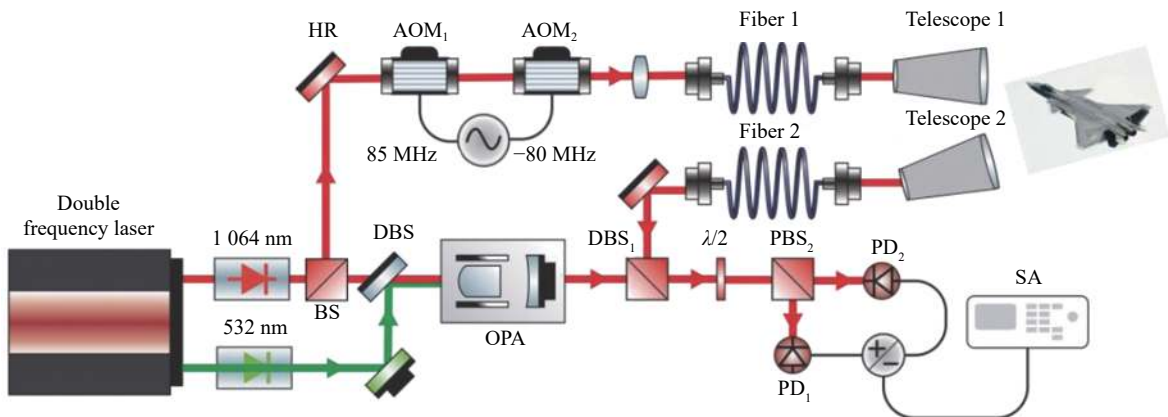


图 15 基于压缩态光场的量子增强多普勒激光雷达探测方案装置图^[33]。HR: 高反镜, AOM: 声光调制器, BS: 分束器, DBS: 双色分束器, OPA: 光学参量放大器, PBS: 偏振分束棱镜, PD: 光电探测器, SA: 频谱分析仪

Fig.15 Device diagram of quantum enhanced Doppler LiDAR detection scheme based on squeezed state light field^[33]. HR: high reflector, AOM: acousto-optic modulator, BS: beam splitter, DBS: double beam splitter, OPA: optical parametric amplifier, PBS: polarization beam splitting prism, PD: photoelectric detector, SA: spectrum analyzer

5 基于其他调控的新体制量子激光雷达

2010 年, 美国 Raytheon BBN Technologies 公司的 Zachary Dutton 等人^[34] 提出利用相位敏感放大 (phase-sensitive amplification, PSA) 和压缩真空态注入 (squeezed vacuum injection, SVI) 两种量子效应来提高激光雷达分辨率的方法。SVI 量子效应应用于降低高空空间频率目标的真空噪声, 而 PSA 量子效应应用于无噪声放大单一场的正交量。SVI 采用零差探测方法, 对噪声已被抑制的正交量敏感, 易受零差探测效率的影响。将 PSA 和 SVI 配合使用即可克服零差探测效率低的问题。该方法提高激光雷达接收信号的信噪比 (SNR) 进而提高系统的成像空间分辨率。

利用 PSA 和 SVI 的量子增强激光雷达接收机的原理简图如图 16 所示。系统采用脉冲激光泛光照明, 目标和激光雷达系统的距离为 L 。目标反射信号光场表示为 \hat{E}_R 。回波信号光场通过可变光圈 $A(\rho')$ 进入系统, 系统在可变光圈处注入压缩真空场 \hat{E}_S 实现噪声抑制。噪声抑制后的场算符 \hat{E}_R 由 PSA 进行放大。放大后的信号与本振光由零差阵列探测器接收。仿真成像结果如图 17 所示, 对比零差探测结果、仅 SVI 探测结果、仅 PSA 探测结果和 PSA 联合 SVI 探测结果可知, PSA 联合 SVI 的成像分辨率最优。

2011 年, 美国 Harris 公司的 Peter A. Wasilousky 等人^[35] 进行了基于相敏放大的量子增强激光雷达系统的搭建 (见图 18) 和验证。传统的激光雷达接收端存在损耗导致其回波光场探测效率通常被限制在 50% 以下, 降低了系统探测信噪比。而采用相位敏感放大器的平衡零差式激光雷达接收机能够有效地将光子探测效率提升并接近于 100%, 显著地增强了激光雷达的探测性能。

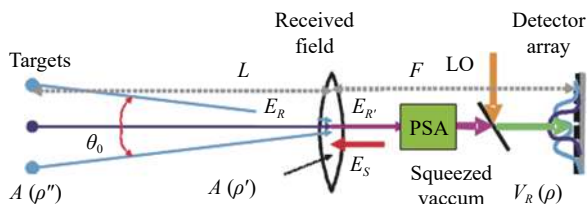


图 16 利用相敏放大和压缩真空态注入的量子增强激光雷达原理简图^[34]

Fig.16 Schematic diagram of quantum enhanced LiDAR using phase sensitive amplification and squeezed vacuum state injection^[34]

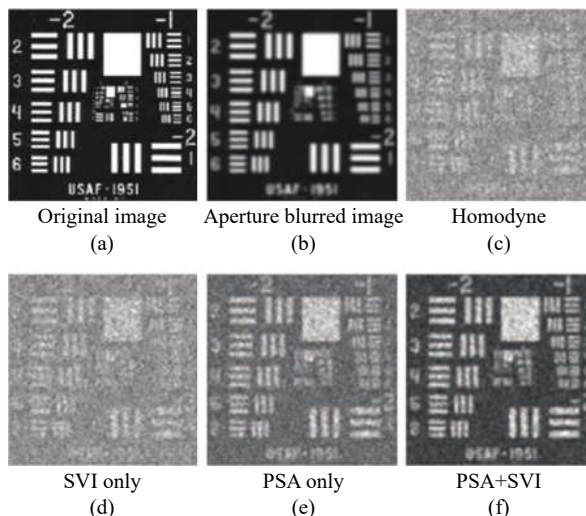


图 17 PSA 和 SVI 的量子增强激光雷达仿真结果^[34]

Fig.17 Simulation results of quantum enhanced LiDAR based on PSA and SVI^[34]

2015 年, 美国 J. M. Dailey 等人^[36] 搭建了一套基于光纤的相敏放大实验演示系统。该系统改进了相关单光子对的检测性能。通信用 InGaAs 单光子探测器存在探测效率低的问题。该系统使用三阶非线性光学效应的非简并相敏前置放大器, 在不显著增加噪声的条件下对经典输入信号实现放大。实验测量的符合增益为 4.5 dB, 探测系统信噪比提高 3 dB。

2017 年, 美国史蒂文斯理工学院 Yuping Huang 等人^[37] 针对在弱信号强噪声条件下信号探测效率受到噪声光子数量影响的问题, 提出一种基于相位匹配边缘的非线性光学量子参数模式排序 (QPMS) 选择测量方案。该方案使用商用铌酸盐波导中的非线性过程生成光学任意波形信号。开展了对时间和光谱上重叠、正交时频模式下皮秒信号和宽带噪声的高度选择性探测。其性能远超优化时频滤波的理论极限。QPMS 实验系统如图 19 所示。

2020 年, 史蒂文斯理工学院 Yuping Huang 等人^[38] 报告了一种基于 QPMS 测量方案的 3D 成像仪, 能够在强背景噪声存在的情况下对三维场景进行重建, 具有卓越的探测灵敏度和噪声容忍度。该系统利用 QPMS 区分真实信号光子与噪声光子, 实现远超典型线性光学滤波器所能达到的信噪比极限。该 3D 成像实验系统如图 20 所示, 在每脉冲仅检测到 0.0006 个信号光子、6 ps 检测窗口内有 34 倍噪声光子重叠的条件下, 实现半透明介质后目标场景的 3D 轮廓重

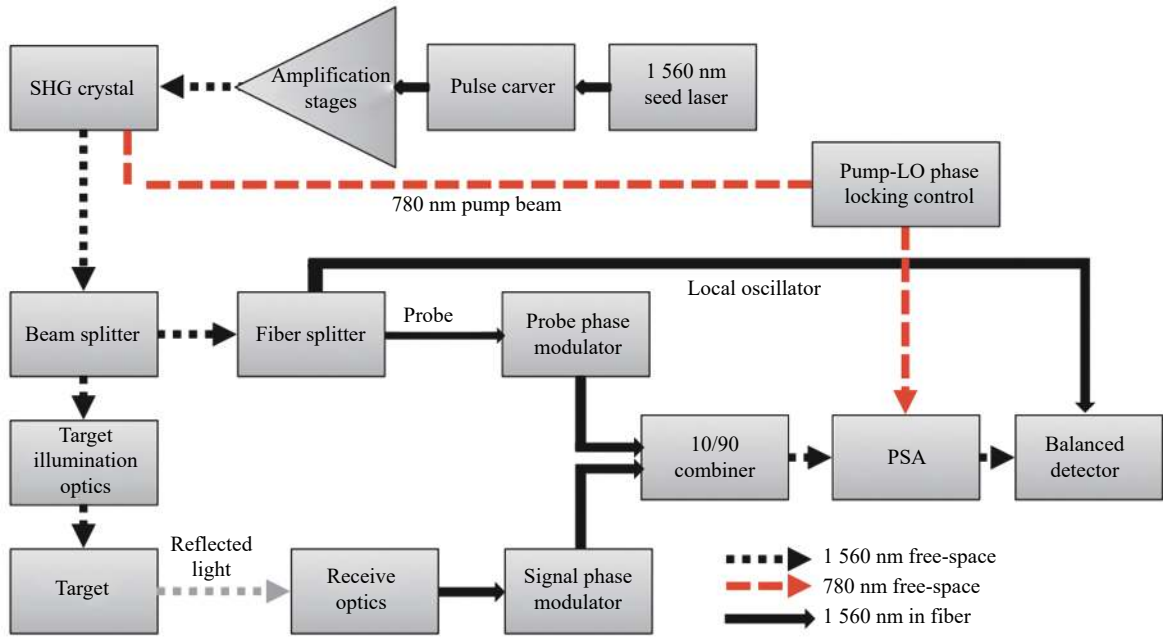


图 18 基于相敏放大量子增强激光雷达系统框图^[35]

Fig.18 Block diagram of quantum enhanced LiDAR system based on phase sensitive amplification^[35]

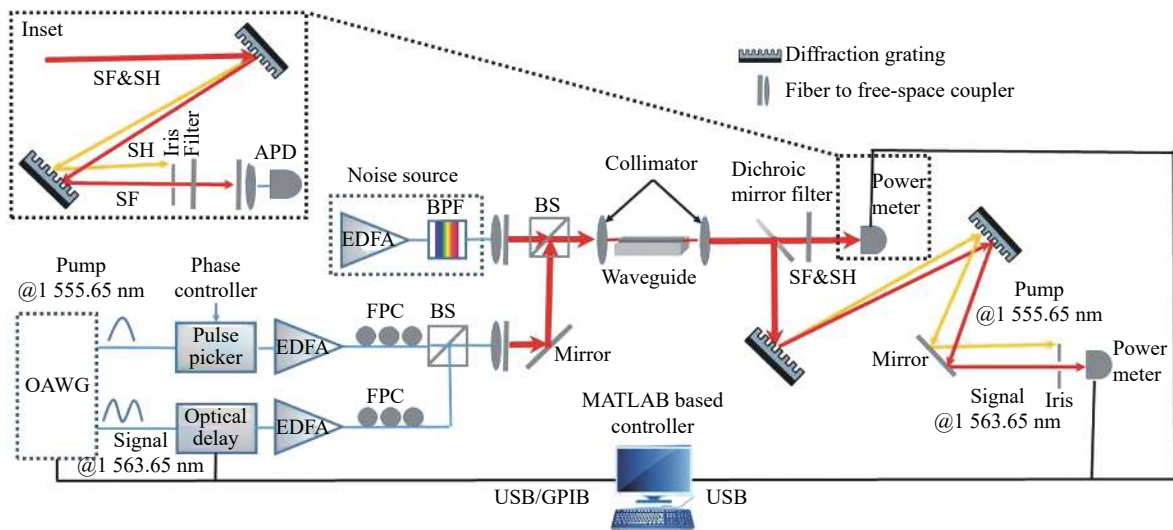


图 19 QPMS 的实验系统^[37]。BPF:带通滤波器, FPC:光纤偏振控制器, BS:分束器, 3DTS:三维平移台, APD:雪崩光电二极管

Fig.19 Experiment system of QPMS^[37]. BPF: band pass filter, FPC: fiber polarization controller, BS: beam splitter, 3DTS: 3D translation table, APD: avalanche photodiode

建。与线性光学滤波器直接光子检测相比, QPMS 的噪声抑制具有 36 dB 的优势; 与匹配时频滤波器的理论极限相比, QPMS 高 7.1 dB。

同年, 他们针对浑浊水体中远距离高分辨三维成像受水体吸收和散射效应限制的问题, 引入 QPMS 测量方案^[39]并结合皮秒时间门控检测技术, 实现目标后向散射信号光子与障碍物多重散射光子的区分。在

强散射介质中, 背景噪声强于信号几个数量级的条件下目标三维成像。实验表明: 在光学深度 >9 (往返 >18), 仅需每激光脉冲 10^{-5} 个光子条件即可实现亚毫米分辨率的三维成像。

使用相位敏感放大结合压缩真空态注入、非线性光学量子参数模式排序选择测量等量子效应的新体制量子激光雷达具有探测灵敏度高和噪声容忍度高

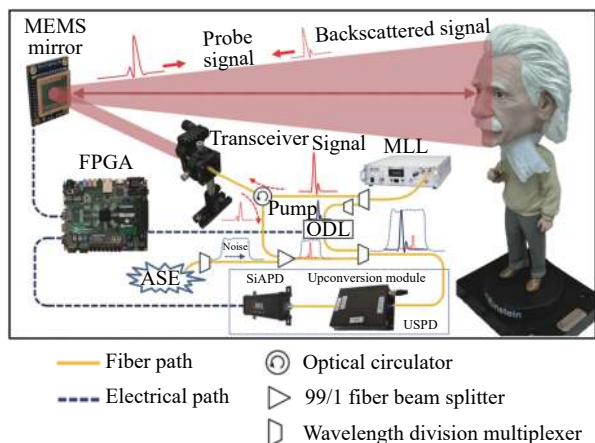


图 20 基于 QPMS 的噪声容忍型三维成像实验装置^[38]。MLL: 锁模光纤激光器; MEMS: 微机电扫描系统; ODL: 光延迟线; ASE: 放大自发辐射; USP: 上转换单光子探测器; Si-APD: 硅雪崩光电二极管; FPGA: 现场可编程门阵列

Fig.20 Experimental device of noise tolerant 3D imaging based on QPMS^[38]. MLL: mode locked fiber laser; MEMS, Micro-Electro-Mechanical Systems scanning system, ODL: optical delay line, ASE: amplified spontaneous emission, USP: upconversion single photon detector, Si-APD: silicon avalanche photodiode, FPGA: field programmable gate array

的优点;相较于上述其他量子激光雷达体制研究工作更少、起步更晚、研究内容较为单一。

6 总结和展望

量子激光雷达旨在将量子信息技术引入到经典激光雷达探测领域,解决经典激光雷达在探测、成像等方面的卡脖子难题,打破经典限制提升性能扩展功能。纵观整个激光雷达发展历程,激光雷达技术中信息维度不断发生拓展,从最开始的单纯只利用信号的能量,演化到后来综合利用信号的频率和相位信息,随着信息维度的拓展,激光雷达的性能也得到了逐步的提升。现在量子激光雷达也是在此整体发展的趋势上通过量子信息技术进一步扩展可利用的信息维度,从而提升其总体性能,催生出各种新兴体制的量子激光雷达。具体表现在发射端和接收端两个层面上:

在发射端,经典激光雷达已经使用了空、时、频域上的各种调制,相比之下,量子激光雷达应该通过对发射光场或光子增加微观量子操作,将调制信息的维度拓展到更多量子特征态上,对信息调制维度进行扩充。

在接收端,除了空、时、频域上的特征检测之外,一方面可以通过相应的量子操作和量子检测方法逼近经典探测极限,降低接收端的噪声提升量子激光雷达的灵敏度,提升其性能;另一方面可以利用新维度上信号的特殊物理效应实现更加多维信息的获取,扩展其功能。

量子激光雷达刚刚兴起,除了系统新体制的研究在发射端和接收端向更高维度信息利用拓展探索外,实现更高维度调制解调探测的器件发展以及更高维度信号在探测传输以及目标反射过程中演变的规律及理论也都是至关重要的,因此量子激光雷达的发展需要各个相关方向的科研工作者共同努力。

参考文献:

- [1] Malik M, Magaña-Loaiza O S, Boyd R W. Quantum-secured imaging [J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(24): 241103.
- [2] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L. Quantum cryptographic ranging [J]. *Journal of Optics B*, 2002, 4(4): S413.
- [3] Malik M, Magana O, Boyd R W. Secure quantum LIDAR[C]//Frontiers in Optics Optical Society of America, 2012: FM3 C. 3.
- [4] Wang X, Zhu B. A quantum target detection using polarized photons[C]//Photonics Asia, International Society for Optics and Photonics, 2012, 855405: 1-9.
- [5] Shi D S. Research on optical quantum radar technology based on wavelength, time and quantum random pulse sequence [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2020. (in Chinese)
- [6] Klyshko D N, Sviridov Y. Photons and Nonlinear Optics[M]. London: Routledge, 2018.
- [7] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. *Physical Review A*, 1995, 52(5): R3429.
- [8] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(11): 113601.
- [9] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.
- [10] Hardy N D, Shapiro J H. Ghost imaging in reflection: Resolution, contrast, and signal-to-noise ratio[C]//International Society for Optics and Photonics, 2010, 7815: 78150 L.
- [11] Katkovnik V, Astola J. Computational ghost imaging: Advanced compressive sensing (CS) technique[C]//International Society

- for Optics and Photonics, 2012, 8413: 84130 N.
- [12] Phillips D B, He R, Chen Q, et al. Non-diffractive computational ghost imaging [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14172-14182.
- [13] Cheng J, Han S. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(9): 093903.
- [14] Zhang D, Zhai Y H, Wu L A, et al. Correlated two-photon imaging with true thermal light [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(18): 2354-2356.
- [15] Cheng J. Ghost imaging through turbulent atmosphere [J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 7916-7921.
- [16] Liu X F, Chen X H, Yao X R, et al. Lensless ghost imaging with sunlight [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2314-2317.
- [17] Cai Y J. Research progress of correlation imaging and its Application [J]. *Journal of Sichuan Normal University*, 2018, 41(6): 711-728. (in Chinese)
- [18] Wu Z W, Qiu X D, Chen L X. Research status and prospect of correlation imaging technology [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2020, 57(665): 9-25. (in Chinese)
- [19] Zhao S M, Zhao L, Guo H, et al. Research on principle and Progress of ghost imaging [J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications*, 2021, 41(192): 65-77. (in Chinese)
- [20] Lloyd S. Enhanced sensitivity of photodetection via quantum illumination [J]. *Science*, 2008, 321(5895): 1463-1465.
- [21] Tan S H, Erkmen B I, Giovannetti V, et al. Quantum illumination with Gaussian states [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(25): 253601.
- [22] Lopaeva E D, Berchera I R, Degiovanni I P, et al. Experimental realization of quantum illumination [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(15): 153603.
- [23] Xu S L, Hu Y H, Zhao N X, et al. Quantum illumination target detection based on M&M' state [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(6): 0627001. (in Chinese)
- [24] Sanz M, Las Heras U, García-Ripoll J J, et al. Quantum estimation methods for quantum illumination [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(7): 070803.
- [25] Gregory T, Moreau P A, Toninelli E, et al. Imaging through noise with quantum illumination [J]. *Science Advances*, 2020, 6(6): 2652.
- [26] Tao Z W, Ren Y C, Ai Z Z, et al. Quantum illumination radar based on entangled coherent States [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(17): 63-70. (in Chinese)
- [27] Pezzé L, Smerzi A. Mach-Zehnder interferometry at the Heisenberg limit with coherent and squeezed-vacuum light [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(7): 073601.
- [28] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L. Quantum metrology [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(1): 010401.
- [29] Anisimov P M, Raterman G M, Chiruvelli A, et al. Quantum metrology with two-mode squeezed vacuum: parity detection beats the Heisenberg limit [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(10): 103602.
- [30] Zhang J D, Zhang Z J, Zhao Y, et al. Ultra-sensitive interferometric quantum lidar with Compressed Vacuum Injection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0730002. (in Chinese)
- [31] Schäfermeier C, Ježek M, Madsen L S, et al. Deterministic phase measurements exhibiting super-sensitivity and super-resolution [J]. *Optica*, 2018, 5(1): 60-64.
- [32] Wang S, Wang Y, Zhai L, et al. Two-mode quantum interferometry with a single-mode Fock state and parity detection [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(5): 1046-1053.
- [33] Gao L, Zhang X L, Ma J T, et al. Quantum enhanced Doppler lidar based on integrated quantum compression light source [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 20210031. (in Chinese)
- [34] Dutton Z, Shapiro J H, Guha S. LADAR resolution improvement using receivers enhanced with squeezed-vacuum injection and phase-sensitive amplification [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(6): A63-A72.
- [35] Wasilousky P A, Smith K H, Glasser R, et al. Quantum enhancement of a coherent lidar receiver using phase-sensitive amplification[C]//SPIE, 2011, 8163: 816305.
- [36] Dailey J M, Agarwal A, Toliver P, et al. Enhanced photon-pair detection using phase-sensitive pre amplification[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics IEEE, 2015: 1-2.
- [37] Shahverdi A, Sua Y M, Tumei L, et al. Quantum parametric mode sorting: Beating the time-frequency filtering [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-12.
- [38] Rehai P, Sua Y M, Zhu S, et al. Noise-tolerant single photon sensitive three-dimensional imager [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-7.
- [39] Sua Y M, Zhu S, Rehai P, et al. Quantum 3 D imaging through multiscattering media of 10 optical depth[C]//Ocean Sensing and Monitoring XII. International Society for Optics and Photonics, 2020, 11420: 1142009.