

轻小型全天时远程光子计数激光雷达系统技术

王海伟^{1,2}, 丁宇星^{1,2}, 黄庚华^{1*}, 侯佳¹, 舒嵘¹

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 对提升激光雷达作用距离的方法进行了分析, 针对 2 km 以上的远程探测应用, 提出了一种轻小型能够全天时工作的光子计数激光三维成像雷达解决方案, 可用于轻小型飞行器制导, 无人机、直升机、船舶导航与避障, 铁路轨道障碍物探查等有远程探测需求的应用场合。该系统采取光子计数高探测灵敏度方案, 光学应用收发共光路设计, 收发望远镜巧妙采用了共轭光学设计, 二维扫描机构放置于望远镜的后方, 不但扩大了望远镜口径, 提升了作用距离, 同时也缩减了扫描镜尺寸, 有利于扫描速度的提高, 激光收发采取窄发散角和瞬时视场共视场扫描设计, 再结合超窄带滤波器的应用, 使得系统能够实现强烈背景噪声条件下的工作。最后讨论了高重频微脉冲激光器、发射杂散光干扰、偏振激光雷达适应性以及光子计数背景滤波去噪处理技术等技术难点。

关键词: 远程激光雷达; 全天时; 光子计数; 收发共口径

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0106005

Research on the long-range and compact photon counting lidar system under sunlight condition

Wang Haiwei^{1,2}, Ding Yuxing¹, Huang Genghua^{1*}, Hou Jia¹, Shu Rong¹

- (1. Laboratory of Space Active Electro-Optical Technology and System, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A compact design of photon counting 3D imaging lidar was proposed, which can be used in full-time remote detection applications but with strict restrictions on the size and weight, such as high-speed vehicle guidance, high-speed UAV, helicopter, ship navigation and obstacle avoidance, and railway track obstacles exploration. This design adopted high sensitivity photon counting technology, common aperture for laser transmission and receives, as well as conjugate optics in the telescope. And the two-dimensional scanning mechanism was placed in the rear of the telescope, to expand the telescope aperture, improve the detecting range and reduce the size of scanning mirror. With a smaller scanning mirror, the scanning speed was further improved. The laser transceiver was designed with a narrow divergence angle and narrow instantaneous common FOV. Combined with the application of ultra

收稿日期: 2018-08-10; 修订日期: 2018-09-20

基金项目: 国家 863 计划(2015AA123801)

作者简介: 王海伟(1982-), 男, 副研究员, 硕士, 主要从事主被动复合光电探测技术方面的研究。Email: wanghaiwei@mail.sitp.ac.cn

通讯作者: 黄庚华(1980-), 男, 研究员, 博士, 主要从事空间激光主动探测技术方面的研究。Email: genghuah@mail.sitp.ac.cn

narrowband filter, the lidar system can achieve good performance under the strong daylight noise condition. At last, key technologies of high repetition laser emission, emission stray light suppression, polarization degradation, photon counting sunlight background denoising use in this design were discussed.

Key words: long range lidar; daylight condition; photon counting; T/R common aperture

0 引言

激光三维成像雷达随着激光技术的进步近年来逐步发展起来,它具有诸多优点,包括全面的角度距离数据、可靠的目标探测和识别能力等。相对微波雷达,激光雷达的工作波长较短,波束发散角小,呈现出极高的分辨本领和测量精度,在军用和民用领域都得到了广泛的应用^[1-2],尤其是在智能驾驶以及人工智能新兴热点的引领下,国内外针对近程车载导航/避障激光雷达开展了广泛的研究,以多元线列摆扫、MEMS 扫描以及 FLASH 面阵为代表的激光雷达技术已经相对成熟,作用距离一般在~100 m 左右。针对有超过 2 km 量级的远程探测,以及应用于轻小型平台上的避障导航,对远程激光雷达的需求往往更为迫切,但相对近程激光雷达而言,远程激光雷达技术难度更大,尤其是有严格轻量化要求的远程激光雷达技术门槛较高,需要开展深入的研究。文中就提出了一种基于光子计数技术,能够满足强烈日光背景条件应用的远程激光雷达的轻小型化系统方案。

1 激光雷达作用距离提升

激光雷达作用距离提升要结合应用背景和应用平台来综合考虑,并非在近程激光雷达基础上简单提升激光器能量或者扩大口径。如下式所示:

$$P_r = \frac{P_s T_A^2 \rho D^2 \eta_t \eta_r}{4R^2} \quad (1)$$

以作用距离约 100 m 的近程激光雷达为例(望远镜口径 20 mm、单脉冲激光器能量 2.5 μJ、重频高于 1 kHz),如作用距离提升至 2 km,激光器单脉冲能量需要提升 400 倍,或者望远镜口径扩大 20 倍,由此激光器及激光雷达整机在体积、质量、功耗以及成本等方面的要求都是一般平台难以承受的。所以远程激光雷达需要综合考虑工作体制、模式、核心部件及参数选取等方多方面因素,经过

系统优化设计后方能满足轻小型要求。

图 1 显示了单点、线列扫描以及 FLASH 面阵非扫描体制激光雷达原理示意,为达到相同的探测距离,以等效成像图像规模为 $N \times N$ 为例,线列扫描体制下激光器能量需求提升 N 倍,而对于面阵成像体制激光器能量需求提升 N^2 倍,当图像规模较大时,对激光器能量需求十分巨大,所以一般面阵成像激光雷达以近程应用为主。单点扫描体制激光雷达在远程探测比较有优势,但其实时性较差,不适用于高速平台应用。而线列扫描工作体制是一种兼顾探测距离和图像帧频的折衷办法,比较适合于远程激光雷达。

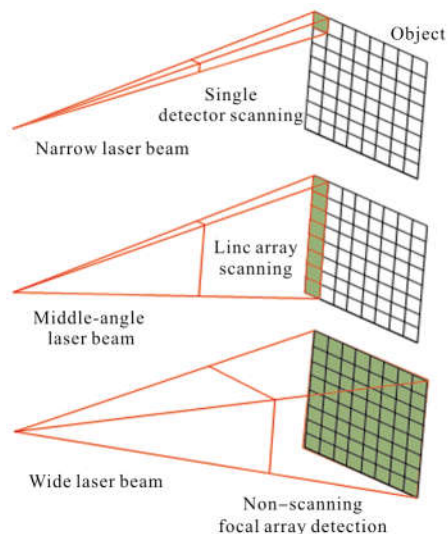


图 1 单点、线列扫描以及面阵非扫描激光雷达示意图
Fig.1 Lidar schematic of single, line array scanning and non-scanning system focal array

提高探测灵敏度也是提升作用距离的重要方法。激光雷达主要探测体制包括直接探测、激光相干探测等,相干体制探测灵敏度相对较高且对背景噪声相对不敏感,但其对激光器和探测器都有较高要求,此外相干探测系统复杂,成本居高不下,实际应用并不多见。而直接探测技术采用脉冲式飞行时间测距,技术路线简单,是目前应用较为普遍

的探测方式。直接探测体制探测灵敏度一般 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ W 数量级(百光子至千光子量级)。

当激光接收系统得到的回波光信号更加微弱时,由于量子特性的凸显,上述依赖于提高峰值功率的功率探测模型将无法用于设计测距系统和解释探测结果,此时便需要在激光测距理论和探测体制上进行创新,发展新型的探测理论^[3]。光子计数技术就是为适应这样的背景提出的,它可将激光脉冲测距系统的探测灵敏度逼近理论上的极限值,为突破远程激光雷达技术瓶颈提供了有效的技术手段。

2 日照背景光子计数激光雷达技术

光子计数激光测距与传统脉冲测距相类似,但接收采用光子探测器,因此获得了极高的灵敏度,能够敏感单个光子量级相当的信号能量,从而提高最大探测距离。其测距原理如图 2 所示,目标返回的散射激光能量经光子探测器接收后,形成的每一个光子事件都被记下(有响应为 1,无响应为 0,没有时间相关的强度信息,但有时间相关的光子事件的信息),经过统计处理,可以提取出目标的距离信息^[4]。

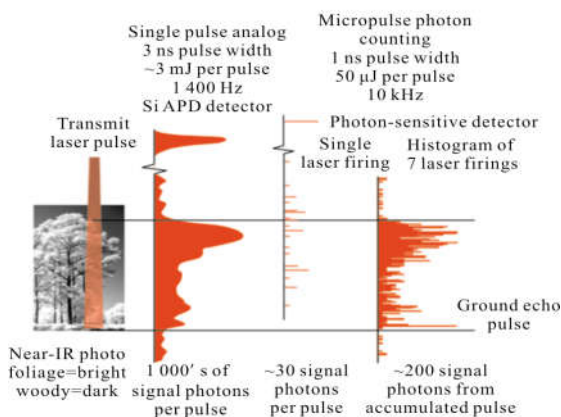


图 2 光子计数飞行时间探测原理

Fig.2 Detection principle of photon counting TOF

光子计数激光雷达探测灵敏度较高,对背景噪声非常敏感,所以目前在背景噪声较弱的人卫测距、空间应用等合作目标探测场合应用较多,又或在大气条件下仅限于夜间工作,如量子保密通信等,基于以上因素目前光子计数激光雷达无法做到全天时工作,大大制约了其推广应用。

为研制全天时远程激光雷达,首先在工作波段

上应选择 1 064 nm 或者 1 550 nm 等近红外波段,其背景辐射水平相比可见波段低几倍左右,相应地探测器选择该波段量子效率较高的 InGaAs 基盖格光电雪崩二极管(APD),或采取上转换型单光子探测器技术,将回波经由上转换器件转换为可见波段,被技术较为成熟的硅基盖格 APD 或者 PMT 探测器来利用获得较高的响应率和较低的背景噪声^[5-6]。

$$\text{假定接收视场角 } \theta \text{ 为(立体角为 } \Omega = \pi \left(\frac{\theta_{\text{fov}}}{2} \right)^2 \text{),}$$

反射率为 ρ ,太阳光谱照度为 E ,太阳入射方向与目标法向夹角为 θ_i ,接收机与目标的距离为 R ,滤光片带宽为 $\Delta\lambda$,望远镜口径为 A_r 。

$$n_b = \left(\frac{\rho E \Delta\lambda \cos\theta_i \theta_{\text{fov}}^2 A_r \eta_r \eta_q}{4h\nu} + n_{\text{dark}} \right) t_{\text{gate}} \quad (2)$$

光谱滤波也是激光雷达中背景噪声抑制的一种主要手段,相比于传统线性探测体制,日光条件下工作的光子计数用窄带滤光片需要由常规超过 1 nm 的带宽进一步压缩到 0.5 nm 以内。

在太阳入射角与激光雷达视角相同的极端条件下,以目标反射率 0.2,激光接收视场 0.4 mrad,望远镜口径 60 mm,窄带滤光片 0.3 nm,单光子探测器量子效率 10%来估算,背景噪声水平达到约 2 MHz 量级。经仿真分析,以中纬度地区典型春分秋分时节点(纬度为 30°,赤纬为 0°,太阳角为 0°)全天背景噪声变化情况如图 3 所示。

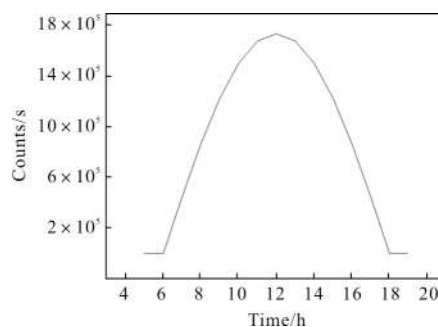


图 3 日光条件下不同时间对应的光子计数背景噪声水平变化

Fig.3 Background noise photon counts at different points in time in daylight condition

图 4 为试验装置采用 10 mm 口径望远镜、中心波长 1 064 nm 的 1 nm 带宽窄带滤光片,在正午日照条件获取的回波和背景噪声光子事件统计情

况,多次累积平均背景噪声为 120 kHz。按以上大口径激光雷达条件等效计算日光背景噪声水平为 1.44 MHz,与估算值接近。再通过距离门选通控制,以目前光子计数滤波嵌入式信号处理系统(2 MHz 处理能力)能够适应该量级噪声。由此基于该技术路线,能满足全天时光条件下的目标探测,就具备了使得远程光子计数激光雷达扩展至全天时工作的能力。

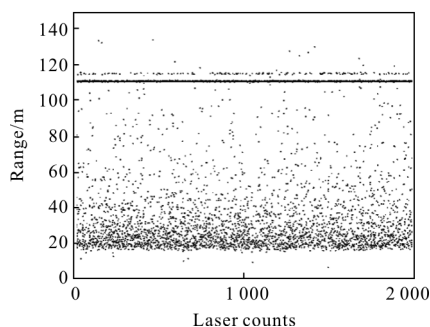


图 4 日光条件下利用实验装置的回波与噪声光子事件统计
Fig.4 Echo and sunlight noise photon counts test statistics with experimental device in daylight condition

基于以上输入条件,当单脉冲激光能量达到 1 μJ,激光雷达作用距离就能达到 2 km。光子计数探测中单次发射探测概率与回波光电子数呈指数关系,通过高重频探测累积可以有效提高探测可靠性,这也对光子计数激光光源提出了高重频的严格要求^[7]。

3 轻小型光子计数激光三维成像雷达系统设计

3.1 总体方案

图 5 为一种近程扫描成像的激光雷达,采取收

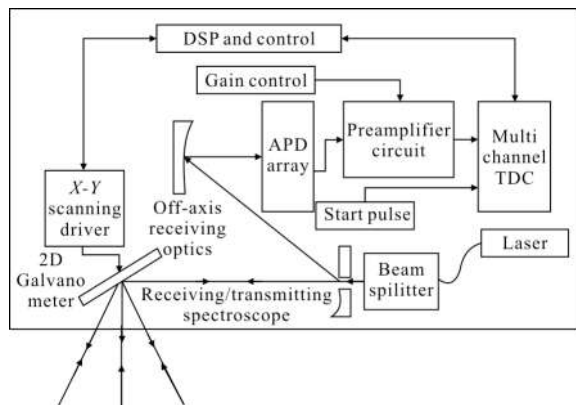


图 5 一种扫描体制近程激光雷达的系统框图

Fig.5 Block diagram of a scanning mode near-range lidar system

发共光路体制,采用穿孔镜实现收发分光,发射激光通过穿孔镜中孔发射,而回波通过穿孔镜其余位置汇聚接收。二维振镜扫描镜放置于望远镜之前,因振镜的尺寸一般在 20~30 mm,限制了该种激光雷达的通光口径,导致其作用距离无法进一步提升。

为适合于远程探测需求,提出了一种轻小型化、紧凑型远程激光雷达(见图 6)。其主要设计特点包括:

(1) 激光收发共孔径设计,结构紧凑、方便装调;扩束主望远镜采用有中间像面的光阑共轭的设计。轻小型二维激光扫描机构置于望远镜之后,望远镜口径得到明显提升,有效解决远程探测和高帧频问题;

(2) 激光收发采用窄视场设计,有效控制背景噪声;

(3) 采取光子计数探测工作体制,激光波长处于近红外波段,使用高重频微脉冲激光器和单光子探测器;

(4) 收发采用 PBS 偏振分光,接收光学耦合至光纤或光纤阵列,采用光纤耦合超窄带滤光片实现光谱滤波。

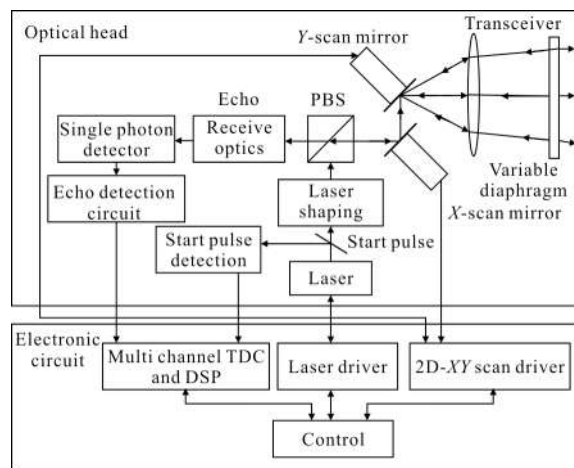


图 6 后光路扫描收发共光路远程激光雷达系统框图

Fig.6 Scheme of T/R common aperture long-range lidar system with rear optical scanning

从系统设计上,激光发射和激光接收共用望远镜,激光发射和激光接收通过偏振分束器(PBS)分光,通过望远镜后光路的二维扫描镜实现大视场激光扫描。激光器出射光经扫描镜 1、扫描镜 2 折转,

入射至扩束望远镜,经过 4 倍扩束后出射。激光回波经过分光镜后再经过接收望远镜汇聚到光纤端面,通过光纤耦合 APD 探测接收。

3.2 收发共光路系统设计

激光收发共口径的光学系统框图如图 7 所示,下面以全视场 $2^\circ \times 2^\circ$ 、激光发散角 0.2 mrad、激光接收瞬时视场 0.4 mrad 为例介绍,根据实际需求此方案能够适应全视场角度至 $6^\circ \times 6^\circ$,激光发散角可以进一步压缩至 0.1 mrad。

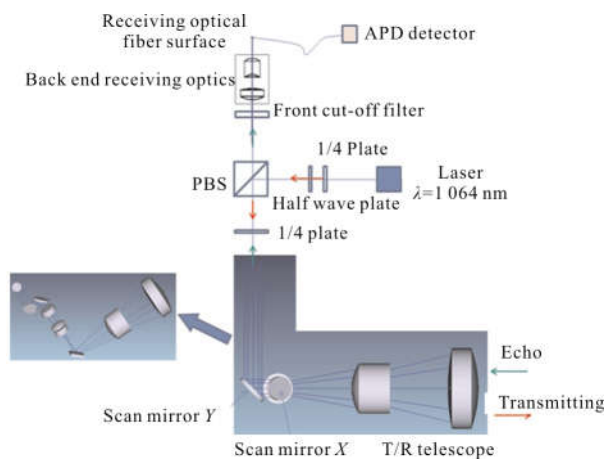


图 7 一种远程激光雷达光学系统框图

Fig.7 An optics system scheme for long-range lidar

收发共用扩束望远镜是一个中等视场角、中等扩束比、较小口径光学系统,采用透射式结构。

扩束望远镜结构示意图如图 8 所示,系统的实际孔径光阑在扫描镜 Y 附近,为了使接收不同视场的光斑在望远镜前端透镜处重合,最大程度地利用接收口径,扩束主望远镜采用有中间像面的光阑共轭的设计,扫描镜 Y 位置的孔径光阑与望远镜前端最大口径透镜表面共轭,系统总长约为 230 mm,通过折转镜可较大程度地折叠光路。望远镜由 5 片透镜组成,所有光学表面均为球面,所有材料均为融石英。系统的光阑位于扫描镜 Y 处,激光器的出射光斑尺寸为 2.0 mm,发散角 0.8 mrad,通过扫描镜 X 和扫描镜 Y 的不同角度扫描,光束相对于望远镜

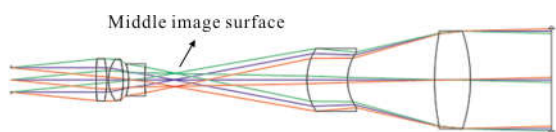


图 8 采用光阑共轭设计的望远镜

Fig.8 A telescope used conjugate optical design

在 $8^\circ \times 8^\circ$ 的方形视场内入射,经过望远镜扩束后,以 0.2 mrad 发散角在 $2^\circ \times 2^\circ$ 的角度范围内出射。

加入扫描镜和折转镜折叠以后的光路如图 9 所示,在接收反向模拟时,边缘视场在光纤芯径范围内的衍射能量集中度优于 99%,接近衍射极限。用作发射时,中心视场具有较好的成像质量,为了使光斑质量和发散角能控制在比较好的范围,其他视场的像质也得到了比较好的校正, $2^\circ \times 2^\circ$ 视场内不同角度出射激光处光斑的足印点阵如图 9(b)右下角所示,最大的波像差不超过 0.04λ 。

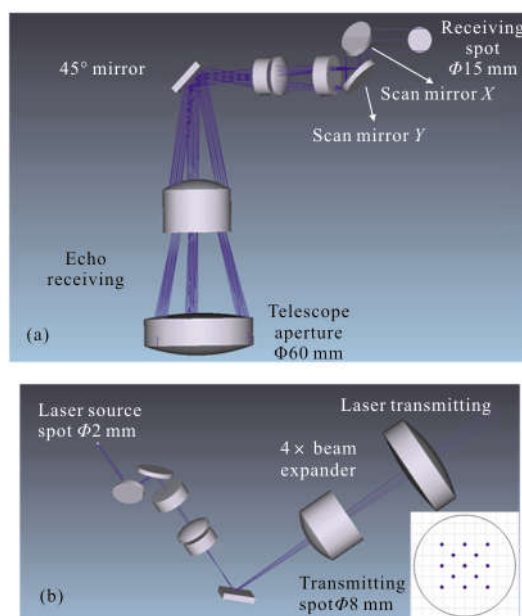


图 9 望远镜排布及激光接收示意图(a)和激光发射示意图(b)

Fig.9 Arrangement of telescope and schematic diagram of receiving laser beam(a), and transmitting laser beam (b)

接收望远镜为小口径、小视场的两片透射式汇聚系统,目标反射回波经过扩束望远镜和扫描镜反射,经过 PBS 后为单视场回波光斑。前截止滤光片置于平行光路中可以有效地防止因入射角度引起波长漂移,损失接收能量,窄带滤光片集成在光纤里,接收的瞬时视场为 0.4 mrad。针对单视场,系统设计可以达到衍射极限。并且系统的像方数值孔径略小于光纤的数值孔径,可以有效地保证光纤接收的耦合效率。

3.3 激光收发隔离设计

相比于图 5 中的方案,为了避免接收能量的损

失,采取波片组和偏振分束器实现发射和接收光束的共孔径和隔离方案。激光器出射固定偏振态的激光,分别经过 1/4 波片、1/2 波片,调节出射光的偏振态至线偏振光,且该线偏振光的长轴方向沿竖直方向,经过 PBS 时 98% 以上的能量发生反射,反射光再经过快轴方向与水平方向成 45° 的 1/4 波片,转换成圆偏振光,经扫描镜、扩束镜后到达被测目标。目标回波返回后以接近圆偏光的状态进入 1/4 波片(快轴方向与水平方向成 45°),转换成水平方向的线偏光,再经过 PBS 后 95% 以上的能量发生透射,经窄带滤光片及接收望远镜后耦合入光纤接收。

3.4 二维扫描机构

二维扫描机构布置于望远镜后,相比于位于望远镜前,扫描镜的尺寸有效缩减,可选择微型高速二维振镜,相比于压电和 MEMS 扫描镜,其扫描镜口径更大,更有利于提升望远镜口径来提升作用距离。而相对于音圈电机和转镜电机等扫描机构,又具有体积小、质量轻的优势,再者其具有响应速度快、重复精度高等特点,可以实现大角度高速高精度扫描成像。

4 关键技术与难点

光子计数激光雷达对激光器提出了高重频和超窄脉冲的需求,高重频有利于提高图像分辨率,也能弥补基于概率模型光子探测的单个探测概率低的缺点。为满足实际需要,一般光子计数激光雷达的激光重频要高于 10 kHz。而脉冲越窄越有利于提高测距精度,所以为满足厘米级测量精度激光脉冲一般要优于 1 ns。比较包括 LD 阵列、电光调 Q、声光调 Q、被动调 Q 以及 MOPA 全光纤等在内的各体制激光器^[8],前面三种体制脉冲宽度难以做到 1 ns 以内,被动调 Q 激光器具有窄脉冲优势,但工作重频难以达到 10 kHz 以上。综合以上,MOPA 全光纤激光器重频可达到 50 kHz 以上,经过特别设计激光脉冲也可以达到 1 ns 左右,同时具有结构紧凑、插头效率高等优点,适合于轻小型平台远程激光雷达的应用。

以全天时应用为目标,远程光子计数激光雷达要解决噪声抑制难题。首先光子计数背景问题主要

通过光谱滤波和时间相关滤波技术来解决,超窄带滤光片常规方案包括镀膜方案、光纤光栅方案、声光可调滤波器等^[9],三者均能够达到 0.2 nm 以内的超窄带宽,相比之下传统镀膜方案,工艺简单且波长温度敏感度低,特别是封装耦合在光纤内制成超窄带滤波器,具有更小的尺寸,便于缩短带宽,另一方面有利于均匀性;其次在采取发共口径的设计方案中,虽采取 PBS 分光隔离方案,但光子探测器灵敏度较高,存在发射激光泄露进入接收通道的可能,会导致激光雷达对近程目标无法正常探测,所以需要从光机系统材料选择和设计方面出发重点解决杂散光干扰问题。

采取 PBS 偏振分光方案中,出射激光为圆偏光,不同目标的属性、材质显现出不同的偏振退偏特性,人工目标表面较光滑,回波以近似镜面散射为主,退偏能力差,同时回波能量也会更强,而自然目标表面粗糙且排布不规则,回波散射以漫散射为主,退偏能力强,相应回波能量也较弱。由此在自然背景下识别人工目标有独特的优势,比如在水面上识别舰船等人工目标,以往水面常常引入的杂波在偏振成像中会得到很好的抑制,更加凸显出人工目标,有效地提高了目标识别概率。但偏振成像激光雷达的适应场景和目标方面仍需要开展广泛和深入的研究。

最后,光子探测获取的激光雷达原始点云数据中回波信号淹没于噪点中,需经过噪声滤除才能获取最终目标图像,此过程中滤波去噪算法显得尤为重要。虽然通过栅格化分割粗去噪再经细栅格点密度统计精去噪算法能够去除噪点^[10-11],但远程激光雷达有高实时性要求,以上算法迭代次数较多、实时性差,所以在现有嵌入式硬件水平基础上实现高速实时预处理需要进一步探索研究。

5 结束语

在提升激光雷达作用距离的方法中,提高激光器能量、扩大望远镜口径都不适合于轻小型平台的应用,而采用高重频窄脉冲光纤激光器,应用盖格 APD 单光子探测器,采取光子计数超高探测灵敏度的技术路线更为适合。在光路设计上采取收发共用望远镜形式,利用 PBS 实现激光收发分光,扫描

机构放置于望远镜后,并使用超窄带滤光片实现背景噪声抑制。该系统方案具有轻小型化的优点,适用于弹载、机载、车载以及舰载等对资源有严格约束的平台,能够适应在轻小型飞行器制导、避障、预警等远程探测应用场合的广泛需求。

文中只基于单元扫描成像进行了设计分析,基于系统方案将探测器更换为线列探测器,激光器采取 DOE 分光或光纤分光方式发射,就可方便地改造为多元线列扫描成像形式,可明显提高分辨率和图像帧频,更加适合于高相对速度和高实时性要求的应用场合。文中给出了实现远程全天时激光雷达的系统方案,提供了一条极有价值的参考技术路线,但最终仍需要继续解决包括光子滤波去噪实时处理等在内的一系列技术难题,才能满足实际应用需求。

参考文献:

- [1] Dai Yongjiang. Laser Radar Technology (1) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese)
戴永江. 激光雷达技术(上册)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [2] Sun Jianfeng, Yan Aimin, Liu Dean, et al. Progress on longrange laser imaging ladar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(8): 49-54. (in Chinese)
孙建锋, 阎爱民, 刘德安, 等. 远距离激光成像雷达进展[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(8): 49-54.
- [3] Shu R, Huang G, Hou L, et al. Multi-channel photon counting three-dimensional imaging laser radar system using fiber array coupled Geiger-mode avalanche photodiode[C]// Proc of SPIE, 2012, 8542: 1-10.
- [4] Shen Shanshan, Chen Qian, He Weiji, et al. Research and realization on performance of single photon counting ranging system optimizing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0217001. (in Chinese)
沈姗姗, 陈钱, 何伟基, 等. 单光子测距系统性能优化研究和实现[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 0217001.
- [5] Shentu Guoliang, Zheng Mingyang, Zhang Qiang. The new development of up-conversion single-photon detector [J]. *Scientia Sinica: Information*, 2014, 44 (3): 389-393. (in Chinese)
申屠国樑, 郑名扬, 张强. 上转换单光子探测器最新进展 [J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(3): 389-393.
- [6] Zhao Yuan, Zhang Zijing, Ma Kun, et al. High sensitivity photon polarization laser radar system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0902001. (in Chinese)
赵远, 张子静, 马昆, 等. 高灵敏度的光子偏振激光雷达系统[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(9): 0902001
- [7] Liu Zhiqing, Li Pengcheng, Chen Xiaowei Classification of airborne LiDAR point cloud data based on information vector machine[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(1): 210-219. (in Chinese)
刘志青, 李鹏程, 陈小卫, 等. 基于信息向量机的机载激光雷达点云数据分类[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(1): 210-219.
- [8] Zhang Xinting, An Zhiyong, Kang Lei. Design of 3D laser radar transmitting/receiving common path optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0618004. (in Chinese)
张欣婷, 安志勇, 亢磊. 三维激光雷达发射/接收共光路光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 0618004.
- [9] Wang Feng, Hu Xiaoyang, Ye Yidong. Development of ultra-narrow band filter technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(6): 62-67. (in Chinese)
王锋, 胡晓阳, 叶一东. 超窄带滤光技术研究进展[J]. 激光与电子学进展, 2007, 44(6): 62-67.
- [10] Xie Feng, Yang Gui, Shu Rong, et al. An adaptive directional filter for photon counting Lidar point cloud data [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, 36 (1): 107-113. (in Chinese)
谢锋, 杨贵, 舒嵘, 等. 方向自适应的光子计数激光雷达滤波方法[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(1): 107-113.
- [11] He Weiji, Sima Boyu, Miao Zhuang, et al. Correction of reversal errors in photon counting 3D imaging lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21 (10): 2488-2494. (in Chinese)
何伟基, 司马博羽, 苗壮, 等. 光子计数三维成像激光雷达反转误差的校正[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(10):2488-2494.