

先进体制激光成像雷达技术的发展与分析

杨兴雨^{1,2*}, 王中华¹, 汪禧希¹, 王天雅¹, 刘阿朗¹, 赵燕铎¹, 陈丹¹¹石家庄铁道大学信息科学与技术学院, 河北 石家庄 050043;²河北省电磁环境效应与信息处理重点实验室, 河北 石家庄 050043

摘要 激光成像雷达是一种综合激光技术与雷达技术于一体的主动式光电成像设备,具有探测精度高、图像信息量丰富、抗干扰能力强等优点,在科学领域和商业领域等都有广阔的发展前景。为了满足人们日益增长的实际需求,不同成像体制的先进激光成像雷达技术应运而生。首先介绍先进体制激光成像技术的工作原理;然后开展不同体制下先进激光成像雷达的分类,阐述国内外不同分类方式下激光成像雷达技术的关键性能,分析不同激光成像雷达系统的优势与不足;最后总结激光成像雷达技术的未来发展趋势,可为先进激光成像雷达技术的发展提供一定的借鉴和参考。

关键词 激光雷达; 成像体制; 精度高; 抗干扰

中图分类号 TN95 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231386

Development and Analysis of Advanced Laser Imaging Radar Technology with Different Systems

Yang Xingyu^{1,2*}, Wang Zhonghua¹, Wang Xixi¹, Wang Tianya¹, Liu Alang¹,
Zhao Yanduo¹, Chen Dan¹¹School of Information Science and Technology, Shijiazhuang Tiedao University,
Shijiazhuang 050043, Hebei, China;²Hebei Key Laboratory of Electromagnetic Environmental Effects and Information Processing,
Shijiazhuang 050043, Hebei, China

Abstract Laser imaging radar integrates laser and radar technology, serving as an active photoelectric imaging tool. It boasts high detection accuracy, rich image information, and robust anti-interference capabilities, making it promising in scientific and commercial sectors. As its demand increases, diverse advanced laser imaging radar systems have emerged. This paper outlines the operating principle of this advanced imaging technology, classifies the radar systems, discusses key performances across different classifications globally, compares the advantages and disadvantages of various systems, and concludes with future trends in the technology. This offers insights into the evolution of advanced laser imaging radar technology.

Key words lidar; imaging system; high precision; anti-interference

1 引言

激光成像雷达是一种综合激光技术与雷达技术于一体的主动式光电成像设备,可以快速、精确地获取目标物体的距离、方位、图像等三维空间信息^[1],通常用于对目标物体的位置信息、速度信息的测量,拥有广阔的发展前景^[2]。激光成像雷达系统通过发射经过处理的激光脉冲信号对目标物体进行搜索、探

测和扫描,激光脉冲信号接触到待测目标表面之后,待测目标将激光脉冲信号以返回波的形式反射回去,返回的回波信号由激光雷达系统的接收模块和激光光电探测器接收并处理,从而获取目标物体的数据信息,并通过分析目标的数据信息来获得目标的位置信息、强度信息、激光脉冲信号速度信息、周围环境信息、目标图像信息等内容。激光成像雷达技术是将激光雷达技术、成像技术、计算机识别控制

收稿日期: 2023-05-29; 修回日期: 2023-06-23; 录用日期: 2023-07-24; 网络首发日期: 2023-08-04

基金项目: 河北省科技厅计划项目(21355902D, F2021210008)

通信作者: *xyyang@stdu.edu.cn

技术和数据信息处理技术等结合起来而形成的产物^[3],相比于传统的微波雷达、毫米波雷达,激光成像雷达,其激光信号强度更高,测量精度更准确,拥有较高的信息处理速度,并在图像分辨率以及抗干扰性能方面占据优势^[4]。本文主要阐述先进激光成像雷达技术的工作原理,描述不同方式下先进激光成像雷达的分类,并对不同分类方式下的激光成像雷达技术的主要性能指标进行介绍,分析其优势和不足,旨在为从事相关领域的研究人员提供一定的借鉴和参考。

激光三维成像的中心原理是在单点激光探测的基础上,利用激光脉冲实现对三维空间中每个像素点的同步测量^[5],最后通过数据处理与分析将获取的目标数据通过三维图像的形式显示。因此,为了更好地实

现激光三维成像,就要在对测距点进行测距时提高测量的精确性及测量效率。

2 激光成像雷达测距原理

由于雷达成像的原理不同,各种激光成像雷达的工作原理也有所不同。激光雷达基本成像原理主要是通过激光测距方法来获取目标物体的距离维度信息,依据探测体制的不同,激光成像雷达探测系统可分为相干探测激光探测系统和非相干探测激光探测系统。相干探测激光探测系统的工作原理是通过系统发射和接收到的激光本振信号和激光回波信号在传感器上实现混频之后的中频信号进行测量和信息处理,进而获取目标物体的位置距离信息。相干探测激光探测系统示意图如图 1 所示。

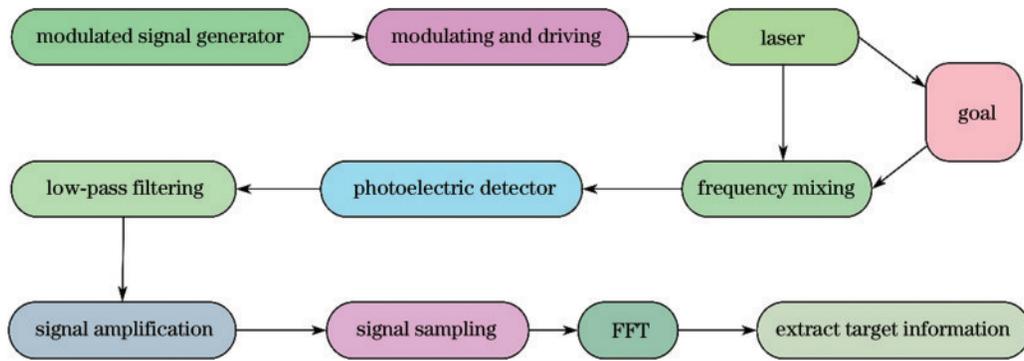


图 1 相干探测激光探测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coherent detection laser detection system

2.1 相干探测原理

由于相干探测只接收接近本振光的光信号,因此采用相干探测的激光雷达不易受外部环境光的影响。相干光探测的主要原理是将两个偏振方向相同、传播方向平行且重合的本振光信号与信号光信号混频,从而获取到相位、振幅、频率等与信号光均相同的中频信号^[6]。

假设信号光与本振光的电场分别为

$$E_a(t) = A_a \cos(\omega_a t + \varphi_a), \quad (1)$$

$$E_b(t) = A_b \cos(\omega_b t + \varphi_b), \quad (2)$$

式中: A_a 为信号光的振幅; A_b 为本振光的振幅; ω_a 为信号光的角频率; ω_b 为本振光的角频率; φ_a 为信号光的相位; φ_b 为本振光的相位。

令光电探测器的响应强度为 R , 根据光电探测器的特性要求, 输出电流的表达式为

$$I(t) = R [E_a(t) + E_b(t)]^2. \quad (3)$$

将式(1)、(2)式代入式(3)并展开, 有

$$I(t) = R \{ A_a^2 \cos^2(\omega_a t + \varphi_a) + A_b^2 \cos^2(\omega_b t + \varphi_b) + A_a A_b \cos(\omega_a + \omega_b)t + (\varphi_a + \varphi_b) + A_a A_b \cos(\omega_a - \omega_b)t + (\varphi_a - \varphi_b) \}. \quad (4)$$

由光电探测器的平方律特性可得, 光电探测器的

光混频电流信号为

$$I(t) = R \{ P_a + P_b + 2\sqrt{P_a P_b} \times \cos[(\omega_a - \omega_b)t + (\varphi_a - \varphi_b)] \}, \quad (5)$$

式中: P_a 是平均信号光功率; P_b 是平均本振光功率。

经过带通滤波器选通之后, 隔掉直流信号、截去高频信号, 最终获得的中频电流信号为

$$I(t) = 2R \sqrt{P_a P_b} \cos[(\omega_a - \omega_b)t + (\varphi_a - \varphi_b)]. \quad (6)$$

相干探测又称为光外差探测, 依据本振光与信号光混频后差频信号频率的不同将相干探测分为外差探测、零差探测和内差探测: 当 $\omega_a = \omega_b$ 时, 称为零差探测; 当 $\omega_a \neq \omega_b$ 时, 称为外差探测; 同外差探测一样, 内差探测中本振光与信号光混频后生成的差频信号不为零, 但内差探测所得到的差频信号要远小于外差探测得到的差频信号^[7]。相干探测技术将激光雷达传输的优点与微波雷达探测的精度高、功率低、选通方便等特点相结合, 有效地解决了抗干扰能力差的问题, 同时采用光载波能够获得更好的距离分辨能力。因此, 其在空地、空空、地空等领域对目标的识别与跟踪有着广泛的应用。

2.2 非相干探测原理

非相干探测激光探测器技术是一种在探测过程中不需要利用和获取接收信号相位信息的探测技术, 非相干探测激光探测器将接收到的激光信号转化为电信

号,并且信号大小与入射光子流瞬时能量强度呈正相关的关系。依据激光调制方式的不同,将激光成像雷达分为脉冲式激光调制雷达和相位式激光调制雷达。

2.2.1 脉冲式激光调制雷达探测原理

脉冲式直接激光调制雷达的测量范围在几百 m~几十 km 之间。但是在远距离探测过程中,由于会受到外部环境的影响,照射到一些干扰物上后也会产生回波信号形成干扰,因此测量精度较低^[8]。脉冲式直接激光探测利用光的传播速度在大气中基本不变的特点,正常工作时,脉冲式激光测距系统由激光器发射激光脉冲,激光脉冲在空气介质中传输,当光脉冲接触到目标物体之后,部分激光脉冲经过目标物体的反射后返回测距点,返回的光脉冲被探测系统接收并处理,获取回波信号携带的目标物体距离信息^[9],进而直接测得激光脉冲传播的往返时间间隔 t ,其中,光脉冲在空气介质中的传播速度为 c ,故脉冲式直接激光测距公式为 $r=c \cdot t/2$ 。脉冲式直接激光测距系统原理图如图 2 所示。

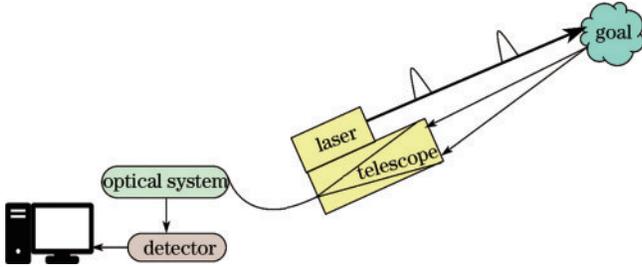


图 2 脉冲式直接激光测距系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of pulse type direct laser ranging system

脉冲式直接激光测距精度主要是由系统时间测量精度决定的,系统时间的精确测量主要包括精准的时刻鉴别和精确的时间间隔测量两个方面^[10]。其中,精准的时刻鉴别由光电探测处理系统来保证,而精确的时间间隔测量则通过时间间隔测量电路来保障。激光测距成像雷达系统的精确度主要依赖激光脉冲信号的上升沿、信号接收通道的带宽、传感器的信噪比,以及系统时间间隔测量的精度。

依据激光雷达系统传感器的不同,即选择单光子传感器或者线性传感器,可以将直接脉冲激光测距系统探测技术分为光子计数探测和线性探测。当测距系统为光子技术探测模式时,系统传感器工作模式为盖革模式,此时系统探测灵敏度达到单光子级灵敏度^[11],单个信号光子的通过即可触发一次相应的电脉冲效应,但是由于单光子传感器只能对是否存在回波信号进行判断,因此并不能提供脉冲信号的强度信息^[12]。当激光脉冲照射到目标物体表面后发生反射产生回波信号,回波信号返回到接收光学系统之后被单光子传感器响应,根据激光雷达探测的激光雷达方程,回波信号所产生的光子数 N_s 可表示为

$$N_s = \frac{E_i \lambda}{hc} \cdot \frac{\rho A_t \cos \theta_i}{\Omega_i R^2} \cdot \frac{A_r}{\pi R^2} \cdot \eta_i \eta_r \eta_q \eta_{atm}^2, \quad (7)$$

式中: E_i 为激光的单脉冲能量; A_t 为目标物体反射的截面积; A_r 为接收系统望远镜的接收面积; Ω_i 为激光脉冲发射的立体角; R 为目标物体的距离; λ 为激光脉冲的波长; h 为普朗克常数; ρ 为目标物体的反射率; θ_i 为激光脉冲发射角; η_i 为激光脉冲发射的光学效率; η_r 为系统接收回波信号的光学效率; η_q 为光子探测器的光子探测效率; η_{atm} 为单程大气的透过率。单光子计数探测激光成像雷达具有隐蔽性好、抗干扰能力强、角度和距离分辨率高、体积小等优点^[13]。

在线性探测模式下,探测系统传感器的信号脉冲响应与入射激光光强呈线性相关关系,系统发射的每一个激光脉冲都有随时间变化的回波波形,因此能够获取更精确有效的目标物体信息。两种探测模式的示意图如图 3 所示。

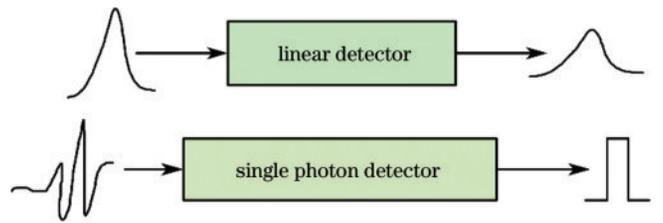


图 3 线性探测模式和单光子探测模式示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of linear detection mode and single photon detection mode

2.2.2 相位式激光调制雷达探测原理

相位式激光探测与脉冲式激光探测的目的均是测量目标的距离信息,但二者的原理不同。相位式激光探测雷达对连续激光信号进行调制并将其作为发射信号发射出去,当激光信号照射到目标物体后,在物体表面产生反射,生成回波信号,回波信号被光电探测器接收并获取目标的相位信息,并将其相位与激光器的参考信号的相位进行比较,利用系统发射信号与回波信号两者的相位差进而获取探测目标的方位信息,距离计算公式为

$$D = \frac{c}{2f} \cdot \frac{\varphi}{2\pi}, \quad (8)$$

式中: f 是激光器的调制频率; φ 是相位差。

相比于脉冲式直接探测系统,相位式激光测距技术具有更高的测量精度,一般为 mm 级,适用于精密测距。但是由于相位式激光探测雷达发射信号为连续激光信号,其平均功率远低于脉冲式激光的峰值功率,故相位式激光探测系统只适用于短距离的测量,无法实现远距离目标的探测。相位式激光探测系统如图 4 所示。

经过系统调制的连续激光信号从发射系统发出,当信号照射到目标物体后经过反射返回出发点,被接收系统探测并接收,对发射激光信号和回波激光信号

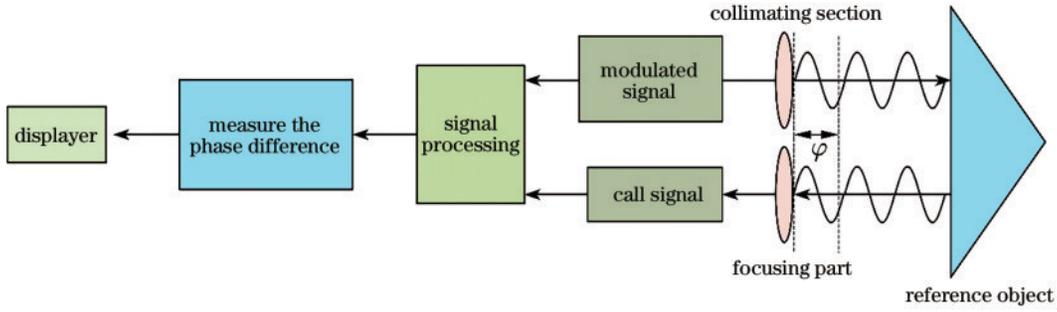


图 4 相位式激光探测系统图

Fig. 4 Phase laser detection system diagram

之前的相位变化进行测量,通过计算获取目标物体的距离信息进而形成距离图像。图 5 为相位式激光探测原理图。

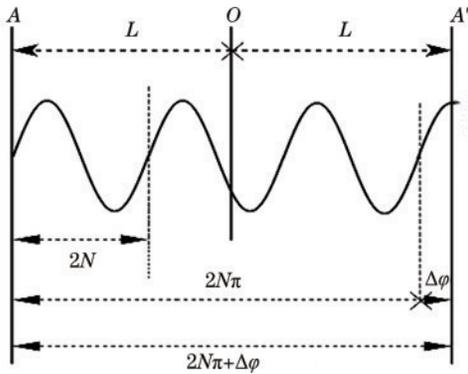


图 5 相位式激光探测原理图

Fig. 5 Schematic diagram of phase laser detection

记起始时刻为 t , 系统发射的连续激光信号为

$$I_0 = A \sin(2\pi ft + \varphi), \quad (9)$$

经过物体反射的回波激光信号为

$$I_1 = A \sin(2\pi ft + \varphi + \Delta\varphi), \quad (10)$$

则待测目标物体的距离信息 L 的计算公式为

$$L = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t = \frac{1}{2} \cdot \frac{c\varphi}{2\pi f} = \frac{c\varphi}{4\pi f}. \quad (11)$$

3 激光成像雷达分类

激光成像雷达种类繁多,根据激光成像雷达成像机制的不同,其分类方式也不尽相同。激光成像雷达主要的分类方式有激光成像模式、激光探测方法、激光扫描方式、激光源作用模式、激光雷达载荷平台。通过这 5 种分类方式可以对激光成像雷达的发展进行详细描述和比较。

3.1 依据激光成像模式分类

依据激光成像雷达不同的成像模式,可以将激光成像雷达分为单点激光扫描成像、线阵激光扫描成像和面阵激光扫描成像。

单点激光扫描成像雷达工作原理为:利用激光测距系统扫描装置不断改变激光的扫描方向,从而获取待探测目标各点的距离信息,结合激光光束扫描时记

录的俯向角以及方位角信息即可得到探测目标的三维立体像。

基于单点激光扫描成像系统扫描效率低、图像分辨率低、精度低、扫描装置结构复杂体积庞大等不足,人们开始着手研究非机械装置扫描的线阵推扫式激光成像雷达技术。线阵激光推扫成像的工作原理为:通过激光光学分束的方式将单点激光分成一个扇面的扫描面或者采用 N 元线性半导体激光探测器阵列,同时在目标探测区域形成一个线性激光照射区域,即在探测目标区域的同时形成 N 个激光脚印,最终目标探测点所对应的激光回波信号被激光器系统的 N 元传感器阵列所并行接收,经过系统处理之后获取对应探测目标上 N 点的距离信息和幅值信息,进而实现在同一时刻获取 N 个目标探测点的三维信息。

面阵激光成像雷达采用泛点或者点阵的方式,发射一个激光面照射目标区域^[14],激光光束在照射到目标区域表面后发生漫反射,进而产生回波信号,当从不同距离的物体表面返回的回波信号被面阵探测器接收并处理后,可获取目标区域的信息。3 种扫描成像方式示意图如图 6 所示。

线阵激光成像在扫描成像过程中,线性激光照射到目标区域,在目标区域同时形成多个激光脚印,激光脚印示意图如图 7 所示。假设激光光束在目标区域形成的脚印为矩形,激光器发射的激光光束的发散角为 $\alpha \times \beta$,飞机飞行高度为 h ,与目标物体的距离为 R ,激光光束与飞机飞行方向的夹角(即前倾角)为 θ 。

由图 7 激光脚印示意图可知,激光脚印边长 l_x 和 l_y 的大小为

$$\begin{cases} l_x = \frac{2\alpha R \sin \theta}{1 - \cos 2\theta}, \\ l_y = \beta \cdot R \end{cases} \quad (12)$$

故单元激光脚印面积 S 的大小为

$$S = l_x \times l_y = \frac{2\alpha\beta R^2 \sin \theta}{1 - \cos 2\theta}. \quad (13)$$

由激光脚印面积公式可知,激光脚印面积 S 与激光光束发散角 $\alpha \times \beta$ 、前倾角 θ 以及目标距离 R 均有关。当激光光束的前倾角 θ 固定不变时,目标距离 R 和激光光束的发散角 $\alpha \times \beta$ 越大则激光脚印面积 S 就越大。

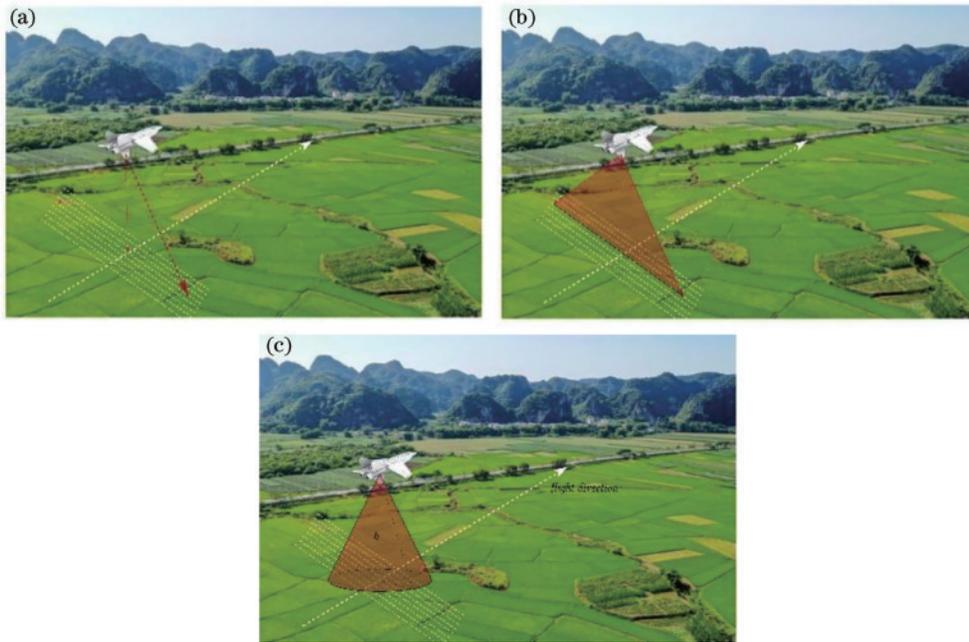


图 6 3 种扫描成像方式示意图。(a)单点激光扫描成像;(b)线阵激光扫描成像;(c)面阵激光扫描

Fig. 6 Schematic diagrams of three scanning imaging methods. (a) Single point laser scanning imaging; (b) linear array laser scanning imaging; (c) area array laser scanning

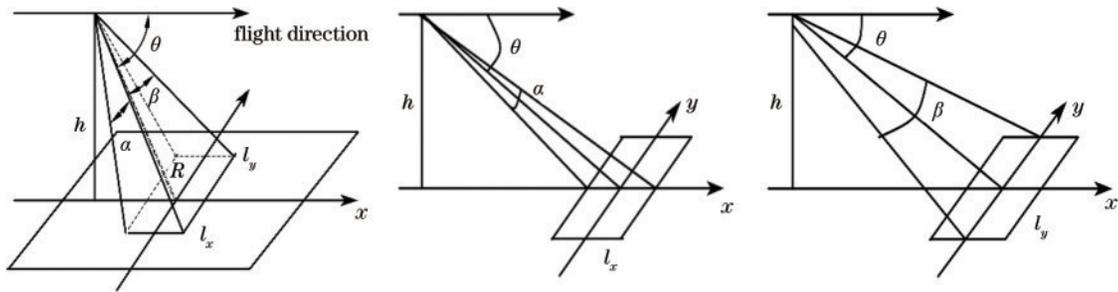


图 7 激光脚印示意图

Fig. 7 Schematic diagrams of laser footprints

3.2 依据激光探测方法分类

依据不同的激光探测方式,可将激光成像雷达分为直接探测激光成像、相干探测激光成像等。其中,相干激光成像以接收激光的相位、频率、偏振等为主要参数,或者利用激光的外插接收法接收微弱的激光幅度或者能量信号。直接激光探测成像则是以接收激光能量为主的成像。

3.2.1 直接探测激光成像

图 8 为直接探测激光成像雷达系统采用雪崩光电二极管 (APD) 直接测距成像的基本框图。正常工作时,发射系统发射的信号经过目标的反射产生回波信号,该回波信号被接收系统获取后,通过激光信号往返所用时间,利用距离公式即可确定探测目标的距离。探测目标的径向速度则可以通过测量多个距离,利用其变化率进而确定,也可以通过反射光的多普勒频移来确定。

一般情况下,激光雷达探测系统的探测模式由于传感器的不同成像模式也不同。当探测模式为线性探

测模式时,此时系统传感器的电脉冲响应与入射光强线性相关,采用阈值鉴别法、恒比定时法等时间测量技术即可获取激光信号的往返时间。当测距系统为光子计数探测模式时,系统传感器工作模式为盖革模式,相比于线性探测模式,光子计数探测模式下的成像系统拥有更高的灵敏度,因此其在弱信号探测以及远距离等复杂环境有着广泛的应用^[15]。光子计数探测模式下的激光雷达也称为单光子探测激光雷达,盖革模式下单光子激光成像雷达是远距离三维成像的核心,Tan 等^[16]开发设计的基于平面阵列的光子计数激光雷达采用 32×32 光线阵列与光学镜片结合构成接收模块,实现了 1024 pixel 的灵活检测和高精度对准。

3.2.2 相干探测激光成像

相干探测激光雷达以高功率激光器作为激光发射源,广泛应用于软目标探测。为了应对软目标所产生的回波信号相对微弱的问题,相干探测激光雷达在接收端采用平衡式相干探测的探测方式。平衡式相干探测将混频之后的混频信号均分为两个支路,并将两个

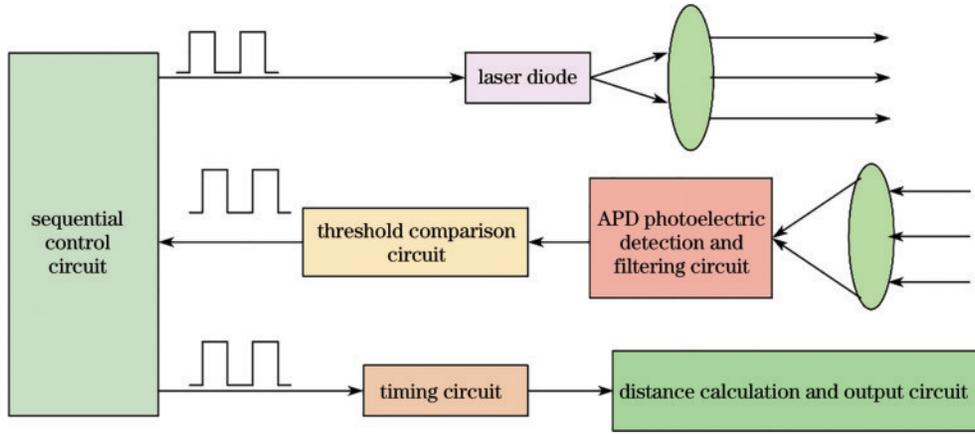


图 8 直接测距成像激光雷达作用框图

Fig. 8 Function block diagram of direct ranging imaging lidar

支路的信号分别注入两个光电探测器的光敏面上,利用差分电路和光电转换对信号进行处理,进而获取高质量的电信号。平衡式相干探测方式能有效地消除激光探测系统本身的相位噪声和探测过程中的随机热噪声,因此相干探测激光成像雷达的灵敏度以及信噪比性能较好。

相干探测激光雷达正常工作时,通过一种较为灵敏的技术可直接获取目标径向变化的速度信息,即所谓的外差方式,其相干探测原理图如图 9 所示。

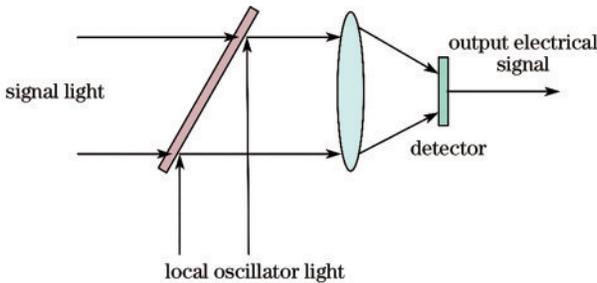


图 9 相干探测原理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of coherent detection principle

当目标物体与波源的位置存在相对运动时,目标反射回波光的频率发生变化,测量出回波信号的多普勒频移^[17],便可获取目标运动状态信息。对于单波长的相干激光雷达,在运动目标物体上反射回来的回波信号的多普勒频移为

$$f_D = 2V_c \cos \theta_{aim} \frac{v_0}{c}, \quad (14)$$

式中: v_0 为相干激光雷达发射光信号的频率,其一般与本振光的频率相同,即 $v_0 = v_L$; θ_{aim} 为激光雷达发射光线与目标速度矢量之间的夹角; V_c 为相对激光雷达静止的目标速度矢量大小。

从式(14)可以得出,目标径向运动速率 V_{c1} 为

$$V_{c1} = V_c \cos \theta_{aim} = \frac{cf_D}{2v_0} = \frac{f_D \lambda_0}{2}, \quad (15)$$

当 v_0 的变化精度足够小时,有

$$\frac{\Delta V_{c1}}{\Delta V_c} = \frac{\Delta f_D}{f_D}. \quad (16)$$

从式(16)可以得出以下结论:对于相同的差频探测能力 Δf_D 来说,多普勒频移量越大,速度检测越精确,这也是相干探测激光雷达的优点。除了确定目标的方位和距离之外,通过掌握目标其他的参数状态的数量,还可以获得目标信息的表征信息。

3.3 依据激光扫描方式分类

激光成像雷达在发展过程中,扫描成像模式发展较快,作为目前发展较为成熟的激光三维成像雷达技术,扫描式三维成像激光雷达主要包括单点激光测距系统和激光光束扫描装置两部分。利用激光光束扫描装置不断改变激光的扫描方向,从而获取待探测目标各点的位置信息,进而可得到探测目标的三维立体图像。其中,依据雷达扫描方式的差异,激光成像雷达可分为机械旋转式激光扫描成像雷达、MEMS型微镜扫描激光雷达、FLASH型激光雷达以及相控阵雷达。

3.3.1 机械旋转式激光扫描成像雷达

机械旋转式激光扫描成像雷达主要由激光器、光束扫描装置、光电传感器、GPS以及光学组件等构成。其工作原理是利用旋转的机械镜面对激光光束发射和接收到回波信号之间的时间差进行测量,进而确定目标物体的距离信息和方位信息。与其他激光雷达相比,机械旋转式激光扫描成像雷达发展较早,但由于机械旋转扫描式激光雷达的结构比较复杂且系统的各个模块的组件造价昂贵,因此存在制造成本高、稳定性差等不足。

传统的机械扫描式激光成像雷达由竖向排列的多个 Laser-APD 收发对单元组成多线结构,搭载于旋转电机实现对周围 360° 的探测成像。Ouster公司率先利用 Vcsel 芯片结合 APD 阵列进行直接的面阵雷达成像机制,该公司公布的 128 线超广角 OSO 激光雷达^[18]最大探测距离为 100 m,每秒最大点数高达 520 万,实现了 90° 全视角垂直扫描。但是,已有的固态激光雷达方案都无法利用单个雷达模块对 360° 的环境进行探测,

多采用基于多雷达模块多角度互补观测作为替代解决方案,对于整个雷达感知系统自身成本带来了新的挑战。

图 10 为上海思岚科技公司推出的 RPLIDAR 系列机械扫描式激光成像雷达系统^[19]。其中:RPLIDAR S1 采用飞行时间(TOF)测距技术,确保雷达的测量精度不会受到距离的影响,测距半径达到 40 m;RPLIDAR S2 在 S1 的基础上进一步改进,测距半径达到 50 m,采样频率为 30 kHz,角度分辨率为 0.12°,测距精度高且兼容性较好;RPLIDAR A2 360°激光扫描测距雷达的测量半径最远可达 16 m,测量频率为 16 kHz,角度分辨率为 0.225°~0.45°;相比于 RPLIDAR A2 激光雷达,RPLIDAR A3 的性能更好,拥有 16 kHz 的采样频率,且测量半径为 25 m。该系列激光雷达成本较低、结构简单,广泛应用于二维激光 SLAM 技术中,但由于无法实现垂直视场的探测,因此只能作为二维平面激光雷达。

为了弥补上述缺陷,在三维激光成像雷达上采用多线机械扫描的扫描方式即可实现激光成像雷达垂直



图 10 RPLIDAR 系列机械扫描式激光成像雷达系统
Fig. 10 RPLIDAR series mechanical scanning laser imaging radar system

视场方向的探测。以此为基础,美国的 Velodyne 公司研发出众多类型的高性能多线扫描激光雷达产品。图 11 为 Velodyne 公司研发的 Alpha Prime(VLS-128) 三维激光扫描成像雷达^[20],该产品采用 128 线激光探测外加机械旋转式扫描,最大测距距离为 300 m,扫描视场角达到 360°×40°,水平角分辨率为 0.1°~0.4°,垂直角分辨率为 0.11°,能够满足高精度探测的要求。



图 11 Alpha Prime(VLS-128)激光扫描成像雷达系统实物图
Fig. 11 Physical image of Alpha Prime (VLS-128) laser scanning imaging radar system

3.3.2 MEMS 微镜扫描成像雷达

micro-electro-mechanical-systems (MEMS),又称微型机电系统,是一种基于半导体材料发展而来的可以将微机械结构与高性能的集成电路结合在一起的具备多学科交叉特性的新兴技术。MEMS 微镜扫描成像雷达实物图如图 12 所示。MEMS 将包括反射镜在内的所有机械器件全部集成于单个芯片上,MEMS 微镜扫描成像雷达激光光束扫描利用驱动信号控制微型反射镜的快速振动来实现。与机械旋转式扫描激光雷达相比,MEMS 激光雷达体积小、扫描速度快、频率高且可靠性强,但也存在着一些不足,如微振零件会缩短系统的使用寿命、系统接收电路复杂等^[21]。

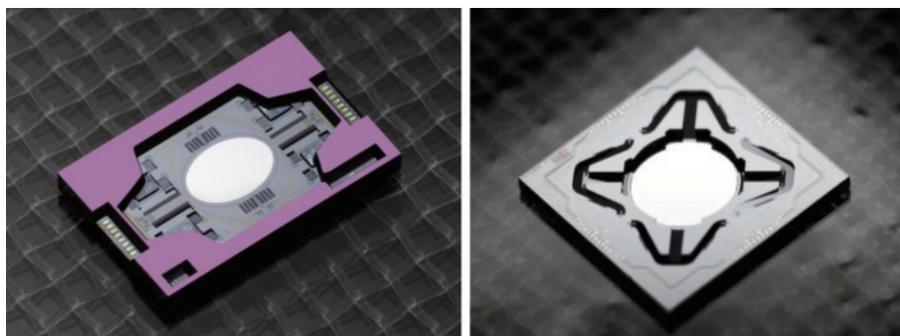


图 12 MEMS 微镜扫描成像雷达实物图
Fig. 12 Physical image of MEMS micro mirror scanning imaging radar

MEMS 激光雷达现已被广泛应用于无人机主动巡航控制系统(机载)、无人驾驶目标识别(车载)等环境中^[22]。机载激光雷达方面:德国戴姆勒-奔驰航宇公司研制了一款颇有影响力的机载激光雷达,该机载激

光雷达可对障碍物进行探测,其探测距离达到 300~500 m,探测分辨率极高,可探测 1 cm 以上的障碍物,视场达到 32°。车载激光雷达方面:2016 年,Innoluce 公司及其合作公司 Osram 公司共同推出了一款应用

MEMS 技术进行激光光束反射的扫描雷达系统样机, 如图 13 所示, 该系统的结构为收发分置, 4 个独立可控的 905 nm 激光二极管和 1 个集成控制电路共同组成了 4 通道激光器。该系统水平视场为 120°, 垂直视场为 20°, 水平分辨率为 0.1°, 垂直分辨率为 0.5°, 在白日光照射的运行环境下, 探测距离可达 250 m。国内激

光雷达产品的研发与制造迟于国外, 最具有代表的公司是速腾聚创, 2022 年其研制的 MEMS 激光产品 RS-LiDAR-M1^[23] 垂直视场角和水平视场角分别为 25° 和 120°, 垂直方向和水平方向的角分辨率为 0.2°, 探测距离超过 200 m, 测距精度为 ±5 cm, 性能稳定可靠, 能够足够满足商业需求。

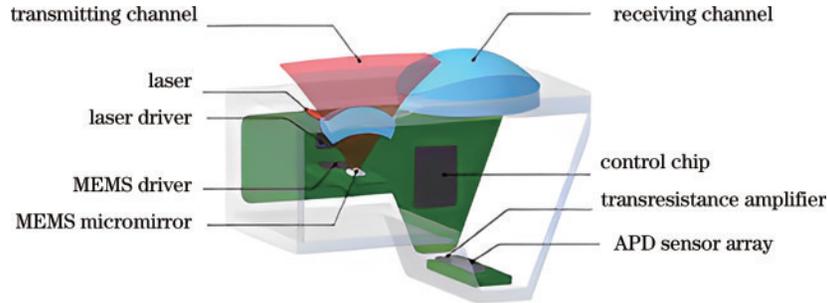


图 13 Innoluce 公司研发的基于 MEMS 的扫描 3D 传感器
Fig. 13 MEMS based scanning 3D sensor developed by Innoluce

虽然 MEMS 微镜扫描方式的发展较为迅速, 但依然存在着一些问题, 其中, 最大的问题就是不管是采用发射扫描、大视场接收的方式, 亦或是采用收发同轴的扫描方式, 都会对 MEMS 微镜扫描激光成像雷达的探测距离产生限制^[24]。上述问题也是基于 MEMS 技术的激光成像雷达系统所面临的严峻挑战, 也是急需解决的问题之一。

3.3.3 FLASH 激光成像雷达

闪光激光雷达系统 (FLASH) 是一种基于脉冲激光的雷达成像系统^[25], 其中, 每个激光脉冲都会照亮一大片区域。FLASH 激光雷达工作原理如图 14 所示。

激光发射单元在极短的时间内以面阵激光脉冲的形式对探测目标进行照射, 经探测目标反射的回波信号由接收系统中位于透镜焦平面处的阵列传感器完成光电转换, 根据阵列上每个像素点记录的飞行时间信息来进行测距, 并完成对探测目标三维图像的绘制。由于 FLASH 激光雷达工作时发射的激光会照射整个视场, 其中包括大量不需要探测的区域, 造成了激光器功率的浪费, 进而影响其探测精度和探测范围。为了减少所需的激光功率并提高稳健性, FLASH 激光成像雷达系统通常倾向于使用高时间分辨率的时间数字转换器和高带宽传感器来获得 3D 图像。

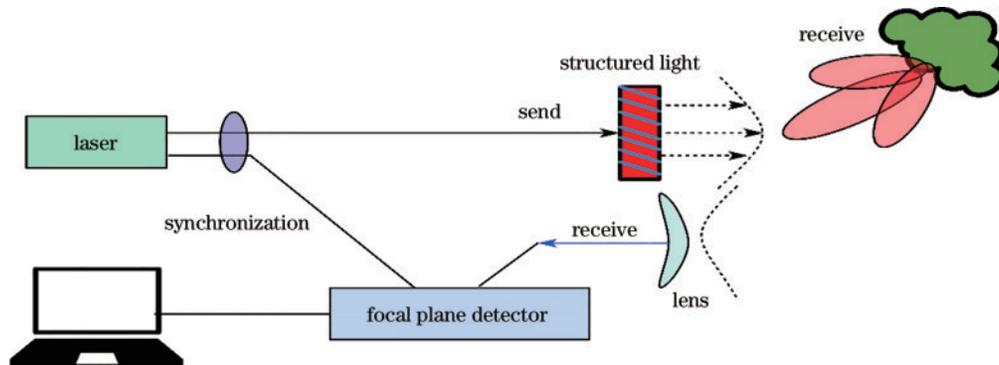


图 14 FLASH 激光雷达工作原理图
Fig. 14 Working principle diagram of FLASH LiDAR

随着现代科学技术的发展, 人们对闪光激光成像雷达的研究也更加深入并取得了实质性的进展。针对闪光激光成像雷达探测精度差、抗干扰能力差等问题^[26], 一些研究人员对闪光激光成像雷达进行改善, 提高了闪光激光成像雷达的探测距离。程坤^[27]提出一种提高测量精度的方法, 对目标反射回波信号的幅度序列和激光脉冲信号的幅度序列进行自相关运算, 通过运算获取激光雷达发射系统和目标之间的距离

信息。由侯松山^[28]提出的闪光激光雷达, 在激光雷达发射系统和接收系统之间添加挡光器件来阻挡散光干扰, 使得激光雷达接收系统能快速响应目标反射的回波信号, 亦能提高闪光激光雷达的探测精度。Park 等^[29]提出的闪光激光雷达系统通过 VCSEL 阵列形成二维激光阵列, 在增大探测距离的基础上提高了扫描视场和成像分辨率。在抗干扰性方面, 王超^[30]研究了激光雷达及其探测方法、存储介质和探

测系统,将激光探测器阵列划分成 N 个独立的探测模块,在系统完整的探测窗口内,某个独立的探测模块只会在 1 个子窗口的时间内运行,以此来缩短每个探测模块进行信号采集的时间,减小了探测过程中的信号干扰。

相比于机械式扫描激光雷达,FLASH 激光雷达内部没有转动光学扫描器,具有较高的可靠性和稳定性,易于雷达系统小型化。同时,它具有较高的成像速度,能够克服由目标运动造成的图像模糊问题,具备对运动目标快速成像的能力。

3.3.4 相控阵激光成像雷达

随着光学相控阵(OPA)技术的研究与快速发

展,为激光雷达的光束快速扫描带来了新的途径^[31]。OPA 成像技术是一种利用电光调制实现波束转向的光栅扫描成像技术,其主要的优势为不需要任何机械转动部件就可以实现光束扫描^[32]。相控阵激光成像雷达是一种对激光光束的相位进行控制和光束合成处理,进而实现光束功率提高和电扫描的激光雷达体制,该系统的成像模式为主动成像,探测过程所采用的载波为近红外波长激光。正常运行时,经过调制的激光光束照射到待探测目标表面,在目标表面进行反射产生回波信号,接收系统通过对目标返回的回波信号进行采集和处理进而确定目标的三维数据。OPA 激光成像雷达工作原理图如图 15 所示。

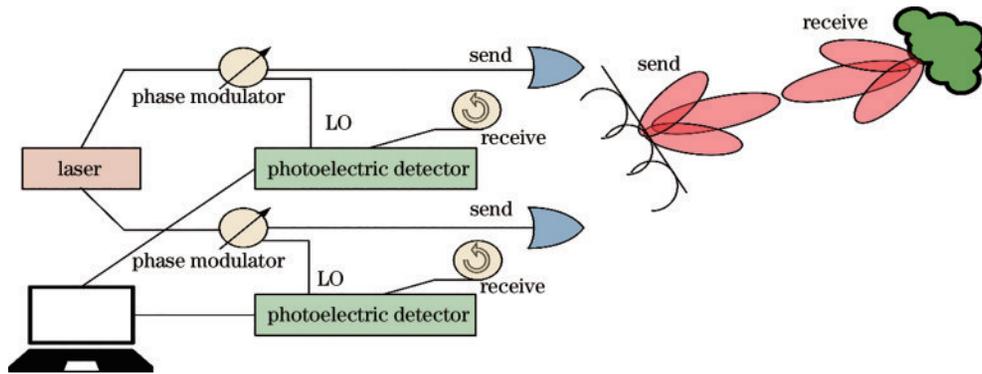


图 15 OPA 激光成像雷达工作原理图

Fig. 15 Working principle diagram of OPA laser imaging radar

基于 OPA 技术的激光雷达具有扫描速度快、扫描角度范围大、角分辨率高、相控阵单元可控性好、可以实现任意方向的波束产生等特点^[33],而且利于激光雷达系统的小型化、集成化^[34]。因此,具有光子集成电路的 OPA 技术能够以低成本进行 2D 束高速扫描,而无需任何机械运动。但与 OPA 相关的主要问题是光束尺寸小或光束发散角大,这限制了探测距离。在此基础上,国内外相关企业和研究人员以 OPA 技术为核心展开相关研究并取得了较大的进展。2022 年,万集科技发布的 WLR-732R 激光雷达^[35]采用 OPA 技术进行探测扫描,在 200 m 探测范围内测距精度可达 6 cm,垂直扫描视场和水平扫描视场分别为 37° 和 360° 。同年,Wu 等^[36]基于同步光探测和测距雷达以及自由空间光通信数据传输功能,提出一种多光束光纤相控阵,扫描视场为 $58^\circ \times 32^\circ$,单波束阵列转向角为 0.48° ,在 3 km 的自由光通信中有着 8 Gbit/s 的数据传输速率。Poulton 等^[37]基于 8192 元光学相控阵提出一种单元紧凑型相干激光雷达系统,视场角为 $100^\circ \times 17^\circ$,系统激光器调谐范围为 60 nm,能够实现对漫射目标的测距并获取各个点云的实时速度。

相比于 FLASH 激光雷达,OPA 激光雷达的激光光束能量更加集中,探测距离更远,与 MEMS 激光雷达相比,OPA 激光雷达的扫描角度更大、测量精度更高、速度更快。并且 OPA 激光雷达凭借其部件可以全

部集成电路化的优势,可以实现高度自动化的组装和调试。

3.4 依据激光源发射波形分类

随着激光器技术的不断发展,各种模式的激光器逐步成熟,其在激光成像雷达领域中得到广泛应用。根据激光源发射波形类型的不同,可分为连续型激光成像雷达系统和脉冲式激光成像雷达系统。这两种模式的激光成像雷达系统各有优缺点,在实际生活中因需求指标不同,所选取的激光源发射波形类型也就存在着差异。

3.4.1 连续型激光成像雷达

连续型激光成像雷达在探测目标时以连续光信号为探测信号,分辨率高且峰值功率较低,其主要分为单频连续波激光雷达和调频连续波激光雷达(FMCW)两种。单频连续波激光雷达以相位激光测距技术为基础,激光光束经过单频信号调制之后发射,接收系统对目标反射的回波信号进行鉴相处理,进而获取探测目标的距离信息和方位信息。FMCW 则将调频连续波测距和激光探测两种技术相互结合,进而实现激光探测成像。

现代连续波激光成像雷达系统正常运行时,比较目标返回的回波信号和设定的参考信号的瞬时功率,从而获取探测目标的位置信息^[38]。探测过程中以线性调频微波激光信号作为探测信号。与现代连续波激光

成像雷达系统不同,FMCW 则利用可调谐半导体激光器进行驱动,进而生成光频率随着时间以三角波规律变化的信号。通过对生成的信号进行分光处理,将其分为本振光和信号光两部分,激光光束经过激光发射系统发射后照射到待测目标表面上,本振光与信号光的回波信号在光电探测器上混频。

调频连续波激光雷达凭借其高性能、高精度等优势,逐渐成为当前激光成像雷达发展的主流之一。国外的一些研究人员从事调频连续波激光雷达技术的研究相对较早,并取得了一些成果。2021年,Nicolaescu等^[39]在高线性度 FMCW 激光雷达的基础上采用焦平面阵列的方式实现高精度远距离的大规模像素三维成像,在探测距离为 75 m 条件下探测精度达到 3.1 mm。次年,AEVA 公司推出的全球首个 4D 激光雷达——Aeries II,能够精确获取 500 m 范围内目标的具体移动速度,是激光雷达技术发展的重大突破^[40]。

国内在该领域的研究相对较晚,但是发展速度却比较迅速。2021年,Xu等^[41]在相位编码调制的基础上设计了一种调制连续波激光雷达,该系统能减小光多普勒频移和内反射对成像的影响,成像质量较高;同年,Wang等^[42]提出一种基于单岩性集成双截面分布反馈激光器的高分辨率 FMCW 激光雷达系统,该系统采用边带光注入锁定技术实现了 1.3% 的距离最大相对误差以及 3.18% 的速度最大相对误差;除此之外,

2023年,由张恒康等^[43]提出的 FMCW 测量误差校正方法以中频频率算法为基础进行校正,使得测量精度实现 3 个数量级以上的提升。相比于传统的脉冲型激光雷达,FMCW 拥有更高的激光成像分辨率,探测距离更远,并且可以实现多普勒探测^[44]。因此,调频连续波激光雷达在自动驾驶、测绘、三维成像等领域的应用愈发广泛。

3.4.2 脉冲型激光成像雷达

脉冲型激光成像雷达运行时发射端会发出数万个激光粒子,因此其脉冲激光输出的激光信号不是连续的,而是不断闪烁的。依据激光信号的特点可以得出,脉冲型激光探测要比连续型激光探测的激光点位多数十倍。脉冲激光雷达测距原理图^[45]如图 16 所示。整个测量系统的核心是控制与数据处理单元:首先由控制单元触发脉冲激光器发射脉冲激光,发射的激光大部分能量透过发射光学系统的分光片并照射到目标物体,同时会有一个小能量的激光反射到内部 PIN 高速光电传感器,继而向时间间隔测量单元发射计时开始信号,时间间隔测量单元开始计时;当发射出的激光返回并被接收,经过 APD 传感器以及滤波放大等处理,再由时刻鉴别单元做出回波信号的来到时刻定时,产生相应的停止计时信号发送给时间间隔单元,时间间隔单元停止计时;最后,控制系统读取时间间隔测量单元内部时间数据,并计算出对应的距离显示到终端或存储起来。

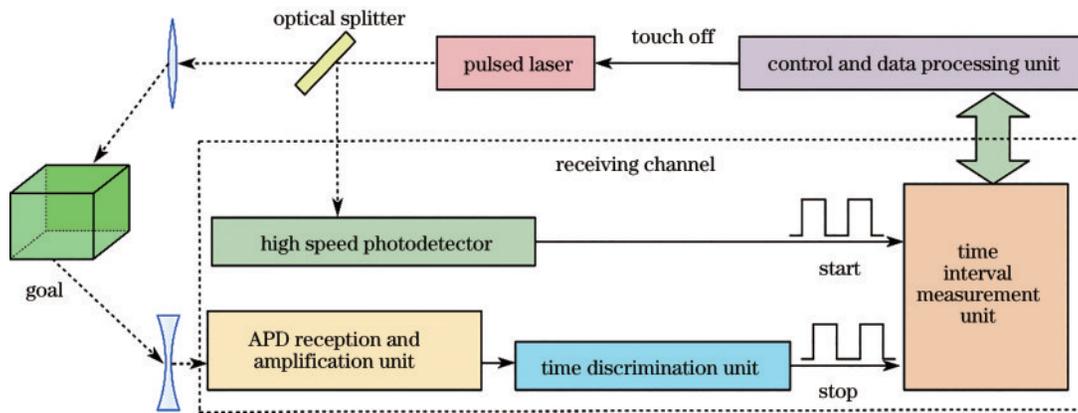


图 16 脉冲激光雷达测距原理图

Fig. 16 Schematic diagram of pulse LiDAR ranging

凭借抗干扰电磁性能强、穿透性好等优点,脉冲激光雷达技术逐渐成为国内外科研人员的研究热点,脉冲型激光雷达技术的发展速度也越来越快。2022年,Chen等^[46]提出一种基于时分复用的三维多输入多输出 MIMO 脉冲混沌激光雷达,该系统在 11 dB 的干扰强度环境下,仍具有高达 98% 的整体探测概率,且像素率也有所提高。2023年,陈勇强等^[47]提出一种基于 InGaAs 64×64 Gm-APD 阵列的脉冲激光成像雷达系统,在 60 km/h 的移动载体平台上,面积覆盖率达到 36 km²/h,满足车载移动平台地形三维快速成像的需求。国外相关人员对脉冲型激光雷达也有所研究,

2023年,Kruse等^[48]设计了一个具有终极量子距离精度的脉冲激光雷达系统,在 1.56 ps 脉冲长度的条件下,探测范围为 6000 μm,当脉冲长度为 2.12 ps 时,探测范围为 1100 μm。

当前时期,脉冲激光成像雷达技术正处于快速发展的阶段,人们对于脉冲激光成像雷达技术的关注也在不断提高,凭借其自身优势,未来脉冲式激光成像雷达技术在无人驾驶、地形勘测等领域的应用也会愈发广泛。

3.5 依据激光雷达载荷平台分类

在激光成像雷达技术的不断发展过程中,由于应

用场景、应用环境、应用条件等要求的不同,出现了以各种载体为基础的激光成像雷达系统,依据激光雷达系统载体形式的不同,常见的激光成像雷达系统可分为地基激光成像雷达、车载激光成像雷达、机载激光成像雷达以及星载激光成像雷达。

3.5.1 地基激光成像雷达

地基激光成像(TLS)雷达是一种以激光信号为基础的新型遥感探测设备,利用光束偏转机制采集被探测目标物体表面的三维点信息,进而实现被探测目标的范围测量以及精确的角度测量。范围测量主要利用 TOF 和相移(PS)两种激光扫描系统来实现,其中,TOF 通过精确的时间来确定激光飞行的时间以及激

光的速度,PS 则采用连续激光光束照明和激光光束的幅度调制来实现高频率范围的辨别^[49]。TOF 技术基于激光光束最简单的调制原理:通过光束在介质中的速度乘以光脉冲信号传播到目标的距离所需要的时间来确定距离。当在相同的光学介质中传播时,光速 c 为常数,故激光器与目标的距离与传播的时间成正比。其中,激光器到达目标的距离公式为

$$R = \frac{c \cdot t}{2}, \quad (17)$$

式中: R 是激光器与目标之间的距离; c 为光在自由介质中的传播速度,取 3×10^8 m/s; t 是激光脉冲从发射系统传播到目标然后经过反射返回到接收系统的时间。TOF 测量原理图如图 17 所示。

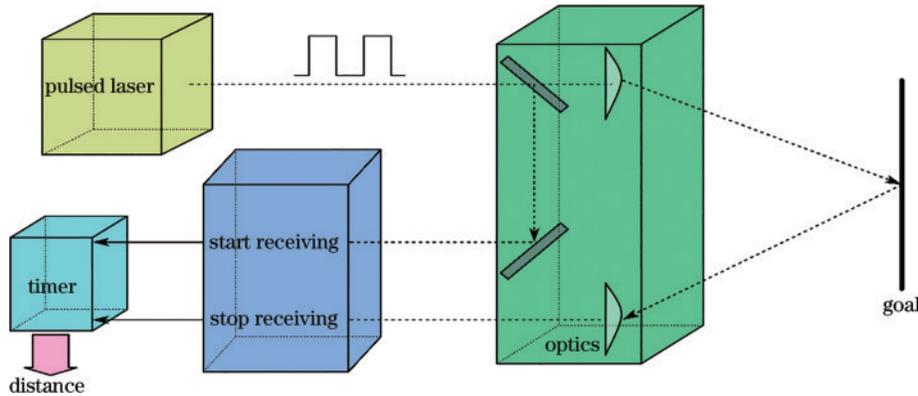


图 17 TOF 测量原理

Fig. 17 TOF measurement principle

TLS 技术可以较为直接、快速地采集被探测目标的三维立体结构信息和其精确的地理位置坐标,TLS 技术在地面上通过仪器便可以对整个陆地生态系统进行实时监测和管理,TLS 技术的发展与应用使得研究人员能够更加精确地掌握生态系统的变化,并通过分析这些变化,从而能够进一步认识到这些变化对整个陆地生态系统的影响。2022 年,Szostak^[50]利用激光雷达点云和 PlanetScope 图像对次生林植被演替过程进行研究,通过激光雷达扫描获取点云数据,并将精确的森林植被参数以直方图等数据可视化方式呈现,能够更加直观地观察植被变化。次年,Pu 等^[51]提出基于种子点自动监测的无人机激光雷达点云的单树检测与分割(ITDS)新策略,该策略使得 ITDS 的精度和效率有着显著的提高,能够更好地观察与检测森林植被的属性变化。

地基激光成像雷达为研究人员进行森林监测提供了一种非破坏性的冠层高图像分辨率的三维立体测量方法。TLS 技术应用广泛,不仅可以对森林生态系统的地形、森林植被结构等进行测量,还可以对森林景观的属性进行预测,同时也能对植被枝叶的物理特性、微生物多样性等方面作出评估^[52]。凭借在地面上便可获取传统监测手段难以采集的单木参数(生物量、单木结构等)、较高的点云分辨率以及较强

的抗干扰性能等优势,地基激光成像雷达已取代传统的森林监测方法,成为完成森林监测任务的主要手段。

3.5.2 车载激光成像雷达

车载激光成像雷达别称车载 3D 激光扫描仪,是一种移动型载体 3D 激光扫描成像系统。该系统正常工作时,发射端发射激光光束,光束经物体反射后产生回波光束,通过采集发射激光光束到目标的时间以及回波光束返回的时间,即可计算出被扫描目标与系统载体的相对距离。同时通过对采集的被扫描目标表面密集点的三维坐标、表面发射率等信息进行处理和分析,可以精确、快速地重建被扫描目标的 3D 模型,生成三维立体点云图像,绘制目标周围环境地图,进而实现环境感知的功能^[53]。

近年来,无人驾驶汽车被人们广泛讨论,众多汽车企业也着手从事无人驾驶的研发,其中,扫描激光成像雷达技术则是实现无人驾驶汽车的关键技术,为了无人驾驶汽车发展的突破,世界各国的研究人员都在积极开展车载激光成像雷达的相关研究。2004 年,第一届 Grand Challenge 比赛在美国国防部高级研究计划署的安排下顺利举办,Grand Challenge 比赛拉开了汽车自动驾驶技术高速发展的序幕,第一届 Grand Challenge 比赛的冠军是卡内基梅隆大学的 CMU

BOSS,其参赛实物图如图 18 所示。

作为智能汽车无人驾驶技术中的核心传感器,车载激光成像雷达对于无人驾驶技术安全性能的保障有着不可或缺的作用^[54]。2022年,由北科天绘主导研发的CK-128车载雷达^[55]测距距离为200 m,拥有120°×



图 18 CMU 的 BOSS 车载激光成像雷达系统

Fig. 18 BOSS onboard laser imaging radar system of CMU

3.5.3 机载激光成像雷达

机载激光成像雷达以空中飞行平台为载体,将激光测距仪器、GPS、INS 设备以及 GNSS 设备等集成于系统载体上。系统运行时,对目标区域进行扫描,实时记录扫描目标的位置、姿态以及表面反射强度等信息^[57],通过对采集的数据进行处理和分析,进一步获取目标区域的三维数据信息。

相比于传统的测量手段,机载激光成像雷达在测量时能够精确、快速地获取目标区域的数字化表面信息和数字化高程信息,并且将多光谱、超光谱等二维光学图像技术与机载激光成像雷达技术相结合可以进一步提高测量过程中对目标区域的识别能力和精度^[58]。凭借数据采集速度快、数据处理成本低等优势,机载激光成像雷达广泛应用于遮蔽目标探测、电力线巡检、水下目标探测以及复杂地形测绘等领域。

在雷达测绘领域, RGG 研发的 RIEGL VQ 系列新一代大型机载激光雷达^[59]最大测量范围为 6800 m, 2 MHz×2 MHz 的激光发射频率结合 58° 视场角可以轻松满足测绘需求。北科天绘公布的蜂鸟微型无人机雷达系统最大测距距离为 250 m, 采样频率最高可达 640 kHz, 高程测量精度小于 0.1 m, 可机载、车载等多平台作业, 效率高。1970 年, 美国航空航天局 (NASA) 研发出机载激光成像雷达测绘系统, 在测绘过程中, 研发人员将测绘系统安装在飞机平台载体上, 载体搭载着测绘系统在目标区域飞行扫描, 即可测出地表结构、建筑或植被等三维立体图像。

机载激光成像雷达避障系统在飞机低空飞行时会将周围障碍物信息在机载平台显示器上实时显示, 因此可以有效地避免飞机与地面建筑物、山体等相撞, 为飞机巡检提供有效的安全保障。由德国戴姆勒-奔驰宇航公司主导研发的障碍探测激光雷达实现了 32°×32° 的视场角, 成像能力达到 1.54 μm, 能够探测到 500

25.6° 的视场角, 拥有较强的三维感知能力, 能够应对多种复杂的交通环境, 对无人驾驶技术的发展有着重要意义。由于现在无人驾驶技术大多应用于汽车领域, 为满足汽车用户的需求, 未来车载激光成像雷达系统必将朝着低成本、小型化的方向发展^[56]。

m 范围内直径 1 cm 的电力线。2022 年, Bigazzi 等^[60]提出一种基于激光雷达与相机互补的无人机快速障碍物检测系统, 将雷达工作距离远的优势与相机高分辨率的特点相结合, 在保持较远距离探测的情况下, 有效提高了成像分辨率, 为激光雷达避障系统的发展提供了新思路。

机载激光成像雷达水下目标探测系统发射的激光是波长为 0.46~0.53 μm 的蓝绿激光, 凭借该波长能够穿透数百到数千米海水的特性, 该系统可以对水下目标进行扫描、识别、监控、跟踪和实时成像^[61]。其在军事领域也有着广泛的应用, 其中典型的为桑德斯公司主导研发的配置于“海鹰”直升机上用于水雷、炸弹等的搜寻的 ATD-111 激光雷达系统。

3.5.4 星载激光成像雷达

星载激光成像雷达以航天卫星为载体, 运行轨道高、扫描范围广、探测区域大, 不仅能够对国内区域进行精确扫描还可以对国外区域目标进行探测, 在科研领域和国防领域都有着极大的作用。并且在宇宙星体探测中星载激光成像雷达也发挥着重要作用, 科研人员对火星、月球等星体的探测中, 均依靠星载激光成像雷达采集的数据信息绘制目标星体的三维地形图。

星载激光扫描成像雷达在空间交会对接、飞行器导航着陆以及区域地形三维成像等领域有着广泛的应用。相比于国外激光雷达技术的发展, 我国的星载激光成像雷达虽然起步较晚, 但发展速度却远超其他国家。其中, 2020 年 7 月发射的“资源三号”卫星所配备的星激光测高仪采用前后沿鉴别以及多阈值多回波探测技术, 地面探测脚印缩小为 50 m, 并且拥有数据备份和双通道开机功能, 能够适应多种复杂探测环境^[62]。

国外机载激光成像雷达技术较为成熟, 其中, ICESat 和 ICESat2 星载激光成像雷达是 NASA 为实

现全球观测、生态系统测量等功能所研发的。NASA 星载激光成像雷达系统发展路线如图 19 所示,其研究

成果和发展趋势对未来太空资源和太空领域的探测具有重要意义,并对其国家具有战略性意义^[63]。

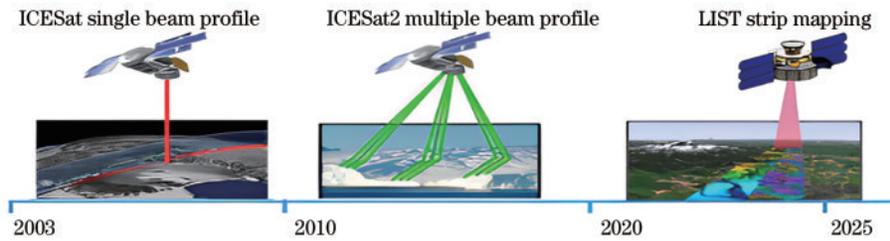


图 19 NASA 星载激光雷达系统发展线路

Fig. 19 Development route of NASA spaceborne LiDAR system

4 先进激光成像雷达的优势与不足

在激光成像雷达发展初期,激光成像雷达系统被广泛应用在地形地貌勘测、智能汽车无人驾驶、障碍扫描等诸多领域。不同体制下的先进激光成像雷达有着各自的优势和不足。

单点激光扫描成像雷达存在着精度低、效率低、分辨率低、抗干扰能力差、扫描装置结构复杂等问题,而这些问题与高效率、高分辨率、快速激光成像的发展相矛盾。

与单点激光扫描成像模式相比,线阵激光推扫成像的探测效率远远高于单点激光扫描激光成像模式,并且线阵激光扫描成像技术相邻激光探测点之间的误差减小,成像分辨率也进一步提高。线阵推扫激光成像采用 N 元线阵传感器阵列接收目标物体的回波信号,单次探测即可获取目标物体的一行或一列维度信息,具有成像速度快、扫描效率高等特点,适用于大面积或者大目标物体的探测。

而面阵非扫描激光成像雷达(多元阵列探测器)是继线阵推扫激光成像之后快速发展起来的激光三维成像技术。激光雷达系统发射的激光点阵在目标物表面形成阵列激光脚印,当传感器阵列足够大时,同一时刻所获取的目标物点信息也就越多,同比与单点扫描成像和线阵推扫成像模式恢复的相同探测目标物的分辨率较高。

5 未来发展与展望

激光成像雷达技术是将激光雷达技术、成像技术、计算机识别控制技术和数据信息处理技术等结合起来而形成的产物。目前,激光成像雷达技术的研究已是国内外研究人员所关注的重点,先进激光成像雷达凭借其探测距离远、成像分辨率高等优势,在解决地形勘测、无人驾驶、障碍识别、环境监测、电力巡检、战场监测等诸多领域的关键技术问题方面发挥着巨大作用。先进激光成像雷达在科研领域、商业领域、民用领域等诸多领域都是一种极为重要的新兴成像技术,尽管激光成像雷达技术近几年已得到快速发展,并且在多个领

域的实际应用也愈发广泛,但激光成像雷达技术在目前仍处于发展阶段,基于各种体制下的激光成像雷达系统性能和核心技术的发展现状以及技术参数,并结合科研领域、军事领域、商业领域等对激光成像雷达技术的需求,各种体制下的激光成像雷达系统还存在着一些问题,在以下几个方面仍需要进一步完善和改进:

1) 改进系统设备、简化系统结构。虽然目前的激光成像雷达系统已得到快速发展并取得重要突破,在民用、科研等诸多领域的应用也越来越广泛,但相关技术的发展都是以系统构件的增加或者结构复杂化为基础的。此种情况下的激光成像雷达系统存在着体积大、系统结构复杂、操作困难、不适合便携式作业等问题。因此,激光成像雷达技术未来发展应该在提高系统性能的基础上提高对系统结构、设备更新等方向的关注,使得雷达系统简单化、轻量化。

2) 优化系统参数、提高成像质量。不同体制下的激光成像雷达系统所应用的领域也不同,因此不同体制下系统性能参数的需求也就不一样。从成像模式、激光源作用方式和载体平台方面考虑,探测距离和探测精度是激光雷达系统发展的核心参数,因此对探测距离和探测精度的要求也就更高,未来激光成像雷达的探测距离应向千米级别、万米级继续发展,探测精度也是朝着毫米级乃至更小量级的方向发展;而从探测方法和扫描方式考虑,激光雷达的成像分辨率和视场角就显得更加重要,虽然目前激光雷达系统的成像质量较好,但仍有着较大的发展空间,未来可从提高系统配置、改进扫描方式等方面下手,增大扫描视场角,进一步提高成像质量。

3) 增强系统隐蔽性、提高系统抗干扰能力。激光成像雷达在众多领域都有着较为广泛的应用,面对的工作环境也多种多样,因此对激光成像雷达系统的隐蔽性以及抗干扰能力的要求也就更加苛刻。尤其是在军事领域和商业领域的应用,工作环境复杂,拥有较强的干扰信号和多种干扰源,因此需要对激光成像雷达系统进行不断的改进。首先在激光发射和接收的过程中要做好屏蔽工作,其次在数据处理和图像识别中要将有用信息和干扰区别开,提高系统数据的有效性,最

后更要注重系统本身的隐蔽性,为雷达系统工作提供安全保障。

4) 结合前沿技术、增强系统的网络化和智能化程度。当前激光成像雷达系统的应用主要是在地形勘测、环境监测、三维图像构建等领域,所需处理的数据量庞大,并且系统的结构较为复杂,从而使得操作过程较为复杂。因此,为了提高系统的工作性能,使得激光成像雷达技术能够有更大的突破,就需要进一步提高系统的网络化和智能化程度,从而减少操作人员的工作量。

本文对激光成像雷达的发展和现状进行综述,对激光成像雷达的探测原理进行相关描述,并在此基础上对不同分类标准的激光成像雷达进行详细的介绍说明,旨在为从事相关领域或者对激光成像雷达领域感兴趣的读者提供一些帮助。

激光成像雷达系统的分辨率、工作距离、信噪比以及抗干扰性等技术指标将随着激光器技术和传感器技术的突破进一步发展,系统综合性能将根据实际需求得到优化和完善,体制上将朝着网络化、智能化以及多元化的方向发展,先进激光成像雷达技术的研究是激光成像雷达技术的重要发展方向,对我国的国防事业和科研事业具有重要的意义。激光成像雷达是人们获取信息的重要手段之一,是未来人们关注的重点科学研究方向之一。

参 考 文 献

- [1] 徐国权, 张一帆, 万建伟, 等. 高分辨率三维成像激光雷达的应用[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 1628002.
Xu G Q, Zhang Y F, Wan J W, et al. Application of high-resolution three-dimensional imaging lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1628002.
- [2] Cui A J, Li D J, Wu J, et al. Laser synthetic aperture coherent imaging for micro-rotating objects based on array detectors[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(6): 7861809.
- [3] 王滨川, 郑焕东, 石峰. 基于国产三代微光 ICCD 探测器的三维激光成像雷达[J]. 激光与红外, 2022, 52(9): 1348-1353.
Wang B C, Zheng H D, Shi F. Three-dimensional laser imaging radar based on domestic third-generation low-light-level ICCD detector[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(9): 1348-1353.
- [4] 龚文林, 孙建锋, 邓陈进, 等. 基于相干探测的单像素激光成像雷达研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 1011003.
Gong W L, Sun J F, Deng C J, et al. Research progress on single-pixel imaging lidar via coherent detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011003.
- [5] Villa F, Severini F, Madonini F, et al. SPADs and SiPMs arrays for long-range high-speed light detection and ranging (LiDAR)[J]. Sensors, 2021, 21(11): 3839.
- [6] Piggott Alexander Y.. Understanding the physics of coherent LiDAR[D]. Cornell: Cornell University, 2022.
- [7] 高玉龙. 高灵敏度内差激光相干探测技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
Gao Y L. Research on coherent detection technology of high sensitivity heterodyne laser[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [8] Meng L C, Pedersen C, Rodrigo P J. CW direct detection lidar with a large dynamic range of wind speed sensing in a remote and spatially confined volume[J]. Remote Sensing, 2021, 13(18): 3716.
- [9] Pang Y J, Zhang K, Bai Z X, et al. Design study of a large-angle optical scanning system for MEMS LIDAR [J]. Applied Sciences, 2022, 12(3): 1283.
- [10] Yu M H, Shi M Y, Hu W S, et al. FPGA-based dual-pulse anti-interference lidar system using digital chaotic pulse position modulation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(15): 757-760.
- [11] 向雨琰, 马跃, 郭高峰, 等. 考虑脉冲高度分布(PHD)的光电倍增管光子探测模型[J]. 红外与毫米波学报, 2023, 42(1): 88-101.
Xiang Y Y, Ma Y, Guo G F, et al. Photon detection model of photomultiplier tube considering pulse height distribution (PHD)[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2023, 42(1): 88-101.
- [12] Jin L, Huang H X. Receiver performance and detection statistics of single photon lidar[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2020, 14(1): 105-109.
- [13] Hu Y Y, Xu D D, Zhou Z H, et al. Research on the influence of metamaterials on single photon LiDAR[J]. Frontiers in Physics, 2020, 8: 585881.
- [14] 刘负负. 基于面阵探测器的高精度目标探测技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
Liu F F. Research on high-precision target detection technology based on area array detector[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [15] Hu H Q, Ren X Y, Wen Z Y, et al. Single-pixel photon-counting imaging based on dual-comb interferometry[J]. Nanomaterials, 2021, 11(6): 1379.
- [16] Tan C S, Kong W, Huang G H, et al. Design and demonstration of a novel long-range photon-counting 3D imaging LiDAR with 32×32 transceivers[J]. Remote Sensing, 2022, 14(12): 2851.
- [17] Pan L, Wang Y Q, Deng C J, et al. Micro-Doppler effect based vibrating object imaging of coherent detection GISC lidar[J]. Optics Express, 2021, 29(26): 43022-43031.
- [18] Ouster推出两款新型的高分辨率数字激光雷达传感器[J]. 世界电子元器件, 2020(3): 28-30.
Ouster introduces two new high-resolution digital lidar sensors[J]. Global Electronics China, 2020(3): 28-30.
- [19] 张浩, 左杭, 刘宝华. 视觉与二维激光雷达的目标检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(3): 79-86.
Zhang H, Zuo H, Liu B H. Target detection method for visual and 2D laser radar[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(3): 79-86.
- [20] 张超然, 陈美伶. 车载激光雷达专利技术趋势[J]. 中国科技信息, 2022(10): 25-30.
Zhang C R, Chen M L. Patent technology trend of

- vehicle-mounted lidar[J]. *China Science and Technology Information*, 2022(10): 25-30.
- [21] Kang E, Choi H, Hellman B, et al. All-MEMS lidar using hybrid optical architecture with digital micromirror devices and a 2D-MEMS mirror[J]. *Micromachines*, 2022, 13(9): 1444.
- [22] Lin C H, Zhang H S, Lin C P, et al. Design and realization of wide field-of-view 3D MEMS LiDAR[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 22(1): 115-120.
- [23] Jie L, Jin Z, Wang J P, et al. A SLAM system with direct velocity estimation for mechanical and solid-state LiDARs[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(7): 1741.
- [24] 王晰晨. 基于二维 MEMS 微镜扫描的高强度分辨率三维成像激光雷达系统研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2022.
Wang X C. Research on high intensity resolution 3D imaging lidar system based on 2D MEMS micromirror scanning[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2022.
- [25] Hao Q, Tao Y, Cao J, et al. Development of pulsed-laser three-dimensional imaging flash lidar using APD arrays[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, 63(10): 2492-2509.
- [26] 吕玉婷, 王晓琼, 张茂, 等. 闪光雷达的专利技术发展[J]. *中国科技信息*, 2022(7): 20-22.
Lü Y T, Wang X Q, Zhang M, et al. Development of patent technology of flash radar[J]. *China Science and Technology Information*, 2022(7): 20-22.
- [27] 程坤. 一种激光测距方法及系统: CN111538026B[P]. 2022-06-03.
Kun C. Laser ranging method and system: CN111538026 B[P]. 2022-06-03.
- [28] 侯松山. 闪光激光雷达: CN112740074A[P]. 2021-04-30.
Hou S S. Flash lidar: CN112740074A[P]. 2021-04-30.
- [29] Park J, Choi J, Jeong C, et al. Range enhancement of a semi-flash LiDAR system using a sparse VCSEL array and depth upsampling[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12226: 122260X.
- [30] 王超. 激光雷达及其探测方法、存储介质和探测系统: CN112470026A[P]. 2021-03-09.
Wang C. Lidar and its detection methods, storage media, and detection systems: CN112470026A[P]. 2021-03-09.
- [31] 封洽华, 张福领, 董光焰, 等. 基于级联式的硅基光学相控阵激光雷达天线研究[J]. *光电子技术*, 2022, 42(4): 267-273, 279.
Feng Z H, Zhang F L, Dong G Y, et al. Research on silicon-based optical phased array lidar antenna based on cascade[J]. *Optoelectronic Technology*, 2022, 42(4): 267-273, 279.
- [32] Zhao S, Chen J Y, Shi Y C. All-solid-state beam steering via integrated optical phased array technology[J]. *Micromachines*, 2022, 13(6): 894.
- [33] Lei Y F, Zhang L X, Yu Z Y, et al. Si photonics FMCW LiDAR chip with solid-state beam steering by interleaved coaxial optical phased array[J]. *Micromachines*, 2023, 14(5): 1001.
- [34] Hsu C P, Li B D, Solano-Rivas B, et al. A review and perspective on optical phased array for automotive LiDAR[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 27(1): 8300416.
- [35] 赵祥模, 孙朋朋, 孙城浩, 等. 路侧多线激光雷达降雪噪点去除方法、装置及设备: CN113970734A[P]. 2022-01-25.
Zhao X M, Sun P P, Sun C H, et al. Method, device, and equipment for removing snow noise from roadside multi line LiDAR: CN113970734A[P]. 2022-01-25.
- [36] Wu Y H, Shao S, Li Y X, et al. Multi-beam optical phase array for long-range LiDAR and free-space data communication[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 151: 108027.
- [37] Poulton C V, Byrd M J, Russo P, et al. Coherent LiDAR with an 8, 192-element optical phased array and driving laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28(5): 6100508.
- [38] 庞亚军, 姚美菱, 孙有春, 等. 基于 MEMS 微镜的调频连续波激光雷达设计[J]. *激光杂志*, 2022, 43(4): 46-51.
Pang Y J, Yao M L, Sun Y C, et al. Design of frequency modulated continuous wave LIDAR based on MEMS mirror[J]. *Laser Journal*, 2022, 43(4): 46-51.
- [39] Nicolaescu R, Rogers C, Piggott A Y, et al. 3D imaging via silicon-photonics-based LIDAR[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11691: 116910G.
- [40] Aeva 推出全球首款具有相机级分辨率的 4D 激光雷达[J]. *世界电子元器件*, 2022(2): 37.
Aeva launched the world's first 4D lidar with camera-level resolution[J]. *Global Electronics China*, 2022(2): 37.
- [41] Xu Z Y, Yu F X, Qiu B W, et al. Coherent random-modulated continuous-wave LiDAR based on phase-coded subcarrier modulation[J]. *Photonics*, 2021, 8(11): 475.
- [42] Wang C S, Zhang Y S, Zheng J L, et al. Frequency-modulated continuous-wave dual-frequency LIDAR based on a monolithic integrated two-section DFB laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(11): 111402.
- [43] 张恒康, 王立, 郭绍刚, 等. 调频连续波激光雷达高速目标测量误差的校正方法[J]. *中国激光*, 2023, 50(13): 1310003.
Zhang H K, Wang L, Guo S G, et al. Error correction method in measurement of high-speed targets with frequency-modulated continuous-wave lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(13): 1310003.
- [44] Xiao Z Z, Wu Z M, Jiang Z F, et al. Experimental investigation on the ranging resolution of a FMCW lidar[J]. *Photonics*, 2021, 9(1): 11.
- [45] Pang C K, Zhang Q Q, Li Z H, et al. Portable pulsed coherent lidar for noncooperation targets at the few-photon level[J]. *Sensors*, 2021, 21(7): 2341.
- [46] Chen J D, Wu K W, Ho H L, et al. 3-D multi-input multi-output (MIMO) pulsed chaos lidar based on time-division multiplexing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28(5): 0600209.
- [47] 陈勇强, 贺岩, 罗远, 等. 基于盖革 APD 阵列脉冲式三

- 维成像激光雷达系统[J]. 中国激光, 2023, 50(2): 0210001.
- Chen Y Q, He Y, Luo Y, et al. Pulsed three-dimensional imaging lidar system based on Geiger-mode APD array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(2): 0210001.
- [48] Kruse S, Serino L, Folge P, et al. A pulsed lidar system with ultimate quantum range accuracy[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(14): 769-772.
- [49] Zhang Y P, Wu Y B, Xia H Y. High-spatial-resolution coherent Doppler lidar with pseudo-random phase-shift keying[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(10): 561-564.
- [50] Szostak M. Usage PlanetScope images and LiDAR point clouds for characterizing the forest succession process in post-agricultural areas[J]. Sustainability, 2022, 14(21): 14110.
- [51] Pu Y H, Xu D D, Wang H B, et al. A new strategy for individual tree detection and segmentation from leaf-on and leaf-off UAV-LiDAR point clouds based on automatic detection of seed points[J]. Remote Sensing, 2023, 15(6): 1619.
- [52] Zhang Y P, Tan Y L, Onda Y, et al. A tree detection method based on trunk point cloud section in dense plantation forest using drone LiDAR data[J]. Forest Ecosystems, 2023, 10: 100088.
- [53] Lim S, Jung J, Lee B H, et al. CNN-based estimation of heading direction of vehicle using automotive radar sensor [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2021, 15(6): 618-626.
- [54] Wang Y L, Zhu Y F, Liu H. Research on unmanned driving interface based on lidar imaging technology[J]. Frontiers in Physics, 2022, 10: 810933.
- [55] ISURESTAR[EB/OL]. [2023-03-02]. <https://www.isurestar.com/>.
- [56] Dai Z Q, Wolf A, Ley P P, et al. Requirements for automotive LiDAR systems[J]. Sensors, 2022, 22(19): 7532.
- [57] Liu F H, He Y, Chen W B, et al. Simulation and design of circular scanning airborne geiger mode lidar for high-resolution topographic mapping[J]. Sensors, 2022, 22(10): 3656.
- [58] 龚威, 史硕, 陈博文, 等. 机载高光谱激光雷达成像技术发展与应用[J]. 光学学报, 2022, 42(12): 1200002.
- Gong W, Shi S, Chen B W, et al. Development and application of airborne hyperspectral LiDAR imaging technology[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(12): 1200002.
- [59] 宿殿鹏, 阳凡林, 陈亮, 等. 无人机载 LiDAR 测深系统进行海岸带测绘的可行性分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 11-20.
- Su D P, Yang F L, Chen L, et al. Feasibility analysis of coastal zone mapping with unmanned airborne LiDAR sounding system[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 41(5): 11-20.
- [60] Bigazzi L, Miccinesi L, Boni E, et al. Fast obstacle detection system for UAS based on complementary use of radar and stereoscopic camera[J]. Drones, 2022, 6(11): 361.
- [61] Wang J B, Wang L Y, Feng S F, et al. An overview of shoreline mapping by using airborne LiDAR[J]. Remote Sensing, 2023, 15(1): 253.
- [62] 邱庞合, 陶宇亮, 王春辉, 等. 星载激光测高技术在地绘中的应用和发展[J]. 航天返回与遥感, 2023, 44(1): 102-111.
- Qiu P H, Tao Y L, Wang C H, et al. Application and development of spaceborne laser altimetry technology in surveying and mapping[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2023, 44(1): 102-111.
- [63] 刘东, 陈斯婕, 刘群, 等. 星载环境探测激光雷达及其关键技术[J]. 光学学报, 2022, 42(17): 1701001.
- Liu D, Chen S J, Liu Q, et al. Spaceborne environmental detection lidar and its key techniques[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(17): 1701001.