



DOI: 10.12086/oe.2019.190167

激光雷达探测及三维成像研究进展

刘博*, 于洋, 姜朔

中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

摘要: 激光雷达是一种可以精确、快速获取目标三维空间信息的主动探测技术,在目标的识别、分类和高精度三维成像及测量方面有着独特的技术优势,应用范围和发展前景十分广阔。本文详细阐述了激光雷达探测以及三维成像系统的各种体制、探测原理等;总结和梳理了国内外单点扫描、线阵推扫以及面阵三维成像激光雷达系统的发展现状;同时对比分析了它们在星载、机载、车载等不同平台和应用领域的技术特点及优劣势等。近年来,三维成像激光雷达逐渐从单点扫描向小面阵扫描和线阵推扫式及面阵闪光成像发展,成像速度越来越快;同时单光子探测技术逐渐成熟,探测灵敏度越来越高。随着现代探测技术越来越趋向于多种传感器的融合探测发展,三维成像的发展也趋向于主、被动成像相结合,以获取更丰富的目标信息。

关键词: 激光测距; 激光雷达三维成像; 扫描激光三维成像; 面阵激光三维成像

中图分类号: O436.3; TN247

文献标志码: A

引用格式: 刘博, 于洋, 姜朔. 激光雷达探测及三维成像研究进展[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 190167

Review of advances in LiDAR detection and 3D imaging

Liu Bo*, Yu Yang, Jiang Shuo

Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract: LiDAR is a kind of active detection technology, which can acquire the three-dimensional spatial information of the target accurately and quickly. Due to its unique technical advantages in object recognition, classification, high-precision 3D imaging and measurement, the application scope and development prospect of LiDAR are quite broad. In this article, the principles of various LiDAR detection and 3D imaging systems are introduced, and the foreign and domestic development status of single point scanning, linear array sweeping and planar array 3D imaging LiDAR systems are summarized and sorted out. Meanwhile, their technical characteristics, advantages and disadvantages in different platforms and application fields such as spaceborne, airborne and vehicular platforms are compared and analyzed. Recently, 3D imaging LiDAR is gradually developed from single point scanning to small array scanning, line array sweep and array flash imaging. At the same time, the single photon detection technology is becoming mature and the detection sensitivity is getting higher and higher. With the development of modern detection technology more and more inclined to the fusion detection of various sensors, the development of 3D imaging is also inclined to the combination of active and passive imaging to obtain more abundant target information.

Keywords: laser ranging; LiDAR 3D imaging; laser scanning 3D imaging; planar array laser 3D imaging

Citation: Liu B, Yu Y, Jiang S. Review of advances in LiDAR detection and 3D imaging[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(7): 190167

收稿日期: 2019-04-11; 收到修改稿日期: 2019-06-17

作者简介: 刘博(1979-), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光雷达探测与通信的研究。E-mail: boliu@ioe.ac.cn

1 引言

激光雷达是一种可以精确、快速获取目标三维空间信息的主动探测技术^[1-2]。三维成像激光雷达作为一种主动成像系统，与被动成像系统相比具有可获得高精度距离信息以及不受光照条件限制的优势；与微波成像系统相比，具有角分辨力高、测量精度高、抗干扰能力强以及系统易小型化的优点；在目标识别、分类和高精度三维成像及测量方面有着独特的技术优势，因而被广泛应用于军事、航空航天以及民用三维传感等领域。自上世纪六七十年代起，随着激光技术和探测器件的发展，发达国家率先在激光雷达三维成像领域进行了研究，各种距离测量技术和三维成像体制蓬勃发展。激光雷达三维成像系统按照成像体制可以分为扫描式成像系统和面阵成像系统两种，按激光距离测量体制可以分为直接脉冲测距、相位式测距以及线性调频测距等类型。不同体制的激光雷达三维成像系统具有不同的优缺点，本文就这些成像体制的原理、特点以及国内外发展现状进行了总结和梳理。

激光三维成像本质上是通过测量光脉冲或调制信号往返于雷达和目标之间的飞行时间来获得距离信息(Z轴),同时通过扫描或者多点对应测量获得垂直于光束方向平面内的方位信息(X、Y轴),因此,在对激光成像体制探讨之前,有必要对激光测距的基本原理进行了解。

2 测距原理

激光雷达要实现目标距离测量,必须确保能够接收到足够的回波信号,而计算激光回波信号的依据则是激光雷达方程,通用的激光雷达方程:

$$P_R = \frac{4P_T}{\pi\theta_t^2 R^2} \cdot \frac{\int \rho dA}{\Omega \cdot R^2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \eta_{Atm} \cdot \eta_{sys} + P_b \quad (1)$$

其中: P_R 是接收回波功率, P_T 是发射激光功率, P_b 是背景辐射和噪声功率; R 是目标与雷达之间距离, θ_t 是发射天线视场角/光束发散角; ρ 是目标表面对激光的反射率, dA 是目标表面面元, Ω 是目标光散射立体角; D 是接收天线孔径/直径, η_{Atm} 是传输介质的双程透过率, η_{sys} 是光学系统透过率。

其直观物理意义:

$\frac{4P_T}{\pi\theta_t^2 R^2}$ 为激光发射功率分摊在被光斑覆盖到的目标表面积上的部分, $\int \rho dA$ 为目标将该部分照射功

率向外散射的总散射功率, $\frac{1}{\Omega R^2} \cdot \frac{\pi D^2}{4}$ 为目标散射功率被雷达天线孔径接收的部分; 在这整个过程中还需要考虑光信号功率在雷达系统内部和自由空间中传播的损耗。由式(1)可见, 在外部条件一定的情况下, 激光发射功率越高, 接收孔径越大, 背景噪声抑制越好, 系统的信噪比越高, 这也是雷达系统设计的要点。

激光测距的方法有很多种, 除了直接利用计时电路对激光脉冲的飞行时间进行测量外, 还可以通过对发射激光信号的幅值、频率、相位等进行调制, 从而间接获得目标的距离。目前较为常用的激光测距技术大致可以分为直接脉冲飞行时间探测、幅度调制连续波探测以及频率调制连续波探测三种。除直接探测技术外, 相干探测也可用来进行测距, 但相干探测一般用于相对位移测量, 在绝对距离测量上存在较多问题, 在三维成像中较少应用, 这里不对其展开论述。

2.1 直接脉冲飞行时间探测

直接脉冲飞行时间探测顾名思义就是直接测量激光脉冲从发射到经目标散射后返回雷达的往返时间 t , 已知激光在大气中的传输速度 c , 得到被测目标的距离 $r=ct/2$ ^[3], 如图 1 所示。根据雷达系统选择线性探测器或者单光子探测器, 又可以将直接脉冲测距技术细分为线性探测和光子计数探测。线性探测模式下, 探测器的电脉冲响应与入射光强呈线性关系, 可以采用恒比定时、阈值鉴别法等高精度时间测量技术获得激光脉冲的往返飞行时间。而在光子计数探测模式下, 探测器工作在盖革模式, 具有单光子级灵敏度, 一个信号光子即能触发一次电脉冲响应, 但此时探测器只能响应回波信号的有无, 不能提供信号的强度信息。光子计数模式一般用于远距离探测, 回波信号弱, 光子数很少, 此时探测器对回波信号的响应可以认为服从泊松分布^[4], 当入射到探测器的信号和噪声的总光电子数为 m 时, 理论上产生 k 次光子事件的概率密度为

$$p(k) = e^{-m} m^k / k! \quad (2)$$

至少有一次光子事件发生即代表探测器响应到回波信号, 因此探测到信号或噪声光子事件的概率为

$$P(k > 0) = 1 - p(k = 0) = 1 - e^{-m} \quad (3)$$

对于线性探测器, 其输出的回波信号为随时间变化的电压值, 经过 A/D 采样后, 每一发激光脉冲都能获得一个随时间变化的回波波形, 探测电路带宽足够高时能够获得目标纵深剖面的回波强度轮廓, 又称为

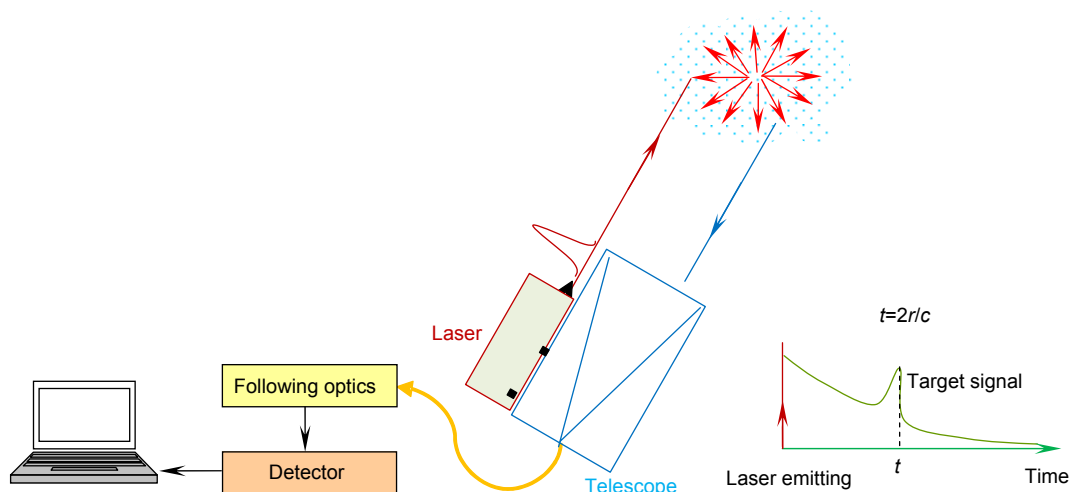


图 1 激光雷达探测示意图
Fig. 1 LiDAR detection schematic diagram

全波形探测，在信噪比足够高时能够获得更为丰富的目标信息。对于线性探测的激光雷达回波信号，我们关注的是回波功率与信噪比，为了获得更远的探测距离系统应提高发射脉冲的峰值功率，同时降低探测电路的噪声。与线性探测相比，光子计数探测更高的灵敏度使得其在远距离或者微弱信号探测领域的应用越来越广泛。对于光子计数的激光雷达回波信号，我们关注的是回波光光子数与噪声计数，为了获得更远的探测距离系统应提高发射脉冲的单脉冲能量，同时抑制噪声光子计数，而对于工作在白天的激光雷达系统来说，噪声光子中占主导地位的是日光背景噪声计数，因此采用窄带宽、高带外抑制的光学滤波器件，同时尽量减小接收光学系统的接收视场角是光子计数探测激光雷达系统的关键。对于探测灵敏度极高的光子计数探测激光雷达，也称为“单光子”探测激光雷达，这是指其接收灵敏度达到了能够响应单个光子能量的程度，但实际上，仅仅能够响应单个光子是不足以完成实际探测的，因为系统必然会存在噪声，如探测器的暗计数、背景噪声计数等，必须要把实际的回波光光子计数与这些噪声计数区分开来才能实现探测，这可以通过系统的优化设计以及信号处理算法的改进来实现。

直接脉冲测量激光雷达发射的一般为纳秒级脉宽的激光脉冲，优点是作用距离远、探测时间短，理论上单发脉冲即可完成测距，尤其随着光子计数探测器的发展与成熟，使得雷达系统可以实现上百公里甚至上千公里的测量；缺点主要是其测距精度相对较低(主

要受限于发射激光脉冲宽度和探测器响应时间抖动)，一般可以达到厘米量级，不适合要求毫米甚至亚毫米量级的高精度测量领域。

2.2 幅度调制连续波探测

幅度调制连续波 (Amplitude modulation continuous wave, AMCW) 激光雷达一般又被称为相位式激光雷达，与直接脉冲探测不同，其发射的是连续激光信号，并对激光发射信号的幅值进行调制，通过检测回波信号与发射信号之间的相位差来进行测距^[5]。如图 2 所示，当正弦信号的调制频率为 f 时，可以测到发射信号与接收信号的相位差为

$$\Delta\phi = 2\pi ft = 2\pi f \left(\frac{2r}{c} \right) \quad (4)$$

因此，目标的距离即为

$$r = \frac{\Delta\phi c}{4\pi f} \quad (5)$$

由于鉴别的相位差只能在 $0 \sim 2\pi$ 之间，超过 2π 的整周期将会带来距离模糊的问题。并且，当测量电路的鉴相精度一定时，发射信号的调制频率与雷达测距精度成正比，与探测的最大不模糊距离成反比。因此，雷达的探测距离与测距精度之间是相互矛盾的。为了解决这一问题，相位式激光雷达通常采用多个调制频率同时发射，通过较高的调制频率提高测距精度，通过较低的调制频率提高系统的最大不模糊距离，又称为“多测尺”测量^[6-7]。

相比于直接脉冲测量技术，相位式测距精度较高，一般可达毫米量级，但由于其发射的是连续信号，平

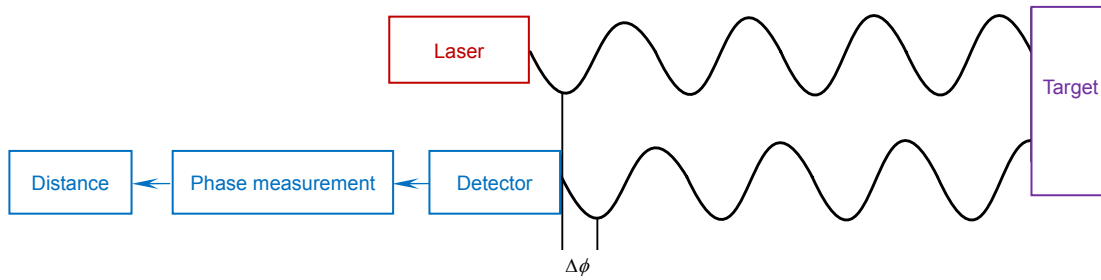


图 2 幅值调制相位测距原理
Fig. 2 Principle of AMCW LiDAR

均功率远低于脉冲信号的峰值功率，这就限制了系统的探测距离。另外，由于其必须采集完整的周期信号，这就使系统的探测时间较长。

2.3 频率调制连续波探测

频率调制连续波(Frequency modulated continuous wave ,FMCW)探测是上世纪末发展的一种较新的测距体制^[8-9]，它调制的是发射激光的光频率(波长)，可以避免幅值调制带来的发射功率损失。对于频率调制激光雷达，由于回波信号与发射信号存在时间差 t ，将回波信号与本振信号进行混频后，通过平衡探测器就可以得到他们的差频信号 f_{if} ：

$$f_{if} = \frac{4rB}{Tc} \quad (6)$$

其中： r 为目标距离， B 为调制带宽， T 为调制信号的周期。

当对发射的信号进行对称三角波线性调频时，可以同时获得被测物体的距离和速度信息。当目标或激光雷达平台在波束往返时间内运动时，受多普勒效应影响拍频信号也会发生偏移。因此，通过提取“上啁啾”和“下啁啾”的拍频频率，可以确定目标距离和速度。由式(6)可以得到目标的距离：

$$r = \frac{Tc}{4B} \left(\frac{f_{if}^+ - f_{if}^-}{2} \right) \quad (7)$$

式中： f_{if}^+ 为上变频的差频信号频率， f_{if}^- 为下变频的差频信号频率。

同时能够得到被测物体在雷达视线方向的相对速度：

$$v = \frac{\lambda}{2} f_d = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{f_{if}^+ + f_{if}^-}{2} \right) \quad (8)$$

式中： λ 为发射激光的波长， f_d 为多普勒频移。

相比于 AMCW 技术，FMCW 技术没有调制功率

损失且测距精度更高，调制带宽足够高时其测距精度甚至能够达到微米量级，其突出的优点是能够同时进行目标距离和多普勒径向相对速度的测量。其缺点为调频激光器较为昂贵，系统成本高，激光调制过程存在非线性效应，校正过程加剧了系统复杂程度。另外，由于其调制的是光频率对于高精度测距必须考虑传输介质的色散影响，并进行补偿。

3 激光雷达三维成像

激光三维成像可以理解为是对每个二维像素点的激光测距，在单点激光测距的基础上，对每个测距点的方位信息同步进行测量，即可实现三维成像。而方位信息的获取可以通过单点扫描和面阵器件成像两种方式。

3.1 扫描式三维成像激光雷达

扫描式三维成像激光雷达由单点激光测距系统配以光束扫描装置构成，是目前发展相对成熟的三维成像激光雷达技术，在地形测绘、大气环境检测、导航和防撞、空间交会对接、汽车自动驾驶等领域的应用十分广泛。扫描式激光雷达要求实现每个点的快速测距，因此大多采用直接脉冲探测的方式。扫描装置的作用是控制雷达光轴指向不同方向，依次测量目标上各点的距离，同时记录光束指向的方位-俯仰角，这样就可以得到目标的距离-角度-角度图像(rang-angle-angle)，又称为三维图像。需要注意的是，激光雷达系统一般同时存在两个相互平行的光轴，即发射光轴和接收光轴，扫描装置必须能够同步对这两个光轴进行扫描，因此一般扫描式雷达多设计为发射-接收同轴，并且为了保证接收到足够的回波功率，扫描镜的光学有效孔径不能过小，这在很大程度上限制了系统的扫描速度。为了提高系统的扫描速度，在单

点扫描的基础上,人们发展了线扫描、点阵扫描等方式^[10-12]。

目前,可用于激光雷达系统的扫描方式中较为成熟的是机械式扫描,主要有摆镜扫描^[13-15]、万向节扫描^[16-17]、转镜扫描^[18-20]、双光楔扫描^[21]等类型,通过电机驱动镜面转动,并利用几何光学的原理实现光束的偏转,具有大扫描视场和高扫描效率,是近些年最常见、应用最广泛也是最成熟的成像激光雷达扫描方式。其中 MEMS^[22-24]扫描是最新发展的一种扫描方式,其通过微型反射镜的快速振动来实现光束扫描,扫描速度较传统的机械扫描可以大幅提高,同时很好地克服了机械扫描系统体积大的缺点,可以实现系统的小型化,因其扫描结构“微观”化,无可见的机械运动部件,所以也被称为“混合固态”扫描方式,目前仍存在接收光路较为复杂,微振部件影响系统使用寿命的缺陷^[25]。对于 MEMS 扫描方式,最大的问题是,若采用收发同轴扫描的方式,则受微型反射镜尺寸的限制,其接收光学口径较小,探测距离受限;而若采用发射扫描、大视场接收的方式,则背景噪声过强,同样导致探测距离受限。双光楔扫描通过两块具有一定楔角的光学平板绕轴转动来实现折射光束的空间偏转,适用于较大口径的激光雷达系统,一般用于远距离探测成像。另外,近年来光学相控阵技术^[26](optical phase array, OPA)的发展为激光发射光束的快速扫描提供了一种新的手段,然而激光雷达除发射外还需对回波信号进行同步接收,目前技术上还有待成熟。扫描成像激光雷达从搭载平台来看主要分为星载扫描成像激光雷达、机载扫描成像激光雷达、车载成像激光雷达等。

3.1.1 星载成像激光雷达

星载扫描成像激光雷达主要用于空间交会对接、

飞行器的导航着陆以及星载对地三维成像等。2005 年 MDA Space Mission^[27]以及 2013 年中国科学院上海光学精密机械研究所^[28]均提出使用二维扫描镜作为扫描机构,如图 3 所示,分别具有 $10^{\circ}\times 10^{\circ}$ 、 $30^{\circ}\times 30^{\circ}$ 、 $120^{\circ}\times 120^{\circ}$ 的最大扫描视场角,并利用二维扫描镜扫描角度可调的特点,实现空间自主捕获、定位和跟踪合作目标,激光雷达系统工作距离覆盖范围从十几米到十几千米。

2011 年欧洲航天局(The European Space Agency)提出使用万向节作为扫描机构,实现了 $20^{\circ}\times 20^{\circ}$ 的扫描角度,成像帧频不小于 1 Hz^[29],如图 4 所示。机械扫描三维成像激光雷达因其体积小、质量轻、功耗低、精度高、技术成熟等优点,广泛应用于空间交会对接和飞行器导航着陆。

我国的空间交会激光雷达虽然起步较晚,但发展迅速,由中国科学院光电技术研究所和中电科 27 所联合研制的激光雷达已多次成功应用于我国空间站和神舟系列飞船的交会对接,技术指标已达国际领先水平。

美国国家航天局(NASA)一直致力于发展地球观测系统,测量冰盖质量平衡、冰盖高度和海冰厚度,云和气溶胶高度,以及陆地地形和植被特征等研制的 ICESat 和 ICESat2 星载激光雷达成像系统均已成功发射,完成既定任务^[30-34]。ICESat 在单像素测距的基础上,利用卫星平台的运动,实现对地表的单点扫描成像。ICESat 于 2003 年 1 月 13 日发射成功,采用线性探测体制,在轨工作 7 年后,于 2010 年由于主要载荷失效最终导致任务终结,完成了对地球表面绝大部分地区的激光测绘工作。ICESat2 同时发射三对六束激光,采用光子计数探测,每对间隔 3.3 km,沿轨光斑间隔 70 cm,测量地形高度变化小于 4 mm。ICESat2 已于 2018 年 9 月 15 日发射成功,预计在轨工作 3 年。



图 3 (a) MDA Space Mission 和 Optech 公司联合设计的星载激光雷达^[27]; (b) 中国科学院上海光学精密机械研究所提出的星载激光雷达系统^[28]

Fig. 3 (a) Space-borne LiDAR jointly designed by MDA Space Mission and Optech^[27]; (b) Space-borne LiDAR system proposed by Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences^[28]

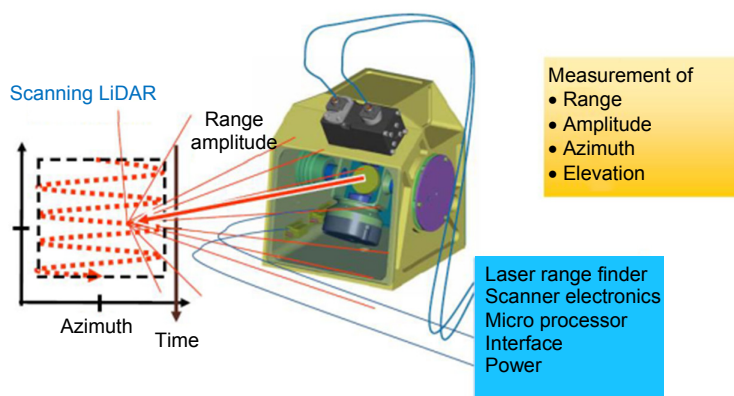


图 4 欧洲航天局设计的星载激光雷达系统^[29]
Fig. 4 Space-borne LiDAR system designed by ESA^[29]

为了实现更高的横向测量精度，NASA 正在研制 LIST(LiDAR surface topography)雷达系统，其采用 1000 像元的光子计数探测器方案，将能够实现 5 m 的横向分辨率和分米级的测距精度^[35]。图 5 为 NASA 星载激光雷达系统发展路线图。

星载激光雷达平台运行轨道较高，需要探测的距离较远(400 km 左右)，对系统的发射功率和接收口径有较高的要求。同时，星载激光雷达受平台载荷的限制，对系统的体积、功耗、质量又有严格的约束，因此具有更高灵敏度的光子计数激光雷达逐渐成为其技术发展方向。而随着对三维成像效率要求的提高，星载激光雷达系统逐渐从单点探测向着线阵推扫或面阵式成像发展，系统的横向分辨率和测距精度不断提高，系统的发展也越来越成熟。

3.1.2 机载成像激光雷达

机载扫描成像激光雷达主要应用于地形测绘、电力巡线、水下探测、遮蔽目标探测等领域。奥地利的 Riegl、瑞士的 Leica、加拿大的 Optech 和国内的海达数云、北科天汇等公司，已经有许多定型的商业化产品。以 Riegl 公司为例^[18]，目前主要有 VQ、LMS、VUX 等系列的机载激光雷达，均使用反射式旋转多面转镜作为扫描机构、角分辨率均可达到 0.001°、测距精度小于 25 mm，VQ 与 LMS 系列具有 60°的扫描角度、VUX 系列扫描角度可达 330°，如图 6 所示。

1995 年 Fibertek 公司^[21]研制出了用于直升机防撞的激光雷达系统(HLR)，如图 7 所示，以两个双楔形硅棱镜组成二维扫描器，可以探测到 440 m 外直径 1 cm 的电线。

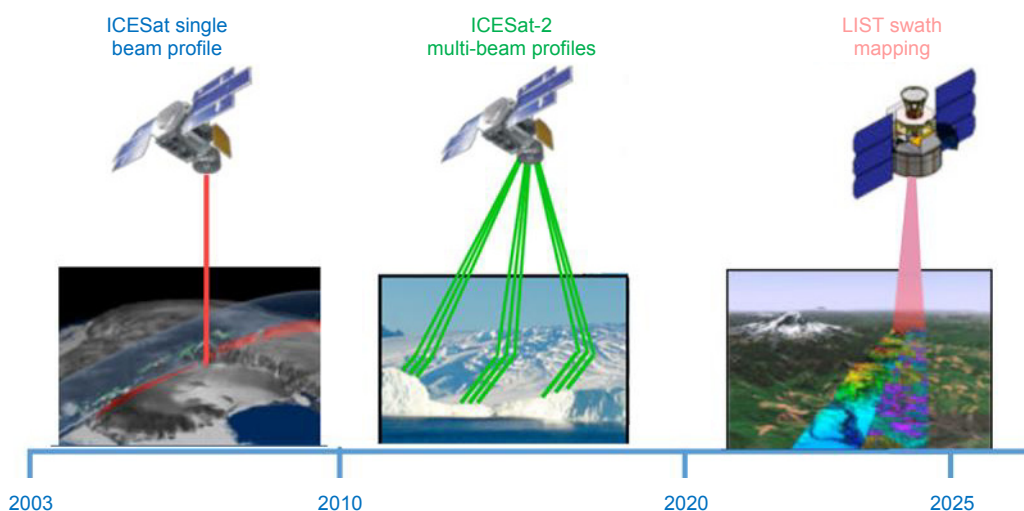


图 5 NASA 对地观测激光雷达发展路线图^[32]
Fig. 5 NASA Earth observation LiDAR development roadmap^[32]



图6 Riegl公司VQ、LMS、VUX系列机载激光雷达^[18]
Fig. 6 Riegl's VQ, LMS and VUX airborne LiDARs^[18]

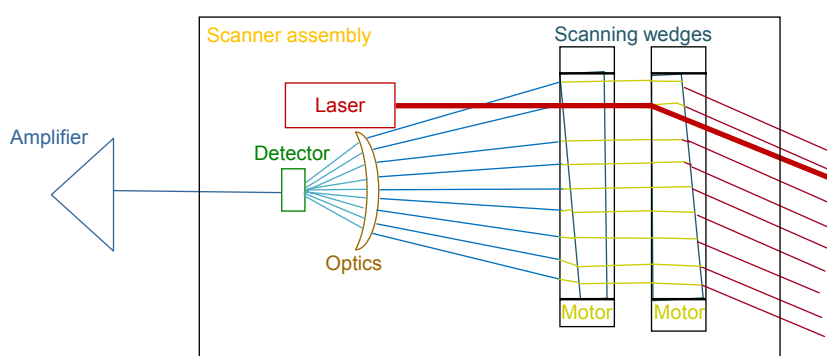


图7 Fibertek公司研制的直升机防撞的激光雷达系统主要模块示意图^[21]
Fig. 7 Schematic diagram of main modules of LiDAR system for helicopter anti-collision developed by Fibertek company^[21]

2003年MIT为了对隐藏在树林下的坦克等目标成像,提出利用衍射光学元件将光束分成 32×32 的阵列^[12],采用 32×32 GM-APD作为探测器,并采用异向旋转的双光楔作为扫描部件,提高图像分辨率;最终通过150 m的飞行试验验证了系统具有5 cm横向分辨率和40 cm的距离分辨率,能够精确识别伪装的目标。此外,2007年约翰霍普金斯大学应用物理实验室^[17]也提出采用可调整的Optech ALTM 3100商用激光雷达系统配以双轴万向节扫描装置,使用步进凝视探测模式,识别测量树木、丛林下的遮蔽目标,如图8所示。

NASA在机载扫描成像激光雷达领域也取得了丰硕的成果,2001年“Microaltimeter”首次完成了扫描单光子雷达(single photon LiDAR, SPL)的空中演示^[36]。此后,在此基础上研发了满足低、中、高空探测的“Leafcutter”^[37]、HRQLS^[11](high resolution quantum LiDAR system)、HAL^[38](high altitude LiDAR)等机载成像激光雷达系统。

机载扫描成像激光雷达系统是目前应用最广泛、发展最成熟的激光雷达系统,国内外的多家激光雷达

公司都已经推出成熟的机载激光雷达系统,在城市地形测绘、电力巡线、水下探测等领域有着广泛的应用。根据机载平台的实际应用特点,目前机载激光雷达的最大测距范围一般为3 km~6 km,测距精度为厘米级,为实现快速扫描,其激光发射重频较高,可达百kHz量级,其探测体制也在从成熟的线性探测向光子计数方向发展。

3.1.3 车载成像激光雷达

车载成像激光雷达的主要应用方向即汽车自动驾驶,其对探测范围的要求相对较低(200 m~300 m),但探测视场需要覆盖水平 360° 和垂直方向 $\pm 20^\circ$ 左右,且对横向分辨率要求较高。近年来无人驾驶汽车发展迅速,扫描成像激光雷达作为无人驾驶一种有效的解决方案,吸引着世界各国都在积极开展车载激光雷达的研究。IBEO、Velodyne、SICK、Quanergy、Innoviz、AEye、禾赛科技、北科天绘等一大批国内外公司都积极投身这一领域。Velodyne公司以 360° 水平周扫的多光束激光雷达为主要产品,扫描线数达到了16线、32线及64线,是机械旋转+多线扫描成像的典型代表,技术较为成熟。Quanergy公司则以相控阵光学扫描作

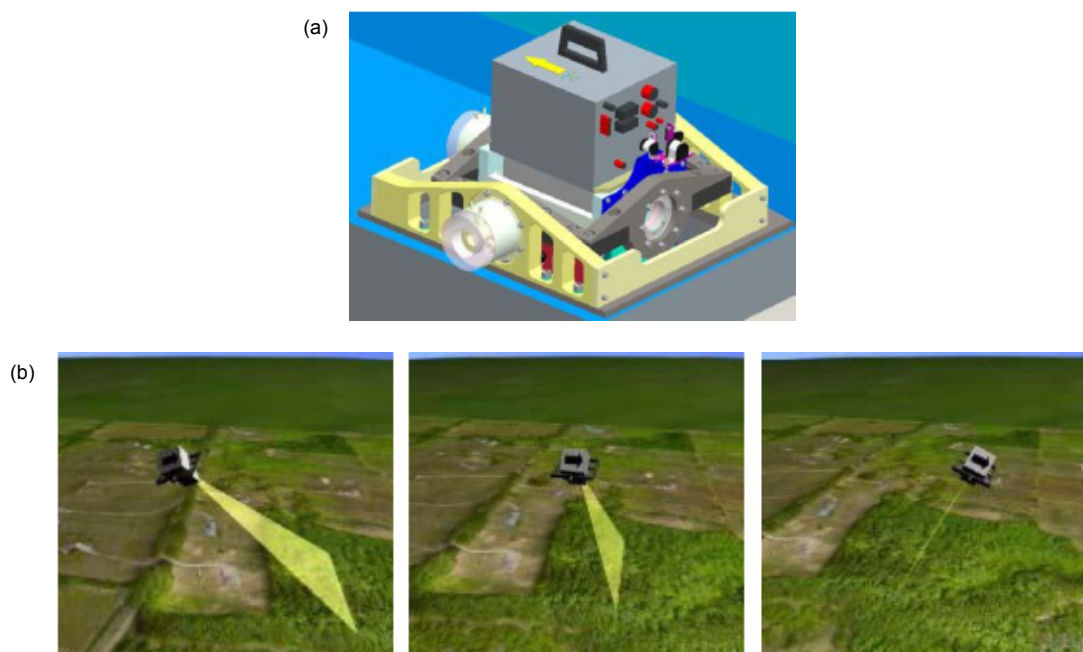


图 8 (a) 约翰霍普金斯大学应用物理实验室设计的双轴万向节扫描装置; (b) 步进凝视探测模式示意^[17]

Fig. 8 (a) A bi-axis universal joint scanning device designed by Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory; (b) Stepping gaze detection mode indication^[17]

为主打方案,但在回波信号的接收上存在短板,技术有待成熟。值得一提的是,AEye公司以MEMS微镜扫描结合摄像头实现行人、骑行者、车辆及动物等关键性目标物实时提取,较为贴近自动驾驶的实际需求。目前车载激光雷达多采用成本较低的905 nm激光二极管作为光源,但随着1550 nm激光器件的发展与成熟,车载激光雷达应更倾向于这一人眼安全的波段。

值得注意的是,对于自动驾驶来说,如果由激光雷达自己先“漫无目的”做全景扫描,构建更高分辨率、更远探测距离的三维点云图像,再去与其他传感器进行融合,这样不仅效率低、成本高,且将产生大量“无效”数据,不利于决策系统的快速处理和响应。而将激光雷达与视觉感知技术深度融合,结合人工智能技术,首先对视觉传感器“看”到的图像进行语义分割、识别,然后充分发挥“精确测距”这一激光雷达的核心优势,由其仅仅对分割后的图像区域或者“兴趣点”进行选择性的测距,可大大减少无效数据,提高系统的响应速度,应成为这一领域的技术发展方向。

车载激光雷达作为无人驾驶技术中重要的传感器之一,对于保证无人驾驶汽车行车安全具有重要意义。随着无人驾驶产业的进一步发展,车载激光雷达市场前景广阔。为了满足商业应用的需求,车载激光雷达系统实现小型化、低成本是未来的总体发展趋势。无

人驾驶汽车产业化的到来以及车载激光雷达成本的降低,将共同推动车载激光雷达产业的爆发式增长。

扫描成像激光雷达成像系统根据不同的平台应用于不同的场合,采用直接探测的方式,不需要合作目标,具有探测距离远、成像视场大的优点,在星载、机载、车载等领域有着不可替代的位置。总的来说,为了克服单点扫描成像激光雷达系统成像速度慢的缺点,扫描成像激光雷达逐渐从单点扫描向小面阵扫描和线阵推扫式成像过渡。而且,为了减小系统体积、重量、功耗,扫描成像激光雷达系统的探测器也逐渐由线性探测器向灵敏度更高的光子计数探测器过渡。

3.2 面阵式三维成像激光雷达

近年来,随着探测器件的发展,基于面阵成像体制的三维成像激光雷达得到了快速发展。它不需要复杂的扫描机构,仅发射一次激光脉冲即可获得一帧三维图像,即所谓的“闪光式”成像,能够极大地提高雷达系统三维成像的速度,特别适用于高速运动平台或高动态目标三维成像等一些无法进行扫描成像的特殊场景。目前,按照采用的光电探测器件,面阵三维成像激光雷达大致存在APD阵列和CCD相机两种探测方式。其区别在于,APD阵列的每个像元都是一个单点探测的激光像元,能够直接给出与其对应的距离

信息,而 CCD 相机作为一种积分探测器件无法直接获得距离信息,需要通过调制/解调来由所获得图像的灰度间接计算出每个像元对应的距离。对于面阵式三维成像激光雷达,为了提高系统的探测效率,与面阵探测器件相对应的,其激光发射系统应设计为相对应的点阵式分光发射,目前一般多采用衍射光学器件(diffraction optical element, DOE)来进行激光的分束,随着垂直腔面发射激光器(vertical cavity surface emitting laser, VCSEL)的快速发展,未来其将有望成为面阵式三维成像激光雷达的理想光源。

上世纪 90 年代后期,美国麻省理工学院林肯实验室(MIT/LL)对基于盖革模式工作的雪崩光电二极管焦平面阵列(GM-APD FPAs)进行了研究,并将其作为探测器应用于面阵式三维成像激光雷达。其探测阵列的规模日益增大,从 4×4 、 8×8 到 128×32 乃至 256×256 ^[39-40]。2003 年,MIT/LL 研制的焦平面阵列三维成像激光雷进行了机载三维成像试验,在 150 m 的飞行高度获得了 5 cm 的横向分辨率和 40 cm 的距离分辨率。另外,该雷达还进行了地面目标成像试验和机载植被穿透试验^[41-42],实验结果表明,采用焦平面探测器的面阵式三维成像激光雷达具有快速获取目标三维图像的能力,能够有效地探测被遮蔽的目标,实现对伪装目标的精确识别(图 9)。

从 MIT/LL 的研究历程来看,其重点都放在研制大面积 APD 上。受半导体工艺的限制,对于无法获得大面阵 APD 的单位,大多采用了小面阵 APD 结合其他探测器或者扫描方法来获得大视场以补偿空间分辨率不足的问题。另外,这种焦平面阵列式三维成像激光雷达对 APD 阵列探测器及其配套的读出电路要求很高,在阵列像元的规模日益扩大的情况下,受到像元间串扰和高速读出电路带宽的制约,因此,其三维成像的横向和纵向分辨率均难以得到大幅度的提升。

这种情况下,研究人员开始探索利用 CCD 相机

等大像元规模的探测器来实现激光三维成像的方法。丹麦国防研究机构在 2004 年提出了基于距离选通时间切片的激光三维成像方法^[43-44],利用 CCD 相机在不同的选通距离范围内成像,采用时间切片步进的方式获取由近到远不同距离上的图像,然后再将这些不同距离上获得图像的灰度信息叠加重构出三维图像。由其成像原理可知,它需要多帧图像的叠加才能重构成一帧三维图像,成像时间较慢。

2007 年,法-德圣路易斯研究所提出了一种强度相关激光三维成像方法^[45],利用 ICCD 相机获取的两幅强度调制图像即可重建出一幅距离图像,能够大幅提高三维成像的速度。然而,这种方法必须要保证激光光源的线性度,同时还要求激光脉冲和选通脉冲宽度满足 2 倍关系,实现起来较为困难。浙江大学于 2008 年提出了基于增益调制的激光三维成像方法,采用线性-恒定、线性-线性的增益调制进行距离信号的恢复,避免了对激光脉冲和选通脉冲形状特殊需求的问题,利用脉冲激光主动照明和百万像素的 ICCD 相机,对距离 1 km 处的建筑物进行了三维成像实验,其测距精度约为 1 m^[46-48],成像结果如图 10 所示。

在此基础上,哈尔滨工业大学将线性增益调制改变为指数增益调制^[49-50],采用 532 nm 的脉冲激光照明和 ICCD 相机,对距离 1 km 处的建筑物进行三维成像试验,其测距精度约为 5 m,实验结果如图 11 所示。

ICCD 一般由微通道板、荧光屏、光纤锥和 CCD 四个器件级联组成的,在其成像过程中,信号经过了“光-电-光-电”的多重转换,必然引入了较多的噪声,并且受限于微通道板本身的通道数以及荧光屏与 CCD 通过光纤锥的耦合过程,其成像的传函较低,横向分辨率有限。2018 年,中国科学院光电技术研究所提出了基于偏振调制的激光三维成像方法^[51-52],利用高灵敏度、高分辨率的 EMCCD 相机作为探测器,其成像信号直接完成“光-电”一次转换,省去了 ICCD

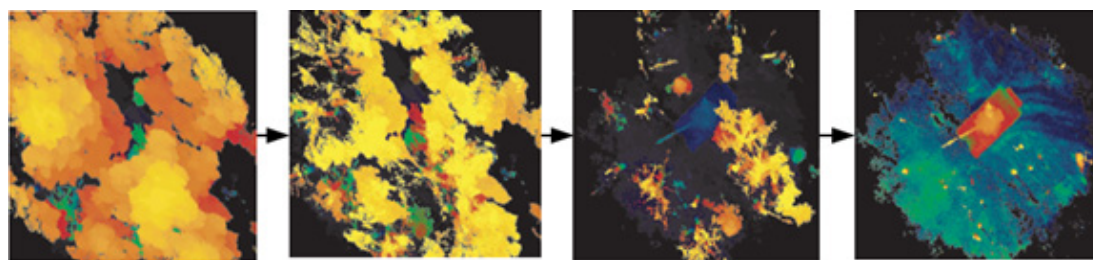


图 9 MIT 闪光式三维成像激光雷达对密林中隐蔽坦克进行探测^[41-42]
Fig. 9 Detection of hidden tanks in dense forest by MIT Flash 3D imaging LiDAR^[41-42]

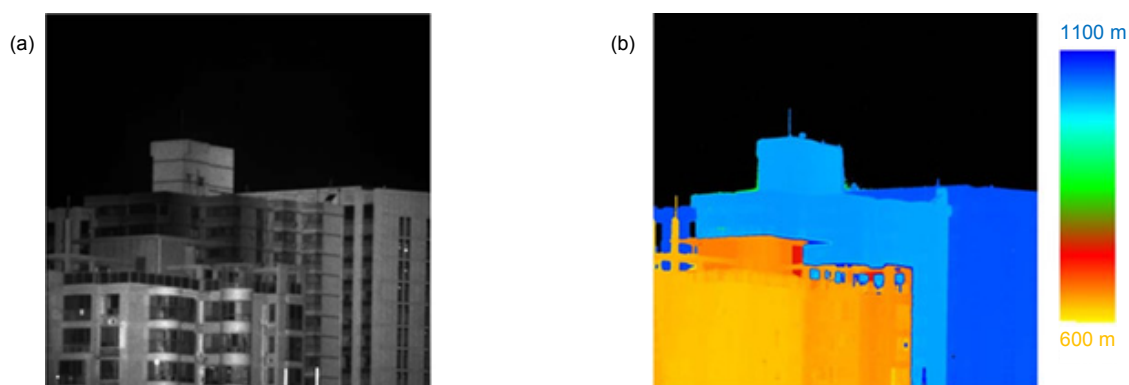


图 10 浙江大学面阵激光雷达三维成像^[46-48]。(a) 强度图; (b) 距离图

Fig. 10 3D imaging of array LiDAR in Zhejiang University^[46-48]. (a) Strength image; (b) Distance image

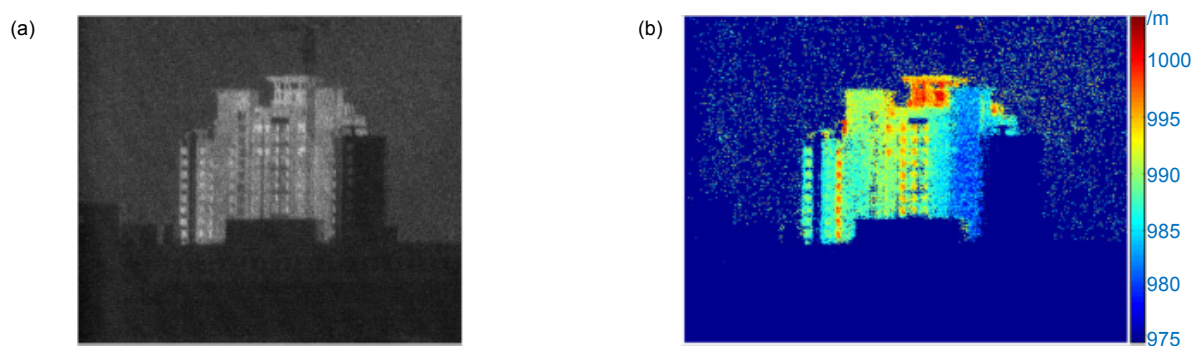


图 11 哈尔滨工业大学面阵激光雷达三维成像^[49-50]。(a) 强度图; (b) 距离图

Fig. 11 3D imaging of array LiDAR in Harbin University of Technology^[49-50]. (a) Strength image; (b) Distance image

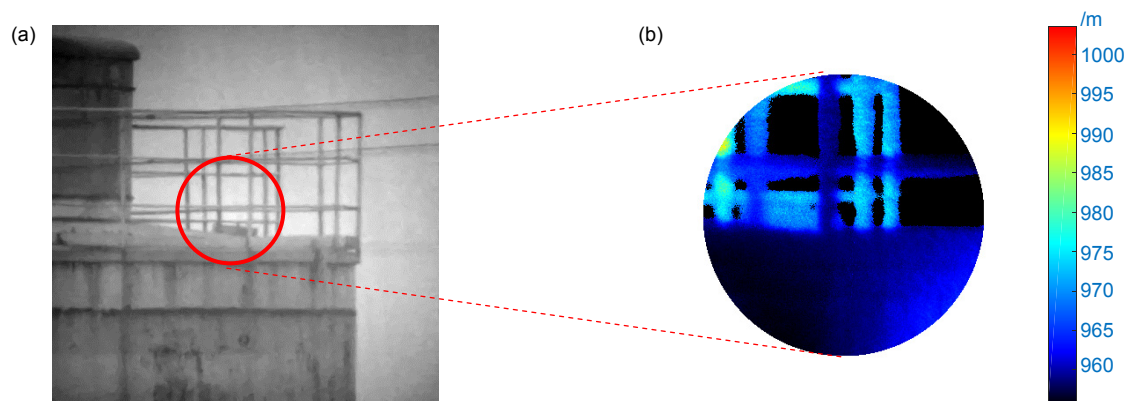


图 12 中国科学院光电技术研究所研制的激光雷达获取的远距离目标三维图像^[51-52]。(a) 灰度图像; (b) 距离图像

Fig. 12 3D image of long-range target acquired by Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences^[51-52]. (a) Grayscale image; (b) Distance image

相机的“光-电-光-电”多重转换过程，提高了系统的探测灵敏度和横向分辨率。同时，利用偏振调制技术将时间信息转换为图像的灰度信息，从而实现距离的测量。该系统仅需发射一次脉冲即可获得一幅三维图像，具备闪光三维成像能力，其曝光时间达到亚微秒量级，能够适应于高速运动平台或高动态目标的三维成像需求。

需要指出的是，面阵式激光三维成像本质上是将扫描激光成像逐点式的距离信息串行获取，改变为点阵式的距离信息并行获取，虽然其成像速度快，不需要复杂的扫描机构，具备闪光三维成像的能力，但同时也要求将系统接收的激光回波功率平均分布到每个探测像元上，在相同的激光发射总功率和接收口径下，探测像元越多，分散到每个像元上的回波功率就

越小,因此面阵成像系统的探测距离远远小于单点探测系统,一般仅适用于较近距离的成像探测。

4 结束语

三维成像激光雷达系统与传统的被动相机成像相比不仅能够捕获被测目标的强度像还能提供目标的距离图像,能够获取更为丰富的目标信息,且不受光照条件限制;与微波雷达成像系统相比,激光成像系统具有更高的距离和角度分辨率,以及更小的体积、重量和功耗。三维成像激光雷达日益成为现代成像领域不可或缺的重要组成部分,随着激光器与探测器等元器件的不断发展,激光雷达系统的发展也日新月异,其应用领域也不断扩展。三维成像激光雷达逐渐从单点扫描向小面阵扫描和线阵推扫式及面阵闪光成像发展,成像速度越来越快;同时单光子探测技术逐渐成熟,探测灵敏度越来越高,也使得激光雷达系统的体积、重量、功率进一步减小。本文对三维成像激光雷达进行了综述,详细阐述了国内外的发展现状及不同体制的工作原理,总结了不同体制成像激光雷达系统的优缺点,希望能够为读者了解现代成像激光雷达系统的发展及进行激光雷达系统的设计提供借鉴。另外,也要认识到三维成像激光雷达作为一种探测手段也有其不足之处,例如相比于被动相机成像,其横向分辨率不高,缺乏目标的纹理信息,相比于微波雷达,其更易受到云、雾、霾等大气条件的限制。现代探测技术的发展越来越趋向于多种传感器的融合探测从而获取更丰富的目标信息,三维成像的发展也趋向于主、被动成像相结合。在激光雷达系统的设计和应用中应充分考虑实际需要,尽量避免“以己之短,克敌之长”的情况,而是发挥它的优势,与可见/红外相机等被动成像相结合,充分利用他们面阵成像、大视场的优点,在兴趣点/控制点上快速、精确测距,从而做到“点面结合,各善所长”。

参考文献

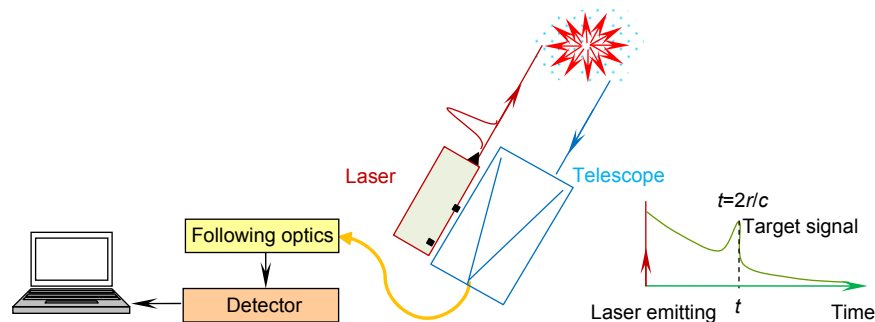
- [1] McManamon P F. Review of lidar: a historic, yet emerging, sensor technology with rich phenomenology[J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(6): 060901.
- [2] Stone W C, Juberts M, Dagalakis N G, et al. Performance analysis of next-generation LADAR for manufacturing, construction, and mobility[R]. NISTIR 7117, 2004.
- [3] Richmond D R, Stephen C C. *Direct-Detection LADAR Systems*[M]. USA: SPIE Press, 2010.
- [4] Gatt P, Johnson S, Nichols T. Geiger-mode avalanche photodiode lidar receiver performance characteristics and detection statistics[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(17): 3261–3276.
- [5] Whyte R, Streeter L, Cree M J, et al. Application of lidar techniques to time-of-flight range imaging[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(33): 9654–9664.
- [6] Jang J, Hwang S, Park K. Unambiguous range extension of a phase-shift based lidar by using two laser diodes with different modulation frequencies[C]//*Proceedings of SPIE - International Conference on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology*, Singapore, 2013.
- [7] Fan Y Y. Study of phase distance measurement based on dual-frequency modulated signals[D]. Taiyuan: North University of China, 2014.
范圆圆. 基于双频调制信号的相位法距离测量研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [8] Pierrottet D F, Amzajerdian F, Petway L B, et al. Linear FMCW laser radar for precision range and vector velocity measurements[J]. *MRS Proceedings*, 2008, **1076**: 1076-K04-06.
- [9] Gao S, Hui R. Frequency-modulated continuous-wave lidar using I/Q modulator for simplified heterodyne detection[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(11): 2022–2024.
- [10] Nobili S, Dominguez S, Garcia G, et al. 16 channels Velodyne versus planar LiDARs based perception system for Large Scale 2D-SLAM[C]//*17th Workshop on Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles*, Hamburg, Germany, 2015: 131–136.
- [11] Degnan J J. A conceptual design for a spaceborne 3D imaging lidar[J]. *e&i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 2002, **119**(4): 99–106.
- [12] Marino R M, Stephens T, Hatch R E, et al. A compact 3D imaging laser radar system using Geiger-mode APD arrays: system and measurements[C]//*Laser Radar Technology and Applications VIII*, Orlando, Florida, United States, 2003, **5086**: 1–16.
- [13] Hegna T, Pettersson H, Grujic K. Inexpensive 3-D laser scanner system based on a galvanometer scan head[C]//*International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, UK, 2010.
- [14] Wang J Y, Hong G L, Bu H Y, et al. Study on airborne scanning lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2584–2589.
王建宇, 洪光烈, 卜弘毅, 等. 机载扫描激光雷达的研制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2584–2589.
- [15] Ji R W, Zhao C M, Chen G. Analysis and calculation of scan trace of laser scanning rotation mirror[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(4): 1–5.
纪荣祎, 赵长明, 陈国. 激光扫描转镜扫描轨迹的分析计算[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 1–5.
- [16] Do Carmo J P. Imaging LIDAR technology developments at the European Space Agency[C]//*International Conference on Applications of Optics and Photonics*, Braga, Portugal, 2011, **8001**: 800129.
- [17] Roth M W, Hunnell J C, Murphy K E, et al. High-resolution foliage penetration with gimbaled lidar[C]//*Laser Radar Technology and Applications XII*, Orlando, Florida, United States, 2007, **6550**: 65500K.
- [18] Riegl. Industrial 2D laser Scanner LMS-Q120ii[Z]. Riegl, 2009.
- [19] He J. Theory of high speed of scanning system of bistatic lidar and design[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
贺嘉. 激光雷达高速扫描系统原理及设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [20] Kim J D, Jung J K, Jeon B C, et al. Wide band laser heat treatment using pyramid polygon mirror[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, **35**(5): 285–297.
- [21] Stevenson G, Verdun H R, Stern P H, et al. Testing the

- helicopter obstacle avoidance system[C]//*SPIE's 1995 Symposium on OE/Aerospace Sensing and Dual Use Photonics. International Society for Optics and Photonics, Orlando, FL, United States, 1995: 93–103.*
- [22] Hofmann U, Senger F, Soerensen F, et al. Biaxial resonant 7mm-MEMS mirror for automotive LIDAR application[C]//*2012 International Conference on Optical MEMS & Nanophotonics, Banff, AB, Canada, 2012: 150–151.*
- [23] Niclass C, Ito K, Soga M, et al. Design and characterization of a 256×64-pixel single-photon imager in CMOS for a MEMS-based laser scanning time-of-flight sensor[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(11): 11863–11881.
- [24] Lee X, Wang C H. Optical design for uniform scanning in MEMS-based 3D imaging lidar[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(9): 2219–2223.
- [25] Yu J Y. The main technical branches and development trend of vehicle LiDAR[J]. *E-science Technology & Application*, 2018, **9**(6): 18–24.
余莹洁. 车载激光雷达的主要技术分支及发展趋势[J]. 科研信息化技术与应用, 2018, **9**(6): 18–24.
- [26] Yan Y W, An J M, Zhang J S, et al. Research progress of optical phased array technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, **55**: 020006.
颜跃武, 安俊明, 张家顺, 等. 光学相控阵技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, **55**: 020006.
- [27] Nimelman M, Tripp J, Bailak G, et al. Spaceborne scanning lidar system (SSLS)[C]//*Spaceborne Sensors II, Defense & Security, Orlando, Florida, United States, 2005, 5798: 73–82.*
- [28] Luo Y, He Y, Gao M, et al. A lidar system for acquisition, pointing, and tracking used in space rendezvous and docking with cooperative target[C]//*Shanghai International Symposium on Remote Sensing and Social Development, Shanghai, 2013: 150–163.*
罗远, 贺岩, 高敏, 等. 用于空间交会对接过程中捕获、定位和追踪合作目标的激光雷达系统[C]//上海遥感与社会发展国际学术研讨会, 上海, 2013: 150–163.
- [29] Pfennigbauer M, Möbius B, do Carmo J P. Echo digitizing imaging lidar for rendezvous and docking[C]//*Laser Radar Technology and Applications XIV, SPIE Defense, Security, and Sensing, Orlando, Florida, United States, 2009, 7323: 732302-1–732302-9.*
- [30] Abshire J B, Sun X L, Riris H, et al. Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat Mission: On-orbit measurement performance[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(21): L21S02.
- [31] Sun X L, Abshire J B, McGarry J F, et al. Space lidar developed at the NASA goddard space flight center—The first 20 years[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, **6**(3): 1660–1675.
- [32] Abshire J B. NASA's space lidar measurements of the earth and planets[C]//*IEEE Photonics Society Meeting University of Maryland, Maryland, 2011.*
- [33] Seidleck M. The ice, cloud, and land elevation satellite-2 — Overview, science, and applications[C]//*IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2018: 1–8.*
- [34] Markus T, Neumann T, Martino A, et al. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **190**: 260–273.
- [35] Yu A W, Krainak M A, Harding D J, et al. Development effort of the airborne lidar simulator for the lidar surface topography (LIST) mission[C]//*Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing VII, Prague, Czech Republic, 2011, 8182: 818207.*
- [36] Degnan J, McGarry J, Zagwodzki T, et al. Design and performance of an airborne multikilohertz, photon-counting, micro-laser altimeter[C]//*Proceedings of the ISPRS Workshop on Land Surface Mapping and Characterization Using Laser Altimetry, Annapolis, MD, 2001.*
- [37] Degnan J, Wells D, Machan R, et al. Second generation airborne 3D imaging lidars based on photon counting[C]//*Advanced Photon Counting Techniques II, Boston, MA, United States, 2007, 6771: 67710N.*
- [38] Gluckman J. Design of the processing chain for a high-altitude, airborne, single-photon lidar mapping instrument[C]//*Laser Radar Technology & Applications XXI, Baltimore, Maryland, United States, 2016, 9832: 983203.*
- [39] Albota M A, Aull B F, Fouche D G, et al. Three-dimensional imaging laser radars with Geiger-mode avalanche photodiode arrays[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, **13**(2): 351–370.
- [40] Schultz K I, Kelly M W, Baker J J, et al. Digital-pixel focal plane array technology[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2014, **20**(2): 36–51.
- [41] Marino R M, Davis W R Jr. Jigsaw: A foliage-penetrating 3D imaging laser radar system[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, **15**(1): 23–36.
- [42] Vaidyanathan M, Blask S, Higgins T, et al. Jigsaw phase III: a miniaturized airborne 3-D imaging laser radar with photon-counting sensitivity for foliage penetration[C]//*Laser Radar Technology and Applications XII, Orlando, Florida, United States, 2007, 6550: 65500N.*
- [43] Busck J, Heiselberg H. Gated viewing and high-accuracy three-dimensional laser radar[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(24): 4705–4710.
- [44] Busck J. Underwater 3-D optical imaging with a gated viewing laser radar[J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(11): 116001.
- [45] Laurenzis M, Christnacher F, Monnin D. Long-range three-dimensional active imaging with superresolution depth mapping[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(21): 3146–3148.
- [46] Zhang X D, Yan H M, Jiang Y B. Pulse-shape-free method for long-range three-dimensional active imaging with high linear accuracy[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(11): 1219–1221.
- [47] Zhang X D, Yan H M, Zhou Q. Overcoming the shot-noise limitation of three-dimensional active imaging[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(8): 1434–1436.
- [48] Zhang X D, Yan H M. Three-dimensional active imaging with maximum depth range[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(12): 1682–1686.
- [49] Jin C F, Sun X D, Zhao Y, et al. Gain-modulated three-dimensional active imaging with depth-independent depth accuracy[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(22): 3550–3552.
- [50] Jin C F, Zhao Y, Sun X D, et al. Scannerless gain-modulated three-dimensional laser imaging radar[C]//*Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XII, San Diego, California, United States, 2011, 8159: 1–15.*
- [51] Chen Z, Liu B, Wang S J, et al. Polarization-modulated three-dimensional imaging using a large-aperture electro-optic modulator[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(27): 7750–7757.
- [52] Chen Z, Liu B, Wang S J, et al. Efficient subpixel registration for polarization-modulated 3D imaging[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(18): 23040–23050.

Review of advances in LiDAR detection and 3D imaging

Liu Bo*, Yu Yang, Jiang Shuo

Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China



Schematic diagram of LiDAR detection

Overview: LiDAR is a kind of active detection technology, which can acquire the three-dimensional spatial information of the target accurately and quickly. As an active imaging system, three-dimensional imaging LiDAR has the advantages of obtaining high-precision distance dimension information and not being restricted by light conditions compared with passive imaging systems, and compared with the microwave radar imaging system, it has the advantages of high angular resolution, high measurement accuracy, strong anti-interference ability and easy miniaturization. Due to its unique technical advantages in object recognition, classification, high-precision 3D imaging and measurement, it is widely used in military, aerospace and civil 3D sensing and other fields. With the development of laser and detector, various range measurement techniques and 3D imaging LiDAR systems are flourishing, and the application scope and development prospect of LiDAR are quite broad. Recently, 3D imaging LiDAR systems are gradually developed from single point scanning to small array scanning, line array sweep and planar array flash imaging. At the same time, the single photon detection technology is becoming mature and the detection sensitivity of 3D imaging LiDAR is getting higher and higher. With the development of modern detection technology more and more inclined to the fusion detection of various sensors, the development of 3D imaging is also inclined to the combination of active and passive imaging to obtain more abundant target information.

According to the imaging mechanism, the 3D imaging LiDAR systems can be divided into scanning imaging LiDAR system and planar array LiDAR imaging system. According to the laser distance measurement mechanism, it can be divided into direct pulse ranging, phase ranging and linear frequency modulation ranging. Different mechanisms of LiDAR 3D imaging system have different advantages and disadvantages. In this article, the principles of various LiDAR detection and 3D imaging systems are introduced, and the foreign and domestic development status of single point scanning, linear array sweeping and planar array 3D imaging LiDAR systems are summarized and sorted out. Meanwhile, their technical characteristics, advantages and disadvantages in different platforms and application fields such as spaceborne, airborne and vehicular platforms are compared and analyzed. In addition, it should also be recognized that 3D imaging LiDAR as a means of detection also has its shortcomings. For example, compared with passive camera imaging systems, its horizontal resolution is not high and it lacks target texture information, compared with the microwave radar, it is more susceptible to atmospheric conditions such as cloud, fog and haze. In the design and application of LiDAR systems, one should give full consideration to the actual need, try to avoid its weakness and take its advantages. It will be a good choice for combining LiDAR with visible/infrared passive imaging cameras and only taking the point of interest/controlling for fast and accurate ranging, which can make full use of their respective advantages. Hoping this article can provide some reference for readers to understand the development and design of modern 3D imaging LiDAR systems.

Citation: Liu B, Yu Y, Jiang S. Review of advances in LiDAR detection and 3D imaging[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(7): 190167

Supported by the Hundred Talents Program of Chinese Academy of Sciences

* E-mail: boliu@ioe.ac.cn