



DOI: 10.12086/oe.2019.190038

频率调制连续波激光雷达技术基础与研究进展

卢焰宇^{1,2}, 葛春风^{1,2}, 王肇颖^{1,2}, 贾东方^{1,2}, 杨天新^{1,2*}¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;²天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要: 在现有的激光雷达技术中, 频率调制连续波体制的激光雷达相比于传统的飞行时间激光雷达具有分辨力高、测量准确度高、设备轻巧、功耗低等优势; 得益于使用连续光信号进行测量, 调频连续波激光雷达还具有高灵敏度、信息量丰富、处理解调容易等特有的性能。对高分辨力、高准确度的探测需求而言具有很强的竞争力, 并具有非常好的集成化、小型化、低能耗的潜力。本文介绍了调频连续波激光雷达的基本工作原理和重要参数, 根据实现频率调制连续波的激光光源方案, 分类介绍了近十年来调频连续波雷达的研究进展, 并探讨了各种方案的特点。

关键词: 激光雷达; 频率调制; 分辨力; 相干检测

中图分类号: TN959.98

文献标志码: A

引用格式: 卢焰宇, 葛春风, 王肇颖, 等. 频率调制连续波激光雷达技术基础与研究进展[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 190038

Basics and developments of frequency modulation continuous wave LiDAR

Lu Zhaoyu^{1,2}, Ge Chunfeng^{1,2}, Wang Zhaoying^{1,2}, Jia Dongfang^{1,2}, Yang Tianxin^{1,2*}¹School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: Among the existing LiDAR technologies, the LiDAR with frequency modulation continuous wave (FMCW) format has the advantages of high resolution, high measurement accuracy, light weight, low power consumption compared with the conventional time-of-flight LiDAR. Benefitting from adopting continuous lightwave for measurement, the FMCW LiDAR also has unique performances such as high sensitivity, rich information, and easy processing and demodulation. It is highly competitive for high-resolution, high-accuracy detection needs, and has the potential for very good integration, miniaturization, and low energy consumption. This paper introduces the basic principles of different LiDAR systems, especially focusing on the important parameters of FMCW LiDAR, and classifies the research work of FMCW LiDAR in the past ten years into different types based on the light source scheme, and discusses the features of various schemes.

Keywords: LiDAR; frequency modulation; resolution; coherent detection**Citation:** Lu Z Y, Ge C F, Wang Z Y, *et al.* Basics and developments of frequency modulation continuous wave LiDAR[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(7): 190038

收稿日期: 2019-01-23; 收到修改稿日期: 2019-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61471256, 61575143, 61275084, 61377078); 天津市自然科学基金项目(18JCYBJC16800)

作者简介: 卢焰宇(1992-), 男, 博士研究生, 主要从事微波光子学和光信号调制技术的研究。E-mail: luzhaoyu@tju.edu.cn

通信作者: 杨天新(1964-), 女, 博士, 教授, 主要从事光纤激光器、光纤传感和微波光子学的研究。E-mail: tyang@tju.edu.cn

1 激光雷达简介

激光雷达(Laser detection and ranging, LiDAR)是一种使用激光进行成像、侦查和测距的主动遥感技术,具有分辨力高、精度高、设备轻巧、抗干扰能力强等优势。继1960年激光发明之后,雷达(radio detection and ranging, Radar)的工作波段和技术很快就被研究者们从微波波段迁移到了光波波段。相比于传统的微波雷达技术,激光雷达工作在波长更短的光频波段,这使得激光雷达出射波束可以实现更小的发散角与更好的方向性,而更短的工作波长也使雷达探测时可实现的距离分辨力与角分辨力大大提高。激光雷达探测时可获得目标距离、速度、反射率等丰富信息,获取的三维点云数据通常被用于生成高分辨力三维地图或者三维模型,被广泛应用于测绘学、地形学、林业学、大气物理、激光制导、航空航天、深空探测和无人驾驶等领域^[1-6]。

激光雷达可以使用紫外线、可见光、红外光或太赫兹等不同波长作为工作波段;可以探测多种材质,包括金属,非金属、岩土、云层、气溶胶等。工作波段的选用需要考虑被探测物的散射能力和传播介质的透过窗口等(环境背景噪声、人眼安全)因素^[7]。由于大气层内激光传输受到大气衰减、扰动与不良天气状况的影响较大,所以激光雷达与传统的微波雷达以及摄像装置互为重要补充;在宇宙与深空探测领域,由于没有大气的干扰,激光雷达便具有微波雷达难以比拟的优势。在实现高精度、高分辨力探测需求上,激光雷达具有非常重要的地位。

目前激光雷达的检测机制主要分为两种:非相干检测与相干检测。非相干检测也被称为直接检测,通过直接测量反射光信号强度的变化实现探测,由于探测方式较为简单直接,广泛应用于飞行时间(time of flight, TOF)激光雷达或调幅连续波激光雷达。相干检测使用外差检测的方法,通过测量回波信号与本振信号的频率或相位差实现探测。目前主流的相干检测雷达包括频率调制连续波(frequency modulation continuous wave, FMCW)激光雷达与多普勒测速激光雷达。外差检测方式相比于直接检测方式具有更高的灵敏度,这令相干检测型激光雷达可以工作在更低的发射功率下^[8]。

鉴于激光雷达,特别是相干检测 FMCW 型激光雷达的种种优势,本文针对 FMCW 激光雷达的基本工作原理与国内外研发的最新进展进行了详细介绍。

第2部分讲述了 FMCW 激光雷达的工作原理,介绍了 FMCW 激光雷达的基本性能和发射系统参数指标的关系;第3部分介绍了多种基于内调制方案产生 FMCW 信号的激光雷达;第4部分介绍了外调制方案产生 FMCW 激光信号的激光雷达系统;第5部分对文中提到的近十年来国内外多种不同调制方式的 FMCW 激光雷达系统进行了对比与总结和展望。

2 频率调制连续波激光雷达的基本原理

FMCW 激光雷达是一种发射功率恒定但光载波频率(或相位)持续周期性变化的雷达类型,通过相干检测的方式,测量回波信号与发射信号之间由距离延时引入的调制频率差和相对速度引入的多普勒频率差,从而解调出目标的距离与速度。在同等性能指标下,连续波工作模式相比于脉冲工作模式具有更小的平均发射功率和整体功耗,同时相干检测方式将会比直接检测方式具有更高的灵敏度。这意味着 FMCW 激光雷达可以工作在更低的发射功率下。相应的, FMCW 激光雷达需要一个相对复杂的发射源。

2.1 FMCW 激光雷达光源的频率调制形式

FMCW 激光雷达的光源需要根据测量目的对光载波的频率进行不同形式的调制,目前常用的包括三角波形式、锯齿波形式和正弦形式。如图1所示,发射信号的频率围绕着光载波频率 f_c 随时间 t 周期性变化,每一周期 T 称为信号重复时间,频率的变化范围 (f_1-f_2) 称为调制带宽 B 。使用三角波形状(图1(a))的调频形式可以较为容易地解调出目标反射信号的多普勒频率,从而可实现同时测距与测速;锯齿波形状(图1(b))的调频形式常用于与探测目标的相对速度引入的多普勒频移量可以忽略的时候,可以达到相对最大的探测距离。正弦形状(图1(c))调频信号的产生较为方便,但是解调方式复杂,且其精度相对于高调频线性度的调制形式略差^[9]。

本文将主要讨论线性调频连续波激光雷达。线性调频连续波是指光载波在每段频率调制的单调周期内,频率随时间线性变化的调制形式。这里介绍的三角波调制形式和锯齿波调制形式即为两种常用的线性调频连续波激光雷达光源的调频形式。

2.2 FMCW 激光雷达测距基本原理

以三角波形式频率调制为例,本节将简单介绍

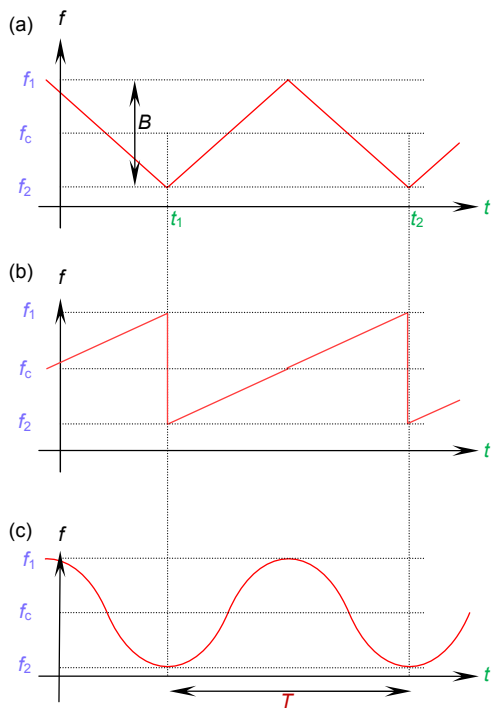


图 1 FMCW 激光雷达光源的频率调制形式，显示了光载波频率随时间的变化关系。(a) 三角波形式调频连续波信号时频图；(b) 锯齿波形式调频连续波信号时频图；(c) 正弦波形式调频连续波信号时频图

Fig. 1 Frequency modulation pattern of the FMCW lidar source, representing the relationship between the frequency of optical carrier wave and the time. (a) Time frequency relationship of FMCW with the triangular modulation; (b) Time frequency relationship of FMCW with the sawtooth modulation; (c) Time frequency relationship of FMCW with the sine modulation

FMCW 激光雷达测距的基本原理。如图 2(a)所示，发射信号的频率随时间周期性上下线性变化，上升时间与下降时间相同，频率平均值为 f_c 。从准直器出射照射到被测目标再散射回接收端所用的传输延时记为 τ ，信号频率的变化范围记为带宽 B 。由于信号频率随时间线性变化和被测目标相对位移产生的多普勒效应，接收到的回波信号与本振信号的频率之间产生了频率差 df ，图 2(b)，频率差由因距离延时 τ 引入的频率变化量 f_R 和多普勒频移 f_D 构成，在频率上升沿产生的频率差 Δf_1 和频率下降沿产生的频率差 Δf_2 与 f_R 之间各相差 f_D 。那么由距离引入的差频量 f_R 和多普勒频移 f_D 就可以通过相干解调的方式由 Δf_1 和 Δf_2 计算得出：

$$\begin{cases} f_R = \frac{\Delta f_1 + \Delta f_2}{2} \\ f_D = \frac{|\Delta f_1 - \Delta f_2|}{2} \\ \gamma = \frac{B}{T/2} = \frac{2B}{T} \\ \tau = \frac{f_R}{\gamma} = \frac{(\Delta f_1 + \Delta f_2)T}{4B} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R = \frac{c \cdot \tau}{2} = \frac{c \cdot f_R}{2\gamma} = \frac{c(\Delta f_1 + \Delta f_2)T}{8B} \\ v = \frac{f_D \cdot c}{f_c} \end{cases}, \quad (1)$$

式中： γ 代表发射信号的频率变化速率， R 代表激光雷达与被测目标的距离， c 代表光速， v 代表目标速度在激光雷达与被测目标连线上的投影， f_c 代表发射信号光载波的中心频率。由此，即可解调出被测目标的距离 R 与相对速度 v 。

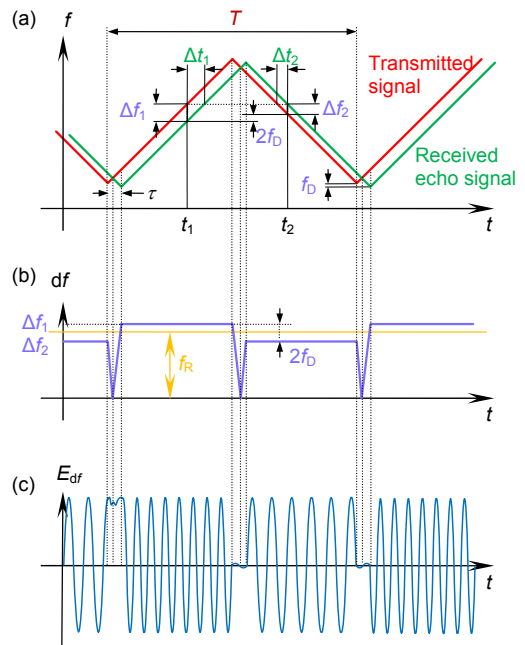


图 2 (a) 三角波形式频率调制下发射信号与接收回波信号的时频域关系示意图；(b) 经相干检测所得到拍信号的时频关系图；(c) 接收端拍频电信号的时域波形^[10]

Fig. 2 (a) Time frequency domain diagram of transmitted signal and received echo signal under the triangular modulation; (b) Time frequency domain diagram of the beat signal after coherent detection; (c) Time domain waveform of the received beat signal^[10]

在激光雷达接收端能够实际接收到的拍频电信号如图 2(c)所示，拍频电信号由本振信号和回波信号在

光电探测器(photodetector, PD)上相干拍频产生。三角波形调频光在扫频周期 T 内上升与下降沿的拍频信号频率不相等是由于多普勒效应导致的,通过对单调区间内的每一段电信号做傅里叶变换,即可得到这段时间内拍频电信号的频率值用于距离解调计算。

2.3 FMCW 激光雷达的重要指标

本节将介绍 FMCW 激光雷达的指标与其光源性能参数和一些其他因素的关系:

1) 最大探测距离:对于激光雷达而言最重要的指标之一便是最大探测距离,这项指标受到很多因素的综合影响。其中发射信号的重复周期 T 决定了激光雷达能实现的最大无模糊距离,只有在时间 T 或者更短的时间内被接收到的回波信号才能解调出正确的距离信息,在超出 T 时刻接收到的回波信号会因与后续发射信号产生的回波无法区分而产生模糊。对于 FMCW 激光雷达这种相干探测体制的雷达而言,最大探测距离还受到发射光信号的相干长度影响,超出相干长度的目标回波会使信号功率极大下降,信噪比(signal noise ratio, SNR)减小以至于无法检测。此外发射光功率、接收器带宽与灵敏度、传输介质损耗、目标散射效率、天线孔径、环境背景噪声等因素也会引起 SNR 的变化,所以在设计时需要考虑应用场景综合分析^[11]。

2) 距离分辨力:FMCW 激光雷达的距离分辨力 S_r (range resolution)代表该雷达单次测量中可区分的目标间最小距离,单纯地由光源调制带宽 B 决定^[12],并满足: $S_r \geq c/(2B)$;

3) 角分辨力:FMCW 激光雷达的角分辨力(angular resolution)指激光雷达在单次探测中把距离 R 相同但是相对角度不同的目标区分开的能力,根据高斯光束的瑞利判据^[13],光束发散角 θ 受到发射端准直器的孔径 d 与光载波波长 λ 的影响,满足 $\theta=1.27\lambda/d$;那么在测量距离为 R 时,可区分的径向距离 S_A 可表示为 $S_A \geq 2R \cdot \sin(\theta/2)$ 。

在工作波长固定的前提下,为了提高角分辨能力,常用的方法是增加天线孔径 d 以减小光束发散角。所以用于成像的 FMCW 激光雷达通常和综合孔径技术结合,通过对目标在不同位置的多次测量与相关算法增大虚拟孔径以提高角分辨能力^[14]。

4) 距离测量与角测量的准确度:FMCW 激光雷达的距离测量准确度(accuracy)代表雷达测得的距离分布的均值与真实距离之间的差距,其主要受到光源频率调制的线性度和测量系统校准的影响;角测量准

确度受到发射端扫描器件的角度准确度影响。

5) 距离测量与角测量的精度:FMCW 激光雷达的距离测量与角测量结果的精度(precision)反映了雷达对同一目标测量结果的一致性程度,受到光源的各参数稳定性和角扫描重复性与最小步长的影响。

6) 测量速率:FMCW 激光雷达的测量速率是指雷达获得一个探测数据的时间的倒数,其主要受限于调制信号重复速率,高重复速率代表了更快的测量刷新率与测量效率。但是值得注意的是,高重复速率和长可探测距离不可兼得,需要考虑信号重复周期、接收端带宽,ADC 采样速率和存储器深度等限制因素并具体分析。

2.4 FMCW 激光光源的产生方式

从上述分析中可以看出 FMCW 激光雷达的指标主要受限于光源的性能参数:在接收端的相干检测方法都比较成熟^[15];由于高速模数转换器(analog to digital converter, ADC)、数字信号处理(digital signal processing, DSP)等技术的快速发展,后端数据的采集和处理目前也不是整体指标的瓶颈;所以如何产生性能优越的光调频信号成为了 FMCW 激光雷达研究者们关注的重点。

根据调谐器件与激光器的关系,目前实现激光光载波频率调制的方法可以分为内调制技术和外调制技术两种。内调制技术是指调制过程与激光振荡建立同时进行的调制技术,通过调制改变激光腔的谐振参数,从而实现激光器输出频率的变化,主要包括调制谐振腔的光学长度或改变腔内的增益损耗谱位置等方式;外调制技术是指在激光振荡建立之后,在激光出射的光路上使用调制器对光场参数进行调制的技术。

3 基于内调制技术的 FMCW 激光雷达

内调制技术是指在激光建立的过程中使用调制信号去控制激光振荡的某一参数,以达到控制激光的频率,强度等参数的目的。其中激光振荡的参数包括谐振腔腔长、增益谱位置、腔内损耗等,可以通过腔长调谐,电流注入调谐等方式实现。

3.1 外腔激光器腔长调谐方案

2002 年,美国海军实验室(Naval Research Laboratory)在 *Optics Letters* 上首次报道了使用综合孔径与频率调谐光源的二维扫描模式成像激光雷达^[16],实验装

置如图 3(a)所示。实验中光源采用了 New Focus 公司的 1550 nm 波段的单纵模可调谐外腔激光器(New Focus 6328HP),通过调节一端腔镜光栅的倾角作为腔内选模方式实现输出波长线性调谐,调谐范围 10 nm,调谐速度为 10 nm/s,输出功率为 5 mW。发射端采用了 8 cm 焦距的准直透镜,使发射光束在 30 cm 距离处的目标上呈 1 cm 左右的光斑,并以 50 μm 的步长在 x 方向上步进扫描 200 步。经过综合孔径算法^[17]处理后, x 方向分辨力达到 90 μm , y 方向分辨力达到 170 μm ,目标和测量结果图 3(b)、3(c)所示。

而后在 2005 年,美国航空航天公司的 Buell 等人采用类似的方案使用 FMCW 激光雷达对散射型非合作目标进行成像^[18-19],如图 4(a)。其光源采用 NetTest Tunics Plus 公司的外腔式半导体激光器,使用了 1539 nm~1568 nm 之间约 20 nm 的波长调谐范围,单次调谐周期为 0.36 s,等效频率调谐速率为 10.5 THz/s。该系统距离分辨力的理论值达到了 0.06 mm,并使用综合孔径技术在 2 m 的探测距离上实现了优于 0.5 mm 的距离分辨力,成像结果和被测目标见图 4(b)所示。

上述方案由于腔长调谐过程中实现发射波长线性变化,而在频率域中呈非线性,使得有效信号区间变短,会对测量准确度和分辨力都产生影响,所以在解调过程中需要引入参考臂进行辅助。此外,由于使用

外腔调制光源,实际应用中还需要注意同步每次调谐的初始频率是否一致,以满足测量一致性的要求。

3.2 半导体激光器注入电流调谐方案

2009 年加州理工大学(Caltech)的 Yariv 课题组提出使用分布反馈(distributed feedback,DFB)激光器产生线性频率调制光的方案,如图 5(a)所示^[20]。该方法结合了半导体激光器的注入电流调谐效应和光电反馈环技术,实现了 1550 nm 波段光源在 1 ms 内 100 GHz 的频率调谐范围,并使用此光源进行实时测距,其距离分辨力达到了 1.5 mm,如图 5(b)。该小组于 2012 年使用垂直腔表面发射激光器(vertical cavity surface emitting laser,VCSEL)实现了 2 ms 内 400 GHz 的频率调谐范围^[21],表明该方案可以用于多种半导体激光器。半导体激光器注入电流的变化改变了共振腔内的折射率,从而使腔内光程和谐振纵模模式都产生变化,实现了激光器输出纵模波长的调谐;腔外使用光电锁相技术,通过负反馈作用实现了激光器频率调谐的线性变化,保证了频率调谐的高线性度。这种方案避免使用机械振动的部件,完全电控可调,而且调谐方式简单。但是由于半导体激光器本身的结电容限制了激光器的响应速率以及腔内光场建立时间的存在,使得可调谐范围、调谐速率、输出线宽等参数较难进一步提高。

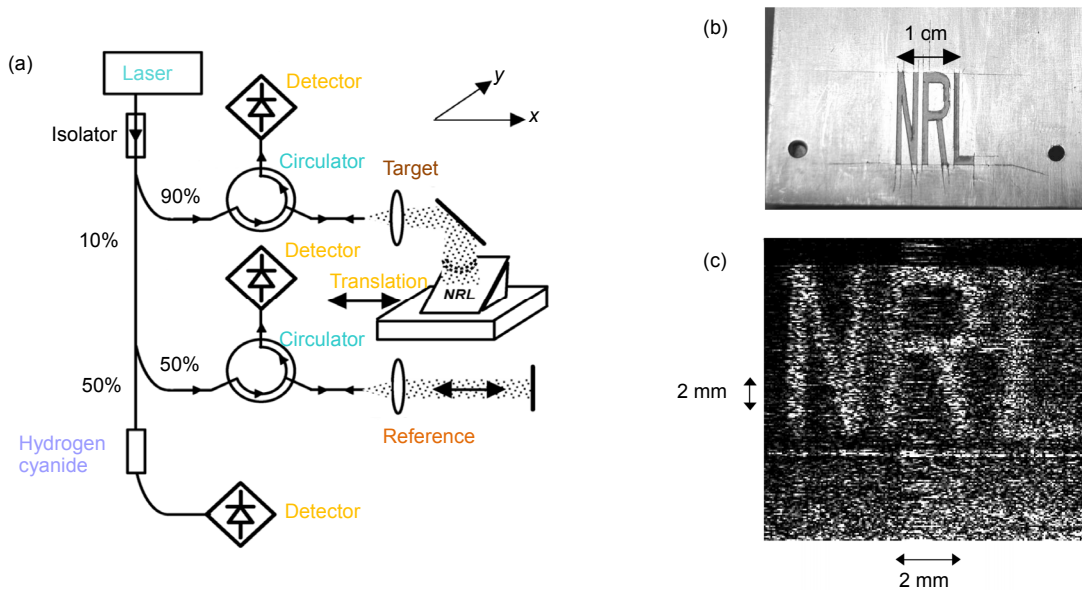


图 3 (a) 实验装置图; (b) 待测量目标照片; (c) 综合孔径成像结果^[16]

Fig. 3 (a) Experimental setup; (b) Target constructed from the letters NRL cut out from reflective tape and mounted upon a scratched aluminum plate; (c) SAIL-processed image of the sample^[16]

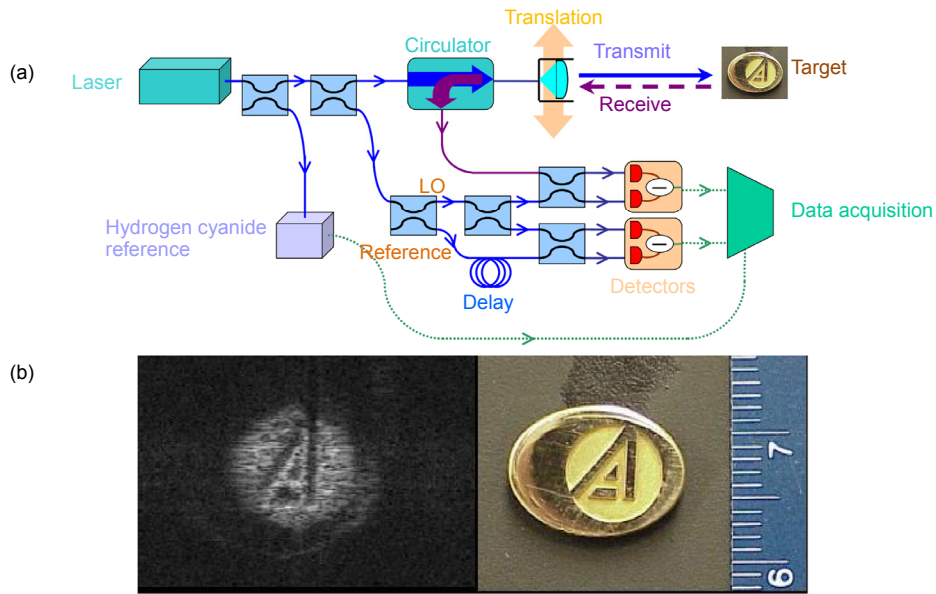


图 4 (a) 基于光纤的综合孔径雷达实验装置布局图，其中综合孔径部分通过位移平台移动孔径形成；(b) 综合孔径成像结果与待测量目标照片^[18]

Fig. 4 (a) Component layout for the fiber-based SAIL system. The synthetic aperture is created by using a translation stage to scan the aperture across the target; (b) SAIL image of a tie tack with a "circle A"^[18]

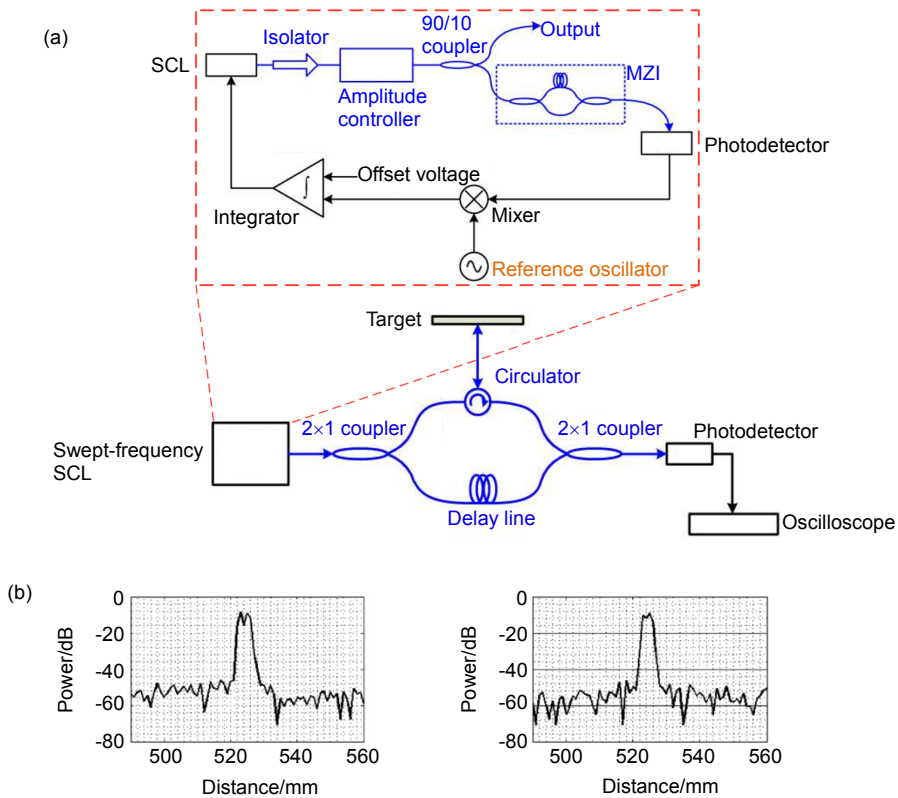


图 5 (a) 用于产生宽带线性调频光的光电反馈环路与测量装置示意图；(b) 使用本扫频光源的距离测量结果：待测目标是折射率为 1.5 的亚克力板，厚度分别为 2.25 mm 和 1.49 mm^[20]

Fig. 5 (a) Schematic of the ranging experiment with a linearly chirped optical source based on optoelectronic feedback loop; (b) Range resolution measurements using the swept-frequency SCL. The target was an acrylic sheet of refractive index 1.5 and thickness 2.25 mm and 1.49 mm^[20]

为了提高探测距离分辨力,最直接的解决办法就是增加光源的输出可调谐带宽。2018年美军RDECOM CERDEC夜视与电子传感指挥部展示了使用12个DFB激光器拼接成超宽带FMCW激光雷达的实验结果^[22-23]。该方案使用了12个线宽为3 MHz且输出波段相连的DFB激光器阵列,在3 ms内依次输出从1524 nm连续调谐到1568 nm的线性调频光,每个激光器在240 μs内调谐3.6 nm,总频率调谐范围达到5.56 THz。在16 m的工作范围内,其理论距离分辨力达到26.98 μm,实验方案如图6(a)所示。虚线框中所有的元件被放置在一个自制的PCB板上,该部分通过过零(zero crossing, ZC)检测PD3(Photodetector)的输出信号与参考信号 X_{ref} 比较,进行驱动电流的控制,实现了12个DFB的激光阵列依次顺序发光并保持频率线性调谐。为了实现弱信号的相干检测,PD1使用了平衡探测器,PD4用于接收通过HCN(hydrogen cyanide)气室的光信号以跟踪输出的绝对波长,半导体放大器(semiconductor optical amplifier, SOA)和半导体制冷器(thermo electric cooler, TEC)保证了激光器在频率调谐过程中的输出强度平坦与温度稳定,其输出光谱如图6(c)。该方案测量成像结果如图7所示,为了使采集

到的数据量大小具有可处理性,根据不同的工作距离,使用不同的机械扫描步长和光斑大小。该方案提供了极高的纵向分辨力,但是由于光源线宽只有3 MHz,相干距离较短,导致了测量距离有限。

同时,有很多研究机构致力于实现FMCW激光雷达的小型化,集成化。注入电流调谐方式由于天生具有体积小、调谐方式简单等优势而受到集成化激光雷达研究人员的青睐。2016年加利福尼亚大学伯克利分校(UC Berkeley)在ISSCC上发表了它们使用分布布拉格反馈(distributed bragg reflector, DBR)激光器与单片集成的光电锁相环芯片实现122 GHz调谐范围,测距精度达到8 μm的工作^[24]。此后麻省理工大学(Massachusetts Institute of Technology, MIT)在2017年发表了使用DFB激光器与硅光相控阵芯片结合实现FMCW激光雷达的工作^[25]。

3.3 混合调谐方案

2012年蒙大拿州立大学光谱实验室的Barber等人发表了使用他们自己在2009年研制的线性频率调谐光源^[26]进行激光雷达成像的实验方案^[27],如图8(a)所示。该方案中的啁啾光源使用了外腔式半导体激光器,并采用了电流注入和腔长调谐两条反馈环路的混合调

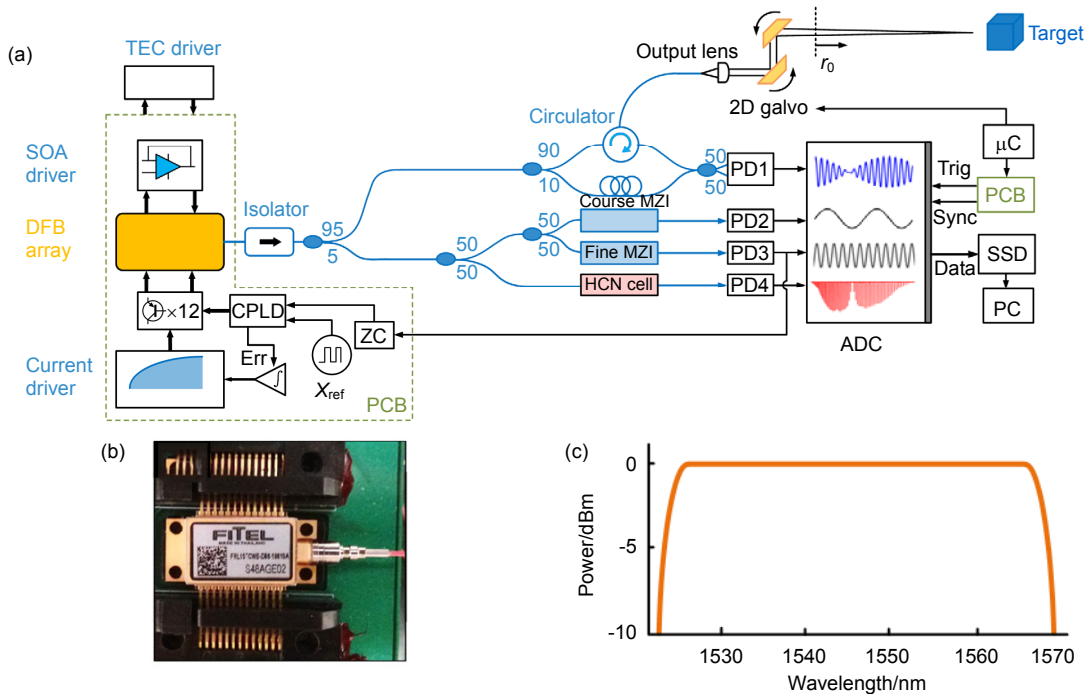


图6 (a) 雷达扫描系统示意图,其中ISO: 光隔离器, MZI: 马赫增德干涉仪, CPLD: 复杂编程逻辑设备, μC : 微控制器, SSD: 固态存储器; (b) DFB阵列模块; (c) DFB阵列的输出光谱强度平坦^[22]

Fig. 6 (a) Scanning system layout, ISO: Optical isolator, MZI: Mach-Zehnder interferometers, CPLD: complex programmable logic device, μC : Teensy microcontroller, SSD: solid-state hard drive; (b) DFB array module; (c) Normalized output power over all elements^[22]

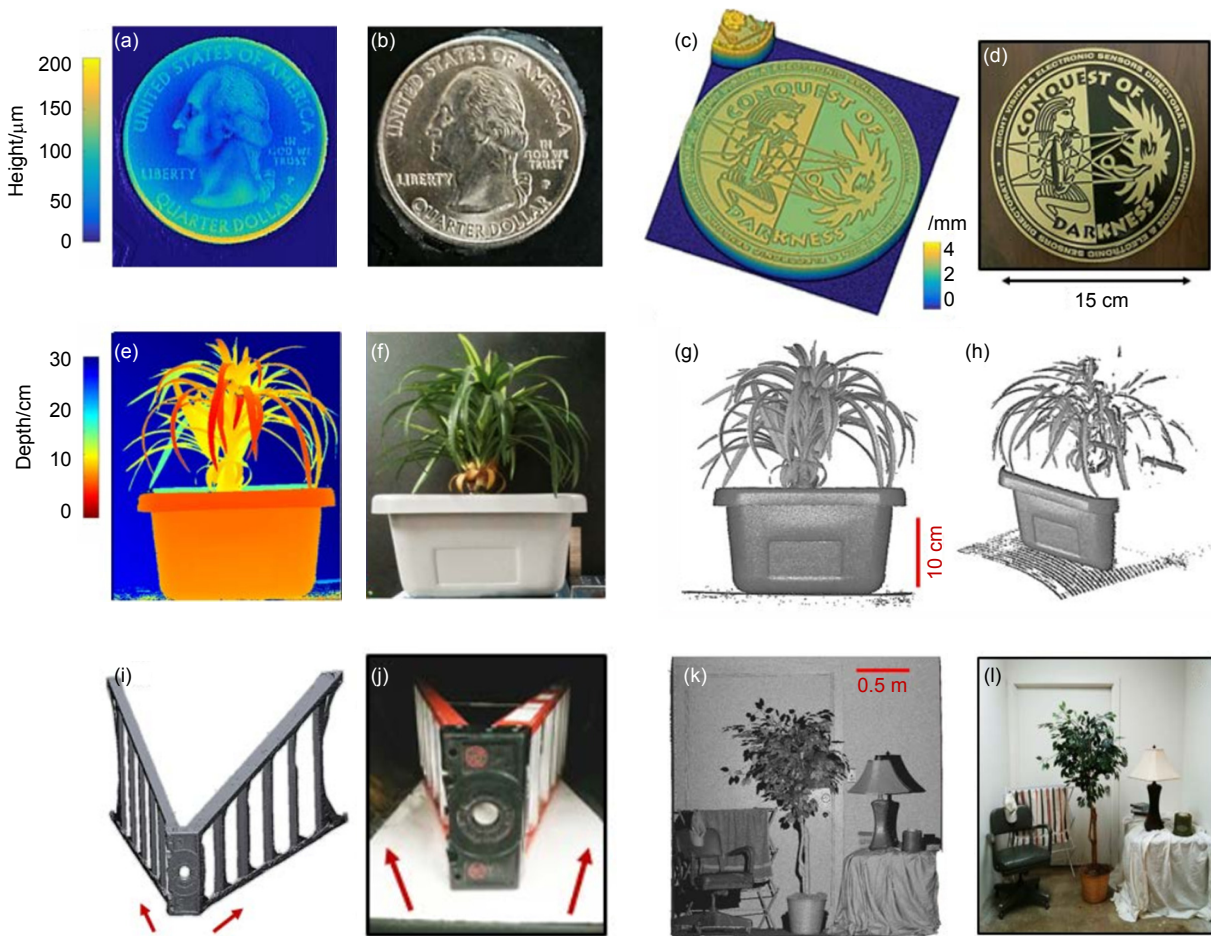


图 7 景深从毫米量级到米量级的三维成像结果。(a) 位于 25 cm 处的 25 美分表面形貌成像结果; (b) 25 美分的实物照片(400 像素×420 像素); (c) 位于 1.1 m 处直径 15 cm 的奖章表面成像结果; (d) 15 cm 直径奖章的实物照片(700 像素×740 像素); (e) 2.5 m 处的物体深度结果图; (f) 2.5 m 处盆栽的照片(408 像素×490 像素); (g) 盆栽的反射率分布图; (h) 盆栽的反射率分布侧视图; (i) 2.5 m 远处放置的 6 层梯的三维成像图; (j) 6 层梯照片(408 像素×370 像素); (k) 放置了不同物体的房间的三维点云图; (l) 放置了多种物体的房间照片(884 像素×900 像素)^[22]

Fig. 7 3D images over depths ranging from less than a millimeter to meters. (a) Surface map of a (b) quarter at 25 cm (400 pixels×420 pixels); (c) Surface map of a (d) 15 cm diameter medallion at 1.1 m (700 pixels×740 pixels); (e) Volume depth map of a (f) potted plant placed at 2.5 m (408 pixels×490 pixels). Volume shown = 33.5l cm×30d cm×40h cm; (g) Reflectivity profile of the plant with a (h) rotated view; (i) 3D mesh of a (j) six-foot ladder starting at 2.5 m (408 pixels×370 pixels); (k) 3D point cloud of a (l) room with a variety of objects (884 pixels×900 pixels)^[22].

谐方式，如图 8(b) 所示。其中腔长由压电陶瓷 (piezoelectric transducer, PZT) 驱动，进行腔长的负反馈粗调节，意图实现大范围的频率调谐；电流注入通过改变腔内增益介质的折射率，实现腔内光学长度的反馈精细调节，从而实现更小的频率偏差。该方案实现了 800 ms 内频率调谐 4.8 THz 的范围，频率误差小于 170 kHz，理论距离分辨力达到 31 μm，并能在 1.5 m 的测量距离下实现 86 nm 的测量精度。

该课题组在 2012 年完成的成像实验中同样采用

了综合孔径技术，其中光源部分使用了 3 THz 的调谐范围，调谐周期为 600 ms，调谐速率为 5 THz/s，提供了约 49.8 μm 的纵向分辨力。图 9 显示了斜向 45° 测量 USAF 1951 分辨力标准片的成像结果，图 9(a) 为原始成像结果，图 9(b) 为使用了相位梯度自聚焦算法 (phase gradient autofocus, PGA)^[28-30] 和啁啾 Z 变换 (chirp-Z transform polar format, CZT-PT)^[31] 后去除鬼像的结果。从图 9(b) 中第三组第二个图样元素看出该系统横向分辨力至少达到了 125 μm，纵向分辨力作者没有给出。

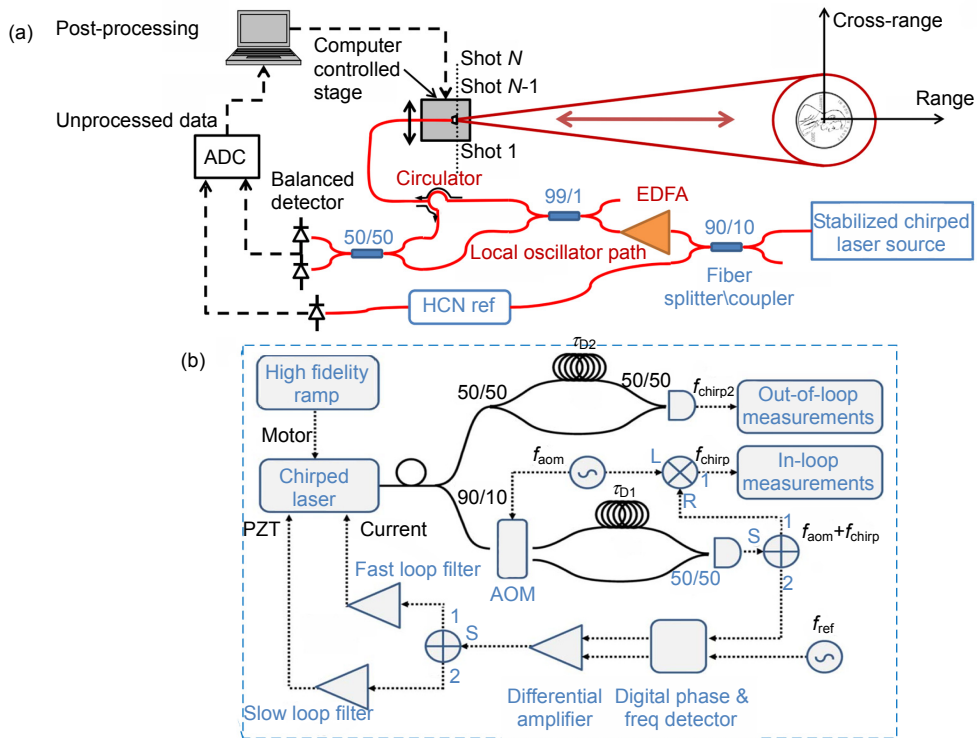


图 8 (a) 条带工作模式的综合孔径激光雷达实验装置示意图^[27]; (b) 线性宽带啁啾光源装置示意图^[26]
 Fig. 8 (a) Schematic of experimental setup illustrating basic stripmap mode SAL system^[27]; (b) Experimental setup for broadband optical frequency chirp linearization using the self-heterodyne technique^[26]

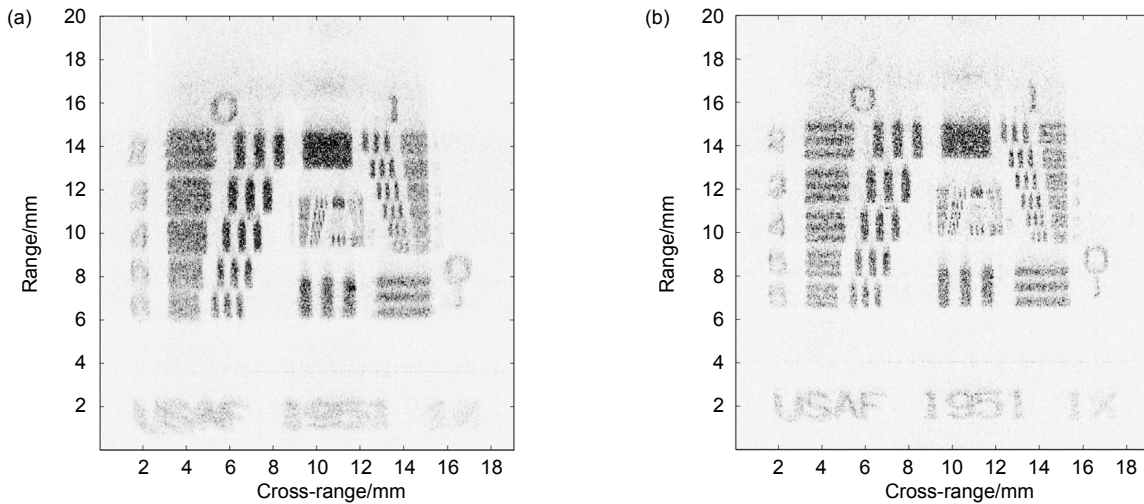


图 9 (a) USAF 1951 分辨率标准片的综合孔径雷达成像结果; (b) 应用了 PGA 和 CZT-PT 算法处理后的 USAF 1951 分辨率标准片的综合孔径雷达成像结果^[27]
 Fig. 9 (a) Spotlight SAL image of USAF 1951 resolution target; (b) Same SAL image with PGA applied in crossrange and range after CZT-PF processing^[27]

4 基于外调制技术的 FMCW 激光雷达

外调制技术是指在激光器外部使用调制器件对激光器输出的强度频率稳定的连续激光进行调制，以实

现控制激光光场强度、频率、偏振、角动量等参数的目的。对于激光线性调频而言，目前应用比较广泛的是基于声光效应的声光调制和基于电光效应的电光调制两种外调制方式，但是由于声光调制的工作带宽相对较窄，所以大多数外调制方案都采用电光调制器作为腔外的频率调谐器件。

4.1 基于电光调制器的调谐方案

2008 年美国国家航空和宇宙航行局兰利研究中心(NASA Langley Research Center)报道了用于宇航器自主软着陆的实验性质全光纤的 FMCW 激光雷达系统^[32],图 10 所示。该系统使用了一个线宽小于 10 kHz 的光纤激光器作为被调制光光源,为了同时实现测速与测距功能采用了三角波调制形式,调制带宽为 600 MHz,调制周期约为 3.4 ms。测量装置被放置在直升机上,距地面待测目标 250 m 处进行测量,最终实现了测距准确度约为 1 cm,测速准确度约为 1 cm/s 结果。

2018 年,中国科学院电子所与上海交通大学合作发表了长距离逆综合孔径 FMCW 激光雷达的方案与测量结果,如图 11 所示^[33]。该系统实现了对 1 km 以外的合作目标进行高分辨力成像的目标,其距离分辨力达到 2.5 cm。发射光源采用了单边带调制技术^[34],实现 60 μs 内频率调谐范围达到 6 GHz 的高速频率调谐,由于采用了外调制技术,保持了种子光源的窄线宽特性^[35]。接收端采用了平衡检测技术以提高信噪比,并且使用联合时频变换(joint time frequency transform, JTFT)作为接收信号的解调算法^[36]。在对 1 km 距离处铝制飞机模型的成像实验中,采用了多次测量结果非相干叠加的处理方式,以避免单次测量中的斑点噪声。从成像结果可以看出该激光雷达较为清晰地分辨出了 60 cm×20 cm 大小的飞机模型,并能区分细节。

4.2 基于循环移频结构的调谐方案

由于外调制器的工作带宽有限,所以单纯使用一

个电光调制器的方案能够实现的频率调谐范围只能达到几十 GHz,限制了外调制方案实现高分辨力测量的功能。为了进一步提高外调制方案的光源频率调谐范围,2018 年天津大学杨天新课题组提出了结合循环移频环路^[37]与扫频调谐的光源构思并加以实验验证^[38]。原理图如图 12 所示,实验中采用了 20 kHz 线宽的连续激光器作为种子光,使用光开关形成持续时间为 343.75 ns 周期为 5.5 μs 的方波脉冲光,进入移频环路中的脉冲频率每次被固定频率转换 12.5 GHz,形成频率随时间阶梯状变化的光脉冲序列,16 个为一组且首尾相连的光脉冲序列经过扫频调制器实现频域上的连续拼接,最终实现了 200 GHz 范围的频率线性调谐。

由于该方案全部采用外调制方案,种子光窄线宽的特性得以保留,最终出射光的线宽在 50 kHz 以内,保证了良好的相干性。FMCW 激光雷达使用这样的宽带窄线宽光源,理论上可以达到距离分辨力小于 1 mm,探测范围至少达到 1 km。该方案突破了外调制器的工作带宽限制,同时保持了光源良好的相干特性且多种光源参数可调,为长探测距离高分辨力成像的激光雷达提供了可行的光源方案。

5 总结与展望

文中以采用内调制或外调制光源作为分类依据,对目前具有代表性的 FMCW 激光雷达体制做了简单介绍,并在每种体制的 FMCW 激光雷达中选出具有代表性的系统进行分析。下面将通过表 1 对文中提到的 FMCW 激光雷达光源的重要参数进行对比。

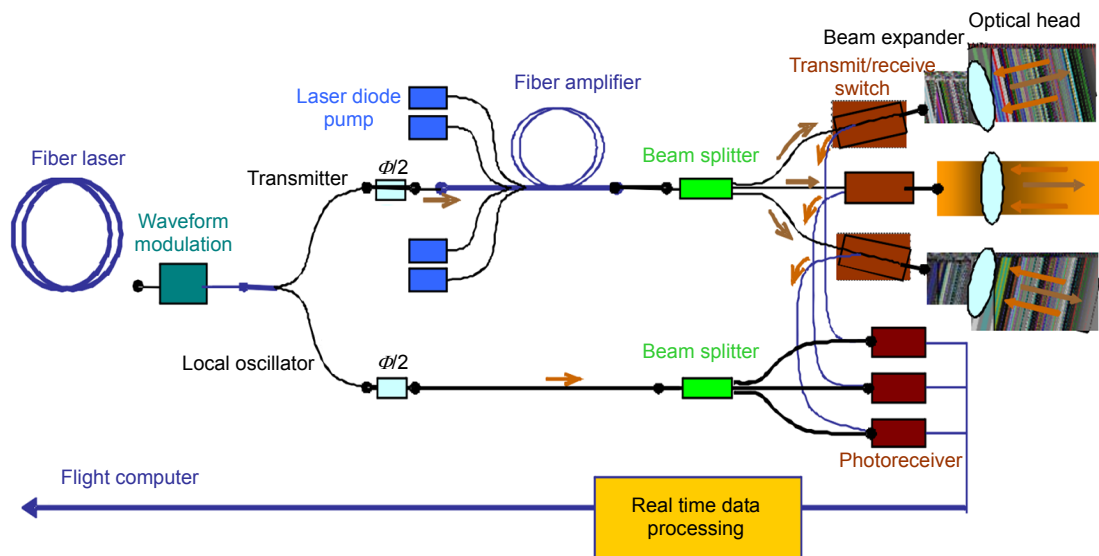


图 10 全光纤相干多普勒雷达系统原理图^[32]

Fig. 10 All fiber, coherent Doppler LiDAR system schematic^[32]

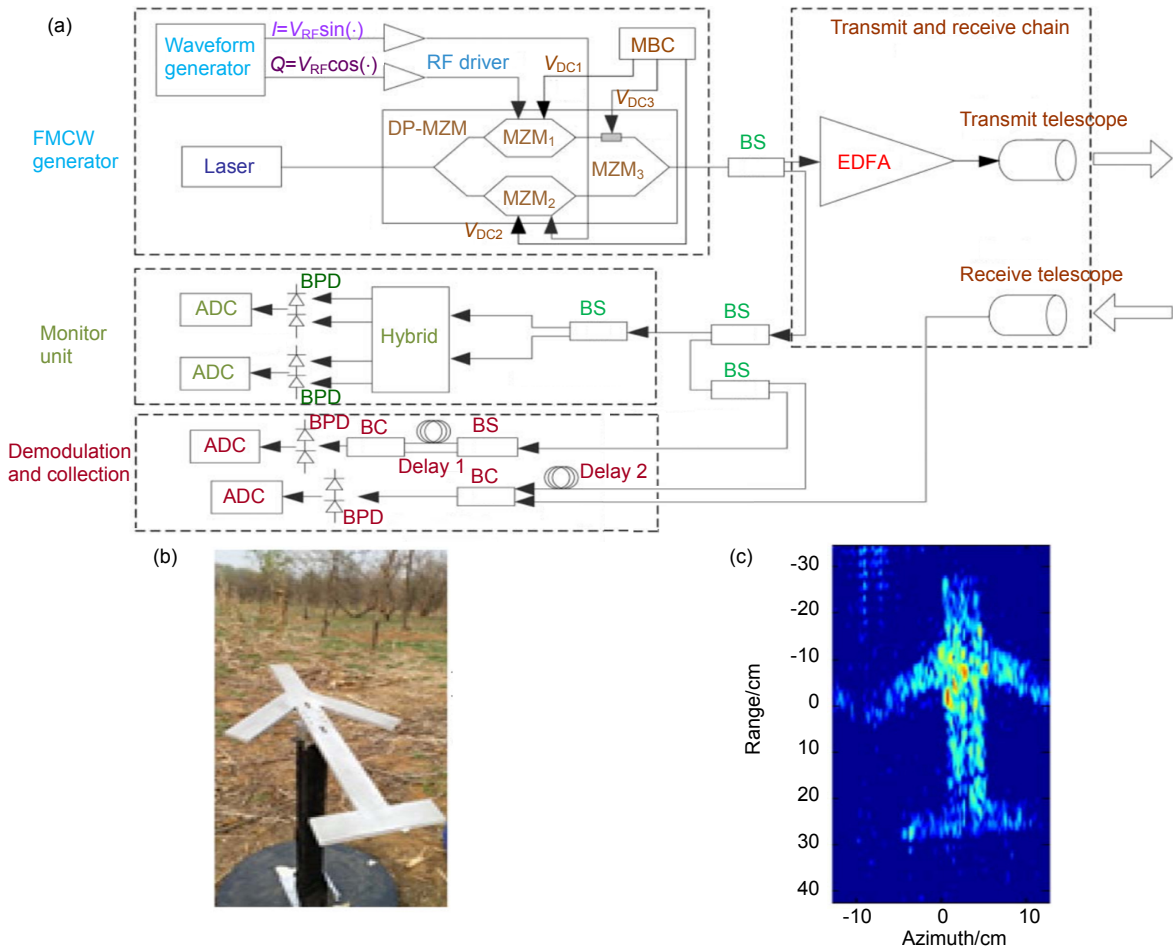


图 11 (a) 逆综合孔径雷达系统装置示意图; (b) 飞机模型照片; (c) 应用 JTFT 解调后的激光雷达方位多视测量结果^[33]

Fig. 11 (a) Block diagram of the proposed linear FMCW LiDAR system; (b) Optical photo of the airplane model; (c) Azimuth multilook result based on the JTFT method^[33]

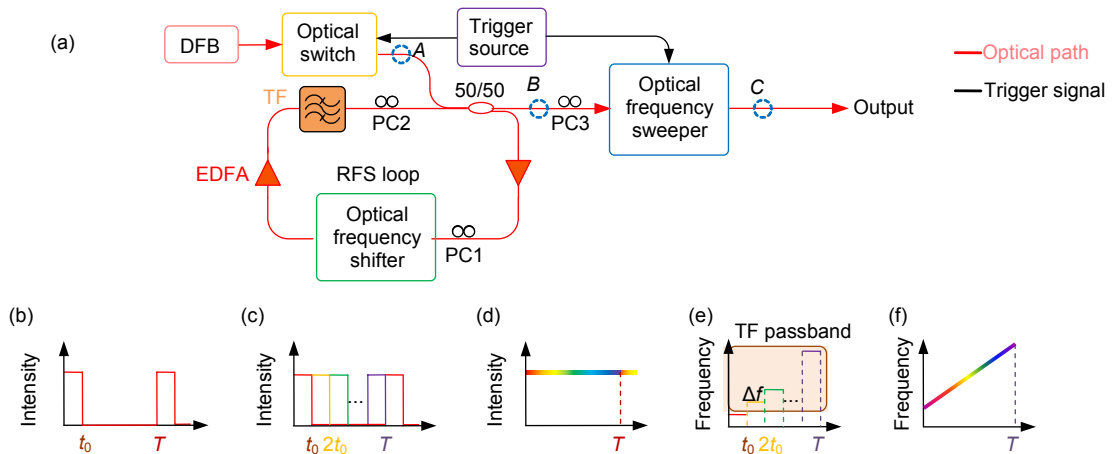


图 12 (a) 宽带调频光源原理示意图; (b)、(c)、(d) 分别为 A、B、C 点光脉冲序列的时间-强度演变示意图; (e)、(f) 分别为 B 和 C 点光脉冲序列的时间频率演变示意图^[38]

Fig. 12 (a) Schematic for the generation of the chirped light; (b),(c),(d) Time-intensity evolution diagrams of the pulse sequence for A,B,C; (e), (f) Time-frequency evolution diagrams of the pulse sequence for B,C^[38]

表 1 9 种 FMCW 激光雷达光源参数对比

Table 1 Specification comparison of mentioned FMCW LiDAR source

	2002 ^[16]	2005 ^[19]	2009 ^[20]	2018 ^[22]	2016 ^[24]	2012 ^[27]	2008 ^[32]	2018 ^[33]	2018 ^[38]
光源类型	内调制	内调制	内调制	内调制	内调制	内调制	外调制	外调制	外调制
调制方式	腔长调谐	腔长调谐	电流注入	电流注入	电流注入	混合调谐	电光调制	电光调制	电光调制
频率调谐范围	1.25 THz	3.73 THz	100 GHz	5.56 THz	122 GHz	3 THz	600 MHz	6 GHz	200 GHz
理论距离									
分辨力	120 μm	40 μm	1.5 mm	27 μm	2.45 mm	49.8 μm	25 cm	2.5 cm	750 μm
光源线宽*	---	100 kHz	1 MHz	3 MHz	---	---	10 kHz	13.9 kHz	50 kHz
相干长度*	---	1 km	100 m	32 m	---	---	10 km	7 km	2 km
重复周期	1 s	0.36 s	1 ms	3 ms	5.6 μs	600 ms	3.3 ms	60 μs	5.5 μs
发射功率	5 mW	6.3 mW	40 mW	12.7 mW	10 mW	200 mW	---	15 W	1 mW
调谐速率	1.25 GHz/ms	10.5 GHz/ms	100 GHz/ms	1.8 THz/ms	44 THz/ms	5 GHz/ms	182 MHz/ms	100 GHz/ms	36.4 THz/ms

*静态工作时光源线宽测量值与由线宽计算得到相干长度

从表中的数据可以看出：总的来说，调谐性好的光源大多不够稳定，稳定的光源大多不能宽可调谐^[19]。从调制方式的角度而言，内调制方式由于直接改变谐振腔参数，获得大调谐范围相对容易，但是由于激光建立时间的存在会造成输出调频光的瞬时线宽比较宽，导致光源相干长度的减少；或者为了建立起稳定光场就必须限制调谐速率。外调制方式通过电光效应等调谐机制能够在保持种子光的优异特性的同时快速改变光场的瞬时频率，但是由于电光效应本身的工作带宽有限，限制了光源调谐范围的增加，即限制了该系统可实现的最高分辨力。

对于调频连续光光源的选择需要考虑激光雷达的具体应用场景。以目前广受关注的用于自动驾驶的车载激光雷达为例，该类型的激光雷达要求探测距离不少于 300 m，距离分辨力达到厘米量级，角分辨力达到 0.1°，全向距离数据动态刷新率不小于 5 Hz。探测距离指标要求雷达光源的相干长度大于 600 m，即线宽小于 150 kHz 且重复周期大于 2 μs；以 1 cm 距离分辨力指标计算，需要频率调谐范围大于 15 GHz；而 5 Hz 的数据刷新率要求光源重复周期小于 50 μs，即扫描速率大于 300 GHz/ms。

对于内调制方式的调频连续光光源，高调谐速率和窄线宽是一对无法同时满足的指标。较长的谐振腔意味着可以实现窄线宽，但是调谐速率较低；较短的谐振腔可以提高调谐速率，但是又限制了光源的线宽水平^[39]。对于车载无人驾驶激光雷达这种长探测距离快速刷新且分辨力要求较高的应用场景，笔者更加看

好基于外调制的 FMCW 激光雷达技术方案，该方案能够保持种子光长相干性的特性下达到足够宽的频率调谐范围和足够快的调谐速率。目前限制该方案实际应用的主要原因在于电光调制器的成本问题，但是随着硅光集成技术的发展，我们相信电光调制器的成本将会在几年内快速降低进而投入实用化生产。

随着民用领域和军用领域需求的增加与要求指标的提升，未来激光雷达将会向小型化、集成化、低功耗和长探测距离、高分辨力、高精度、实时性的方向发展，这对光源、收发装置、控制系统和分析算法都提出了更高的要求。而随着激光雷达的发展，相关应用也会不断增加，从无人驾驶、人脸识别等应用开始，在虚拟现实、增强现实、感知建模和物联网等领域也将会飞速发展。

参考文献

- [1] Swatantran A, Tang H, Barrett T, et al. Rapid, high-resolution forest structure and terrain mapping over large areas using single photon lidar[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 28277.
- [2] Jaboyedoff M, Oppikofer T, Abellán A, et al. Use of LIDAR in landslide investigations: a review[J]. *Natural Hazards*, 2012, 61(1): 5–28.
- [3] Lim K, Treitz P, Wulder M, et al. LiDAR remote sensing of forest structure[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2003, 27(1): 88–106.
- [4] Goyer G G, Watson R. The laser and its application to meteorology[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1963, 44(9): 564–570.
- [5] Gschwendtner A B, Keicher W E. Development of coherent laser radar at Lincoln Laboratory[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2000, 12(2): 383–396.

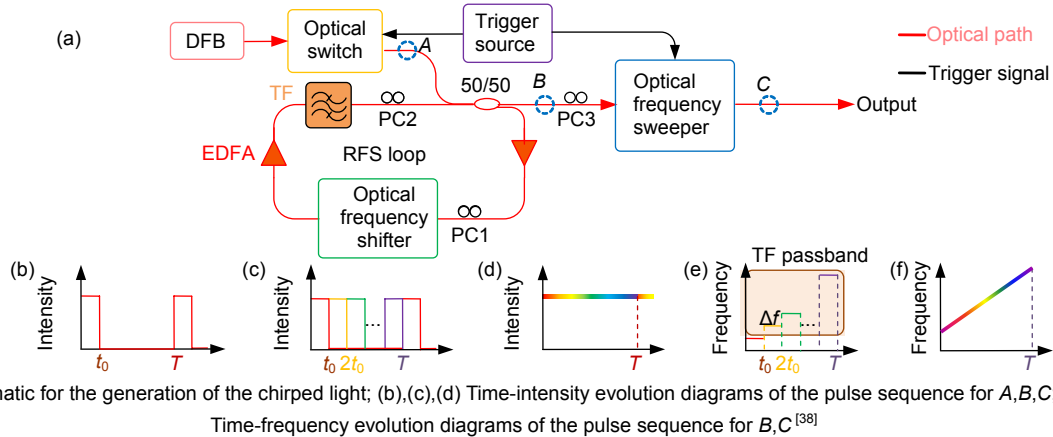
- [6] Pfrunder A, Borges P V K, Romero A R, *et al.* Real-time autonomous ground vehicle navigation in heterogeneous environments using a 3D LIDAR[C]//*Proceedings of 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vancouver, BC, Canada, 2017: 2601–2608.
- [7] Cracknell A P, Hayes L. *Introduction to Remote Sensing*[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [8] Martin A, Dodane D, Leviandier L, *et al.* Photonic integrated circuit-based FMCW coherent LiDAR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, **36**(19): 4640–4645.
- [9] Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(21): 4189–4198.
- [10] Wolff C. Frequency-modulated continuous-wave radar (FMCW Radar)[EB/OL]. (2016-12-01) [2019-01-08]. <http://demonstrations.wolfram.com/FrequencyModulatedContinuousWaveFMCWRadar/>.
- [11] Bissonnette L R. Multiple-scattering lidar equation[J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(33): 6449–6465.
- [12] Burdic W S. *Radar Signal Analysis*[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1968.
- [13] Lichti D D, Jamtsho S. Angular resolution of terrestrial laser scanners[J]. *The Photogrammetric Record*, 2006, **21**(114): 141–160.
- [14] Curlander J C, McDonough R N. *Synthetic Aperture Radar*[M]. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1991.
- [15] Ito F, Fan X Y, Koshikiya Y. Long-range coherent OFDR with light source phase noise compensation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(8): 1015–1024.
- [16] Bashkansky M, Lucke R L, Funk E, *et al.* Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(22): 1983–1985.
- [17] Skolnik M I. *Radar Handbook*[M]. New York NY, USA: McGraw-Hill, 1970.
- [18] Buell W, Marechal N, Buck J, *et al.* Demonstration of synthetic aperture imaging lidar[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5791**: 152–166.
- [19] Beck S M, Buck J R, Buell W F, *et al.* Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(35): 7621–7629.
- [20] Satyan N, Vasilyev A, Rakuljic G, *et al.* Precise control of broadband frequency chirps using optoelectronic feedback[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(18): 15991–15999.
- [21] Satyan N, Vasilyev A, Rakuljic G, *et al.* Phase-locking and coherent power combining of broadband linearly chirped optical waves[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(23): 25213–25227.
- [22] DiLazaro T, Nehmetallah G. Large-volume, low-cost, high-precision FMCW tomography using stitched DFBs[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(3): 2891–2904.
- [23] DiLazaro T, Nehmetallah G. Large depth high-precision FMCW tomography using a distributed feedback laser array[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, **10539**: 1053906.
- [24] Behroozpour B, Sandborn P A M, Quack N, *et al.* 11.8 Chip-scale electro-optical 3D FMCW lidar with 8 μ m ranging precision[C]//*Proceedings of 2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference*, San Francisco, CA, USA, 2016: 214–216.
- [25] Poulton C V, Yaacobi A, Cole D B, *et al.* Coherent solid-state LIDAR with silicon photonic optical phased arrays[J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(20): 4091–4094.
- [26] Roos P A, Reibel R R, Berg T, *et al.* Ultrabroadband optical chirp linearization for precision metrology applications[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(23): 3692–3694.
- [27] Crouch S, Barber Z W. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture lidar techniques[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(22): 24237–24246.
- [28] Carrara W, Majewski R M, Goodman R S. *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms*[M]. Boston: Artech House, 1995.
- [29] Jakowatz Jr C V, Wahl D E, Eichel P H, *et al.* *Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach*[M]. Boston, MA, USA: Springer, 1996.
- [30] Wahl D E, Eichel P H, Ghiglia D C, *et al.* Phase gradient autofocus—a robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, **30**(3): 827–835.
- [31] Yocky D, Wahl D, Jakowatz Jr C. Spotlight-mode SAR image formation utilizing the chirp Z-transform in two dimensions[C]//*Proceedings of 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, Denver, CO, USA, 2006: 4180–4182.
- [32] Pierrotet D, Amzajerjian F, Petway L, *et al.* Linear FMCW laser radar for precision range and vector velocity measurements[J]. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 2008, **1076**: 1076–K04–06.
- [33] Wang N, Wang R, Mo D, *et al.* Inverse synthetic aperture LADAR demonstration: system structure, imaging processing, and experiment result[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(2): 230–236.
- [34] Lyu Y K, Yang T X, Lu Z Y, *et al.* External modulation method for generating accurate linear optical FMCW[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, **29**(18): 1560–1563.
- [35] Li G Z, Wang R, Song Z Q, *et al.* Linear frequency-modulated continuous-wave lidar system for synthetic aperture imaging[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(12): 3257–3262.
- [36] Chen V C, Ling H. *Time-frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis*[M]. Boston, MA, USA: Artech House, 2002.
- [37] Shimizu K, Horiguchi T, Koyamada Y. Technique for translating light-wave frequency by using an optical ring circuit containing a frequency shifter[J]. *Optics Letters*, 1992, **17**(18): 1307–1309.
- [38] Lu Z Y, Yang T X, Li Z Y, *et al.* Broadband linearly chirped light source with narrow linewidth based on external modulation[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(17): 4144–4147.
- [39] Yariv A, Yeh P. *Photonics: Optical Electronics in Modern Communications*[M]. 6th ed. New York, NY, USA: Oxford University Press, 2006.

Basics and developments of frequency modulation continuous wave LiDAR

Lu Zhaoyu^{1,2}, Ge Chunfeng^{1,2}, Wang Zhaoying^{1,2}, Jia Dongfang^{1,2}, Yang Tianxin^{1,2*}

¹School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China



Overview: LiDAR (Laser detection and ranging) is an active remote sensing technology that uses laser for imaging, detecting and ranging. It has the advantages of high resolution, high precision, light weight and strong anti-interference. Following the invention of the laser in 1960, Radar's working bands and techniques were quickly convert by researchers from the microwave band to the optical band. Compared with the traditional microwave radar technology, the LiDAR works in a shorter wavelength band, which makes the laser beam can achieve smaller divergence angle and better directionality. As LiDAR working in the optical band, the distance resolution and angular resolution that can be achieved during detection are greatly improved. LiDAR detection can obtain complex information such as target distance, velocity, reflectivity, etc. The acquired 3D point cloud data is usually used to generate high-resolution 3D maps or 3D models, and is widely used in surveying, topography, forestry, areas of atmospheric physics, laser guidance, aerospace, deep space exploration and unmanned driving.

At present, the detection mechanism of LiDAR is mainly divided into two types, non-coherent detection and coherent detection. Non-coherent detection is also called direct detection since it directly detects the change of the amplitude of the reflected light signal. It is widely used in time-of-flight (TOF) LiDAR or amplitude-modulated continuous-wave LiDAR. Coherent detection uses heterodyne detection to detect by measuring the frequency or phase difference between the echo signal and the local oscillator signal. The current mainstream coherent detection LiDARs include frequency modulated continuous wave (FMCW) LiDAR and Doppler speed LiDAR. The heterodyne detection method has higher sensitivity than the direct detection method, which makes the coherent detection type LiDAR can work at a lower transmission power.

In view of the advantages of LiDAR, especially the coherent detection FMCW LiDAR, this paper will introduce the basic working principle of FMCW LiDAR and the recent developments. The second part introduces the working principle of FMCW LiDAR and the relationship between the basic performance of FMCW LiDAR and the parameters of the transmitting system. The third part and the fourth part introduce the generation of FMCW light by different modulation methods in the past decade and discuss the characteristics of various schemes. Methods and experiments of cavity tuning, current injection tuning and external modulation are briefly present in these two parts as well as the technique and algorithm of synthesis aperture. Finally, we compared and summarized the FMCW LiDAR systems mentioned in this review.

Citation: Lu Z Y, Ge C F, Wang Z Y, *et al.* Basics and developments of frequency modulation continuous wave LiDAR[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(7): 190038

Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (61471256, 61575143, 61275084, 61377078) and Natural Science Foundation of Tianjin (18JCYBJC16800)

* E-mail: tyang@tju.edu.cn