

## 成像激光雷达的无人机载技术探讨

曹秋生

(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

**摘要:** 成像激光雷达作为一种主动成像手段, 具有在低照度、复杂背景条件下获取高分辨率远距离景物三维图像的能力, 作为任务载荷应用于无人机系统领域已成为一种必然趋势, 前景十分广阔。对成像激光雷达技术体制进行总结归类并对其国内外研究进展进行了技术分析, 并在此基础上, 结合无人机载环境特点, 针对典型应用场景, 综合考虑成像距离、成像分辨率、成像范围和成像速度(帧频)等多方面因素, 从总体上探讨并提出无人机载成像激光雷达的一般结构形式、典型技术方案选择和平台适应性要求, 以期对相关技术研究和设备研制起到一定参考作用。

**关键词:** 无人机载; 成像激光雷达; 扫描成像; 非扫描成像

**中图分类号:** TN29   **文献标志码:** A   **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1003002

## Technical discussion on imaging lidars as UAV payloads

Cao Qiusheng

(The 27th Research Institute of CETC, Zhengzhou 450047, China)

**Abstract:** Imaging lidars, operating at an active imaging approach, are capable of obtaining high resolution 3D images of objects at far distance even under low illuminance and complicated background conditions, thus it has been an inevitable trend for imaging lidars to be used as mission payloads in the UAS field with extensive application prospects. The types of imaging lidars were summarized and categorized, with technical analysis carried out on relevant research progresses both at home and abroad. On this basis, discussions are made in the view of system design and general structural formats, typical technical architectural options and platform suitability requirements for the UAV-borne imaging lidars were put forward, in combining the features of the UAV-borne environment and in association with comprehensive considerations of the factors as imaging distance, imaging resolution, imaging range and imaging speed (or frame rate) related to typical application situations, with an expectation to provide reference for relevant technology research and equipment development.

**Key words:** UAV-borne; imaging lidar; scanning imaging; non-scanning imaging

收稿日期: 2016-02-05; 修订日期: 2016-03-03

作者简介: 曹秋生(1961-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光与光电技术、无人机平台与系统方面的研究。Email: llaocao@sina.cn

## 0 引言

光电载荷是装备最早、应用最广的无人机任务设备,目前在国内外都已形成产品系列。常规光电载荷以可见光或红外被动探测、二维成像为主,有的虽增加了激光测距功能,但不能提供高分辨率目标三维图像,而且进一步提升探测距离受目标和背景辐射强度所局限。

成像激光雷达<sup>[1]</sup>作为一种主动成像技术,受光照条件和目标背景反差特性影响较小,可在低照度和复杂背景下获取目标的三维信息,实现三维成像,且相对于微波成像雷达具有空间分辨率高、抗干扰能力强、不受地面杂波影响及成像实时性好、图像直观等优点,还具有探测隐身目标的潜力<sup>[2]</sup>。如用于无人机电载,则可在复杂环境侦察、测绘和海洋、国土资源勘探等军用民用领域替代有人机执行任务,并能长时间作业,具有极好应用前景。

国内外对许多不同类型的成像激光雷达开展了研究工作,并在机载领域形成了大量的研究成果<sup>[3-5]</sup>,然而在无人机电载领域技术和应用研究并不充分,也许是受技术成熟度的限制和出于对飞行安全风险控制的考虑。可以预见,随着成像激光雷达以及无人机平台日益走向成熟,以成像激光雷达作为任务载荷应用于无人机系统领域将成为一种发展趋势,相关研发工

作将越来越受到重视。文章在对成像激光雷达各种技术体制整理归类的基础上,对主要研究进展进行技术分析。在此基础上,结合无人机电载环境特点,针对典型应用场景,从总体上探讨并提出无人机电载成像激光雷达的一般结构形式、典型技术方案选择和平台适应性设计要求,以及对未来发展的看法和建议。

## 1 成像激光雷达常见类型

成像激光雷达按工作方式可分为扫描型、非扫描型和合成孔径型等三类并可进一步展开分解,如图 1 所示。其中扫描型包括光机扫描型和电子扫描型;非扫描型包括阵列探测型、信号调制型和条纹管型,工作时需用激光照明被探测区域,因此也被称为闪光型或照明型。非扫描型激光探测成像可基于雪崩光电二极管(APD)等各类阵列探测器并结合距离选通或各种信号调制手段来实现。条纹管是一种真空光电成像器件<sup>[6]</sup>,依据瞬态光学中高精度微弱信号测量原理工作,将其应用于激光雷达系统可实现大视场、高帧频、高距离分辨力水下目标成像探测。合成孔径激光雷达<sup>[7-9]</sup>针对工作波长一定情况下,空间分辨率受系统光学孔径限制随距离增加而下降的问题,利用合成孔径雷达工作原理,实现高分辨率远距离激光成像探测。如果激光雷达不动而目标动,则为逆合成孔径激光雷达。

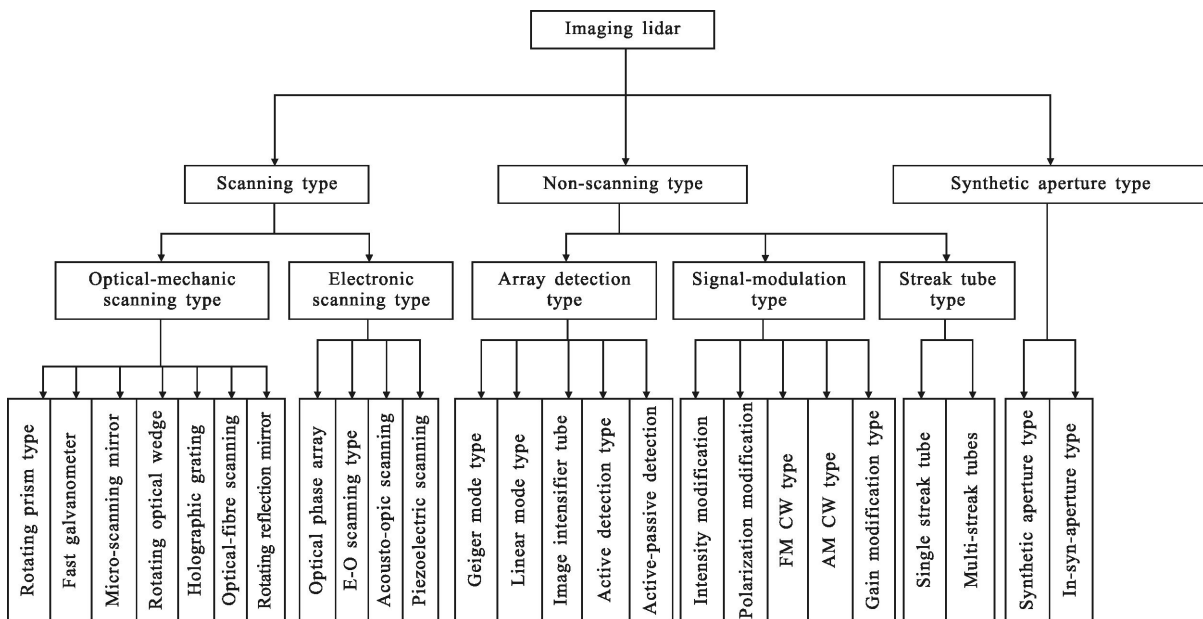


图 1 成像激光雷达主要类型

Fig.1 Main types of imaging lidars

## 2 成像激光雷达主要研究进展

### 2.1 扫描型成像激光雷达

扫描型成像激光雷达技术相对成熟，其产品已应用于工业建模、遥感、测绘等领域。原理上基于 APD 单元探测器，类似于一台光束指向可控的窄视场激光测距机(见图 2)。发射和接收光路可共用光学

孔径以实现系统结构紧凑化,但需解决串扰问题。光束扫描方式有光机扫描型(有机械运动)和电子扫描型(无机械运动)两类。系统工作时,窄激光束对既定区域逐点扫描,通过接收每一点的回波并记录对应的扫描角度和时间信息,得到被扫描诸点的角度位置和距离,按一定顺序进行采集、处理、显示,形成被扫描区域的三维图像。

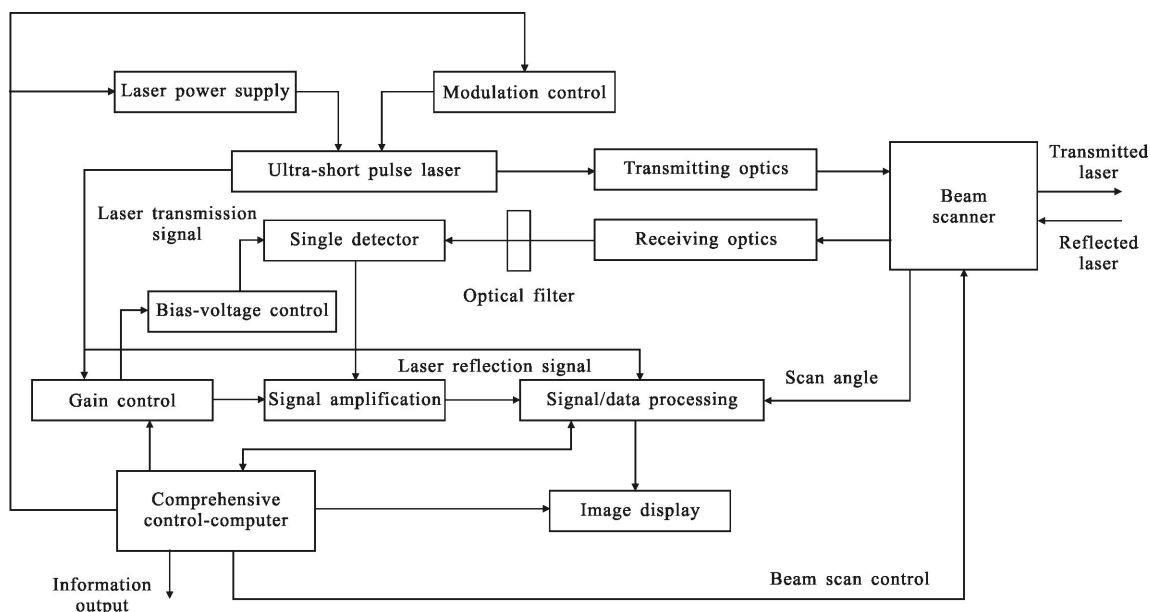


图 2 扫描型成像激光雷达原理组成示意图

Fig.2 Block diagram of scanning type imaging lidar

由于一个激光脉冲对应一个测量点,激光发散角和接收视场都很小,激光能量集中,因此易于实现远距离探测,这是其突出优点。但要获得高的空间分辨率,要求激光扫描点的分布足够密集,因此激光器必须有很高的发射重复频率,大致等于图像的像元数与图像帧频的乘积。同时,高的距离分辨率(可达厘米级)要求激光器工作于超窄脉冲方式。

由于对既定区域进行一次逐点扫描需要花费一定时间,因此扫描型激光雷达成像速度慢,帧频低(几赫兹以内)。当目标和激光雷达存在相对运动时,需要采取补偿或修正措施,以防止图像失真甚至畸变。

快速扫描振镜是一种成熟的高速、高精度光学矢量扫描器件<sup>[3,9]</sup>,其偏转角与电流成正比<sup>[4]</sup>。振镜摆角范围可达几十度,摆角精度为角秒级,摆角频率可

达上百赫兹。二维快速扫描振镜采用两个反射镜和驱动电机实施两个相互垂直方向的激光扫描,可实现各种复杂的扫描曲线,并可调节步长。

受机械传动精度影响,传统光机扫描精度有限,结构复杂且集成微小化程度低,体积、质量难以缩小。新型扫描装置如基于 MEMS 的微扫描镜<sup>[10]</sup>可做到体积小、质量轻、造价低,但尚未见应用报道。

电子扫描无机械运动,无惯性,易于小型化,其中光学相控阵(OPA)<sup>[11]</sup>基于光波波长短的优势,可实现灵巧、轻便和快速的光束偏转控制,指向精度和空间分辨率高。其工作原理是调节从各个相控单元即光学移相器辐射出的光波之间的相位关系,使其在设定方向上彼此同相,产生相互加强的干涉,从而在该方向上产生高强度光束,而在其他方向上各个光

波彼此不同相,干涉的结果彼此相抵消,如此控制一束或多束高强度激光进行空域扫描。此外,McManamon 等<sup>[12]</sup>提出“相控阵的相控阵”(PAPA)概念,以模块化分布式结构的多个光学相控阵子孔径相干组合形成一个大的阵列,通过增加激光器和子孔径的数目提高系统的发射功率和孔径尺寸以增大探测距离。

由于以电光晶体或液晶材料制作光学相控阵器件工艺难度大,光学相控阵技术有待成熟以满足相

位控制精度高、响应速度快、激光发散角小、激光耐受功率高和光束偏转角大等要求。其他电子扫描技术多处在实验室研究阶段。

### 2.2 非扫描型成像激光雷达

采用阵列探测器的非扫描型成像激光雷达具有成像速度快、帧频高、视场大、体积小的优点,原理组成如图 3 所示。由于不需光束扫描,系统大为简化,体积减小,质量降低,同时激光脉冲重复率及发射和接收之间的光束准直要求低。但由于所发射的激光

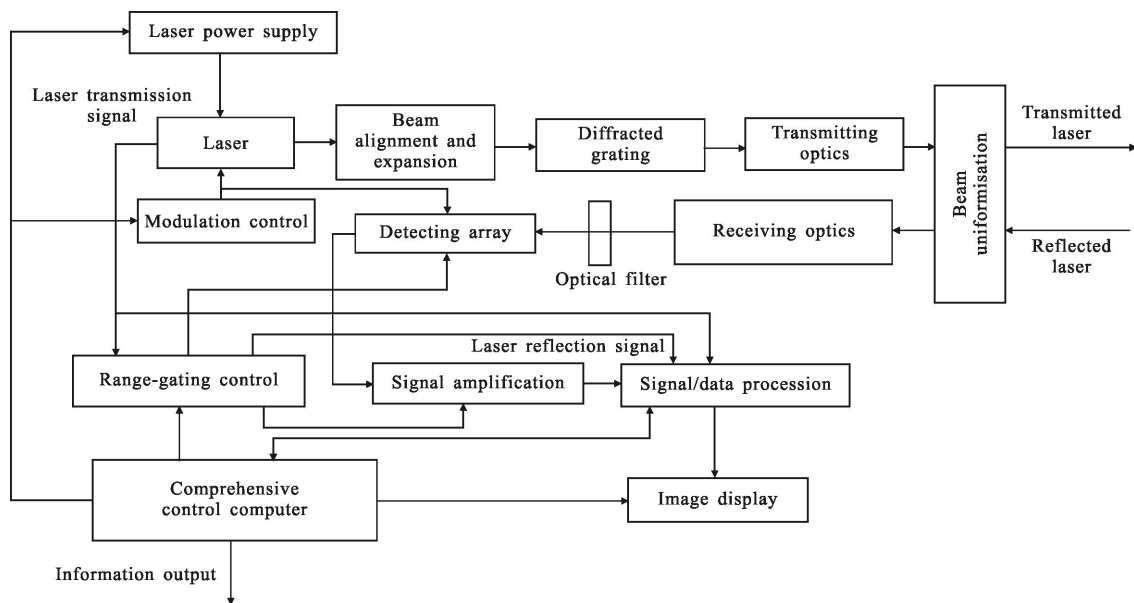


图 3 非扫描型成像激光雷达原理组成示意图

Fig.3 Block diagram of non-scanning type imaging lidar

需要照亮整个成像探测区域,且接收的激光需均匀分布在阵列探测器所有探测单元上,因此发射(或接收)光束需均匀化处理,这在一定程度上降低了发射激光的峰值,未充分利用激光光强。

非扫描型成像激光雷达常用到距离选通技术,将对目标的空间扫描转换为时域扫描,仅当激光回波脉冲到达时探测器才选通工作,既抑制激光大气传输后向散射的影响,又辅助系统获取目标距离信息。甚至有的系统专门增加一个测距通道,以准确设置距离波门位置和宽度。

盖革模式雪崩光电二极管(GAPD)阵列(像元数国外已达  $256 \times 256$ <sup>[13]</sup>)工作于击穿电压以上,倍增增益极高( $10^5 \sim 10^6$ ),每个像元的输出不需放大就可直接驱动距离计数电路给出距离信息,因此也被称为

3D 探测器,通常与 CMOS 计时集成电路阵列桥接成紧凑、低功耗和全固态的模块,以便于集成应用。目前 GAPD 阵列需进一步提高像元规模以实现更大的图像覆盖范围和更高的图像分辨率。

基于 GAPD 阵列的成像激光雷达以高重频小能量激光发射方式工作,利用单光子探测器<sup>[14]</sup>弱光照射下输出信号自然离散的特点,采用单光子计数方法<sup>[15]</sup>结合脉冲甄别及数字计数技术,识别并提取微弱信号,实现成像速度快、探测灵敏度高、作用距离远。距离分辨率可达分米级,空间分辨率可达厘米级(与作用距离有关)。

由于探测器自身暗计数和背景噪声的影响,依靠单个激光脉冲不能给出目标距离,必须纪录整个时间轴上的光子事件,经过大量次数的累计测量区

分回波光子和暗计数,进行直方图统计处理,才能从随机分布的噪声中提取信号脉冲,得到真实目标距离。此外,GAPD 不能长时间处于盖革状态,需采用距离波门选通工作。

GAPD 阵列成像激光雷达需经过许多帧的数据处理才能得出一幅三维图像,因此若平台或目标运动对成像会产生一定影响。相比之下,基于线性模式 APD 阵列的成像激光雷达<sup>[16]</sup>单次探测就能给出目标的强度(灰度级)图像和距离图像,因而可对高速运动目标快速成像。此时 APD 阵列工作偏压低于雪崩击穿电压,每个像素的输出电信号幅度与入射的光信号强度成正比,发射激光可工作于低重频状态,但探测器读出电路复杂,像元间距大,灵敏度低于 GAPD 阵列,系统作用距离近。

主动探测型成像激光雷达采用红外焦平面探测器,用适当波长的红外激光均匀照射被探测区域以提高探测器的接收能量,获得比被动探测更远的作用距离,且当目标反射能量足够大时,目标和背景自身的辐射甚至可以忽略,但不能给出每个像元对应的目标距离,只能生成二维图像。其光束发散角和发射功率或能量由成像覆盖范围、目标特性和成像作用距离要求所确定。

美国 ASC 公司针对复杂背景目标探测研制了基于  $128 \times 128$  InGaAs:APD 阵列的主动/被动成像激光雷达<sup>[17]</sup>,即采用同一个阵列探测器及同一个光学系统和信号处理系统,通过施加不同工作偏压,实现 APD 主动探测工作模式和红外焦平面被动探测模式的转换,用大视场热成像发现目标,用窄视场激光三维成像识别目标。

### 2.3 合成孔径激光雷达

飞机以匀速直线飞行,其上安装发射/接收光学天线线阵,合成孔径激光雷达利用相对目标的运动,将实际尺寸较小的天线孔径等效为较大天线孔径,从而打破光学孔径衍射极限的限制,实现高空间分辨率、远距离激光成像。如目标是运动的,则可以利用直升机可悬停的特点,采用逆合成孔径技术实现目标激光成像。

合成孔径激光雷达探测动态范围大,并在微动目标探测方面具有明显优势。信号处理有聚焦和非聚焦两种方式。目前国内外均未进入工程应用阶段,需要继续开展深入研究。

## 3 无人机载总体设计考虑

远距离、高分辨率、轻量化、低功耗、高实时性和人眼安全是国外机载三维成像激光雷达<sup>[19]</sup>的发展特点,实际上这也是无人机载的发展方向。美国麻省理工林肯实验室发展了 Gen-I、Gen-II、Gen-III 和加强版的机载 3D 探测成像系统,美国 DARPA 开展了针对高隐蔽目标识别的高分辨率成像小型机载激光 3D 成像传感器(JIGSAW)的研发,其设备规模和性能与中小型无人机载要求类似。

从原理上说,各种类型成像激光雷达都可能适用于无人机载,但具体的技术体制选择主要从应用需求、技术成熟性和平台适应性等方面考虑。

### 3.1 一般结构形式

无人机载成像激光雷达通常以前视、下视或侧视方式,以一定的瞬时视场(或扫描视场)对一定区域成像。为了避免机体振动或抖动影响一般系统结构上都包含一个陀螺稳定平台<sup>[18]</sup>保持视轴稳定,同时可进行方位或俯仰调整以对不同方向成像。小型系统可做成一个整体,外挂或内藏(需留光学窗口)安装,否则可做成分体结构,仅将激光发射和接收光学部分装于陀螺稳定平台内。

### 3.2 采用扫描成像体制实现远距离激光成像

扫描型激光雷达体制适合于成像探测距离远但成像速度不快的场合。系统以窄激光波束工作,利用光机或电子扫描实现激光对被测区域的逐点发射和接收,通过激光脉冲飞行时间(TOF)得到目标距离,根据机载 INS/GPS 导航参数、飞机平台运动和姿态参数及激光光束扫描角度得到目标方位角-俯仰角-距离三维坐标,最终通过数据处理和相应算法得到被测目标或区域的三维图像。

发射部分采用二极管泵浦固态高重复频率窄脉冲激光器,根据图像的像元数与图像帧频(几赫兹以内)的乘积确定其重复频率(千赫兹量级)。接收机采用硅雪崩光电二极管探测器。根据探测距离要求和目标特性并依据雷达方程确定激光发射、接收和光学系统的技术指标和参数。

测距精度影响距离分辨率。影响测距精度的因素主要包括计数器分辨率、主波与回波经由路径差异、回波脉冲前沿起伏等,采用时间内插法等技术手

段可提高测距精度。图像的空间分辨率由被测区域测点密度所确定。

如系统是对地面下视成像,则可采用简单的一维行扫方式,即在垂直于航向的平面内对地面进行摆扫,而飞行平台沿预定航向定高定速前飞等效为纵向推扫,二者合成“之”字形的扫描路径。

### 3.3 采用非扫描成像体制实现高帧频激光成像

基于阵列探测器的非扫描型成像激光雷达适用于高帧频成像。采用衍射分光镜将扩束后的激光束分成与探测器阵列像元分布类似的细光束阵列,高效照亮探测器每个像元的视场,减少背景光干扰。也可在探测器阵列前安装小透镜阵列,使探测器每个像元的激活区域都被返回激光信号所照亮。

探测器可采用 GAPD 阵列,结合单光子计数方法获得高探测灵敏度,基于 TOF 得到相对各像元的目标距离,并在多帧累计数据处理中考虑无人机平台运动对成像的影响。激光发射可工作于高重频小能量方式。美国 DARPA 的 JIGSAW 传感器系统和林肯实验室的 Gen-II、Gen-III 属于这种体制,均采用 32×32 GAPD 阵列。

如需以单次探测获得目标强度(灰度级)图像和距离图像,则可采用线性模式 APD 阵列探测器,低重频(20~30 Hz)发射激光器,如美国 ASC 公司的 TigerEye 闪光激光成像系统(采用 128×128 Si:APD 阵列)和林肯实验室的加强版机载激光 3D 探测成像系统(采用 32×32 InGaAs APD 阵列)。

如只需获取二维图像,可采用红外焦平面探测器,结合距离选通技术,用波长匹配并处于大气窗口的红外波段激光照射被测区域,通过提高探测器接收能量,实现主动式红外探测,获得比被动探测更高的探测能力。

### 3.4 采用混合成像体制实现较远距离、较大范围景物快速激光成像

从前述可知,扫描体制激光成像距离远,但成像速度慢,帧频低,而非扫描体制激光成像速度快,帧频高,但需发射激光均匀照亮被测区域,激光功率利用率低,不易提高探测距离。

混合成像体制即以小规模 GAPD 阵列探测器和光学扫描装置结合,每次扫描发射不是形成一个像点,而是一个像点阵列,从而显著提高成像速度,使系统在较快时间内完成较远距离、较大范围景物的

成像,与林肯实验室的 Gen-I 机载激光 3D 探测成像系统类似。

采用混合成像体制可以兼顾探测距离、成像速度、成像覆盖范围等综合要求,并解决不易获得大规模 GAPD 阵列探测器的问题。

### 3.5 采用主/被动结合成像体制实现远距离高分辨率激光成像探测

中空长航时等中大型无人机载应用意味着大的成像探测距离(几十千米或更远),而同时实现高的空间分辨率是技术难点。

分析可知,增大激光发射功率和减小激光束散角有利于提高信号强度、增加作用距离,增大扫描点密集度或减小非扫描成像瞬时视场、采用更大规模探测器阵列有助于提高远距离空间分辨率,但难以兼顾大的成像覆盖范围。

根据主/被动探测工作原理,利用模式可切换的 InGaAs:APD 阵列探测器或用红外焦平面阵列和 GAPD 阵列两个独立探测器,以大视场红外热成像进行远距离目标搜索定位,以窄视场激光成像进行高分辨率目标识别,可实现远距离高分辨率激光成像探测。而合成孔径激光雷达待技术成熟后是一种理想的解决方案。

## 4 无人机平台适应性设计

成像激光雷达的无人机载应用必须适应无人机平台的特点和工作环境,涉及如下技术。

(1) 振动环境适应性技术:无人机的发动机、螺旋桨、控制舵机、齿轮传动机构等运动部件工作时会造成机体振动<sup>[9]</sup>,其中螺旋桨和发动机引起的振动为持续性振动,对载荷的视轴稳定影响很大,需要采取减振措施并避免安装在振动剧烈处;此外,飞行中遇到的风场变化和气流不稳定会引起无人机姿态抖动和飞行不平稳,也会影响视轴稳定。

(2) 载荷与平台结构一体化技术:结构、光路设计和安装位置要确保瞬时和扫描视场满足要求,凸出机身部分或专设的通光窗口在结构上要与无人机平台气动外形良好匹配以减少气动干扰。

(3) 传输带宽匹配技术:激光雷达生成的图像信息要通过下行链路来传输,需考虑带宽匹配问题,尽量减少传输时延和滞后,提高信息传输的实时性和保真性。

(4) 轻量化设计与实现技术:无人机的载荷能力是有限的,需特别重视轻量化、减重设计并兼顾强度和刚度要求,可通过优化结构、光路和电路设计,减少硬件构成,并结合复合材料使用等来实现。

(5) 低功耗技术:由于要综合兼顾载重能力、续航时间等多方面技术要求,无人机的供电能力一般余量不大。要求成像激光雷达尽量降低功耗,并特别要关注激光脉冲工作时的大电流变化对供电电源的冲击影响。

(6) 高实时自动操控技术:无人机载荷通常以遥控、程控方式工作,要求激光雷达简化操作和状态调整环节,并结合测控链路设计,确保载荷控制的高实时性。

(7) 运动补偿技术:当无人机的运动可能对成像探测精度造成不可忽略的影响时,需要以飞机平台 INS/GPS 导航数据、空间位置和运动、姿态参数为基准对图像进行运动补偿处理。

## 5 结束语

在成像激光雷达领域,国内外均开展了大量的技术研究、器件研制和应用系统研发工作。典型机载成像激光雷达逐渐进入实用阶段,为无人机载成像激光雷达的发展提供了很好的技术借鉴,有多种技术方案可供选择以满足不同的应用需求对成像距离、成像分辨率、成像范围和成像速度(帧频)等的不同性能侧重点要求。

从实用化和工程化要求看,无人机载成像激光雷达要在良好的平台适应性基础上,同步实现系统小型化、紧凑化、轻量化和远距离、大范围、高分辨率、快速成像探测,还需要在大功率高重复率窄脉冲微芯片激光器、小型化二极管泵浦高重复率窄脉冲激光器、大规模雪崩光电二极管阵列和高耐受功率电子扫描光偏转器件等方面尽快取得突破。

## 参考文献:

[1] Ni Shuxin. Review on development of the new imaging laser radar systems [J]. *Journal of Laser & Infrared*, 2006, 36(s1): 732-736. (in Chinese)  
倪树新. 新体制成像激光雷达发展评述 [J]. 激光与红外, 2006, 36(s1): 732-736.

[2] Li Jiangyong, Wang Cheng. New thoughts on the development

of airborne infrared detection system [J]. *Journal of Laser and Infrared*, 2013, 43(7): 794-798. (in Chinese)

李江勇, 王诚. 机载红外探测系统的发展新思路 [J]. 激光与红外, 2013, 43(7): 794-798.

[3] Lv Qiongying, Sun Yu, Zhang Dandan, et al. Study of the airborne laser radar scanning mechanism based on Matlab[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 37(4): 24-27. (in Chinese)

吕琼莹, 孙瑜, 张丹丹, 等. 基于 MATLAB 的机载激光雷达扫描机制的研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014, 37(4): 24-27.

[4] Wang Jianyu, Hong Guanglie, Bu Hongyi, et al. Study on airborne scanning lidar [J]. *Journal of Acta Optica Sinica*, 2009, 29(9): 2584-2589. (in Chinese)

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.

[5] Zhang Jian, Zhang Lei, Zeng Fei, et al. Development status of airborne 3D imaging lidar systems[J]. *Journal of Chinese Optics*, 2011, 4(3): 213-232. (in Chinese)

张健, 张雷, 曾飞, 等. 机载激光 3D 探测成像系统的发展现状[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 213-232.

[6] Wang Kui, Shi Yinxin, Li Fuxiao, et al. Development of a streak tube for imaging lidar system [J]. *Journal of Optoelectronic Technology*, 2013, 33(3): 151-154. (in Chinese)

王葵, 石吟馨, 李拂晓, 等. 一种用于激光成像雷达的条纹管研制[J]. 光电子技术, 2013, 33(3): 151-154.

[7] Li Daojing, Zhang Qingjuan, Liu Bo, et al. Key technology and implementation scheme analysis of air-borne synthetic aperture lidar[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(2): 143-151. (in Chinese)

李道京, 张清娟, 刘波, 等. 机载合成孔径激光雷达关键技术和实现方案分析[J]. 雷达学报, 2013, 2(2): 143-151.

[8] Wang Shengwei, Hou Tianjin, Zhou Dingfu, et al. Synthetic aperture lidar[J]. *Journal of Laser Technology*, 2008, 32(1): 4-7. (in Chinese)

王省伟, 侯天晋, 周鼎富, 等. 合成孔径激光雷达[J]. 激光技术, 2008, 32(1): 4-7.

[9] Yang Shaocheng, Liu Xiaping, Li Zhijuan, et al. Galvanometers based laser beam deflections and scanning systems for graphic imaging[J]. *Journal of Laser and Infrared*, 2007, 27(2): 95-99. (in Chinese)

杨少辰, 刘夏萍, 李志娟, 等. 振镜式光束扫描/偏转系统及成像过程研究[J]. 激光与红外, 2007, 27(2): 95-99.

- [10] Yi Kejia, Deng Tingquan, Meng Qinghua, et al. Design and implementation for next generation ladar [J]. *Journal of Semiconductor Optoelectronics*, 2011, 32(5): 707–709. (in Chinese)  
易可佳, 邓廷权, 蒙庆华, 等. 一种下一代激光雷达的设计与实现[J]. 半导体光电, 2011, 32(5): 707–709.
- [11] Yan Aimin, Zhi Yanan, Sun Jianfeng, et al. Recent development of optical phased array scanning technology[J]. *Journal of Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(102801): 1–6. (in Chinese)  
闫爱民, 职亚楠, 孙建锋, 等. 光学相控阵扫描技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(102801): 1–6.
- [12] Mcmanamon P F, Thompson W. Phased array of phased arrays(PAPA) laser systems architechure[C]//IEEE Aerospace Conference, 2002, 3: 1465–1472.
- [13] Zhao Hongli, Fan Youchen, Sun Huayan, et al. Review about 3D laser radar system based on geiger-mode APD array[J]. *Journal of Laser & Infrared*, 2013, 43(10): 1083–1088. (in Chinese)  
赵洪利, 范有臣, 孙华燕, 等. 基于盖革模式 APD 阵列的非扫描激光三维成像雷达研究综述[J]. 激光与红外, 2013, 43(10): 1083–1088.
- [14] Liu Wei, Yang Fuhua. Near infrared single-photo detection [J]. *Journal of Physics*, 2010, 39(12): 825–831. (in Chinese)  
刘伟, 杨富华. 近红外单光子探测[J]. 物理, 2010, 39(12): 825–831.
- [15] Shu Rong, Li Ming, Huang Genghua, et al. Design and verification of multi-beam photo-counting 3D laser imaging radar aero-simulator based on optic-fiber array coupling[M]//Proceeding of the Second Annual Conference on High Resolution Earth Observation, 2013: 12. (in Chinese)  
舒嵘, 李铭, 黄庚华, 等. 基于光纤阵列耦合的多波束光子计数激光三维成像雷达航空模拟器的设计与验证[M]//第二届高分辨率对地观测学术年会论文集, 2013: 12.
- [16] Chen Nianjiang. Review of 3D laser imaging technology [J]. *Journal of Laser & Infrared*, 2015, 45(10): 1152–1156. (in Chinese)  
陈念江. 激光三维成像体制综述[J]. 激光与红外, 2015, 45(10): 1152–1156.
- [17] Tang Xiaoyan, Gao Kun, Ni Guoqiang. Development of active/passive detection technology in 3D imaging lidar system[J]. *Journal of Laser & Infrared*, 2013, 43(9): 986–989. (in Chinese)  
唐晓燕, 高昆, 倪国强. 激光 3D 成像系统主被动探测技术的研究进展[J]. 激光与红外, 2013, 43(9): 986–989.
- [18] Shen Yingfan, Zhao Pinya, Chen Zujin. Airborne pod stabilized platform structure design [J]. *Journal of Aero Weaponry*, 2010, 3(6): 61–64. (in Chinese)  
沈颖凡, 赵滨娅, 陈祖金. 航空吊舱稳定平台结构设计[J]. 航空兵器, 2010, 3(6): 61–64.
- [19] Zou Zhifeng, Zhang Kui. Study on two-level vibration isolation based on multi-frame airborne optronic payload[J]. *Journal of Optics & Optoelectronic Technology*, 2011, 9(6): 78–82. (in Chinese)  
邹志峰, 张旭. 机载多框架光电吊舱两级隔振设计 [J]. 光学与光电技术, 2011, 9(6): 78–82.