

## 直接测距型激光主动成像系统发展现状

徐正平<sup>1,2\*</sup>, 沈宏海<sup>1,2</sup>, 许永森<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:**对直接测距型激光主动成像系统进行了深入研究。按照工作方式分类介绍了国外相关研究机构激光主动成像系统的工作原理及系统参数,归纳总结并比较分析了各工作方式的优缺点。分析认为:基于单点或小面阵探测器配合光机扫描方案可实现较远作用距离,但其对激光器重频要求较高,后续数据处理复杂,且系统体积、功耗较大;而基于Flash探测器的激光主动成像系统易于实现小型化,对激光器重频要求较低。作用距离受限问题可通过电子扫描得以有效解决。在具体应用时,需根据实际需求,综合考虑系统体积、质量、功耗、激光器输出峰值功率及脉冲重复频率、所能获取的探测器类型、后续数据处理能力等多种因素折衷选取。

**关键词:**激光主动成像;直接测距;光机扫描;电子扫描

中图分类号:TN958.98;TJ7625.332;TJ439.2 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20150801.0028

## Review of the development of laser active imaging system with direct ranging

XU Zheng-ping<sup>1,2\*</sup>, SHEN Hong-hai<sup>1,2</sup>, XU Yong-sen<sup>1,2</sup>

- (1. *Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: xuzp090@163.com*

**Abstract:** Laser active imaging system has been used in many fields due to its high precision of angular, range and velocity, so laser active imaging system with direct ranging are researched deeply. According to the operational mode, principle and systemic parameter of many laser active imaging systems from several overseas research institutes are introduced. The advantages and shortcomings of those operational modes are summarized and compared. Analyzing result shows that long operational range could be gained with single or small FPA combining optical-mechanical scanning. But the repeated-frequency of laser would be high and post data-processing is complicated with this method. The volume and power dissipation is also considerable. Compact laser active imaging system could be achieved easily with flash sensor and related repeated-frequency of laser is low.

收稿日期:2014-11-13;修订日期:2015-01-13

基金项目:中国科学院航空光学成像与测量重点实验室开放基金资助项目(No. Y2HC1SR12B);中国科学院国防科技自主创新基金资助项目(No. CXJJ-14-S123)

Although operational range is limited, it could be enhanced by using electronic steering method. In actual system, several factors, such as volume, weight and power dissipation of system, peak power and repeated frequency of laser, type of sensor and post data-processing capability, should be taken into account comprehensively to reach a compromise.

**Key words:** laser active imaging system; direct ranging; optical-mechanical scanning; electronic steering

## 1 引言

激光主动成像系统<sup>[1]</sup>源于 20 世纪 60 年代,随着激光器的发明而产生的,由最初的激光测距和目标指示系统逐渐演变而来,采用激光对目标进行主动照明以获取目标的距离信息<sup>[2]</sup>,其可视为微波雷达的光学版本,即采用激光器作为辐射源,光学望远镜作为天线,接收器件采用光电探测器。激光主动成像系统有其自身优势:能够提供较高的角度、距离和速度分辨率;测速范围宽;能够提供目标的角-角-距-灰度-速度信息;具备“四抗”能力(抗电子战、反辐射导弹、抗低空突防及隐身目标);体积、质量小。但相比于微波雷达,其技术难度大。在军事领域,激光主动成像系统主要应用于红外与激光多模制导、水下探测、直升机防撞<sup>[3]</sup>、自动着陆、空间交会对接、战场侦察及隐藏目标识别<sup>[4-6]</sup>等;在民用领域的应用主要有高速公路维护和设施管理、电力巡线、植被分布、生化探测、城市及大气精细建模。

从 20 世纪 70 年代,欧美发达国家争先开展激光主动成像系统的研究,研制出了多种激光主动成像系统。随着激光器、探测器<sup>[7]</sup>和数据处理与存储等关键技术的发展,激光主动成像系统向着大面阵、小型化方向发展,且性能也有大幅提升。本文在介绍激光主动成像系统工作原理的基础上,将详细分析国外几个典型直接测距型激光主动成像系统实现方案,并分析各方法的优缺点,为系统设计提供技术参考。

## 2 激光主动成像系统工作原理

激光主动成像系统成像方式包括直接成像和相干成像。

直接成像方式是由脉冲激光器发射一束窄脉冲激光照射目标,采用光电探测器分别感应发射激光脉冲和被目标反射回来的激光脉冲,通过光电效应转化为电压或电流信号,通过测量发射脉冲和回波脉冲之间的时间间隔确定脉冲飞行时间,最后得到目标距离。光电探测器输出电信号幅值与入射光功率成正比,在光电转换中失去了光频率和相位信息。

相干成像是通过分光片,将发射激光分为信号光和本振光,信号光经发射光学系统准直后输出,而本振光进入接收系统。接收光学系统同时接收从目标反射回来的激光脉冲,该激光脉冲与发射光学系统分光片产生的本振光进行合成,由光电探测器进行接收并转换为电流或电压信号,通过获取两者的差频信息来确定目标距离。

相干成像方式能够获得很高的测距精度,但在成像距离、技术成熟度、适装性及成像速度等方面,直接成像方式更具优势。

## 3 国外研究发展现状与趋势

### 3.1 基于单点探测器扫描的激光主动成像系统

直升机在盲视环境下起降对于飞行员来说是一极大挑战,而激光主动成像系统是解决这一问题的有效手段之一。德国 EADS 自从 1992 年开

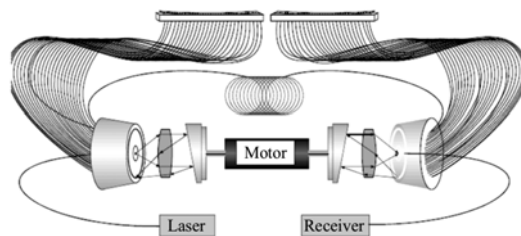


图 1 OWS 系统工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working principle of OWS system

始研究障碍物告警系统<sup>[8-9]</sup> (Obstacle Warning System, OWS), 其工作原理示意图如图 1 所示。

探测器采用单点 APD (Avalanche Photodiodes), 激光器发射激光经发射楔形镜反射, 进入出射光纤照射目标。回波激光经入射光纤后照射接收楔形镜, 经反射后进入光电探测器。激光出射光纤位置与回波接收光纤位置一一对应。电机带动两个楔形镜同时转动。随着楔形镜角度不同, 脉冲从不同发射光纤射出, 通过这种光纤扫描, 以单点探测器实现等效线阵列。垂直方向采用振镜扫描, 其在 Hellas 直升机和 NH90 直升机上进行了飞行试验, 帧频分别达到 3 frame/s@200 × 95 和 4 frame/s@200 × 128。在大气能见度大于 5 km 条件下, 对于大型障碍物和直径为 10 mm 电缆, 探测距离分别大于 1 000 和 500 m。OWS 系统在 Hellas 直升机上安装图片及获取的目标图像分别如图 2、图 3 所示。



图 2 OWS 系统在 Hellas 直升机上安装图片

Fig. 2 Picture of OWS system installed in Hellas helicopter

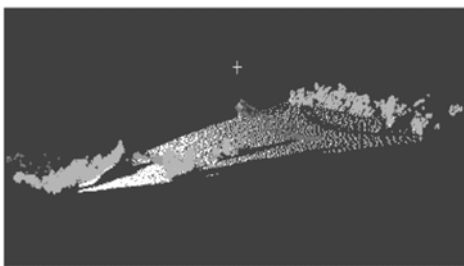


图 3 OWS 系统获取的实验图像

Fig. 3 Image gained by OWS system

美国空军研究实验室 (Air Force Research Laboratory, AFRL) 研究机载激光主动成像系统长达

二十余年, 其成功研制了 3D-LZ (Three-Dimensional Landing Zone) 系统<sup>[10]</sup>。该系统主要应用于盲视环境下直升机起降。成像模式为单点 APD 配合多边形扫描, 在方位方向能视区域达到 60°, 扫描速率为 150 lines/s; 俯仰方向上达到 30°, 扫描速率为 150 mrad/s; 最大作用距离达 609.6 m, 测距精度为 1 cm。根据任务需要, 有多种工作模式可供选择: 伪彩色、真彩色、混合彩色、主动 FLIR。3D-LZ 系统在各种模式下获取的图像如图 4 所示。

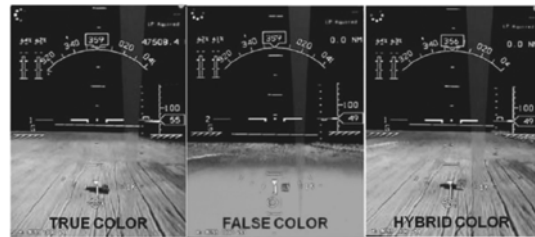


图 4 3D-LZ 系统在各种模式下获取的目标图像

Fig. 4 Target image obtained with 3D-LZ system in several modes

美国军队工程师军团 (United States Army Corps of Engineers, USACE) 从 1996 年开始开展海岸线探测激光主动成像系统的研究, 成功研制出海防测绘和激光成像系统 (Coastal Zone Mapping and Imaging Lidar, CZMIL)<sup>[11-13]</sup>。CZMIL 系统包含 LIDAR、成像光谱仪、数字摄影机, 其设计工作高度为 400 m, 探测器包含有光电倍增管 (PMT)、

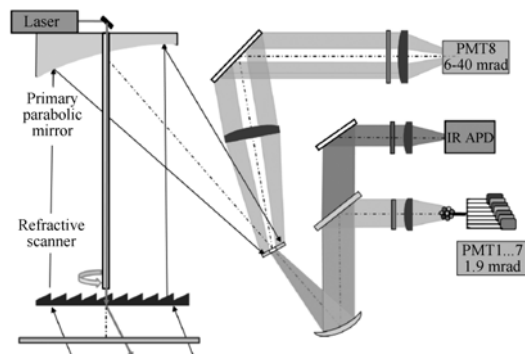


图 5 CZMIL 系统工作原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of working principle of CZMIL system

APD 及 PIN 光电二极管。其中 PIN 光电二极管用于探测激光输出信号,作为后续计时起始信号;APD 用于大气环境监测;PMT 用于探测目标回波信号。CZMIL 系统工作原理示意图如图 5 所示。

CZMIL 系统采用圆形菲涅耳透镜进行扫描,设计加工的扫描镜实物如图 6 所示。CZMIL 系统获取的地物图像如图 7 所示。



图 6 CZMIL 系统设计加工的圆形菲涅耳透镜实物图

Fig. 6 Physical image of circular Fresnel prism designed for CZMIL system

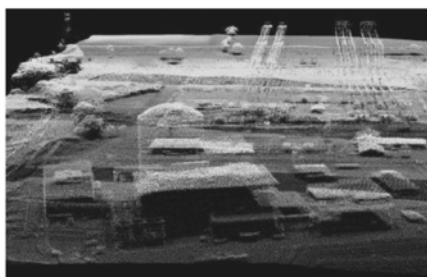


图 7 CZMIL 系统获取的地物图像

Fig. 7 Image on the ground gained by CZMIL system

为满足机器人自动驾驶应用需求,韩国工业技术研究所和三星机电有限公司联合研制了 KIDAR-B25 紧凑型激光主动成像系统<sup>[14]</sup>,其主要目的是高速获取目标高精度距离信息。系统选取波长为 905 nm 的脉冲激光器,脉冲宽度为 10 ns、重复频率为 20 kHz、峰值功率为 20 W,探测器选取硅基 APD,通过水平及垂直扫描机构实现对周边区域的成像。KIDAR-B25 系统装置如图 8 所示。

经测试,垂直扫描速率最高可达 20 Hz,对应扫描范围为  $\pm 10^\circ$ ,角分辨率为  $0.25^\circ$ ;水平扫描

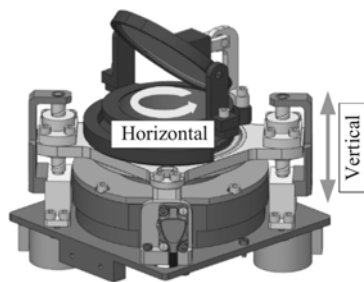


图 8 KIDAR-B25 系统装置图

Fig. 8 Image of KIDAR-B25 system apparatus

速率最高可达 40 Hz,实现  $360^\circ$  扫描,对应角分辨率

为  $0.125^\circ$ 。KIDAR-B25 系统具有两种工作模式:在精确控制模式下,目标图像每 5 ~ 10 s 更新一次;在实时控制模式下,系统成像帧频可达 5 Hz。

KIDAR-B25 系统在水平轴扫描速率为 20 Hz、垂直轴扫描速率为 0.2 Hz 条件下,工作于精确控制模式时获取的室外测试图像如图 9 所示。



图 9 KIDAR-B25 系统在精确控制模式下获取的图像

Fig. 9 Image gained in precision mode with KIDAR-B25 system

KIDAR-B25 系统在水平轴扫描速率为 40 Hz、垂直轴扫描速率为 5 Hz 条件下,工作于实



图 10 KIDAR- B25 系统在实时控制模式下获取的图像

Fig. 10 Image gained in real-time mode with KIDAR- B25 system

时控制模式时获取的室外测试图像如图 10 所示。

### 3.2 基于小面阵探测器扫描的激光主动成像系统

美国麻省理工学院林肯实验室很早就致力于激光主动成像技术的研究,最早的产品为大型地基高功率、长距离 Firepond(火池)激光探测成像系统:应用于太空目标监视和弹道导弹防御等战略军事领域。林肯实验室从 1975 年开始研究机载激光主动成像系统,早期代表成果为红外机载雷达系统 (Infrared Airborne Radar System, IRAR)<sup>[15]</sup>。IRAR 系统测距精度最高可达 15 cm。实验结果同时显示出激光主动成像系统所获取的目标距离图像可多视角显示,且具备很好的隐藏目标识别能力。

为发展低功耗、轻小型激光主动成像系统,林肯实验室研制了具有片上计时电路的盖革模式 APD 阵列,并基于此研发了第一代激光主动成像系统 Gen-I<sup>[16]</sup>。Gen-I 系统采用的探测器为 4 × 4 盖革模式 APD 阵列,并采用两个单轴扫描镜进行扫描,以扩大系统的覆盖面积(4.5 frame/s@ 32 × 32 或 0.6 frame/s@ 128 × 128)。Gen-I 系统光路示意图及所获取的目标图像分别如图 11、图 12 所示。

林肯实验室对 Gen- I 系统进行了改进,形成第二代产品 Gen- II。其改进之处主要体现在探测器规模扩大为 32 × 32,同时,为了提高探测器接收回波能量,在探测器前集成安装了 32 × 32 微透镜阵列,而其扫描系统改为两轴扫描镜。

在发展 Gen- I 和 Gen- II 系统的同时,林肯实验室还集成了加强版及 Gen- III<sup>[17]</sup>激光主动成像

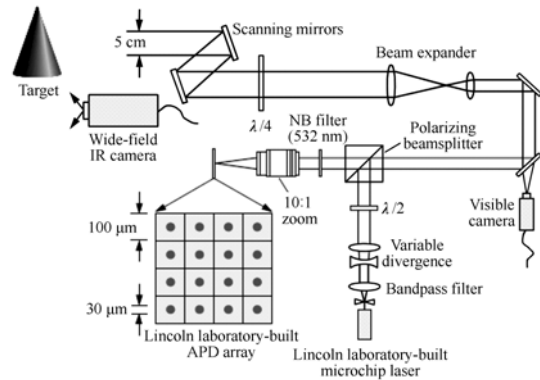
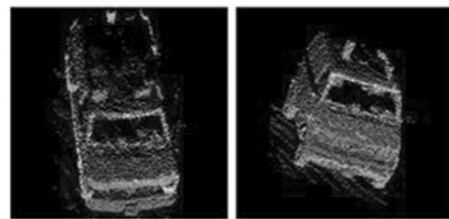
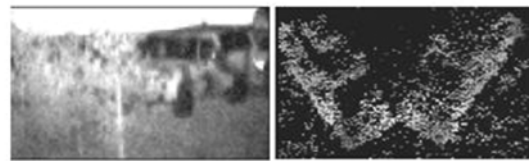


图 11 Gen-I 系统光路示意图

Fig. 11 Sketch of optical path of Gen-I system



(a) 60 m 处汽车距离图像  
(a) Range image of car in 60 m distance



(b) 500 m 处隐蔽汽车灰度/距离图像  
(b) Gray and range image of folged car in 500 m distance

图 12 Gen-I 系统获取的目标图像

Fig. 12 Target image gained by Gen-I system

系统,其与 Gen- II 系统的区别在于为减小激光器输出功率,去除了探测器前的微透镜阵列,取而代之的是采用分束照明方式,将激光器输出光束分为 32 × 32 细束,以达到与探测器匹配的目的。Gen- III 系统光路示意图与目标照明及距离图像分别如图 13、图 14 所示。

美国国防部高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 曾研发一项用于发现高隐藏目标的小型无人机载激光主动成像系统 (JIGSAW)<sup>[18]</sup>,其目标是在飞行高度 200 m 处能够覆盖直径大于 37 m 的目标区域。根据目标要求,需要 256 × 256 探测器阵列,限于当时只有 32 × 32 探测器阵列,其采用双光楔镜对

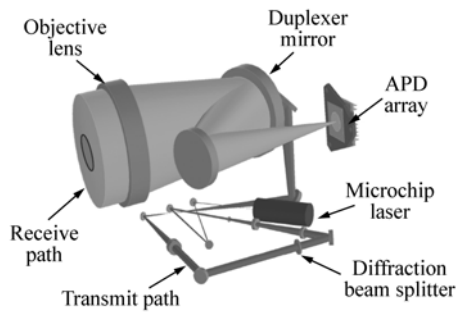
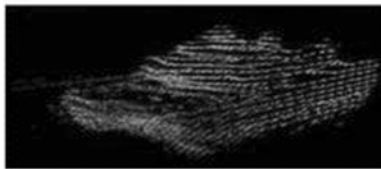


图 13 Gen-III 系统光路示意图

Fig. 13 Sketch of optical path of Gen-III system



(a) 照明图像  
(a) Illumination image



(b) 距离图像  
(b) Range image

图 14 Gen-III 系统对 500 m 坦克照明及距离图像

Fig. 14 Illuminating and range image of a tank obtained with Gen-III system in 500 m distance

目标区域进行扫描,发射光束同样采用分束照明方法照射目标。JIGSAW 系统工作样机及获取的高隐藏目标图像分别如图 15、图 16 所示。

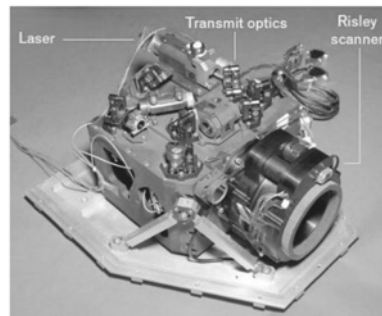


图 15 JIGSAW 系统样机

Fig. 15 Prototype of JIGSAW system

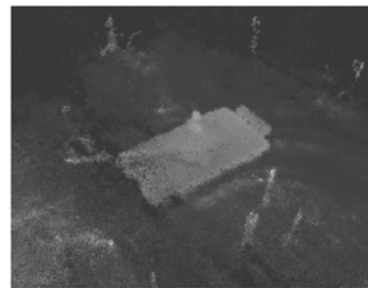


图 16 JIGSAW 系统获取的高隐藏目标图像

Fig. 16 Highly camouflaged target image gained by JIGSAW system

Gen- I 、Gen-III 和 JIGSAW 系统指标参数如表 1 所示。

表 1 Gen- I 、Gen-III 系统和 JIGSAW 系统指标参数

Tab.1 Parameter of Gen- I , Gen-III and JIGSAW system

	Gen- I	Gen-III	JIGSAW
Laser	Passively Q-Switched Nd:YAG Micro-chip Laser		
Laser wavelength		532 nm	
Repeated frequency/kHz	1	5 ~ 10	16
Energy per pulse/ $\mu$ J	30	33	4
Pulse length(FWHM)/ps	380	700	300
Detector	4 $\times$ 4 GM APD	32 $\times$ 32 GM APD	
Pixel pitch		100 $\mu$ m	
Receive aperture diameter/cm	5	7.5	
Focal length	/	30.0 cm	
Illuminated way	/	32 $\times$ 32 diffraction beam splitter	
Range resolution/cm	/	15	40
Scanning mirror	Two single axis	Two axis	Risley prism
Weight	/	6 kg	/

为在探测器受限条件下获取更大区域目标图像,日本防御部科技研究院研制了光纤扫描激光主动成像系统<sup>[19]</sup>,其工作原理示意图如图 17 所示。

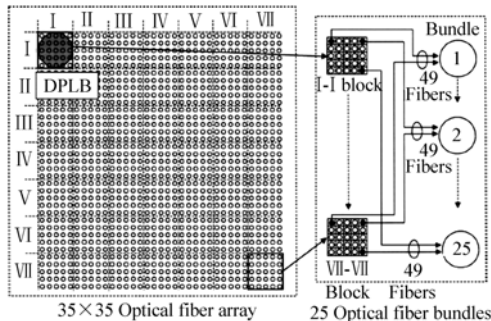


图 17 光纤扫描激光主动成像系统工作原理示意图

Fig. 17 Schematic diagram of working principle of optical fiber scanning laser active imaging system

光纤扫描激光主动成像系统工作原理如下:在焦平面一端,光纤阵列横剖面由  $35 \times 35$  光纤阵列组成,并将光纤阵列划分为  $7 \times 7$  的区域,将每个区域同一位置的光纤组成一个光纤簇,即每一光纤簇由 49 根光纤组成,共分为 25 个光纤簇。系统采用 25 个探测器,每个光纤簇连接一个探测器。在光纤阵列前端放置一个允许露出  $5 \times 5$  光纤剖面区域的可移动窗口用于控制受光区域,确保探测器接收回波脉冲激光束时无串扰影响,通过窗口的移动实现扫描成像,其实质为接收系统前端扫描,优点是稳定性高、成像准确,缺点是激光器功率要求高、视场大。该系统测试时作用距离为 27 m,测距分辨率优于 15 cm,测距精度达 10 cm,但其成像速度慢,每帧耗时 34.6 s。

### 3.3 Flash LADAR

美国 Advanced Scientific Concepts(ASC) 自从 1987 年开始研究 Flash(闪光) LADAR<sup>[20-26]</sup>,其采用 ASC 专利技术发明了 Flash 探测器,工作原理示意图如图 18 所示。

该探测器像元数为  $128 \times 128$ ,采用切片成像方式,每个像元具备 20 个切片成像能力,每个时间切片对应 ns 级门宽。激光器向目标发出一束激光,在设定距离门限内,开启探测器,若第一个时间切片对应的门宽内,探测器有信号输出,说明该门限对应距离处存在目标。之后探测器进行复

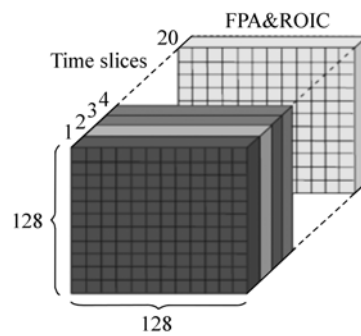


图 18 ASC 专利技术探测器工作原理示意图

Fig. 18 Operational sketch of sensor with ASC patent

位,以判断下一时间切片对应门宽内是否有回波信号。以此类推,直至完成 20 个切片门限范围内回波信号有无的判断。同时探测器具有片上读出电路,简化系统设计,测距精度达到 cm 级别,成像帧频为 30 Hz。

ASC 公司已研制出一系列 Flash LADAR:分立式(1998 年)、便携式(2005 年)、TigerEye(2009 年)、DragonEye(2009 年)及 GoldenEye(2013 年)等。其中,TigerEye Flash LADAR 尺寸仅为  $11 \text{ cm} \times 11.3 \text{ cm} \times 10.7 \text{ cm}$ ,质量为 10.7 cm。ASC 公司 Flash LADAR 对 1 km 以外目标所成图像如图 19 所示。



图 19 ASC 公司 flash LADAR 对 1 km 以外目标所成图像

Fig. 19 Image of target beyond 1 km gained by flash LADAR from ASC Corporation

同时,ASC 公司 Flash LADAR 对浓烟背后目标也具有极好的“透视”能力,测试结果如图 20 所示。

从图 20 上图可见光图像可以看出,由于烟雾过浓,背后目标无法显现,而 Flash LADAR 通过时间切片技术可以清楚显示浓雾背后人物图像(见图 22)。ASC 公司未来设计探测器像元规模达到  $256 \times 256$ ,成像帧频达到 60 Hz,作用距离达



图 20 ASC 公司 flash LADAR“透视”能力测试

Fig. 201 Penetrating performance test of flash LADAR from ASC Corporation

5 km。

利用 ASC 公司的 Flash 探测器,美国 Ball 宇航科技公司(Ball Aerospace & Technologies Corporation)耗时 6 年于 2011 年研制出其第 5 代 Flash LADAR<sup>[27-29]</sup>,其同时集成有可见光相机,以对目标同时获取可见图像和距离图像,并进行后续图像融合,其探测器规模为  $128 \times 128$ ,成像帧频为 30 Hz。Ball 公司第 5 代 Flash LADAR 实物图如图 21 所示。

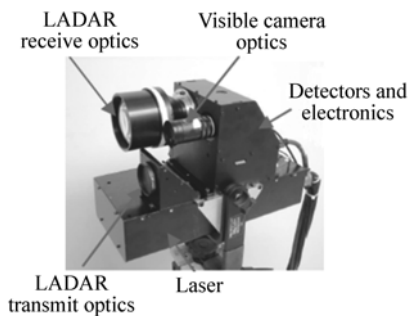


图 21 Ball 公司第 5 代 flash LADAR 实物图

Fig. 21 Physical image of 5<sup>th</sup> generation flash LADAR from Ball Corporation

采用大面阵 Flash 探测器进行成像时的一个突出问题是:随着作用距离的增大,要求激光器输出功率越大,这必将造成系统体积、功耗过大。为解决该问题,Ball 公司和科罗拉多州立大学等研究机构提出电子扫描 Flash LADAR(ESFL: Electronically Steerable Flash LIDAR)<sup>[30-31]</sup>的概念,其采用声光调制器(Acousto-Optic Beam Deflector, AOBD)对输出激光束进行调制,工作原理示意图如图 22 所示。

图 22 中,调制信号数目决定了输出光束数,

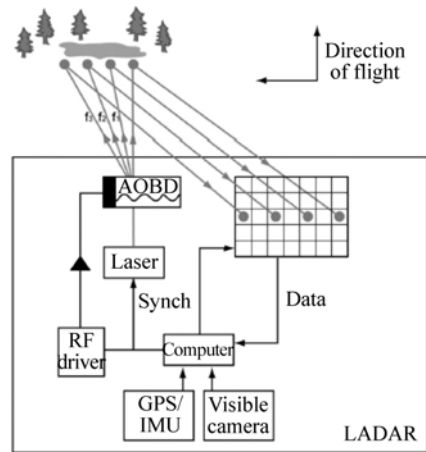


图 22 ESFL 工作原理示意图

Fig. 22 Schematic diagram of working principle of ES-FL system

各输出光束偏转角与其对应调制信号频率相关,而各输出光束能量由调制信号幅值决定。ESFL 应用方法主要是随着目标距离不同改变调制信号特性,示意图如图 23 所示。

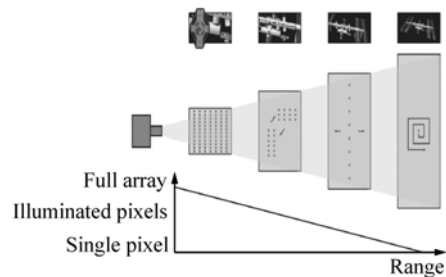


图 23 ESFL 应用示意图

Fig. 23 Sketch of ESFL system application

图 23 中下图曲线横坐标为目标距离,纵坐标为照射探测器像元数。当目标距离较远时,通过控制调制信号,将激光光束照射在探测器阵列中的部分像元甚至是其中单个像元上,以提高像元接收到的回波功率,提高系统作用距离;当目标距离较近时,激光光束照射整个探测器阵列,以获取目标高空间分辨率图像。

### 4 成像方式对比分析

综上所述,直接测距型激光主动成像系统成



像方法主要集中在采用单点探测器或小面阵探测器配合光机扫描,或者采用 Flash 探测器。各实现方法各有优缺点,分述如下:

(1)在单点探测器配合光机扫描方法中,因只有一个探测器,相比于其他方法,在测试条件相同的情况下,探测器接收到的目标回波功率最大。因此,该方法能够实现较远的作用距离。但由于每发送一次脉冲激光,仅能获取目标单点距离信息,因此要求激光器具有较高重复频率。同时,需要对获取的各点信息进行几何较准,后续处理难度大;鉴于光机扫描效率的限制,该方法能够实现的成像帧频不高;

(2)小面阵探测器配合光机扫描方法中,每发送一次激光脉冲,能够获取目标多点信息,且各点信息空间相关性很强,无需进行几何较准,但不同脉冲情况下获取的图像之间仍需进行几何较准。相比于单点探测器配合光机扫描方法,该方法要求激光器输出功率较大,通过分束照明方法可有效减轻对激光器输出功率的要求。同样,限于光机扫描效率,该方法能够实现的成像帧频依然不高;

(3)采用 Flash 探测器可以在发送一束脉冲激光的条件下获取目标整个图像,无需光机扫描机构,从而大大减小了系统尺寸、体积和功耗。同时,获取目标各点距离信息相关性很强,大大简化

了后续数据处理,便于实现系统小型化。同时,该方法可在激光器低重复频率条件下输出目标视频图像。但该方法要求输出激光束照射整个目标区域,要求激光输出功率大,作用距离受限;

(4)采用 Flash 探测器配合电子扫描,可根据目标距离不同自适应改变照射目标区域像素数,在远距离工作时,以空间分辨率换取作用距离,减轻了对激光器输出功率的要求。

## 5 结束语

直接测距型激光主动成像系统可通过单点探测器或小面阵探测器配合光机扫描实现,或者采用 Flash 探测器。各方法有各自优缺点,需根据系统实际应用需求,综合考虑系统体积、质量、功耗、激光器输出功率及脉冲重复频率、所能获取的探测器类型、后续数据处理能力等多种因素折中选取。在作用距离较远,但对成像帧频要求不高,且系统体积、质量、尺寸允许的条件下,可采用单点探测器配合光机扫描方案;在作用距离较近,且需目标实时视频信息,而系统体积、重量要求严格情况下,可采用 Flash 探测器配合电子扫描来实现。而小面阵探测器配合光机扫描方案在实现难度、性能等方面则介于上述两种方案之间。

## 参考文献:

- [1] 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.  
ZHANG J,ZHANG L,ZENG F, et al. . Development status of airborne 3D imaging lidar systems[J]. *Chinese Optics*, 2011,4(3):213-232. (in Chinese)
- [2] 施智勇,潘晓声,张谦. 利用延时法进行高精度脉冲激光测距[J]. 光学精密工程,2014,22(2):252-258.  
SHI ZH Y,PAN X SH,ZHANG Q. High-precision pulsed laser measuring distance by time delay method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,22(2):252-258. (in Chinese)
- [3] 张清源,李丽,李全熙,等. 直升机防撞激光雷达综合信息处理系统[J]. 中国光学,2013,6(1):80-87.  
ZHANG Q Y,LI L,LI Q X, et al. . Comprehensive information processing system of helicopter anticollision laser radar[J]. *Chinese Optics*,2013,6(1):80-87. (in Chinese)
- [4] 郭裕兰,万建伟,鲁敏,等. 激光雷达目标三维姿态估计[J]. 光学精密工程,2012,20(4):843-850.  
GUO Y L,WANG J W,LU M, et al. Three dimensional orientation estimation for laser target[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(4):843-850. (in Chinese)
- [5] 赵建川,王弟男,陈长青,等. 红外激光主动成像和识别[J]. 中国光学,2013,6(5):795-802.  
ZHAO J CH,WANG D N,CHEN CH Q, et al. . Infrared laser active imaging and recognition technology[J]. *Chinese Optics*,2013,6(5):795-802. (in Chinese)

- [6] 王灿进,孙涛,石宁宁,等.基于双隐含层BP算法的激光主动成像识别系统[J].光学精密工程,2014,22(6):1639-1647.  
WANG C J, SUN T, SHI N N, *et al.*. Laser active imaging and recognition system based on double hidden layer BP algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6):1639-1647. (in Chinese)
- [7] 王飞.实时激光三维成像焦平面阵列研究进展[J].中国光学,2013,6(3):297-305.  
WANG F. Research progress in focal plane array for real-time laser three dimensional imaging[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3):297-305. (in Chinese)
- [8] SCHULZ K R, SCHERBARTH S, FABRY U. Hellas:Obstacle warning system for helicopters[J]. *SPIE*, 2002, 4723:1-8.
- [9] BERS K, SCHULZ K R, ARMBRUSTER W. Laser radar system for obstacle avoidance[J]. *SPIE*, 2005, 5958:59581J.
- [10] SAVAGE J, HARRINGTON W, MCKINLEY R A. 3D-LZ helicopter ladar imaging system [J]. *SPIE*, 2010, 7684:768407.
- [11] FUCHS E, TUELL G. Conceptual design of the CZMIL data acquisition system(DAS); integrating a new bathymetric lidar with a commercial spectrometer and metric camera for coastal mapping applications[J]. *SPIE*, 2010, 7695:76950U.
- [12] FUCHS E, MATHUR A. Utilizing circular scanning in the CZMIL system[J]. *SPIE*, 2010, 7695:76950W.
- [13] FEYGELS V I, PARK J Y, WOZENCRAFT J, *et al.*. CZMIL(Coastal Zone Mapping and Imaging Lidar): from first flights to first mission through system validation[J]. *SPIE*, 2013, 8724:87240A.
- [13] LEE M G, BAEG S H, LEE K M, *et al.*. Compact 3D LIDAR based on optically coupled horizontal and vertical scanning mechanism for the autonomous navigation of robots[J]. *SPIE*, 2011, 8037:80371H.
- [14] GSCHWENDTNER A B, KEICHER W E. Development of coherent laser radar at Lincoln Laboratory[J]. *Lincoln Laboratory J.*, 2000, 12(2):383-396.
- [15] ALBOTA M A., AULL B F, FOCHE D G, *et al.*. Three-dimensional imaging laser radars with Geiger-mode avalanche photodiode arrays[J]. *Lincoln Laboratory J.*, 2002, 13(2):351-370.
- [16] MARINO R M, STEPHENS T, HATCH R E, *et al.*. A compact 3D imaging laser system using Geiger-mode APD arrays: system and measurements[J]. *SPIE*, 2003, 5086:1-15.
- [17] MARINO R M, DAVIS W R. Jigsaw: a foliage-penetrating 3D imaging laser radar system[J]. *Lincoln Laboratory J.*, 2005, 15(1):23-36.
- [18] AKIYAMA A, KAKIMOTO Y, KANDA K, *et al.*. Optical fiber imaging laser radar[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(1):016201.
- [19] Advanced Scientific Concepts, Inc., Santa Barbara, Calif. 3D imaging laser radar: America, 6133989[P]. 2000-10-17.
- [20] STETTNER R, BAILEY H. Eye-safe laser radar 3-D imaging[J]. *SPIE*, 2004, 5412:111-116.
- [21] STETTNER R, BAILEY H, SILVERMAN S. Large format time-of-flight focal plane detector development[J]. *SPIE*, 2005, 5791:288-292.
- [22] Larsson H, Gustafsson F, Johnson B, *et al.*. Characterization measurements of ASC FLASH 3D ladar[J]. *SPIE*, 2009, 7482:748207.
- [23] STETTNER R. Compact 3D flash LIDAR video cameras and applications[J]. *SPIE*, 2010, 7684:768405.
- [24] WONG CH M., LOGAN J E, BRACIKOWSKI CH, *et al.*. Automated in-track and cross-track airborne flash ladar image registration for wide-area mapping[J]. *SPIE*, 2010, 7684:76840S.
- [25] POBEREZHSKIY I, JOHNSON A, CHANG D, *et al.*. Flash lidar performance testing-configuration and results[J]. *SPIE*, 2012, 8379:837905.
- [26] COPPOCK E, NICKS J D, NELSON R, *et al.*. Real-time creation and dissemination of digital elevation mapping products using total sight™ flash LiDAR[A]. ASPRS 2011 Annual Conference. Milwaukee, Wisconsin, 2011.
- [27] Ball Aerospace & Technologies Corp., Boulder, CO(US). Flash LADAR system: America, US7961301B2[P]. 2011-06-14.
- [28] NICKS J D, STAPLE B, DELKER T, *et al.*. Flash ladar flight testing and pathway to UAV deployment[A]. AIAA 2010

Conference. Atlanta, Georgia, 2010.

- [29] ROHRSCHEIDER R R, MASCIARELLI J, MILLER K L, *et al.*. An overview of Ball flash LIDAR and related technology development[A]. AIAA Guidance, Navigation and Control(GNC) Conference. Boston, 2013.
- [30] DUONG H V, LEFSKY M A, RAMOND T, *et al.*. The electronically steerable flash lidar: a full waveform scanning system for topographic and ecosystem structure applications[J]. *IEEE*, 2012, 50(11): 4809- 4820.

#### 作者简介:



徐正平(1983—),男,河南许昌人,博士,副研究员,2006年于东北师范大学获得学士学位,2011年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事计算成像及航空遥感器电子学设计方面的研究。E-mail: xuzp090@163.com



许永森(1981—),男,河南信阳人,博士,副研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事航空遥感器方面的研究。E-mail: pm131@sina.com



沈宏海(1976—),男,博士,研究员,1998年于山东大学获得学士学位,2001年、2009年于中国科学院研究生院分别获得硕士、博士学位,主要从事新型航空光学遥感技术及其光电集成方面的研究。E-mail: shenhh@ciomp.ac.cn