

激光与光电子学进展

安防激光雷达研究进展

宋召奇^{1,2}, 朱精果^{1*}, 解天鹏^{1,2}, 李锋¹, 姜成昊¹, 郭文举¹, 王春晓¹, 蒋衍¹

¹中国科学院微电子研究所, 北京 100029;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 激光雷达主动发射激光,可高精度、高分辨率地获取入侵目标的距离、方位、速度及轮廓等信息,已在城市安防和工业安全等领域得到广泛应用。简要介绍了国内外主流安防激光雷达厂商及其产品技术指标。结合不同安防应用需求,从测距方案、扫描方式和光源选型三个方面重点讨论了不同技术体制下激光雷达的原理、特点及现状。最后对安防激光雷达的应用趋势及发展前景进行了总结与展望。为了满足消费级安防应用需求,安防激光雷达将进一步向低成本、高性能、系列化、小型化、固态化、芯片化及多源集成等方向发展。

关键词 激光雷达; 安防应用; 技术体制; 发展趋势

中图分类号 TN958.98; TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0100002

Research Progress on Security LiDAR

Song Zhaoqi^{1,2}, Zhu Jingguo^{1*}, Xie Tianpeng^{1,2}, Li Feng¹, Jiang Chenghao¹, Guo Wenju¹,
Wang Chunxiao¹, Jiang Yan¹

¹*Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract A light detection and ranging (LiDAR) system can actively emit laser light to capture the distance, direction, speed, and contour of an intrusion target with high accuracy and high resolution, and thus it is widely used in the urban security, industrial fields, etc. This paper briefly introduces the mainstream manufacturers of security LiDAR at home and abroad as well as the technical indicators of their products. The principle, characteristics and current status of security LiDAR under different technological regimes are mainly discussed in terms of LiDAR ranging schemes, scanning methods and light source selection, combined with different security applications. The application trend and development future of security LiDAR are summarized and prospected in the end. Security LiDAR will develop toward low-cost, high-performance, serialization, miniaturization, solidification, chip, and multi-source integration.

Key words LiDAR; security application; technological regime; development trend

OCIS codes 280.3640; 280.3420; 140.3360

1 引 言

随着科技发展以及安全意识的提升,越来越多的传感器探测技术应用于安防市场。传统的安防

手段利用主被动传感器进行探测,实现声音监听、视频监控、红外报警和门禁识别等应用。激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)作为主动式环境感知的智能传感器^[1-2],相比于传统摄像头和被

收稿日期: 2020-03-31; 修回日期: 2020-05-18; 录用日期: 2020-05-27

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0803404)

*E-mail: zhujingguo@ime.ac.cn

动红外探测技术,其不受光照环境和目标特性等条件限制,抗干扰性强;相比于激光对射技术,可提供目标动态位置等信息,具有定位跟踪功能,灵活度高;相比于毫米波、微波雷达等传统雷达技术^[3],其工作波长较短,可精确获取目标距离、速度等信息,分辨率高。由此可见,激光雷达在安防领域优势明显,应用场景广泛,在城市安防和工业安全等领域发挥着重要的作用^[4-7]。传统测绘级激光雷达通常体积庞大且价格昂贵,其在安防领域的大规模推广应用受到制约,市场对轻量级和低成本激光雷达需求越来越高。此外,安防领域的特殊性对激光雷达硬件设计、性能指标及软件算法有一些特殊要求:敏感地带的周界防范,要求其具有高探测率和低虚警率;用于目标保护的监控环境,要求其光源隐蔽且人眼安全;恶劣条件下的建筑保护,要求其稳定可靠、防护等级高。

为了满足安防领域的特殊需求,激光雷达关键技术的研究工作正在不断地深入。不同技术体制激光雷达的主要区别在于测距方案、扫描方式及光源选择,这三个方面直接决定了人眼安全性、探测性能和扫描视场等核心指标参数,是实现低功耗、小型化与低成本量产的消费级安防激光雷达的关键。未来安防产业的发展趋势将是全方位和全天候的“智能识别-智能预警-实时处理”,这要求系统在具有高性能的同时更加智能化和集成化。将激

光雷达技术与人工智能和移动互联网等技术结合,可实现安防技术与产品的多元化发展。

本文围绕安防激光雷达小型化、量产化和集成化的发展特点,以测距方案、扫描方式和光源选型为切入点,综合阐述了国内外主流安防激光雷达的技术指标、体制特性、典型案例以及应用趋势。最后,总结和展望了安防激光雷达未来的发展前景。

2 国内外现状

作为智能安防的“眼睛”,安防激光雷达的优异特性在于安全防护。首先能探测入侵目标,同时可作出安全预警;其次是其安全等级高,满足人眼安全及光源隐蔽等需求;最后是防护等级高,在恶劣的环境下能稳定可靠地工作。

安防激光雷达依据其探测的物理参量,如距离、灰度、速度和角度等信息,能实时解算出目标的方位、距离、宽度和深度等数据,被应用于不同类别的安防场景。如测距激光雷达可用于工业安全检测和建筑物防护等领域,能监控目标区域,实现安全距离预警;测速激光雷达可应用于交通车辆的超速监控,能准确对违章行为进行归类,保障道路安全^[8]。另外,激光雷达可利用距离、角度和灰度等信息实现目标成像,适用于目标跟踪识别等领域。如图 1 所示,目前,安防激光雷达在周界防护、工业监控、入侵预警及文物保护等领域得到广泛应用^[9-12]。

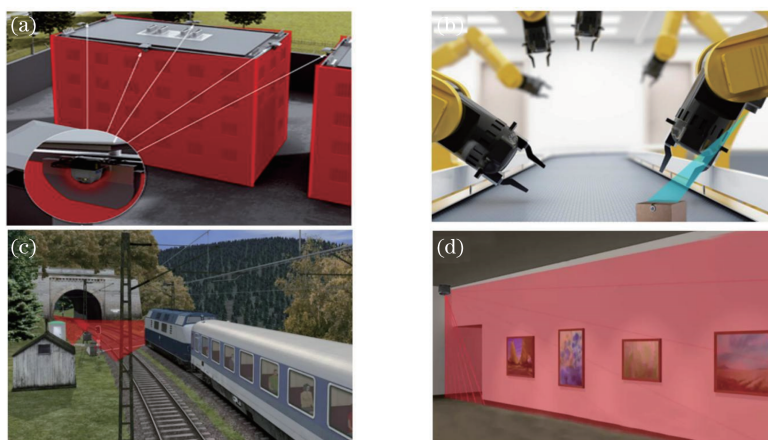


图 1 应用场景。(a)周界防护^[9];(b)工业监控^[10];(c)入侵预警^[11];(d)文物保护^[12]

Fig. 1 Application scenarios. (a) Perimeter protection^[9]; (b) industrial monitoring^[10]; (c) intrusion warning^[11]; (d) cultural relic protection^[12]

近年来,随着安防激光雷达的快速发展,其涉及的应用场景越来越广泛,从室内外建筑防护到智能交通管控^[13-14],再到空中反无人机(Unmanned Aerial Vehicle,UAV)预警^[15]等。对于不同安防场景下的入

侵目标,安防激光雷达具有高探测率,能判断入侵目标的属性,确定位置信息,并及时预警。不同安防场景下的探测目标如表 1 所示,可以看出,安防应用场景下所针对的入侵目标主要是人群,因此这在一定程

表 1 不同安防场景下的探测目标

Table 1 Detecting targets in different security scenarios

Security scenario	Detect object
Perimeter protection	People, animal, and weapon
Traffic control	People, car, animal, and rolling stone
Cultural relic protection	People
Airborne intrusion warning	UAV, bird, and people

度上要求安防激光雷达满足光源隐蔽和人眼安全的要求,从而实现对探测目标的隐蔽保护和安全监控。

为了应对不断变化的复杂环境,在安防领域,集成商和终端客户更关注关于入侵目标的探测精确性,如识别效果及定位精度,以及低误报率和漏报率。但是,影响安防激光雷达误报率和漏报率的关键因素并不在于测量精度,而是在于安防激光雷达稳定可靠的抗干扰能力和防护能力。如图 2 所示,在复杂的森林场景下,利用无人机搭载激光雷达探测入侵目标,因工作环境中温度和湿度等因素的复杂性,存在误判现象。因此,安防激光雷达应具备防护等级高、抗干扰能力强及环境适应性良好等特性,以确保能在恶劣环境中正常使用。

2.1 国外现状

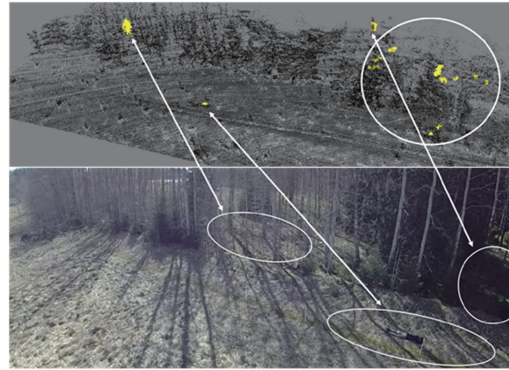
激光雷达在国外起步较早,技术应用比较成

表 2 传统激光雷达产品的指标

Table 2 Product indicators of traditional security LiDAR

Company	Product model	Accuracy /mm	Angular resolution /($^{\circ}$)	Mass /kg	Size /(mm \times mm \times mm)	Cost /USD
RiegI	VZ-400i	5	0.0007 (horizontal) and 0.0005 (vertical)	9.7	206 \times 206 \times 308	Over 10 ⁵
Optech	Galaxy T2000	8		27	340 \times 340 \times 250	Over 10 ⁶
Leica	ScanStation P50	3	0.0022	12.5	238 \times 358 \times 395	115240
Trimble	Trimble GX	7	0.003 (horizontal) and 0.004 (vertical)	13	323 \times 343 \times 404	183300

国外主流安防激光雷达产品的指标如表 3 所示,其中 Flash 表示面阵闪光,OPA 表示光学相控阵, ρ 为目标反射率。与传统激光雷达相比,其尺寸小且成本优势明显,稳定性好,便于推广量产。主流商用的安防激光雷达制造商有德国的 SICK 和日本的 HOKUYO 等,这些公司的安防激光雷达产品是成熟的 2D 单线激光雷达,广泛应用于工业领域,占据了安防市场的主流。安防领域对激光雷达测量精度要求不高,测量精度一般在厘米级,测角精度在 0.1 $^{\circ}$ 左右。近几年,美国的 Quanergy 和 Ouster 等公司推出的高性能、低成本的固态激光雷达也逐渐成为激光雷达智能安防应用领域不可或缺的产品。

图 2 森林场景下无人机搭载安防激光雷达探测入侵目标^[15]Fig. 2 Drones equipped with security LiDAR for detecting intrusion target in forest scenario^[15]

熟。早期国外老牌激光雷达厂商,如加拿大的 Optech,澳大利亚的 RiegI,德国的 Leica 和美国的 Trimble,其产品测量精度高,但较为笨重且价格昂贵,并非安防产品消费市场的最佳选择。传统激光雷达产品的指标如表 2 所示。传统激光雷达多用于高精度工程测绘和工业测量等行业,测距精度可达毫米级,而测角精度一般是 0.001 $^{\circ}$ 甚至更低。其采用多线束机械式结构,随着内部活动部件的损耗,使用寿命降低,维护成本增加,且稳定性不佳,这极大地限制了激光雷达在安防领域的推广应用。

2.2 国内现状

国内激光雷达技术的研究起步较晚,但发展迅速。国内工业界涌现了一批知名的激光雷达公司,主要包括天河电子、北醒光子和镭神智能等。它们针对民用市场中安防领域的应用场景,推出了各自的安防激光雷达产品,其产品指标如表 4 所示。其中,天河电子自主研发的安防产品雷达哨兵 GPDS1-6 系列,可实现一定区域扇形视角范围内布防区域的周界报警、联动、视频跟踪及录像等功能,能够用于铁路、公路、电力、港口及军工等可靠性要求和性能要求高的场合。另外,中国科学院微电子研究所的激光雷达团队致力于新型激光探测感知技术的研

表 3 国外主流安防激光雷达产品的指标^[16-18]Table 3 Product indicators of foreign mainstream security LiDAR^[16-18]

Company	Technological regime	Product model	Maximum measurement distance /m	Field of view / (°)	Mass / kg	Wavelength / nm	Cost / USD
SICK	Mechanical	outdoorScan3	4	275	1.15	850	4834
		nanoScan3	3	275	0.67	905	
		TiM-S	25	270	0.25	850	
		S300	3	270	1.20	905	2437
		S3000	7	190	3.30	905	4500
		TiM1xx	10	200	0.09	850	782
HOKUYO	Mechanical	UAM-05LP	20	270	0.80	905	1200
		UTM-30LX	60	270	0.37	905	4800
		UXM-30LX	30	190	0.80	905	4800
		UST-10LX	30	270	0.13	905	1600
		YVT-35LX	35 (horizontal) and 14 (vertical)	210 (horizontal) and 40 (vertical)	0.65	905	7500
Quanergy	Mechanical	M8	300@ $\rho=80\%$	360 (horizontal) and 20 (vertical)	1.0	905	5000
	OPA	S3-1	150@ $\rho=80\%$	120 (horizontal) and 10 (vertical)	0.5	905	250
Ouster	Flash	OS0-32	55	95 (vertical)	0.445	850	6000
		OS1-32	120	45 (vertical)	0.445	850	8000
		OS2-32	240	25 (vertical)	0.930	850	16000

表 4 国内主流安防激光雷达产品的指标^[19]Table 4 Product indicators of domestic mainstream security LiDAR^[19]

Company	Technological regime	Product model	Maximum measurement distance /m	Field of view / (°)	Mass / kg	Wavelength / nm	Cost / USD
Galaxy electronic	Mechanical	GL-11xx	30@ $\rho=10\%$	270	1.80	905	
		GL-21xx	20@ $\rho=10\%$	180	1.00	905	
		GL-41xx	260@ $\rho=10\%$	100	14.00	905	
		GL-52xx	10@ $\rho=10\%$	300	0.75	905	
L iShen in elligent system	Mechanical	CX16-151C	150@ $\rho=30\%$	360 (horizontal) and 20 (vertical)	0.87	905	2800
		CX32-151A	150@ $\rho=30\%$	360 (horizontal) and 31 (vertical)	1.50	905	8500
	MEMS	LS20C	200	120 (horizontal) and 20 (vertical)		905	1500
		LS21A	Over 200	60 (horizontal) and 20 (vertical)		1550	1500
Benewake	Mechanical	TF02	22@ $\rho=90\%$	3.0	0.052	905	162
		TF03	180@ $\rho=90\%$	0.5	0.077	905	229
	Flash	CE03-D	28@ $\rho=90\%$	240.0	0.356	850	1500
Lorentech	Flash	IT series	80@ $\rho=80\%$	60 (horizontal) and 45 (vertical)	0.62	850	
		IG series	40@ $\rho=80\%$	60 (horizontal) and 30 (vertical)	0.38	850	
		IM series	20@ $\rho=80\%$	30 (horizontal) and 20 (vertical)	0.30	850	

究及装备的研制与开发。同时,该团队在激光雷达小型芯片化方面取得了丰富的研究成果。

3 技术体制

3.1 测距方案

安防激光雷达要实现目标信息的探测,除了直接对激光脉冲的飞行时间进行测量外,还可以对发射激光信号的幅值、频率和相位等进行调制,从而间接实现对目标距离的探测。按照探测方式来分,安防激光雷达测距方案可分为脉冲飞行时间(Time of Flight, TOF)、调幅连续波(Amplitude Modulated Continuous Wave, AMCW)以及调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)三种。

脉冲 TOF 探测采用脉冲光信号作为探测信号,通过精确测量反射光脉冲的飞行时间来获取目标的距离信息,其原理如图 3 所示。TOF 方案可以应用于远中近不同距离的安防,如周界安防和工业安

全,其技术原理简单,成熟度高。同时,对于脉冲激光发射、接收和处理等,均有对应的成熟模块组件和专用的处理芯片。另外,已有大量成熟的 TOF 方案与扫描方法相结合的组件,易满足市场需求。大多数激光雷达均采用此技术机制。但是目前仍存在较多亟需解决的问题:第一是抗干扰差,采用直接探测获取回波信号的方法易受环境光干扰,存在安全隐患;第二是探测灵敏度低,较高的脉冲功率对器件性能和人眼安全性提出了较高要求;第三是全天候工作问题,该方法易受雨、雾和雪等恶劣天气的影响。不同安防激光雷达厂商提出了相应的解决措施,其中北醒光子 TF03 安防激光雷达利用多回波技术,通过结合针对室外强光和雨雪雾环境的补偿算法,保证了恶劣户外环境下的可靠探测。

AMCW 探测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,其原理如图 4 所示。AMCW 一般适合于

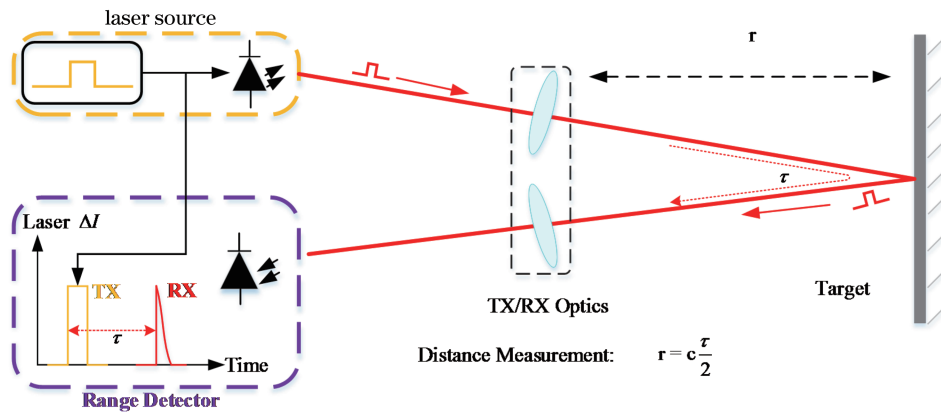


图 3 脉冲 TOF 激光雷达原理图^[20]

Fig. 3 Schematic of pulsed TOF LiDAR^[20]

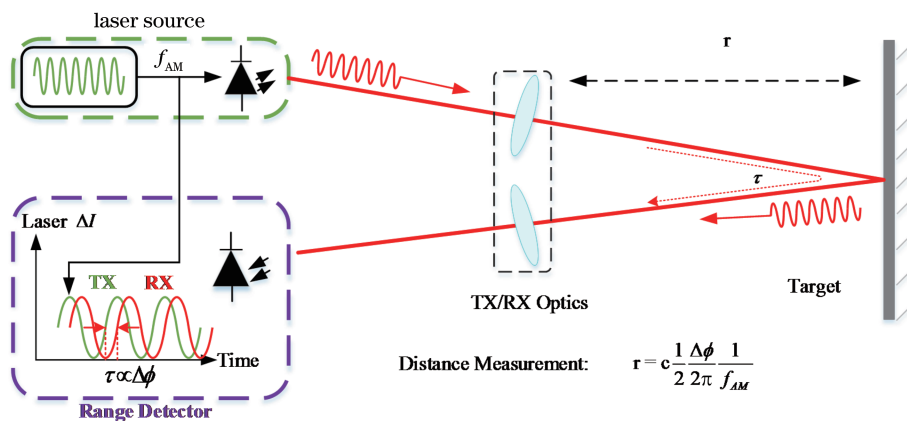


图 4 AMCW 激光雷达示意图^[20]

Fig. 4 Schematic of AMCW LiDAR^[20]

中短距离,如几十米至百米级探测距离,其独特的探测方式有利于实现固态面阵的Flash扫描,同时相位式测距精度较高,一般可达毫米量级。

FMCW 探测采用线性调频信号调制激光,并通过比较反射光信号和本振光信号的瞬时频率差来获得目标距离信息和瞬时速度,其原理如图 5 所示。

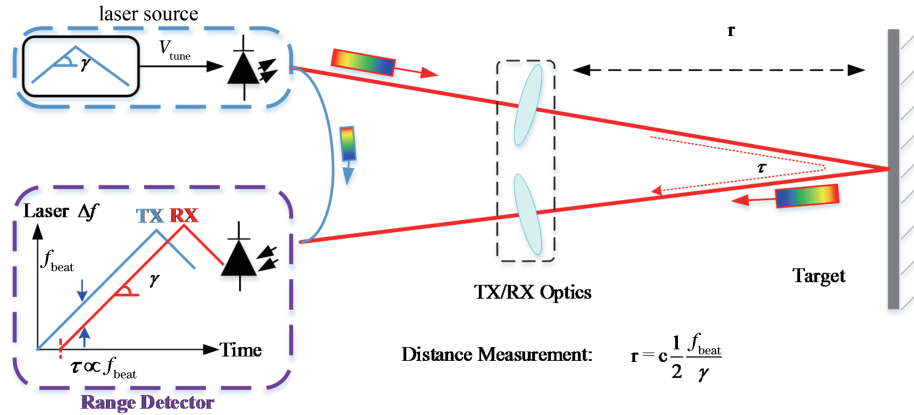


图 5 FMCW 激光雷达示意图^[20]

Fig. 5 Schematic of FMCW LiDAR^[20]

由表 5 所示,三种测距方案均有各自的特点和应用价值。与脉冲 TOF 探测和 AMCW 探测方案相比,如在技术成熟度和性价比方面,FMCW 技术的优势显著且潜力巨大。但迄今为止,FMCW 技术

相比于前两者,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,可以提供 4D 信息,有助于目标分类,应用领域更加广泛;同时具有较强的抗干扰性和较高的灵敏度。另外,该探测方式适合利用硅光子和相控阵技术进行低成本批量生产,但当前技术成熟度较低,器件较为昂贵。

方案在安防市场的应用仍存在问题,所需的高性能元器件的成本高且无法大批量制造。随着半导体技术的发展,利用光子集成技术构建片上集成激光雷达是未来发展的重要趋势。

表 5 三种测距方案的对比

Table 5 Comparison of three ranging schemes

Scheme	Measurement distance	Accuracy	Anti-interference	Power	Cost
TOF	Best	Worst	Worst	Worst	High
AMCW	Worst	Better	Better	Better	Medium
FMCW	Better	Best	Best	Best	High

3.2 扫描方式

根据系统内部有无运动器件,激光雷达可分为机械式激光雷达和固态激光雷达。其中,固态激光

雷达的实现方式有微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)、Flash 技术和 OPA 技术,其优缺点如表 6 所示。

表 6 四种扫描方式的对比

Table 6 Comparison of four scanning schemes

Scanning scheme	Measurement distance	Accuracy	Cost	Size	Technological readiness level	Stability
Mechanical	Better	Better	High	Worst	Best	Worst
MEMS	Worst	Worst	Medium	Better	Better	Better
Flash	Worst	Worst	Low	Better	Better	Better
OPA	Worst	Worst	Low	Better	Worst	-

根据扫描方式中的光束控制特性,激光雷达可分为扫描式激光雷达与非扫描式激光雷达。其中,非扫描式激光雷达通过对场景进行光覆盖而实现目标成像,如 Flash 面阵式激光雷达。合适的扫描方式可以使安防激光雷达获取较大的视场角和分辨率,

同时使整个结构更稳定。因此扫描技术的选择在很大程度上影响激光雷达的生命周期,进而决定了该体制下的安防激光雷达是否可量产。其中远探测距离和大视场角等都是安防激光雷达的关键性指标,同时也决定了未来安防激光雷达的应用前景。

3.2.1 机械式激光雷达

机械式激光雷达是指利用机械旋转来实现激光扫描。通过电机带动单点或多点测距模块进行旋转,实现全周 360°或其他大角度区域视场的扫描。机械式激光雷达的工作原理如图 6 所示,其具有原理简单、易驱动和扫描视场大等优点,最先获得了广泛应用,并成为市场上主流安防激光雷达产品的扫描方案。

考虑到镜片、机械结构和电路板等因素,多点测距模块通常无法在尺寸和重量上进行优化,因此电机带动模块进行长时间旋转时,轴承极易损耗,这使得传统机械扫描在寿命和可靠性方面备受诟病,且由损耗引起的成本增加也是非常现实的问题。因此,早期安防市场多采用降维式低成本化方

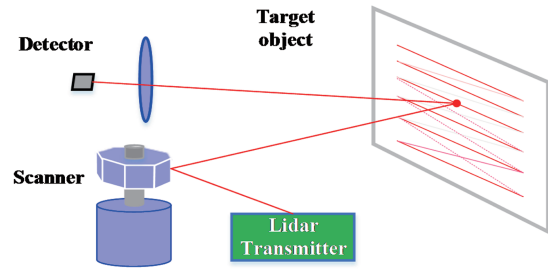


图 6 传统机械式雷达的工作原理^[21]

Fig. 6 Working principle of traditional mechanical LiDAR^[21]

案,即使用低线束线激光雷达配合其他传感器。如 SICK 公司研发的安全激光扫描仪系列^[22],如图 7 所示,这些产品外型小巧,扫描视场大,适用于建筑物保护和区域周界防护等场景。



图 7 SICK 安全激光扫描仪系列^[22]

Fig. 7 SICK safety laser scanner series^[22]

目前,激光雷达设计面临的最大挑战是在实现性能和鲁棒性的同时,以合理的成本实现量产。而机械式激光雷达因核心电子零部件冗多,体积和成本难以降低,故在安防领域无法大规模推广。为此,将激光雷达核心元器件整合至专用集成电路(Application-specific integrated circuit, ASIC)芯片中,缩小激光雷达信号处理电路体积并降低功耗与成本,这是实现多线激光雷达量化的一个重要趋势。

3.2.2 MEMS 激光雷达

MEMS 激光雷达通过集成在硅基芯片上的 MEMS 微振镜来代替传统的机械式旋转装置,由微振镜反射激光形成较广的扫描角度和较大的扫描范围^[23]。其工作原理如图 8 所示。MEMS 微振镜是传统机械式激光雷达的革新者,将引领激光雷达的小型化和低成本化。振镜扫描的方式避免了测距结构的直接旋转,可实现激光雷达的固态扫描,使激光雷达结构紧凑。

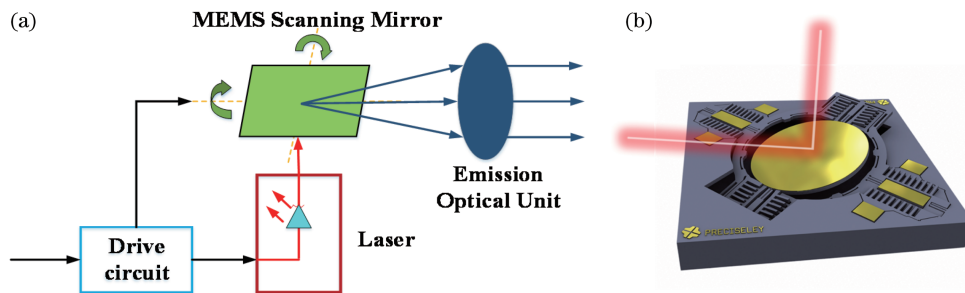


图 8 MEMS 原理图。(a) MEMS 激光雷达的工作原理^[24]; (b) MEMS 扫描镜^[25]

Fig. 8 Schematic of MEMS. (a) Working principle of MEMS LiDAR^[24]; (b) MEMS scanning mirror^[25]

凭借 MEMS 微振镜的优势,业界将 MEMS 激光雷达视为最快落地的技术。目前,镭神智能

LS20/LS21 系列 MEMS 固态激光雷达已应用于智能安防和灾害监测等领域^[26]。但是 MEMS 微振镜

的不足之处在于其扫描角度较小,需要增设角度来实现大视场扫描^[27]。另外,其能投射的激光量有限,实现“远距离探测”存在一定困难。总的来说, MEMS 激光雷达技术方案还不够成熟,有待进一步的提高。相信随着 MEMS 微振镜的发展, MEMS 激光雷达的应用前景会更加广阔。

3.2.3 Flash激光雷达

Flash激光雷达属于非扫描式雷达,通过将发射面阵光照射到目标上,利用面阵探测器探测目标对入射光的散射被,输出具有深度信息的图像,其工作原理如图9所示。虽然Flash激光雷达成本低且稳定性不错,但探测距离较近,因此应用场景受限。

国内外研发固态Flash激光雷达的厂商主要包括ASC和Ouster以及国产洛伦兹和北醒光子等公司。在安防领域,Flash激光雷达已实现广泛应用^[28-29]。Natale等^[30]利用ASC公司的3DFlash激光雷达进行目标检测、分割和跟踪,结果表明Flash激光雷达适用于周边监视和现场安全领域。但是在

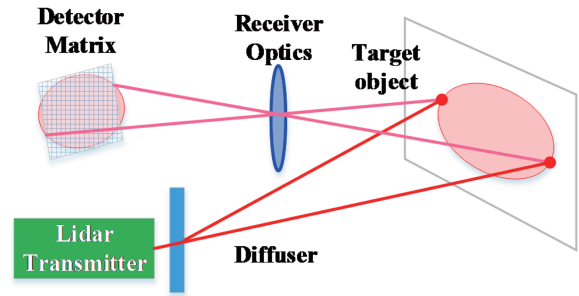


图9 Flash激光雷达的工作原理^[21]

Fig. 9 Working principle of Flash LiDAR^[21]

环境监测、物体观察和危险防御等领域,物体或人员的实时检测会受到扫描特性的限制,导致数据失真。Hammer等^[31]使用由3DFlash激光雷达构建的传感器系统,在中远距离内能够实时且高精度地跟踪高度易变的运动物体。其实验过程及结果如图10所示。另外,随着小型元器件的发展,面阵探测器成本降低,Flash激光雷达易于小型化,其在安防领域的应用会更多。

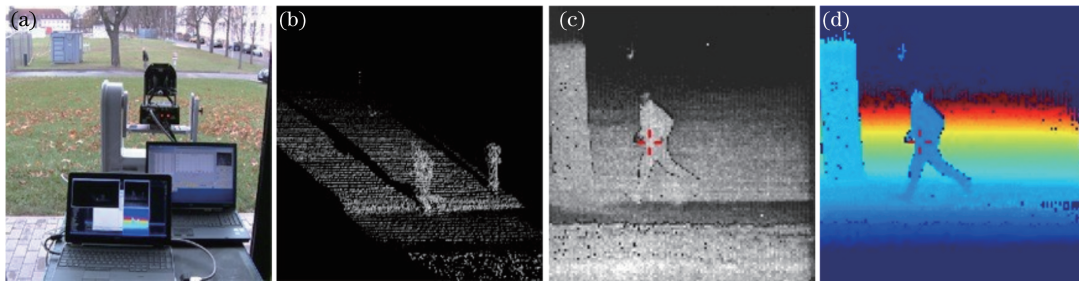


图10 Flash激光雷达的工作场景及实验结果^[31]。(a)在电子计算机上进行实时跟踪并在云台上安装Flash激光雷达进行实验设置;(b)场景点云;(c)标有人物中心的场景强度视图;(d)标有人物中心的场景范围视图

Fig. 10 Working scenario and experimental results of Flash LiDAR^[31]. (a) Experimental setup with real-time tracking on PC and Flash LiDAR on pan-tilt head; (b) point cloud of scenario; (c) intensity view of scenario with person marked center; (d) range view of scenario with person marked center

3.2.4 OPA激光雷达

OPA扫描技术作为一种新型光束指向控制技术成为了近年来的研究热点,其具有无惯性器件、精度稳定和方向可控等优点^[32]。其工作原理如图11所示,若干个发射单元组成发射阵列,通过调节发射阵列中各发射单元的相位差来改变激光光束的出射角度,进而在设定方向上实现互相加强的干涉,从而制备高强度的指向光束。

Quanergy公司一直致力于开发低成本的光学扫描相控阵固态激光雷达,发布了号称“全球第一款固态激光雷达传感器”的S3。S3采用OPA扫描方式,仅有手掌大小。该产品及其原理如图12所示,该S3系列产品已应用于入侵监视和门禁控制等领域^[34]。

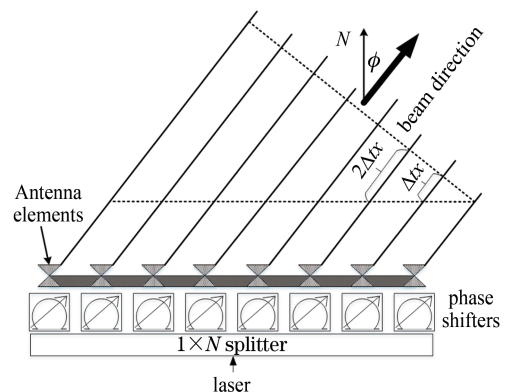


图11 OPA工作原理^[33]

Fig. 11 Working principle of OPA^[33]

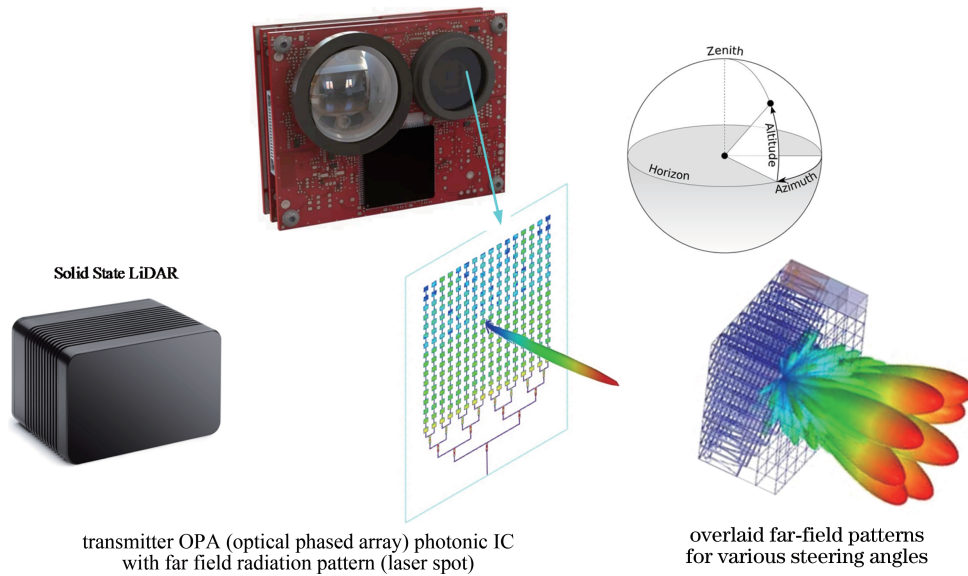


图 12 Quanergy S3 激光雷达原理^[34]

Fig. 12 Working principle of Quanergy S3 LiDAR^[34]

具有高集成度的光学相控阵技术能够满足安防激光雷达全固态和小型化的发展需求。但是,目前制约 OPA 安防激光雷达的量产因素主要有两点:一是在实际扫描中易形成旁瓣,这会影 响光束的作用距离和角分辨率;二是加工难度较高。因此,OPA 安防激光雷达技术仍不成熟,现阶段很难实现产品化。

3.3 激光光源

适用于安防环境的激光雷达对理想光源的选择也需要考虑相关的参数及条件。在防护目标的特殊性要求下,传感器既要考虑光源的隐蔽性,又要保证人眼安全;在极端环境的条件下,传感器需满足低功耗与高性能的要求。另外,光源的成本和体积在一定程度上决定了量产的可能性。

安防激光雷达的光源参数尤为重要。目前发展较为成熟的激光雷达如机械式激光雷达,多采用红外波段的 905 nm,且主要是采用基于砷化镓(GaAs)的激光器和 Si 雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)等材料系统。而 850 nm 波长常用于 Flash 激光雷达,如 Ouster 的 OS 系列激光雷达。首先,该波段对大气湿度有较好的敏感性,原因在于高层大气对水蒸气的吸收率高,导致 905 nm 和 1550 nm 处的太阳光能量谱出现显著下降,相比之下,在所有条件下 850 nm 波段的大气水汽吸收率均较低。该波段对应太阳光谱的峰值,意味着较多来自太阳的光子会在 850 nm 处聚集,环境图像具有较高的信噪比,这一现象在黎明、黄昏和阴天时尤为显著。另外,850 nm 固体激光器能够为 Flash 激

光雷达提供所需要的高能量和高功率。

除了光源选型带来的一系列硬件成本和尺寸大小问题以及技术难度,对于安防激光雷达来说更重要是“人眼安全”问题。850 nm 以及 905 nm 太接近可见光谱,存在人眼安全问题,这实际上限制了许多激光雷达的扫描范围,从而不能满足大场景的要求。而 1550 nm 则是理想的波长选择,因为它远离可见光谱,在高功率下对人眼来说是相对安全的。如图 13 所示,与 905 nm 波长相比,在同样的光斑大小和脉宽条件下,1550 nm 激光的最大允许曝光量和最大允许峰值光功率值均高出几个数量级,眼睛安全性大大提高。如表 7 所示,虽然在人眼安全问题上,1550 nm 比其他较短波长更安全,但是 1550 nm 波段的激光器和探测器都比较贵,且技术不够成熟。

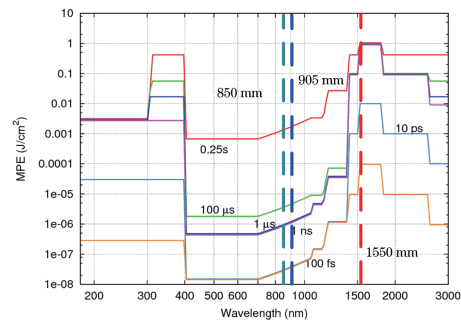


图 13 最大允许曝光量与波长的关系^[35]

Fig. 13 Relationship between maximum permissible exposure and wavelength^[35]

表 7 三种激光雷达光源的对比

Table 7 Comparison of three light sources for LiDAR

Wavelength	Anti-interference	Eye-safety	Hype cycle	Cost
850 nm	Better	Worst	Worst	Better
950 nm	Better	Worst	Better	Better
1550 nm	Worst	Better	Worst	Worst

近年来,安防激光雷达的发展趋势是逐步使用 1550 nm 这一波长,如镭神智能的 LS21 系列 MEMS 固态激光雷达采用的是 1550 nm 光纤激光器,其产品性能和稳定性均表现良好。首先,该波长下的激光器和探测器的成本较低^[36]。其次,用于制造这些波长光学芯片的 InP-InGaAs 材料系统能够制备具有出色光束质量和脉冲特性及较大功率的激光器件^[37]。另外,人眼安全特性允许其可以以更高的功率运行,在探测范围增大的同时其对雨雾雪的穿透力更强。最后,对于敌对目标的监视及成像系统,该波长具有隐蔽性,与那些波长较短的红外激光器不同,人眼在夜视镜中看不到 1550 nm 的光,通常可用于军事安防领域^[38]。

除此之外,基于 FMCW 的探测技术方案可提供较高的检测灵敏度和准确度,而硅光子学的发展为其光学器件的小型化提供了机遇。硅光子初创公司 SiLC Technologies 推出基于芯片的集成式微型 1550 nm FMCW 激光雷达,实现了探测范围扩展和人眼安全,进一步降低了功耗和成本,其在工业和安全领域得到广泛应用^[39]。

目前,在民用和商业应用中,保证人眼安全的激光器在高性能紧凑型激光雷达中越来越受欢迎。随着 1550 nm 激光器件的发展与成熟,可以预见安防激光雷达更倾向于这一人眼安全的波段。

4 应用趋势

目前,随着安防应用向智能家居、智能交通和智慧城市等领域的拓展延伸,市场对消费级安防激光雷达的需求越来越高。但激光雷达价格昂贵仍然是行业应用瓶颈,在追求大视场角、高分辨力和远距离探测等关键性能指标外,还应使其技术成本和应用方式更有利于市场的推广和普及。

随着激光雷达技术的迭代革新以及安防产业的消费需求升级,激光雷达将向着系列化、小型化、固态化、芯片化和多源集成化的方向发展。

4.1 系列化

不同安防应用场景的需求不一样,不同技术体

制下的安防激光雷达均有各自的特色和应用领域。安防激光雷达厂商依据不同体制下安防激光雷达的特点,通过结合不同安防应用方式,正逐步形成系列化产品和系统解决方案。如 Ouster 公司的 OS-0、1、2 系列激光雷达,分别提供了适用于短、中、长测距里程的激光雷达安全解决方案,确保了高效稳定的工作状态。

4.2 小型化

小型化激光雷达在满足高精度和低功耗需求的同时,适用场景广泛,便于系统集成和平台搭载,从而有利于在安防市场中的应用推广。传统的激光雷达常采用分立器件设计方式,成本高,体积大,性能低,这些缺点限制了激光雷达在安防领域的应用发展。因此,小型化、低成本是激光雷达的发展趋势。

2019 年,Intel 发布号称全球体积最小、能效最高的高分辨率激光雷达摄像头 RealSense L515,如图 14(a) 所示,其直径只有 66 mm,厚度为 26 mm,质量仅 100 g,功耗不到 3.5 W,而且配有 MEMS 微振镜系统,能让激光以较低功率进行扫描。凭借异常小巧和超低功耗的特点,其被集成于智能硬件以及手持移动设备,并被广泛应用于仓储监控等场景。另外,nanoScan3 是 SICK 公司最小的安全激光扫描仪,如图 14(b) 所示,高度仅为 80 mm。它在防护与定位移动式平台上的表现出色,同时智能集成性为其提供了高度灵活性。

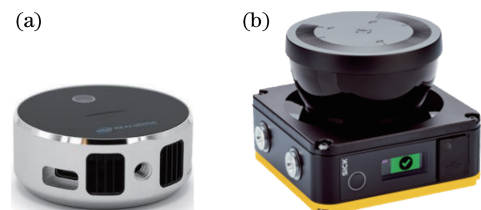


图 14 小型化激光雷达。(a) RealSense L515^[40]; (b) SICK 安全激光雷达 nanoScan3^[41]

Fig. 14 Miniaturized LiDAR. (a) RealSense L515^[40]; (b) SICK safety LiDAR nanoScan3^[41]

小型化激光雷达适应性强,集成度高。作为辅助传感器,将微型化的激光雷达集成进智能手机,可实现高精度的动作识别功能。此外,将激光雷达植入机器人的手指,使其工作时更加灵活隐蔽。在无人机领域,小型化激光雷达极大地减轻了传感器作业的负载,提高了避障和续航能力。未来小型化和低成本激光雷达将促进安防技术与产品的多元化发展。

4.3 固态化

机械式激光雷达中的活动部件限制了系统的尺寸,小型化和紧凑化会增加制作工艺的难度,从而提高成本。相比之下,固态化意味着激光雷达基于电子部件,没有机械旋转部件,偏向于固定扫描。固态化是指对激光雷达进行半导体化设计,将激光雷达内部的发射器和接收器等上千种光电器件固化到芯片之中,从而实现“固态”的形式。这样的固态激光雷达是可以完全构建在芯片上的系统,大大减小了激光雷达的尺寸,提高了使用寿命。这样的特性使得系统成本降低,体积小,便于集成。不过固态激光雷达也有缺点,固态意味着不能进行360°旋转,只能探测前方,而且视角有限。另外,固态激光雷达依然无法解决极端气候条件下无法施展性能的弊端。目前,激光雷达行业已形成TOF测距配合机械扫描或MEMS微振镜扫描的主流技术方案,但研究者仍在探索具有更高性能的技术方案,例如Flash方案及OPA等技术的探索都将推动激光雷达性能的进一步提升。未来随着技术方案的不断完善,固态化的安防激光雷达的应用范围会越来越广泛。

4.4 芯片化

随着半导体技术的发展,利用光子集成技术构建片上集成激光雷达是未来发展的重要趋势。激光雷达芯片化的必然性主要来自两方面因素的支撑:其一,内部元器件的集成化是激光雷达小型化的必经之路;其二,芯片化后的激光雷达集成了多个器件,增强了稳定性的同时大幅度降低了成本。因此,利用异质集成技术,通过将激光器、探测器和光学相控阵等关键系统集成于同一芯片上,可大幅降低系统的体积和成本,有望将更具安全防护特性的激光雷达引入到消费安防领域。从外表来看,激光雷达芯片化是激光雷达的形态从机械旋转式演

变为固态式;从内部来看,激光雷达芯片化是片上集成激光雷达以及电路设计集约化等趋势的突出表现。

如图15所示,中国科学院微电子研究所激光雷达团队自主研发了TOF成像激光雷达的全系统集成芯片以及一系列分模块芯片,包括前置放大器、差分放大器和比较器等。同时针对多通道激光雷达的应用需求,分别设计了多通道和单通道等多款系列芯片,并且搭建了激光雷达测距系统芯片的测试平台,为单芯片全集成激光雷达脉冲测距系统的最终实现奠定了坚实的基础^[42]。相比于脉冲激光雷达,调频连续波激光雷达的峰值功率较低,探测灵敏度高,对探测器性能要求低,更有利于片上集成。因此,调频连续波激光雷达被认为是片上激光雷达的优选方案之一。

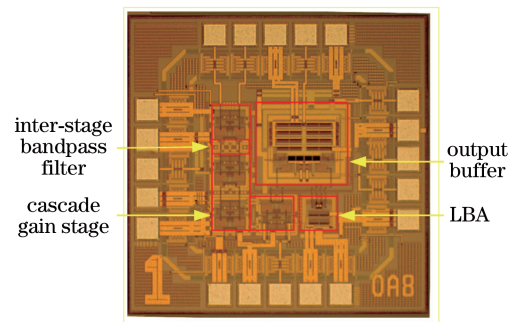


图 15 全差分主放大器芯片显微图^[42]

Fig. 15 Micrograph of fully differential main amplifier chip^[42]

美国加州大学研究人员基于互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)集成电子平台,研发了一款调频连续波激光芯片,可用于小型3D成像系统^[43]。在此基础上,他们又研发了测距精度为8 μm的芯片级FMCW激光雷达^[44]。该激光雷达的工作流程如图16所示。

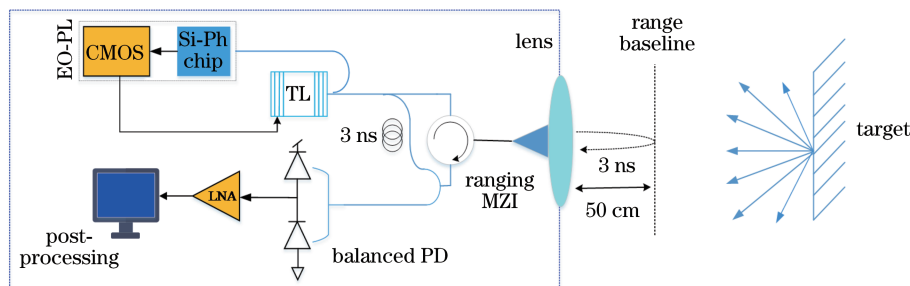


图 16 FMCW 激光雷达工作流程图^[44]

Fig. 16 Working flow chart of FMCW LiDAR^[44]

2017年,美国麻省理工学院光子微系统研究团队在硅光子平台中使用相控阵进行了相干固态激光雷达的演

示,其相关示意图如图 17 所示。该工作将光学相控阵引入 FMCW 激光雷达系统,实现了对目标的扫描成像^[45]。

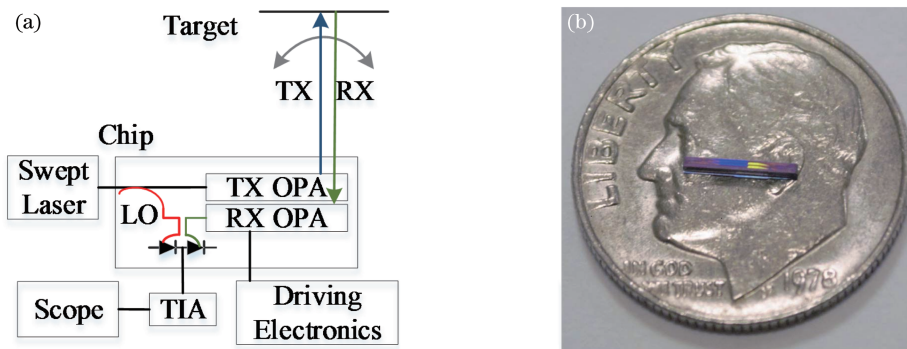


图 17 相干固态激光雷达的工作原理图^[45]。(a)可发射和接收光学相控阵的固态激光雷达系统的原理图；(b)硬币顶部放置激光雷达系统芯片

Fig. 17 Working principle of coherent LiDAR^[45]. (a) Schematic of solid-state LiDAR system with transmittable and receivable optical phased array; (b) chip containing LiDAR system on top of dime

2018年,法国 Thales 公司展示了一种集成度更高的片上调频连续波激光雷达,其中波形校准、扫描系统和平衡探测均在芯片上集成实现,大小仅为 9 mm^2 。在不超过 5 mW 输出功率的情况下,在长达 60 m 的范围内实现了对移动目标的检测和测距。该实验为片上集成全固态光学相控阵激光雷达奠定了基础,有望大幅降低激光雷达成本^[46]。2019年,Aeva发布了基于调频连续波技术的4D激光雷达芯片 Aeries。该系统将关键元件集成到微型光子芯片上,尺寸和能耗均大幅减小,而射程范围却大幅提高,能探测 300 m 以外的低反射率物体,并能测量每个点的瞬时速度^[47]。片上集成的趋势将促使安防激光雷达向小型化和固态方向发展,进而实现低成本量产,从而越来越多的消费级激光雷达产品将被广泛应用于安防场景。

4.5 多源集成

激光雷达作为一种探测手段,相比于被动相机,其横向分辨率不高,缺乏目标的纹理信息,相比

于毫米波雷达,其抗干扰能力较差,容易受到云、雾和霾等极端气候的影响。另外,从性价比、可靠性、安全性及稳定性等多个角度考虑,单一传感器都不能满足所有复杂安防场景的需求。因此,多源传感器集成也是今后安防领域的重要发展趋势。

主被动技术手段的优势互补,可以为目标场景提供更丰富的信息,降低虚警率及漏报率,同时通过配备先进的人工智能算法和软件,可精确预警。英国 Optosafe 公司推出了业内首款无线且独立供电的入侵监视塔 Opto-Q-Guard,其中 Q-Guard 是基于 Quanergy 公司激光雷达传感器 M8 开发的一款侵入探测系统。M8 具备 360° 视场、较低的功耗以及超 150 m 的探测距离^[48]。图 18 所示是该产品与球机摄像头的整合,通过 3D 点云和彩色视频影像,实现了实时探测、追踪及人数统计。另外,该系统利用激光雷达传感器对侵入安防区域的人员进行快速探测和分类,随后利用视频安防摄像机对特定区域内的侵入对象进行跟踪^[49]。



图 18 安防系统设备图^[50]。(a) Optosafe Opto-Q-Guard 系统；(b)电子设备监控

Fig. 18 Equipment diagram of security system^[50]. (a) Optosafe Opto-Q-Guard system; (b) electronic equipment monitoring

目前,在智慧城市大背景之下,AI安防应用的落地是最为直接和快速的,但传统的安全防护还处于被动防御的模式。安防市场目前主要以定点监控为主,监视范围有限,更侧重于事后的探查和人力对监控视频的及时处置。而图 19(a)所示的智能巡检机器人,可利用激光雷达传感器实现导航定位,能主动获取周围环境信息,主动寻找风险,及时进行上报,并具有数据收集功能。另外,深度学习和移动互联网等技术的发展促进了传感器数据信息处理的智能化^[51-52]。莱昂大学学者基于离线训练的全卷积神经网络工具,通过分析跟踪机器人 Orby-One 中二维激光雷达扫描的信息来跟踪目标人员的腿部,以确保在混乱环境中工作的安全性和准确性^[53]。



图 19 安防机器人。(a)装载激光雷达的智能巡检机器人^[52]; (b) Orby-One 跟踪机器人^[53]

Fig. 19 Security robots. (a) Intelligent inspection robot equipped with LiDAR^[52]; (b) Orby-One tracking robot^[53]

5 结束语

安防激光雷达可实现对目标的高精度主动探测、识别及跟踪,已在安防领域大放异彩。从测距方式来看,脉冲 TOF 探测仍是业内安防激光雷达技术方案的首要选择,但 FMCW 探测凭借其巨大的潜力和显著的优势,将逐步地走向商业市场。在扫描体制方面,固态激光雷达比机械式激光雷达更具优势,但不同技术体制有各自的特色和应用领域,结合不同的安防需求,已形成或正在形成系列化产品和系统解决方案。同时,随着现代半导体技术以及光子集成技术的发展,加工工艺更加精密,集成规模更大,利用异质集成技术,对激光器、探测器和光学相控技术等进行芯片化集成将是业界主流。今后安防领域的发展趋向于多源传感器集成化,实现优势互补。随着深度学习与人工智能技术的发展,智能化的软硬件协同将会极大地提升安防激光

雷达的应用优势。

总的来看,未来安防激光雷达为了降低成本、提升性能并满足消费级安防应用需求,将进一步向着系列化、小型化、固态化、芯片化和多源集成化方向发展。未来激光雷达可以应用于所有涉及安防领域环境感知的智能设备上,或将成为全球科技企业争相抢占的高地。

参 考 文 献

- [1] Nunes-Pereira E J, Peixoto H, Teixeira J, et al. The LiDAR hop-on-hop-off route: visiting the LiDARs past, present, and future landscapes [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 1120: 112072Q.
- [2] Pagliariccio S. Development of an optical amplifier in phosphate glass for LIDAR applications [D]. Torino: Politecnico di Torino, 2019.
- [3] Nowok S, Kueppers S, Cetinkaya H, et al. Millimeter wave radar for high resolution 3D near field imaging for robotics and security scans [C]// 2017 18th International Radar Symposium (IRS), June 28-30, 2017, Prague, Czech Republic. New York: IEEE, 2017: 1-10.
- [4] Gamlath G, Dampage U, Hewawasam H, et al. Quadcopter based surveillance system for an industrial environment [EB/OL]. (2018-07-15) [2020-03-25]. https://www.researchgate.net/profile/Sarath_Dampage/publication/328231813_Quadcopter_based_Surveillance_System_for_an_Industrial_Environment/links/5bc0317192851c88fd652466/Quadcopter-based-Surveillance-System-for-an-Industrial-Environment.pdf?origin=publication_detail.
- [5] Vaquero V, Repiso E, Sanfeliu A. Robust and real-time detection and tracking of moving objects with minimum 2D LiDAR information to advance autonomous cargo handling in ports [J]. Sensors, 2018, 19 (1): 107.
- [6] Church P, Grebe C, Matheson J, et al. Aerial and surface security applications using lidar [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 1063: 1063604.
- [7] Caneve L, Colao F, Del Franco M, et al. Multispectral imaging system based on laser-induced fluorescence for security applications [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9995: 999509.
- [8] Coffey V C. Integrated lidar: transforming transportation [J]. Optics & Photonics News, 2019, 30(9): 40.
- [9] SICK Sensor Intelligence. Protecting the facades of

- jails[EB/OL]. (2015-09-20)[2020-03-25]. <https://www.sick.com/cn/zh/industries/building-safety-and-security/outdoor-safety-and-security/object-protection/protecting-the-facades-of-jails/c/p394330>.
- [10] Benewake. Industrial safety distance warning: tower crane [EB/OL]. (2019 - 02 - 03) [2020 - 03 - 25]. http://www.benewake.com/article_list/Detail?id=5c303fd27c67423188b1d5b3&.url=/domain/detail/5c3eac2cef580337b0bae66c.html&.cate_name=750ffcdb-2b91-4707-b946-13e0826aacfd&.id=5c3eac2cef580337b0bae66c.
- [11] LeiShen Intelligent System. [2020-03-25]. <http://www.leishen-lidar.com>.
- [12] LeiShen Intelligent System. [2020-03-25]. <http://5b0988e595225.cdn.sohucs.com/images/20181016/d4f46735b699464196e5ac664e6f3ab0.jpg>.
- [13] Royo S, Ballesta-Garcia M. An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles [J]. Applied Sciences, 2019, 9(19): 4093.
- [14] Zhang Y, Ren G Q, Cheng Z Y, et al. Application research of three-dimensional LiDAR in unmanned vehicle environment perception [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(13): 130001. 张银, 任国全, 程子阳, 等. 三维激光雷达在无人车环境感知中的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(13): 130001.
- [15] Hammer M, Borgmann B, Hebel M, et al. UAV detection, tracking, and classification by sensor fusion of a 360° lidar system and an alignable classification sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 1100: 110050E.
- [16] HOKUYO. [2020-03-25]. <https://www.hokuyo-aut.jp/search/single.php?serial=169>.
- [17] Qaunergy. [2020-03-25]. <https://qaunergy.com/downloads/>.
- [18] Ouster. [2020-03-25]. http://data.ouster.io/downloads/OS1-lidar-sensor-datasheet.pdf?_hstc=34987006.19a5236f42cc8a68302a890d90daca6a.1599137335957.1599187974823.1599206255922.3&_hssc=34987006.1.1599206255922&_hsfp=1106334085.
- [19] Lorentech. [2020-03-25]. <http://www.lorentech.cn/cpxl>.
- [20] Sandborn P. FMCW Lidar: scaling to the chip-level and improving phase-noise-limited performance [D]. Berkeley: University of California, 2017.
- [21] Yoo H W, Druml N, Brunner D, et al. MEMS-based lidar for autonomous driving [J]. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, 2018, 135 (6): 408-415.
- [22] SICK. [2020-03-25]. <https://cdn.sickcn.com/media/190/7/47/547/IM0086547.png>.
- [23] Wang Y, Kyoungsik Y, Wu M. MEMS optical phased array for lidar [EB/OL]. [2016-10-14] [2020-03-25]. <http://www.mingwulab.berkeley.edu/research/lidaropa/>.
- [24] Chen X D, Zhang J C, Pang W S, et al. Key technology and application algorithm of intelligent driving vehicle LiDAR [J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(7): 190182. 陈晓冬, 张佳琛, 庞伟淞, 等. 智能驾驶车载激光雷达关键技术与应用算法[J]. 光电工程, 2019, 46 (7): 190182.
- [25] MEMS PRECISELEY. [2020-03-25]. https://www.preciseley.com/uploads/1/7/3/3/17338281/mirrorbeam_orig.png.
- [26] LSLIDAR. [2020-03-25]. <http://www.lslidar.com/upload/service/Product%20Introduction.pdf>.
- [27] Li X B, Wang C H, Qu Y, et al. Micro-electromechanical systems scan in three-dimensional imaging lidar system: scanning field angle and beam expander [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 111501. 李小宝, 王春晖, 曲扬, 等. 三维成像激光雷达系统中的微电子机械系统扫描: 扫描视场角与扩束[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 111501.
- [28] Hespel L, Riviere N, Fraces M, et al. 2D and 3D flash laser imaging for long-range surveillance in maritime border security: detection and identification for counter UAS applications [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 1019: 1019109.
- [29] McManamon P F, Banks P S, Beck J D, et al. Comparison of flash lidar detector options [J]. Optical Engineering, 2017, 56(3): 031223.
- [30] Natale D J, Tutwiler R L, Baran M S, et al. Using full motion 3D Flash LIDAR video for target detection, segmentation, and tracking [C]//2010 IEEE Southwest Symposium on Image Analysis & Interpretation (SSIAI), May 23-25, 2010, Austin, TX, USA. New York: IEEE, 2010: 21-24.
- [31] Hammer M, Hebel M, Arens M. Automated object detection and tracking with a flash LiDAR system [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9988: 998803.
- [32] Chen J Y, Shi Y C. Research progress in solid-state LiDAR [J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46 (7): 190218. 陈敬业, 时尧成. 固态激光雷达研究进展[J]. 光电

- 工程, 2019, 46(7): 190218.
- [33] Louay Eldada. Solid state lidar for ubiquitous 3D sensing[EB/OL]. (2016-04-06) [2020-03-25]. <http://on-demand.gputechconf.com/gtc/2016/presentation/s6726-louay-eldada-quanergy-systems.pdf>.
- [34] Quanergy. [2020-03-25]. <https://quanergy.com/s3/>.
- [35] Wikimedia Commons. [2020-03-25]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IEC60825_MPE_J_nm.png.
- [36] Yu X, Luo J Q, Xiao X S, et al. Research progress of high-power ultrafast fiber lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508007.
余霞, 罗佳琪, 肖晓晟, 等. 高功率超快光纤激光器研究进展[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508007.
- [37] Wang H, Zhang R K, Lu D, et al. 1.55- μm high-power high-speed directly modulated semiconductor laser array [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0914001.
王皓, 张瑞康, 陆丹, 等. 1.55- μm 大功率高速直调半导体激光器阵列 [J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0914001.
- [38] Grasso R J. Defence and security applications of quantum cascade lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9933: 99330F.
- [39] SILC. [2020-03-25]. <https://www.silc.com/>.
- [40] Intel REALSENSE. [2020-03-25]. <https://www.intelrealsense.com/zh-hans/lidar-camera-l515/>.
- [41] SICK Sensor Intelligence. [2020-03-25]. <https://cdn.sickcn.com/media/895/1/61/661/IM0059661.jpg>.
- [42] Jiang Y, Liu R Q, Zhu J G, et al. A high-performance CMOS FDMA for pulsed TOF imaging LADAR system [J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(7): 190194.
- [43] Quack N, Ferrara J, Gambini S, et al. Development of an FMCW LADAR source chip using MEMS-electronic-photonic heterogeneous integration [EB/OL]. (2013-03-11) [2020-03-25]. <https://pdfs.semanticscholar.org/3a19/e16ca298e5d30830251d231a625816be16b1.pdf>.
- [44] Behroozpour B, Sandborn P A M, Quack N, et al. 11.8 chip-scale electro-optical 3D FMCW lidar with 8 μm ranging precision [C]//2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), January 31-February 4, 2016, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 2016: 214-216.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] Chang M. Aeva reveals first 4D LiDAR on chip for autonomous driving and vote of confidence from VW group with porsche SE investment [EB/OL]. (2019-12-11) [2020-03-25]. <https://www.businesswire.com/news/home/20191211005284/en/>.
- [48] Mitteta M A, Noura H, Roynard X, et al. Experimental assessment of the quanergy M8 lidar sensor [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, XLI-B5: 527-531.
- [49] The New York Times. [2020-03-25]. https://static01.nyt.com/images/2018/09/19/business/19bordertech4/merlin_143080020_31bd17dc-73f7-4836-9d8f-583e9de46011-superJumbo.jpg?quality=90&auto=webp.
- [50] Ertugrul E, Kocaman U, Sahingoz O K. Autonomous aerial navigation and mapping for security of smart buildings [C]//2018 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG), April 25-26, 2018, Istanbul, Turkey. New York: IEEE, 2018: 168-172.
- [51] Bo L, Yang Y, Shuo J. Review of advances in LiDAR detection and 3D imaging [J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(7): 190167.
- [52] UBTECH. [2020-03-25]. http://file.elecfans.com/web1/M00/A1/D7/pIYBAF1F5_uARGUpAAE_Pjw6bwo394.jpg.
- [53] Guerrero-Higueras Á M, Álvarez-Aparicio C, Calvo Olivera M C, et al. Tracking people in a mobile robot from 2D LIDAR scans using full convolutional neural networks for security in cluttered environments [J]. Frontiers in Neurobotics, 2019, 12: 85.