

文章编号 1004-924X(2017)06-1441-08

凝视型激光主动成像系统性能验证

徐正平^{1*}, 许永森², 姚 园², 李 刚², 石 磊², 孙 翥², 于 潇², 沈宏海²

- (1. 中国科学院 苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163;
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:为了研究凝视型激光主动成像系统对非合作目标的成像性能及在目标跟踪中的应用,设计了基于 APD 阵列和分束照明的凝视型激光主动成像系统。对激光回波功率与目标距离之间的关系进行了理论分析,结果显示:200 m 外目标的回波功率小于 $1 \mu\text{W}$ 。为提高系统作用距离,选取高增益带宽积跨阻放大器 OPA657N 提高系统增益,并通过优化元件布局来克服高跨阻值时的通道串扰。实验验证了距离方程的正确性。在此基础上,采用八连通团块检测方法实现目标探测,并对两轴目标跟踪进行了实验验证。结果显示:系统能够对 200 m 处非合作目标稳定成像,并能获取 420 m 处非合作目标的回波信号;当目标在俯仰轴、偏航轴方向行程大于 2.5° 时,系统能够实时探测并稳定跟踪。

关键词:激光主动成像;凝视型;目标跟踪;非合作目标

中图分类号: TN249; P225.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172506.1441

Performance verification of staring laser active imaging system

XU Zheng-ping^{1*}, XU Yong-sen², YAO Yuan², LI Gang²,
SHI Lei², SUN He², YU Xiao², SHEN Hong-hai²

- (1. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology,
Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China;
 2. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
- * Corresponding author, E-mail: xzp090@163.com

Abstract: A staring laser active imaging system based on APD arrays and splitting beam illumination was designed, in order to study the imaging performance of the imaging system on non-cooperative target in target tracking. The relationship between laser echo power and target distance was analyzed theoretically, and the result shows that the echo power of targets beyond 200 m is less than $1 \mu\text{W}$. In order to improve operating distance of the system, a trans-impedance amplifier OPA657N with high gain-bandwidth was adopted to improve the system gain. In addition, the crosstalk of channels at high trans-impedance was overcome by optimizing the element arrangement. A block detection of 8-adjacent connection algorithm was employed to realize target detection and two-axis target tracking based on the verification of distance equation. The results show that the proposed imaging system can achieve

收稿日期:2016-10-21;修订日期:2017-01-05.

基金项目:中国科学院国防科技创新基金资助项目(No. CXJJ-14-S123);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20150204022GX)

stable imaging on non-cooperative target in 200 m, and can obtain echo signal of non-cooperative target in 420 m. When travel of the target in the direction of pitch axis and yaw axis is more than 2.5° , the system can realize real-time detection and stable tracking of the target.

Key words: laser active imaging; staring type; target tracking; non-cooperative target

1 引言

目前,航空光学遥感主要采用挂载于飞机、视频吊舱或导引头等载体上的载荷,诸如相机、摄像机及成像光谱仪等,来获取目标的几何、光谱、偏振及时空位置等信息。这些载荷主要采用被动成像模式,所以受环境影响较大。相比而言,激光主动成像系统^[1-2]受天气、光照等环境因素的影响较小,更具灵活性;可获取目标高程信息,实现三维测量;易于目标探测、识别与跟踪,因此在制导,尤其是激光/红外多模制导^[3-11]中备受关注。法、英等国的研究机构已成功研制出激光/红外多模探测器^[12-14]。

基于四象限探测器的激光制导系统^[15]能够获取目标的角位置信息。从制导技术未来的发展趋势可以看出:成像制导可以获取目标的形态信息,具备抗诱骗能力,是未来寻的式制导技术的主要发展趋势。按照工作方式,激光主动成像系统可分为单点扫描式^[16-17]、线阵扫描式和基于阵列探测器的凝视型^[18-20]。其中,单点扫描式虽作用距离远,但成像效率低,不适合于高速运动目标;凝视型成像效率高,但其作用距离有限。为了提高凝视型系统的作用距离,人们采用小面阵块扫描^[20]、声光模式^[21]或依据探测距离和背景进行线性模式和盖革模式切换的双模式探测器^[23]。

本文着重研究了基于线性 APD 阵列和分束照明的直接测距凝视型激光主动成像系统。在简要介绍系统组成及工作原理的基础上,给出了作用距离方程,并结合 APD 阵列及处理电路参数进行非合作目标成像性能试验验证。在此基础上,给出了基于距离图像的目标检测算法,并配合伺服框架对激光主动成像系统在目标跟踪中的应用进行了全闭环实验。

2 系统简介

激光主动成像系统原理如图 1 所示。脉冲激光器输出激光进入半反半透棱镜,其中透射光线进入发射光学系统照射目标景物,反射光线照射在参考探测器上。被目标景物反射的激光回波信号经接收光学系统照射在回波探测器上。考虑到参考光功率较高,而远距离目标的回波功率低,参考探测器和回波探测器分别选取 PIN 探测器和雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)阵列。两者输出信号经跨阻放大器转化为电压信号后进入压控放大电路,再经时刻鉴别获取信号基准,分别作为计时电路的起止信号。高精度计时模块对起止信号之间的时间间隔进行计时,获取目标的距离信息。为获取目标的强度信息,将压控放大电路输出的信号送入峰值保持电路,使得回波窄脉冲信号的峰值能够保持一定时间,供 ADC 采集,以降低对 ADC 采样速率的要求。

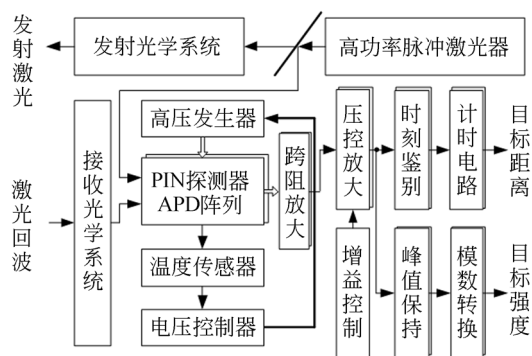


图 1 激光主动成像系统原理框图

Fig. 1 Block diagram of laser active imaging system

为提高激光的能量利用率,同时避免像元间的串扰,系统采用基于达曼光栅的分束照明方式。受结构尺寸限制,系统采用成像光纤阵列将回波信号导至 APD 阵列敏感元区,并采用收发共口径形式的光学系统。

3 作用距离方程与实验验证

作用距离是激光主动成像系统能否应用于实际工程的关键技术指标。本文采用面状探测目标,目标面积大于发射激光束在目标处的面积。系统的作用距离方程如下:

$$P_r = \frac{\tau_a^2 \eta_t \eta_r P_i \rho A_r \cos \theta}{\pi R^2}, \quad (1)$$

式中: P_r 为探测器单个敏感元接收到的光功率; τ_a 为单程大气透过率; η_t, η_r 分别为发射光学系统和接收光学系统的效率; P_i 为激光器的输出功率; ρ 为目标反射率; A_r 为等效接收面积; R 为目标距离; θ 为发射光学系统光轴与目标法向之间的夹角。

激光器、APD 阵列及光学系统的相关参数如表 1 所示。

表 1 激光主动成像系统参数

Tab. 1 Parameters of laser active imaging system

序号	项目	数值
1	接收光学系统直径/mm	50
2	角分辨率/mrad	1
3	激光器输出能量/mJ	2.1
4	激光器输出脉宽/ns	10
5	激光器输出功率 P_i /kW	210
6	大气单程透过率 τ_a	0.36
7	发射光学系统效率 η_t	0.3/64
8	接收光学系统效率 η_r	0.774 5
9	目标发射率 ρ	0.6
10	等效接收面积 A_r	$\pi \times 0.025^2$
11	发射光学系统光轴与目标法向之间夹角 $\theta/(\circ)$	0

依据作用距离方程(式(1))及系统参数,得到探测器单个敏感元接收的回波功率与目标距离之间的关系曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出:探测器单个敏感元接收到的回波功率随目标距离的增大而迅速衰减。200 m 外目标的回波功率小于 $1 \mu\text{W}$,而 2 km 处目标的回波功率为 10 nW。为提高系统的作用距离,需提高系统的总增益。作为信号处理的最前端,跨阻放大器的增益最为关键,需选取高增益带宽积(GBP)的跨阻放大器。

系统选取的 APD 阵列型号为 64AA0. 04-9 SMD,其偏置电压对应的增益为 100 时,在 1 064

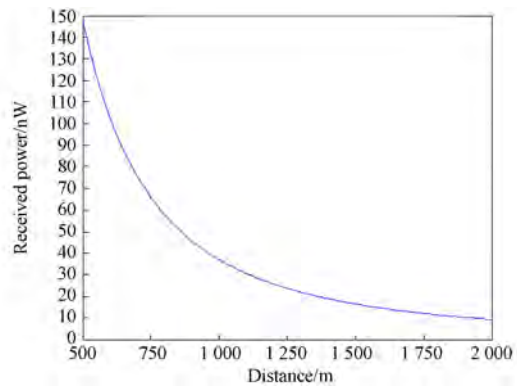
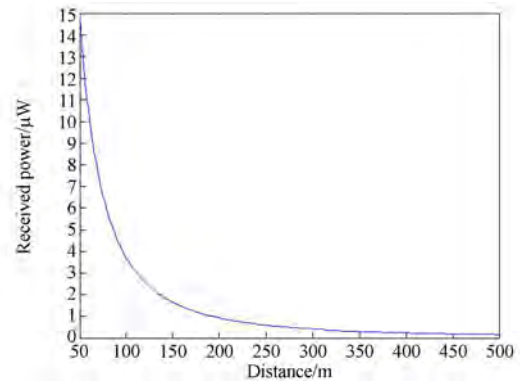


图 2 激光回波功率与目标距离之间的关系曲线

Fig. 2 Relationship between echo power of laser and distance of target

nm 处的响应度约为 10 A/W 。在相同测试条件下,增益带宽积分别为 240 MHz 和 1.6 GHz 的 LMH6609、OPA657N 两个跨阻放大器的响应输出如图 3 所示。从图 3 可以看出:OPA657N 跨阻值可以很大;当跨阻值为 $40.2 \text{ k}\Omega$ 时,输出波形除下降沿存在振荡外,上升沿波形未失真。因系统进行时刻鉴别时以前沿为准,上述波形满足应用需求。APD 阵列处理电路需优化跨阻放大器元件的布局,否则会引起严重的通道互扰,如图 4 所示。图 4 中,当只焊接 F6 通道跨阻放大器时,其输出波形良好;而在添加其周围通道跨阻放大器后,F6 通道跨阻放大器的输出波形严重失真。

考虑探测器在 1 064 nm 处的响应度,取跨阻放大器的跨阻值为 $40.2 \text{ k}\Omega$,以系统噪声 50 mV 为限,对应的光功率计算表达式如下:

$$P_{\min} = \frac{50 \times 10^{-3}}{10 \times 40.2 \times 10^3} = 0.124 \mu\text{W}.$$

即系统能够响应的最小光功率为 $0.124 \mu\text{W}$ 。从图 2 可以看出:系统的最大作用距离约为 550 m。

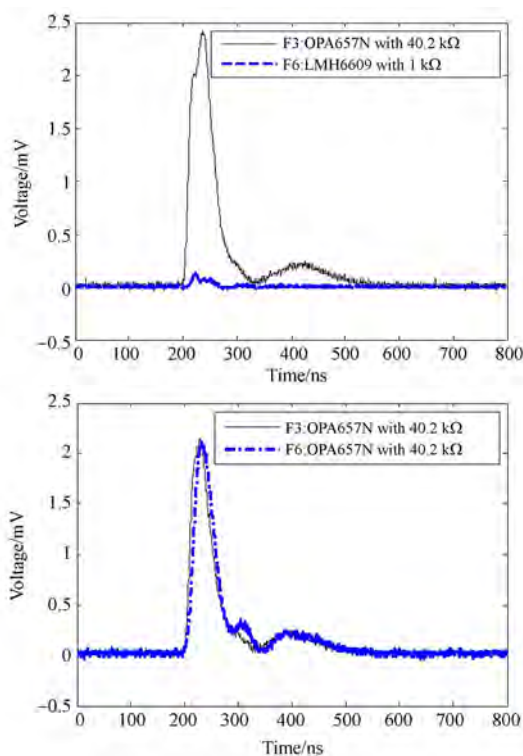


图 3 相同测试条件下不同跨阻放大器的响应曲线
Fig. 3 Responding curves of different transimpedance amplifiers in same testing condition

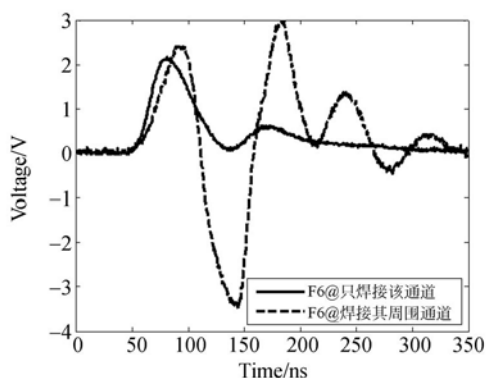


图 4 元件布局不合理引起的跨阻放大器互扰
Fig. 4 Cross-talk of transimpedance amplifiers caused by absurd layout of components

为验证系统对非合作目标的探测性能,分别取 190, 375 及 420 m 处目标的回波信号,如图 5 所示。图 5 中,信号在激光出光起始时刻存在一定时间的饱和,其原因是收发共口径光学系统存在内部杂光,这也是采用收发共口径光学系统需要解决的难题之一。从图 5 可以看出:190, 375 及 420 m 处目标的回波信号均在 50 mV 左右,并非逐步递减。究其原因还是激光器的输出能量不稳

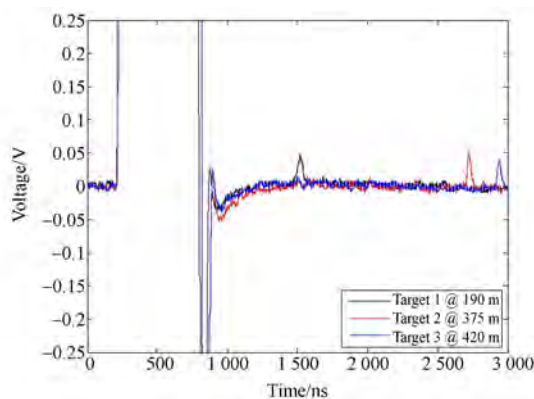


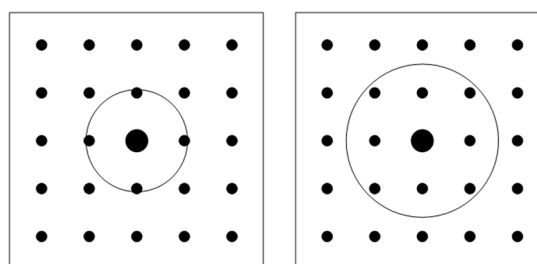
图 5 不同距离处的目标回波信号
Fig. 5 Echo signal of targets at different distances

定,且不同目标的反射率不同。

4 基于距离图像的目标检测方法

成像制导的主要优点是可以获取目标的形态信息,但限于系统选用的 APD 阵列像元数,且测距精度不够高,前期只能进行目标检测实验。

系统采用团块检测方法,主要步骤有滤波、团块检测及目标定位。在实验室进行功能成像实验时,目标放置在 5~25 m 的范围内,此范围外的目标视为干扰信号,加以滤除。团块检测的判断依据主要包括目标的空间相关性及距离相关性。目标空间相关性的判断依据主要有四连通和八连通,如图 6 所示。



(a)四联通 (b)八联通
(a)4-adjacent connection (b)8-adjacent connection

图 6 团块检测的判断依据

Fig. 6 Criterion of block detection

四连通区域是指对应像素位置的上、下、左、右 4 个紧邻的位置;八连通区域除包含四连通区域外,还包括指定像素点左上、右上、左下、右下区域。四连通或八连通区域内的任一点均视为和中心点是同一物体,系统选取八连通区域作为团块

检测的判断依据。

在上述所得到的团块基础上,进行距离相关性判定。假定通过八连通区域判定的团块集合为 A,则最终目标所包含点集合 B 的判断依据如下:

$$B = \{x_{i,j} \mid |x_{i,j} - x_{ave}| \leq x_{th}, x_{i,j} \in A\}, \quad (2)$$

式中: x_{ave} 为团块集合 A 中所有元素距离的均值; x_{th} 为设定的距离阈值,系统设定为 1 m。

经过距离相关性判断可能得到多个目标点集,系统选取元素数最多的作为跟踪目标;元素数相同的,则随机选取其中一个作为跟踪目标。之后,系统分别求取各像素点水平方向和垂直方向的坐标平均值与探测器视场中心坐标值之差,作为俯仰轴和偏航轴脱靶量。将脱靶量与光学系统角分辨率之积送入各轴的伺服控制系统,实现两轴目标跟踪。

5 目标两轴跟踪实验

系统硬件处理系统实物图如图 7 所示,采用底板连接各处理板,便于信号传输及结构装调。

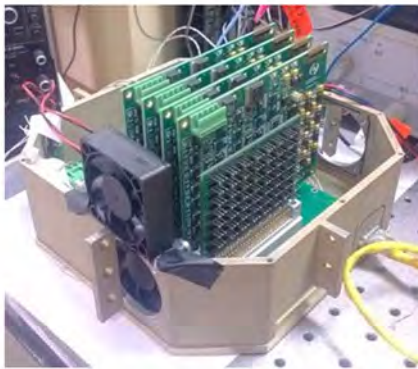


图 7 信号硬件处理系统实物图
Fig. 7 Photo of signal processing hardware system

目标跟踪实验时,将激光主动成像系统的光机结构件安装于俯仰、偏航两轴的伺服框架内,装配后的实物图如图 8 所示。在系统前约 10 m 处放置白板,将 APD 阵列视场分为两半,以测试系统对非合作目标的成像效果。实验场景及成像结果如图 9 所示。可以看出:系统所得图像分为两部分:10 m 处的白板和约 25 m 的背景墙。该实验定性验证了系统具备非合作目标成像的能力。经实验测试,系统能够对 200 m 处的非合作目标稳定成像。



图 8 装配后激光主动成像系统的实物图
Fig. 8 Picture of assembled laser active imaging system

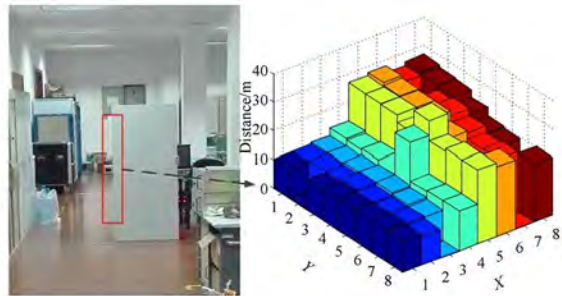


图 9 非合作目标成像实验的场景及结果
Fig. 9 Result and experimental scene of non-cooperative target imaging

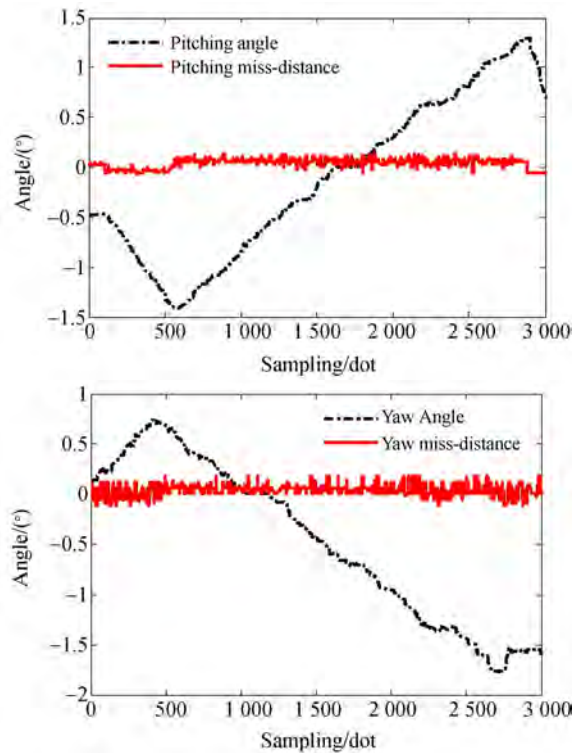


图 10 俯仰轴、偏航轴角度及其对应的脱靶量曲线
Fig. 10 Pitching and yaw angles and corresponding miss-distance curves

为验证系统在目标跟踪中的应用,在装置前 20 m 处放置目标,该目标在系统俯仰方向和垂直方向往复运动,记录俯仰轴、偏航轴的角度信息及其对应的脱靶量信息,结果如图 10 所示。

光学系统的角分辨率为 1 mrad, APD 阵列对应的瞬时视场为 $0.458^{\circ} \times 0.458^{\circ}$ 。由图 10 可以看出:目标在俯仰轴、偏航轴上的行程均大于 2.5° ,即目标的运动范围已超出 APD 阵列的瞬时视场,但脱靶量信息均在 0° 附近,由此表明系统能够实现目标的实时检测与稳定跟踪。整个闭环实验也从原理上验证了激光主动成像系统在目标跟踪中的切实可行性。

6 结 论

本文考虑系统的成像效率及激光能量的利用率,设计了基于 APD 阵列和分束照明的直接测距凝视型激光主动成像系统。通过分析激光回波

信号与目标距离之间的关系发现:200 m 外目标的回波功率小于 $1 \mu\text{W}$,而 2 km 处目标的回波功率为 10 nW。为提高系统的作用距离,选取高增益带宽积跨阻放大器 OPA657N,同时指出在跨阻放大器跨阻值较大时,需优化元件布局以抑制通道间串扰。通过实验验证了系统作用距离方程的正确性。采用八连通团块检测方法实现目标探测,并搭建演示验证平台进行两轴目标跟踪演示验证。结果显示:目标在俯仰轴、偏航轴方向上的行程均大于 2.5° ,已超出 APD 阵列的瞬时视场,但脱靶量信息均在 0° 附近,实现了目标的实时检测与稳定跟踪。

随着 APD 阵列像元数的增加及距离精度的提高,激光主动成像系统能够获取目标更为精细的多视角图像,实现目标的识别和分类,从而进一步提高激光制导性能。具有片上处理电路的大面阵 APD 的研制及线性/盖革模式的灵活应用是实现工程应用的关键。

参考文献:

- [1] 徐正平,沈宏海,许永森. 直接测距型激光主动成像系统发展现状[J]. 中国光学, 2015, 8(1): 28-38.
XU ZH P, SHEN H H, XU Y S. Review of the development of laser active imaging system with direct ranging[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 28-38. (in Chinese)
- [2] 刘立生,张合勇,王挺峰,等. 激光外差探测对振动目标多普勒频谱成像[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1508-1515.
LIU L SH, ZHANG H Y, WANG T F, et al., Doppler spectrum imaging of vibrating target using laser heterodyne detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1508-1515. (in Chinese)
- [3] 王保华. 主动式激光制导导引头光学系统设计[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
WANG B H. *Optical Design and Stray Light Analysis of Active Laser-guided Seeker*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechan-
- ics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [4] GSCHWENDTNER A B, KEICHER W E. Development of coherent laser radar at Lincoln laboratory [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2000, 12(2): 383-396.
- [5] ALBOTA M A, AULL B F, FOUICHE D G, et al., Three-dimensional imaging laser radars with Geiger-mode avalanche photodiode arrays[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, 13(2): 351-370.
- [6] MARINO R M, JR DAVIS W R. Jigsaw: a foliage-penetrating 3D imaging laser radar system[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, 15(1): 23-36.
- [7] 王锐. 激光红外主被动复合导引系统[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 536-543.
WANG R. Compound guided system with active laser imaging and passive infrared imaging[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 536-543. (in Chinese)
- [8] 严洁,阮友田,薛珮瑶. 主被动光学图像融合技术研究[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 378-385.
YAN J, RUAN Y T, XUE P Y. Active and passive optical image fusion technology[J]. *Chinese Optics*,

- 2015, 8(3): 378-385. (in Chinese)
- [9] 孙杰. 高效率复合探测激光雷达光学系统性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
SUN J. *Research on the Performance of High Efficiency Optical System in Dual-mode LIDAR*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [10] 丛海佳. 大视场高分辨率红外/激光复合光学系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
CONG H J. *Complex Optical System Design for Infrared/laser with Large Field of View and High Resolution*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] DE BORNIOLE, GUELLEC F, ROTHMAN J, *et al.*. HgCdTe-based APD focal plane array for 2D and 3D active imaging: first results on a 320×256 with $30 \mu\text{m}$ pitch demonstrator[J]. *SPIE*, 2010, 7660: 76603D.
- [13] DE BORNIOLE, ROTHMAN J, GUELLEC F, *et al.*. Active three-dimensional and thermal imaging with a $30\text{-}\mu\text{m}$ pitch 320×256 HgCdTe avalanche photodiode focal plane array[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(6): 061305.
- [14] BAKER I, OWTON D, TRUNDLE K, *et al.*. Advanced infrared detectors for multimode active and passive imaging applications[J]. *SPIE*, 2008, 6940: 69402L.
- [15] 张军强, 谢飞, 薛庆生, 等. 基于四象限探测器的激光导引镜头的研制[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 471-479.
ZHANG J Q, XIE F, XUE Q SH, *et al.*. Laser guided lens based on four-quadrant detector[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 471-479. (in Chinese)
- [16] 胡春生. 脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
HU CH SH. *Investigation into the High-speed Pulsed Laser Diode 3D-imaging Ladar* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [17] 徐正平, 沈宏海, 许永森, 等. 激光成像系统高精度目标距离和强度信息提取[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2668-2672.
XU ZH P, SHEN H H, XU Y S, *et al.*. Target-distance and intensity information detecting with high precision in laser imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2668-2672. (in Chinese)
- [18] 王飞, 汤伟, 王挺峰, 等. 8×8 APD 阵列激光三维成像接收机研制[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 422-427.
WANG F, TANG W, WANG T F, *et al.*. Design of 3D laser imaging receiver based on 8×8 APD detector array[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 422-427. (in Chinese)
- [19] 于潇, 姚园, 徐正平. 采用 APD 阵列的共口径激光成像光学系统设计[J]. 中国光学, 2016, 9(3): 349-355.
YU X, YAO Y, XU ZH P. Laser imaging optical system design with a shared aperture employing APD array[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 349-355. (in Chinese)
- [20] 徐正平, 沈宏海, 姚园, 等. 直接测距型无扫描激光主动成像验证系统[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 251-259.
XU ZH P, SHEN H H, YAO Y, *et al.*. Scannerless laser active imaging validating system by directly ranging[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 251-259. (in Chinese)
- [21] 张勇, 曹喜滨, 吴龙, 等. 小面阵块扫描激光成像系统实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0814001.
ZHANG Y, CAO X B, WU L, *et al.*. Experimental research on small scale risley prism scanning imaging

- laser radar system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0814001. (in Chinese)
- [22] 罗远, 贺岩, 胡善江, 等. 基于声光扫描的三维视频激光雷达技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0802005.
LUO Y, HE Y, HU SH J, *et al.*. Three-dimensional video imaging lidar system based on acousto-optic laser scanning[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(8): 0802005. (in Chinese)
- [23] 冯百成, 李召辉, 师亚帆, 等. 基于双模式探测器的大动态范围激光测距[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0504001.
FENG B CH, LI ZH H, SHI Y F, *et al.*. Laser ranging with large dynamic range based on dual-mode detectors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0504001. (in Chinese)

作者简介:



徐正平(1983—),男,河南许昌人,博士,副研究员,硕士生导师,2006年于东北师范大学获得学士学位,2011年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事电子学设计方面的研究。E-mail: xuzp090@163.com