

激光红外主被动复合导引系统

王 锐

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:提出了采用激光主动三维成像技术配合被动红外成像技术共同工作的复合导引体制,用于提升地对地导弹的作战效能及对于隐身目标的识别能力。给出了各分系统的设计方案,并提出了合理的导引策略。该套系统能够兼顾红外大视场搜索及激光小视场三维成像,丰富的目标图像信息更加有利于对作战目标进行准确识别。整套复合光学导引系统结构简单、加工难度适中,在将整套导引系统口径控制在 100 mm 左右的情况下,同样能够实现 4 km 以上距离的导引。该项技术的提出对于我国复合导引技术的发展及我军导弹作战能力的提升有着重要意义。

关键词:复合导引系统;激光三维成像;红外成像;作战效能

中图分类号:TJ765.3; V448.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20130604.0536

Compound guided system with active laser imaging and passive infrared imaging

WANG Rui

(*State Key Laboratory of Laser Interaction with Mater, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

* *Corresponding author, E-mail: darui9999@yahoo.com.cn*

Abstract: A compound guided system by combining the laser 3D active imaging and passive IR imaging was proposed to improve the operational effectiveness for air-ground missiles and the recognition ability for IR stealthy targets. The detail design program and reasonable guided strategy were also given. This system has the ability of IR wide field searching and laser 3D imaging in a narrow field and its abundant image information makes the operational object recognition more easy. The structure of the whole system is simple and easy to process. When the aperture of the compound guided system is limited at about 100 mm, the guided distance is longer than 4 km. This technology is important to develop compound guided systems and improve the missile operational ability in our country.

Key words: compound guided system; laser active imaging; IR imaging; operational effectiveness

1 引言

导引头是精确制导武器的核心部件。它的主要作用是利用接收到的目标辐射或反射的某种特征能量探测目标,测量目标与弹体的相对运动参数,确定目标和导弹的相对位置,最终形成指令控制导弹飞向目标。由于制导精度高、抗干扰能力强、命中概率高,寻的式制导技术已成为导弹制导技术发展的重要方向之一。目前,寻的式导引头的种类有很多,例如,电视成像制导、红外点源制导、红外成像制导、激光雷达制导、微波雷达制导、毫米波雷达制导等。制导方式不同,其各自具有的优缺点不同。从制导技术的发展方向看,成像制导由于可以对目标进行成像和识别,具有抗诱饵欺骗能力,因此,逐渐成为寻的式制导技术的主要发展趋势。

目前,长波红外成像制导广泛应用于地对地导弹的导引系统中,并在实战中体现了较好的作战效能。但随着战场情况的复杂化及红外隐身技术的发展,单一的长波红外导引体制在瞬息万变的战场条件下越来越显得力不从心。由于其探测体制是依据目标与背景的温度差异进行成像的,在周围环境温度变化或目标采用红外隐身措施时,图像对比度会严重下降,直接影响到后期对于目标的有效识别及准确打击。为了解决这一问题,本文提出了一种激光三维成像导引复合被动红外成像导引的导引体制,该体制充分发挥了被动红外成像导引作用距离远、搜索范围大的优势,以及激光三维成像导引环境适应性好,对红外隐身目标能够进行高对比度探测的特点^[1],可大幅提升现有地对地导弹的作战效能。

2 国内外研究现状

复合导引技术作为提升导弹识别锁定目标能力的有效手段,一直以来受到各国研究人员的关注,其中双模复合导引体制的研究始于20世纪70年代。早期的双模导引头以红外/紫外复合

导引为主,美国的“尾刺”防空导弹、前苏联的SA-13等都采用这种复合导引技术。近年来,随着光学导引技术的不断发展,导引体制的创新,复合导引技术的组合方式也开始多元化。例如,德国的Diehl BGT Defense(Diehl BGT防御中心)提出了红外/激光雷达高精度导引技术^[2-3],并成功应用于防空及反导拦截领域,真正实现了自主式导引,并大幅提升了自动目标识别能力^[2-3]。其导引流程如下:被动红外导引系统在大视场范围内对各疑似目标进行初步判别,并将判别结果提交给激光雷达,激光雷达系统根据各疑似目标的位置信息,发射高功率激光束对目标进行主动照明,并对回波信号进行图像采集,所采用的探测器为阵列形式的微光探测器,可在极短的积分时间内实现对于目标三维信息的有效获取。激光器集成在导弹的其他位置,并通过光纤连接发射系统,使得整套导引系统结构更为紧凑。

在激光三维成像方面,美国也取得了较大的进展。早在2004年,美国空军就成功研制出了像元数达到 32×32 的GaInAs APD阵列探测器,响应波段为 $1.5 \mu\text{m}$,结构及测距精度优于15 cm。图1给出了该探测器的成像效果^[4]。

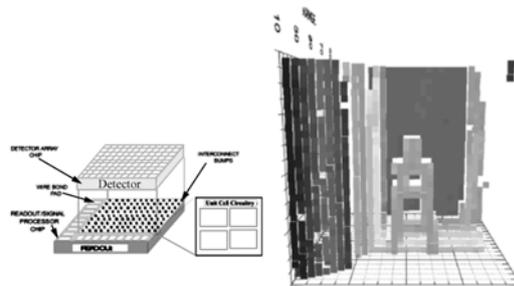


图1 美国空军实验室成像系统探测器

Fig.1 Imaging system detector of the US Air Force Laboratory

2008年,波音公司的光谱实验室利用 32×32 的Geiger探测器阵列研制了一套激光三维成像系统^[5],激光器波段为 $1.06 \mu\text{m}$,单脉冲能量为 $3 \mu\text{J}$,脉冲宽度为1.5 ns。图2给出了该系统的结构及成像效果。

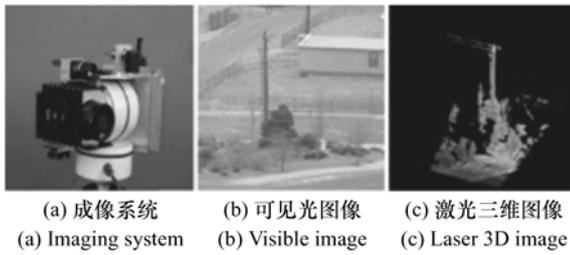


图2 光谱实验室激光三维成像系统及成像结果
Fig.2 Laser 3D imaging system and imaging results of the spectral laboratory

目前,国内在复合导引及激光三维成像方面还处于理论研究阶段,并未出现系统级的原理样机,工程应用道路漫长。

3 系统组成、原理及功能

3.1 总体设计指标

为了满足弹载环境下的使用要求,整套导引系统的设计理念建立在体积小、重量轻、功耗低的基础上。具体的设计指标如表1所示。

表1 复合导引系统设计指标
Tab.1 Design index of compound guided system

| | 激光导引分系统 | 红外成像导引系统 |
|---------------------|---------------------------------|-------------|
| 作用距离 | 4 km; 盲区:500 m; (大气能见度 > 15 km) | 20 km |
| 工作波段/ μm | 1.064 | 8 ~ 12 |
| 视场角/ $^{\circ}$ | 0.3 | 3 |
| 分色镜 | Φ 近红外反射率 92% | 长波红外透过率 92% |
| 重复频率/Hz | 50 | 50 |

为了满足空地导弹对复杂地物背景下目标的搜索和识别的需求,系统采用长波红外导引体制,视场角为 3° ,发现目标后交接激光三维小视场导引,视场角为 0.3° 。为了保证视场切换精度,系统采用主被动共口径接收的结构形式。因此,光学系统中需要加入分色镜来实现两个波段的独立接收。该分色镜的近红外反射率为92%,长波红外透过率为92%,满足使用要求。

3.2 系统组成

整套导引系统由探测系统,信息处理系统、稳定及跟踪系统组成。外形结构如图3所示,相对于其他复合导引系统,该系统在光学系统设计及结构布局方面均考虑到了实际工程化应用情况,结构布局符合空地导弹使用要求。探测系统包括被动红外成像导引系统及激光三维成像导引系统,用于对作战目标进行图像采集。信息处理系统利用所获得的图像信息对目标进行有效识别,确定打击位置。稳定及跟踪系统用来保证在弹载扰动环境下能够对目标进行稳定成像及精确跟踪。

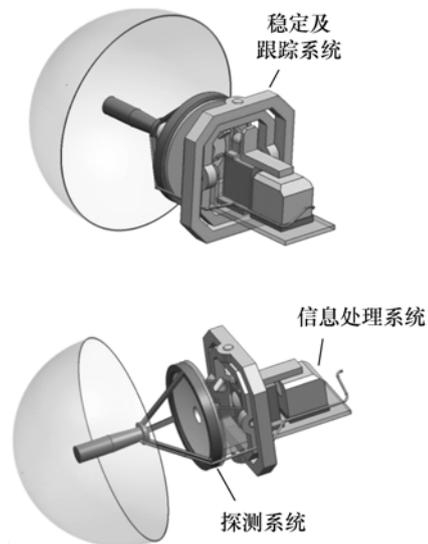


图3 复合导引系统外形结构图
Fig.3 Structure of compound guided system

3.3 工作原理

整套导引系统如图4所示,采用被动红外接收与主动激光测距接收共口径,激光发射与接收

共轴的紧凑型设计方案。一方面,最大限度地节省了所占空间。另一方面,消除了由于发射与接收不同轴所产生的瞄准角度误差^[6]。激光器位于导引室后端,采用光纤导入的方式,在次镜后端连接扩束发射系统,发射系统筒长为 80 mm。接收系统采用反射式结构,利用分色镜实现了激光与红外探测系统的共口径接收,接收系统筒长为 165 mm。加上探测器及数据通讯接口长度,整套导引系统总长为 340 mm,直径为 104 mm。而空地导弹弹径在 300 mm 左右,完全满足使用要求。同时由于采用 Geiger 模式探测器阵列,可使系统的结构进一步简化,体积更小。采用探测器阵列组件,系统中可移动部件大量减小^[7],整体系统的伺服控制系统更少,成像稳定性更高。

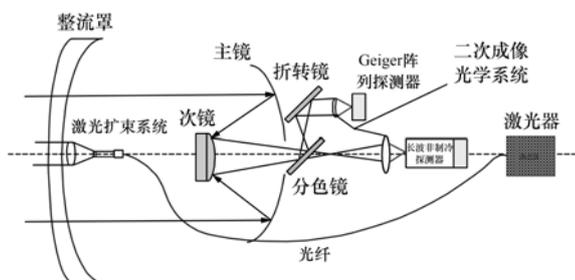


图4 激光红外主被动复合导引系统组成

Fig.4 Compound guided system with active laser and passive IR

整套导引系统的导引流程如下:空地导弹根据发射前装订的飞行路线飞向目标区域,在距离目标 20 km 处,长波红外导引系统开始工作,对目标区域进行大视场搜索,根据目标的辐射特性,确定各疑似目标位置。当距离达到 4 km 时,激光三维成像导引系统开始工作,根据被动红外导引系统所提供的各疑似目标位置信息对其进行小视场成像,通过三维重构获得目标的三维图像信息^[8]。在此基础上,信息处理系统采用相应的识别算法对目标进行准确识别,并综合被动红外导引系统的识别结果,给出最终对于目标的判别结果。由于采用复合导引体制,综合利用了主被动成像识别结果,目标图像信息量丰富,可保证较高的识别概率。

4 分系统设计方案

4.1 被动红外成像导引系统

红外成像系统的作用距离是衡量系统性能的主要指标之一。它与大气环境、目标辐射强度、光学系统传输特性、探测器性能等多个因素有关。

为了满足总体指标中提出的红外导引作用距离 20 km,需要根据其它相关参数,推导出红外成像系统作用距离公式,并以此来确定光学系统及探测器的具体指标。本文综合考虑多方面影响因素,推导出了红外成像作用距离公式:

$$R^2 = \frac{\beta \cdot |L_t - L_{bg}| / N_t | \cdot S_t \cdot S_0 \cdot \tau \cdot \eta \cdot D^*}{(S_d / 2t_{in})^{1/2} \cdot SNR}, \quad (1)$$

式中: R 为探测距离,单位 m; β 为信号提取参数; S_t 为目标辐射面积,单位 cm^2 ; L_t 为目标辐射亮度,单位 $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$; N_t 为目标在焦平面上所占像元数; L_{bg} 为背景辐射亮度,单位 $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$; S_0 为光学系统入瞳面积,单位 m^2 ; τ 为大气透过率; η 为光学系统透过率; S_d 为探测器单个像元面积,单位 m^2 ; t_{in} 为探测器积分时间,单位 s; D^* 为探测器比探测率,单位 $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$;SNR 为信噪比。

根据以上方程,最终被动红外导引系统设计参数如表 2 所示。

表2 被动红外导引系统设计参数
Tab.2 Design parameters of passive IR guided system

| | 参数 |
|---------|----------------------|
| 焦距 | 170 mm |
| 口径 | 85 mm |
| 视场角 | 3° |
| 光学系统筒长 | 165 mm |
| 重量 | 2 kg |
| 探测器像元尺寸 | 25 μm |
| 探测器像元数 | 388 × 284 |
| 工作波段 | 8 ~ 12 μm |

所设计的光学系统结构如图 5 所示。

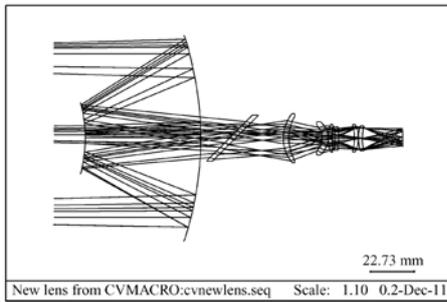
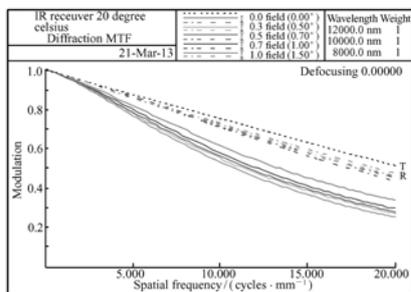
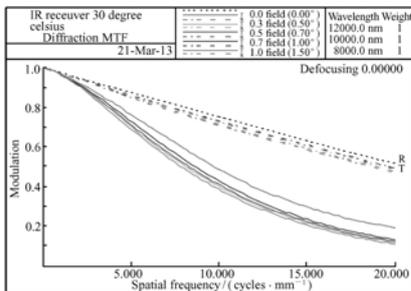


图 5 被动红外导引系统光学系统结构

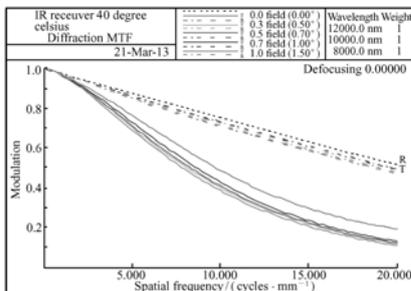
Fig. 5 Optical structure of passive IR guided system



(a) 20 °C条件下MTF曲线
(a) MTF curve at 20 °C



(b) 30 °C条件下MTF曲线
(b) MTF curve at 30 °C



(c) 40 °C条件下MTF曲线
(c) MTF curve at 40 °C

图 6 被动红外光学系统各温度条件下 MTF 曲线
Figure 6 IR optical system MTF curves at different temperatures

系统采用了 6 片红外透镜,透镜材料选择折射率较高的 Ge。整套光学系统工作长度为 165 mm。主镜后侧加入分束片,以实现主被动探测系统的共口径接收。

系统分别在 0, 0.5 及 0.7 视场下进行了分析,并在 20 ~ 40 °C 条件下进行了无热化优化设计。各温度环境下系统的 MTF 曲线如图 6 所示,系统在 20 lp/mm 处的平均 MTF 均在 0.4 以上,成像质量满足要求。

系统点列图如图 7 所示,80% 能量集中在直径为 60 μm 圆内,所占像元数为 3 × 3 满足使用要求。

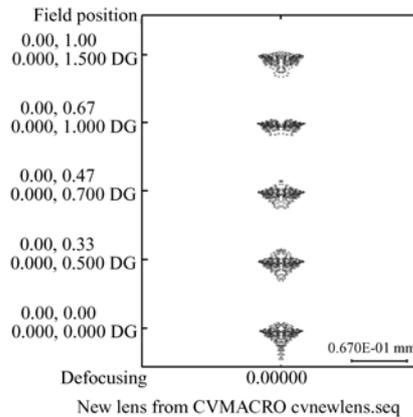


图 7 被动红外光学系统点列图

Fig. 7 Spot diagram of passive IR system

4.2 激光三维成像导引系统

同样,为了实现激光主动导引作用距离 4 km,也要推导出激光雷达作用距离方程,进而确定相关参数,所得到了激光雷达作用距离方程如下:

$$P_r = P_s \eta_t \frac{G_1 T_{A1}}{4\pi R_1^2} \beta \cdot \frac{T_{A2}}{4\pi R_2^2} \cdot \frac{\pi D^2 \eta_r}{4}, \quad (2)$$

式中: P_s 为激光发射功率, η_t 为发射系统效率, G_1 为发射系统增益, β 为目标散射截面, R_1 为发射系统到目标的距离, R_2 为目标到接收系统的距离, T_{A1} 为发射系统到目标的大气透过率, T_{A2} 为目标到接收系统的大气透过率, D 为接收系统口径, η_r 为接收系统效率。

根据以上方程,激光三维成像系统最终设计参数如表 3 所示。

表 3 激光三维成像导引系统设计参数

Tab.3 Design parameters of active laser imaging guided system

| | 参数 |
|-----------|----------|
| 接收系统焦距 | 170 mm |
| 接收系统口径 | 85 mm |
| 视场角 | 0.3° |
| 工作波段 | 1 064 nm |
| 发射系统 | 20 mm |
| 发射系统光束发散角 | 1.5 mrad |
| 探测器像元尺寸 | 40 μm |
| 探测器像元数 | 32 × 32 |

4.2.1 接收系统

所设计的光学系统结构如图 8 所示,主镜后侧的分束片将 1 064 nm 光向上反射,经过折转镜及三片式成像系统,最终在 Geiger 阵列探测器上成像。

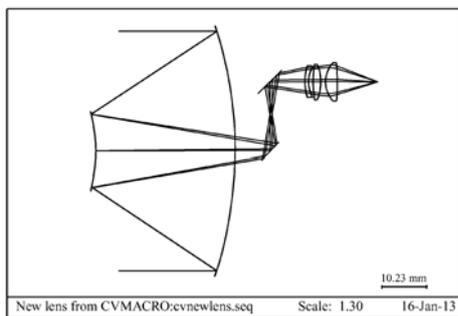


图 8 激光三维成像导引接收系统光学系统结构

Fig.8 Optical structure of active laser imaging guided system

系统分别在 0°、0.3° 视场下进行了分析,系统的 MTF 如图 9 所示,系统在 20 lp/mm 处的平均 MTF 均在 0.4 以上,成像质量满足要求。

系统点列图如图 10 所示,80% 能量集中在直径为 10 μm 的圆内,满足使用要求。

4.2.2 发射系统

经光纤耦合后,光纤输出端激光发散角在 200 mrad 以上。因此,在设计发射系统时,可将光纤输出端看作点光源进行设计,且由于位于次镜后端,发射系统口径应控制在 28 mm 以内,所

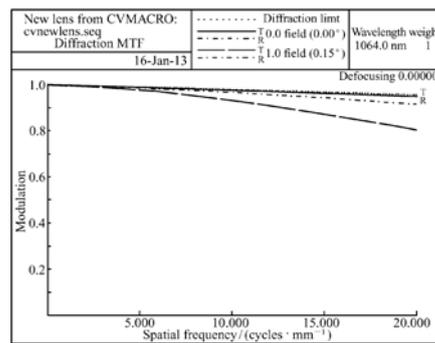


图 9 激光三维成像导引接收系统 MTF 曲线

Fig.9 MTF curve of active laser imaging guided system

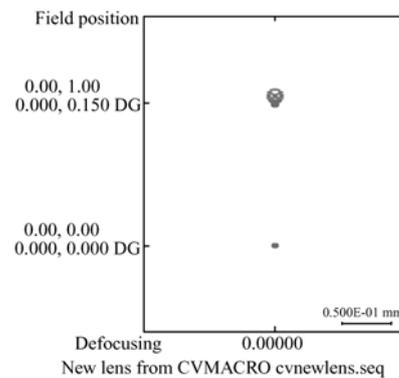


图 10 激光三维成像导引接收系统点列图

Fig.10 Spot diagram of active laser imaging guided system

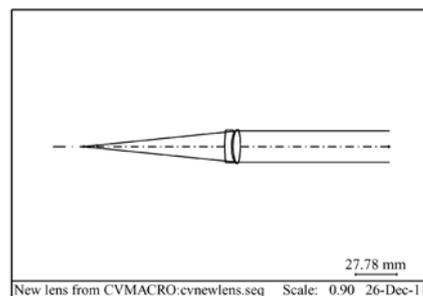


图 11 激光三维成像导引发射系统光学系统结构

Fig.11 Transmitting optical structure of active laser imaging system

设计的发射系统口径为 20 mm,系统筒长为 103 m,

输出光束发散角为 1.5 mrad。设计结果如图 11 所示。

4.3 信息融合处理系统

信息处理系统要实现 3 项主要功能:被动红外成像导引系统图像采集与处理;激光三维成像导引系统图像采集与处理;主被动成像系统的同步控制。

同步控制的目的是保证激光三维信息与红外成像获得的数据在时间上匹配。本系统需要有 3 块嵌入式的信息处理模块,即激光图像采集与处理模块、红外图像信号采集与处理模块和主控数据处理模块。同步方案设计如下:在 主控数据处理模块硬件单元中增加系统内部时钟,分别向红外相机和激光成像系统发送时钟电平信号,红外相机设有外触发开启功能,以红外相机曝光开始为时间基准,通过主控模块向红外相机发送基准时钟电平信号,向激光成像系统发送延迟时钟电平信号,延迟时间由红外相机的曝光时间决定,从而可以实现二者之间的数据匹配。

两套导引系统分别配有独立的图像采集及目

标识别系统,使得两套导引系统能够实现独立并行工作,一旦其中一套导引系统出现问题,可保证整套导引系统仍具备一定的导引能力。且两套导引系统的自动识别算法在设计理念上有较大差异,最终的判别结果综合了两种算法的优势,这样的复合导引策略保证了整套导引系统的识别精度。

5 结 论

本文提出了一套采用激光三维成像导引配合被动红外导引共同工作的复合导引体制,对整套导引系统的工作原理、系统组成进行了详细的介绍,并给出了各分系统详细的设计方案。提出了利用被动红外导引系统在远距离大视场条件下对目标进行搜索,并采用激光三维成像导引系统对目标进行小视场高对比度探测的导引策略。该导引体制可在复杂战场环境下,对红外隐身目标有较高的识别精度。该项技术的提出对于我国复合导引技术的发展及地对地导弹作战能力的提升有着重要意义。

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):213-230.
ZHANG J,ZHANG L,ZENG F,et al.. Development status of airborne 3D imaging lidar systems[J]. *Chinese Optics*, 2011,4(3):213-230. (in Chinese)
- [2] KIRSCH J C,LINDBERG W R,HARRIS D C. Tri-mode seeker dome considerations[J]. *SPIE*,2005,5786:33-40.
- [3] BUCZINSKI S C. Reentry vehicle interceptor with IR and variable FOV laser rader:US,6741341 B2[P]. 2004-05-25.
- [4] STETTNER R,BAILEY H,RICHMOND R. Eye-safe laser radar 3D imaging[J]. *SPIE*,2004,5412:111-116.
- [5] VAIDYANATHAN M,BLASK S,HIGGINS T,et al.. Jigsaw phase III;a minia-turized airborne 3-D imaging laser radar with photon-counting sensitivity for foliage penetration[J]. *SPIE*,2007,6550:1-12.
- [6] 薛向尧,高云国,韩光宇,等. 水平式激光发射系统指向误差的修正[J]. 光学精密工程,2011,19(3):536-544.
XUE X Y,GAO Y G,HAN G Y,et al.. Correction of laser pointing error of level mounting laser transmitter system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(4):536-543. (in Chinese)
- [7] 孟庆季,张续严,周凌,等. 机载激光 3D 探测成像系统的关键技术[J]. 中国光学,2011,4(4):327-339.
MENG Q J,ZHANG X Y,ZHOU L,et al.. Key technologies of airborne laser 3D detection imaging system[J]. *Chinese Optics*,2011,4(4):327-339. (in Chinese)
- [8] 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 ladar target[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(4):843-850. (in Chinese)

作者简介:



王 锐(1982—),男,吉林长春人,博士,2005年于长春理工大学获得学士学位,2010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,主要从事激光主动探测方面的研究工作。E-mail: darui9999@yahoo.com.cn

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国液晶学科和显示技术领域的综合性专业学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊、中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》材料物理和化学、器件制备技术及器件物理、器件驱动与控制、成像技术与图像处理等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域中新理论、科研成果和新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与成果,进行国际交流的平台。其内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业学术期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》征集有关液晶和各类显示材料及制备方法、材料物理和化学;液晶光学与光子学、生物液晶;液晶显示、有机电致发光显示、等离子体显示、发光二极管显示、电致发光显示、场发射显示、3D显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他新型显示等各类显示器件物理和制作技术;各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用;显示材料和器件的测试方法与技术;各类显示器件的应用;与显示相关的成像技术与图像处理等研究论文。

《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

地 址:长春市东南湖大路3888号

《液晶与显示》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)6176059

E-mail:yjyxs@126.com

国内统一刊号:CN 22-1259/04

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

国内邮发代号:12-203

国内定价:40元/期

网 址:www.yjyxs.com