

文章编号 2095-1531(2015)03-0415-07

全捷联激光半主动导引头线性视场研究

张鑫^{1,3*}, 杜智远², 乔彦峰¹, 刘慧¹, 白杨¹, 朱明超¹, 刘立刚¹, 贾宏光¹

(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. 中国人民解放军 92493 部队, 辽宁 葫芦岛 125001;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对全捷联半主动导引头大线性视场的要求,分析了四象限光电系统线性视场与目标距离的关系。首先根据系统参数计算不同能见度、不同目标反射率下的目标距离与导引头接收光功率关系;通过建立光学系统的仿真模型,利用光线追迹方法获得不同视场对应的探测器光敏面光斑功率分布;最后结合探测器灵敏度阈值,得到线性视场与接收激光功率的关系;随着目标距离减小,线性视场从 0° 增大到光学设计理论值。实验测试结果表明,线性视场随着接收功率增大,从 0° 增大到 $\pm 9^\circ$,与理论分析一致。因此,全捷联半主动激光制导系统设计应该考虑导引头线性视场变化规律。

关键词:捷联导引头;激光半主动;四象限探测器;线性视场

中图分类号:TN29 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20150803.0415

Study on linear field of strapdown semi-active laser seeker

ZHANG Xin^{1,3*}, DU Zhi-yuan², QIAO Yan-feng¹, LIU Hui¹, BAI Yang¹,

ZHU Ming-chao¹, LIU Li-gang¹, JIA Hong-guang¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *No. 92493 Troop, the Chinese People's Liberation Army, Huludao 125001, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

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

Abstract: Considering the requirement on the wide linear field of the strapdown semi-active laser seeker, the relationship of linear field for four-quadrant detecting(QD) photoelectric system and target distance was analyzed. First, according to the system parameters, the relationship of target distance on different visibility, different target reflectivity and the received power for the laser seeker was calculated. Then by ray tracing method, the power distribution on quadrant detector for different field was found. Finally, the relationship of linear field and the received power was obtained. Linear field increased from zero to the theoretical value of optical design with the target distance decreasing. Experimental results indicate that linear field increases from 0° to $\pm 9^\circ$ with the received power increasing, which agrees well with the result of theoretic computation. The change law of the linear field should be considered for stapdown semi-active laser system design.

Key words: strapdown seeker; semi-active laser; four-quadrant detecting(QD); linear field

收稿日期:2014-12-23;修订日期:2015-02-21

基金项目:中国科学院知识创新工程国防科技创新资助项目(No. YYYJ-1122)

1 引言

捷联导引头包括半捷联结构和全捷联结构,半捷联结构与常规框架结构相比,由于不需要速率陀螺,在成本、体积和质量方面具有较大优势,近年来已经得到了广泛应用,而全捷联结构在半捷联结构基础上,又省去了万向节、角位置驱动器和传感器,没有任何活动部件,成本、体积和质量方面进一步减小,在导引制导领域有着重大的研究潜力和应用价值^[1-2]。激光半主动制导作为技术成熟、应用广泛、精度极高的一种制导方法,将其应用到全捷联制导技术中已经成为国内外研究机构的研究热点^[3-4]。美国埃尔比特公司推出了大视场全捷联激光半主动导引头^[5],美国空军学院也在积极研发低成本高性能全捷联大视场激光半主动导引头^[6]。全捷联导引头没有万向节框架,光学系统视场即为导引头最大视场范围,所以要求光学系统具有大视场,国内外研究机构对大视场激光四象限光学系统进行了研究^[7-9],目前国内已经公开报道的最大接收视场能够做到 $\pm 15^\circ$,但是最大线性视场仅为 $\pm 6^\circ$ ^[10]。美国洛马公司应用光学弥散和二元光学技术成功研制了 $\pm 15^\circ$ 大视场激光导引头^[11],但是并未深入讨论视场线性区与非线性区关系,而线性视场范围对于制导控制策略和打击精度都极为重要^[12]。事实上,当目标光斑离轴视场较大时,由于目标较远或者天气等不利因素影响,探测器的某一个或者两个象限接收的激光功率过低,导致无法正确获得目标方位,而当导弹接近目标时,接收到的激光功率增大,又能够正确获得目标方位,此种情况下,导引头视场的线性区是随距离等条件变化的,深入研究导引头视场的线性区变化规律,能够有效指导设计导弹制导控制策略。

本文利用 Lighttools 光学软件建立一种大线性视场导引头光学系统光线追迹模型,分析不同视场下四象限探测器(QD)光敏面上的光斑功率分布,研究了导引头线性视场与接收激光功率之间的关系,得出了导引头线性视场随着目标距离的减小而增大的结论,并通过实验验证了该结论。

2 四象限探测器接收功率

2.1 探测器接收功率

激光半主动导引头四象限探测器光敏面接收功率为^[13]

$$P_S = \frac{D^2}{4R_M^2} P_L \rho_T T_R T_A \cos\theta, \quad (1)$$

式中: D 为光学系统孔径, R_M 为目标距离, P_L 为激光照射器峰值功率, ρ_T 为目标反射率, T_R 为光学系统透过率, T_A 为大气透过率, $\cos\theta$ 为目标表面法线与激光接收方向夹角。

实际应用中,激光照射器和导引头光学系统都是确定的,目标表面法线与激光接收方向夹角取决于弹道特性,这里只分析两种典型天气条件下和两种不同目标反射率条件下,四象限探测器光敏面接收功率随着目标距离的变化情况。光学系统孔径为25 mm,典型激光照射器照射下,计算结果如图1中曲线所示,方形曲线表示能见度20 km、目标反射率0.4条件下接收功率随目标距离的变化关系;圆形曲线表示能见度8 km、目标反射率0.4条件下接收功率随目标距离的变化关系;正三角形曲线表示能见度20 km、目标反射率0.1条件下接收功率随目标距离的变化关系;倒三角形曲线表示能见度8 km、目标反射率0.1条件下接收功率随目标距离的变化关系。随着目标距离减小,探测器接收功率迅速增大。

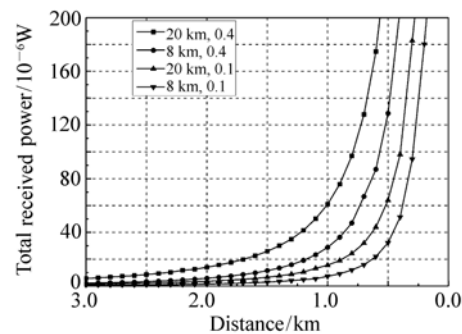


图1 四象限探测器光敏面接收功率与目标距离关系

Fig. 1 Relationship between QD received power and target distance

2.2 探测器光敏面功率分布

四象限探测器光敏面由4个面积相等的90°扇形光敏面组成,如图2白色大圆区域所示,灰色小圆区域表示激光光斑。光斑同时覆盖4个光敏面区域且无溢出,可准确计算出光斑中心位置,光斑此时所处区域称为光敏面线性区,对应的光学接收视场称为线性视场。光斑中心计算要求每个区域的接收功率都要大于灵敏度阈值功率,需要分析光敏面上的光斑分布,由于光敏面和光斑的圆对称性,只分析光敏面1/8扇形区域光斑分布即可,选择图2中0°方向和45°方向之间的区域,在此区域内,光斑偏离中心位置时,第三象限光敏面的光斑面积最小,且光斑中心偏离同样距离时,向0°方向偏离时第三象限光敏面的光斑面积相对最大,向45°方向偏离时第三象限光敏面的光斑面积相对最小,所以只需分析0°方向和45°方向的光斑偏离,其他方向对应的某象限最小光斑面积在二者之间。

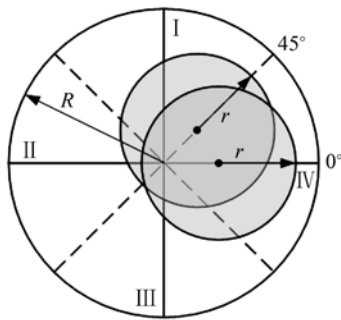


图2 四象限探测器上的光斑
Fig.2 Light spot on the QD

由于实际设计的光学系统有像差存在,光斑不均匀且光斑形状也随位置变化,需要通过光学建模,采用光线追迹方法分析光斑在光敏面上的功率分布。图3为Lighttools光学软件中导引头光学系统模型,光学系统从左至右依次为头罩、窄带滤光片、透镜组、探测器窗口和探测器光敏面。

采用蒙特卡洛法追迹1 000万条光线,随机误差小于1%,在0°方向和45°方向分别从0°视场间隔1°依次分析到12.5°视场,图4(a)为0°视场光斑功率分布,图4(b)为0°方向12.5°视场光斑功率分布,图4(c)为45°方向12.5°视场光斑功率分布。

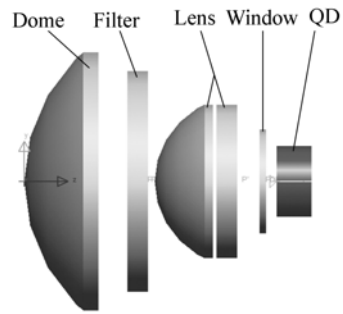
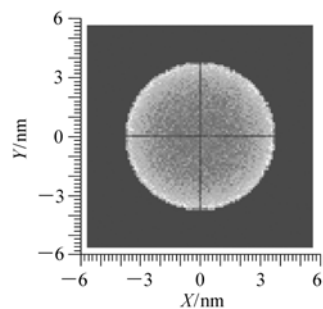
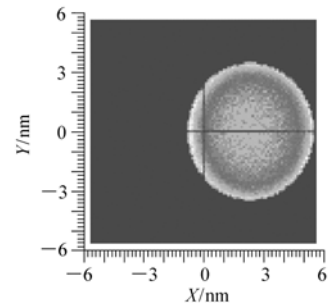


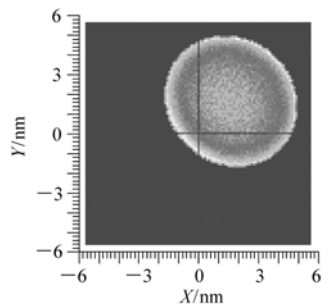
图3 光学系统仿真
Fig.3 Simulation of the optical system



(a) 0° 视场光斑功率分布
(a) Power distribution of 0° field light spot



(b) 0° 方向12.5° 视场光斑功率分布
(b) Power distribution of 0° direction 12.5° field light spot



(c) 45° 方向12.5° 视场光斑功率分布
(c) Power distribution of 45° direction 12.5° field light spot

图4 不同方向、不同视场光斑功率分布情况
Fig.4 Spots power distribution for different directions and fields

从图4中可以看出,光学系统设计光斑并不是理想均匀的,而且当视场较大时,光斑呈椭圆分布,所以光斑在4个象限光敏面的功率分布必须通过光学仿真分析,对光敏面接收的光斑进行功率归一化计算,分别得出第三象限光敏面在0°方向和45°方向接收的光功率百分比与视场的关系,如图5中曲线所示,可以看出,第三象限即最小光斑面积象限接收功率百分比随视场增大近似呈线性减小,0°方向减小最慢,12.5°时第三象限功率所占百分比为4.5%,45°方向减小最快,12.5°时第三象限功率所占百分比为2.2%。

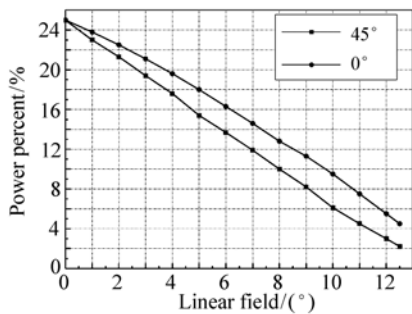


图5 不同视场下最小光斑面积象限接收功率的百分比

Fig. 5 Percentage of received minimum power on QD

2.3 探测器阈值灵敏度

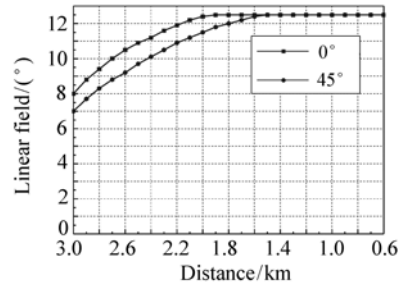
探测器噪声^[14-15]由光敏面噪声和放大器噪声组成,其中光敏面噪声包括散粒噪声和通道电阻热噪声,放大器噪声包括反馈电阻热噪声和跨阻放大器电流噪声。各项噪声都是相互独立的随机噪声,总噪声等于各项噪声平方和的方根。根据探测器光敏面参数和放大器参数,计算得到探测器噪声的理论值为42 nA。

阈值信噪比由导引头探测概率和虚警率决定,本系统要求探测概率大于98%,虚警率小于10%,计算得到阈值信噪比为6.3。

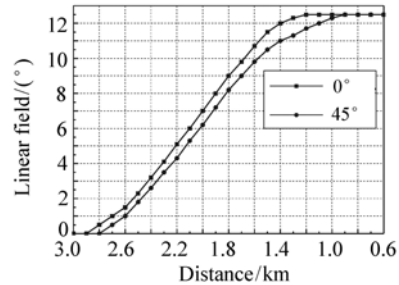
探测器阈值灵敏度等于探测器噪声乘以阈值信噪比,探测器阈值灵敏度为264 nA,探测器光敏面光电响应率为0.4 A/W,计算得到探测阈值灵敏度功率理论值为0.66 μW。

3 导引头线性视场与作用距离关系

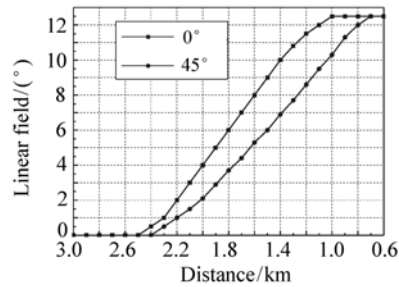
通过上一节分析,可计算出最小光斑功率象



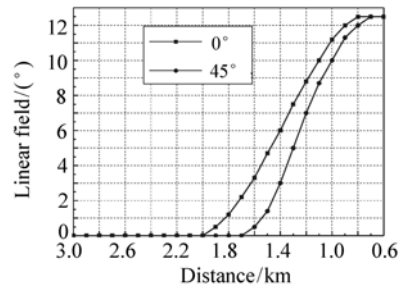
(a) 能见度20 km和目标反射率0.4
(a) 20 km for visibility and 0.4 for target reflectivity



(b) 能见度8 km和目标反射率0.4
(b) 8 km for visibility and 0.4 for target reflectivity



(c) 能见度20 km和目标反射率0.1
(c) 20 km for visibility and 0.1 for target reflectivity



(d) 能见度8 km和目标反射率0.1
(d) 8 km for visibility and 0.1 for target reflectivity

图6 不同能见度、不同目标反射率对应的线性视场
Fig. 6 Linear field for different visibility and target reflectivity

限在不同目标距离、不同视场条件下的接收功率,此功率值若大于阈值灵敏度功率,则可准确计算出光斑中心位置,即光斑落在光敏面的线性区内,若此功率值小于阈值灵敏度功率,则光斑落在光敏面的线性区外,所以光敏面线性区范围与目标距离相关,且目标距离越小,光敏面线性区越大。本系统的探测阈值灵敏度功率理论值为 $0.66 \mu\text{W}$,得出光敏面的线性区范围,图6中(a)、(b)、(c)、(d)分别表示能见度20 km 和目标反射率0.4、能见度8 km 和目标反射率0.4、能见度20 km 和目标反射率0.1、能见度8 km 和目标反射率0.1 条件下接收系统线性视场与目标距离关系,且不同方向的线性视场不同,方块曲线表示探测器 0° 方向,圆圈曲线表示探测器 45° 方向,探测器其他方向的线性区落在这两条曲线之间。

从图中可以看出,能见度20 km 和目标反射率0.4 条件下,导引头在弹目距3 km 时,线性视场为 $\pm 7^\circ \sim \pm 8^\circ$,弹目距1.6 km 时,线性视场达到光学设计值 $\pm 12.5^\circ$;能见度8 km 和目标反射率0.4 条件下,导引头在弹目距2.8 km,线性视场为 $\pm 0.1^\circ \sim \pm 0.5^\circ$,弹目距1 km 时,线性视场达到光学设计值 $\pm 12.5^\circ$;能见度20 km 和目标反射率0.1 条件下,导引头在弹目距2.4 km 时,线性视场为 $\pm 0.1^\circ \sim \pm 0.5^\circ$,弹目距0.7 km 时,线性视场达到光学设计值 $\pm 12.5^\circ$;能见度8 km 和目标反射率0.1 条件下,导引头在弹目距1.7 km 时,线性视场为 $\pm 0.1^\circ \sim \pm 2.2^\circ$,弹目距0.7 km 时,线性视场达到光学设计值 $\pm 12.5^\circ$ 。

导引头线性视场随着目标距离的减小而增大,视场上限是光学设计理论视场。不同大气能见度和不同目标反射率条件下,由于接收激光功率不同,相同距离的线性视场不同。

4 实验与讨论

测试实验中采用光敏面直径为10 mm 的四象限探测器,光学系统的理论线性视场为 $\pm 10^\circ$,实验装置示意图如图7所示。

脉冲激光器发射激光经过可调衰减片照射在透射散射屏上,用来模拟激光散射目标,用挡光舱罩住激光光路,防止激光杂散光干扰测试。导引

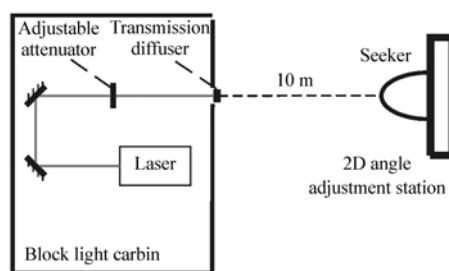


图7 实验系统原理框图

Fig.7 Principle diagram of testing system

头安装在10 m 外的二维角度调整台上,初始位置对准透射散射屏。调解衰减片可模拟不同强度的激光散射目标,调整导引头角度可测量此条件下的线性视场范围。

首先测试探测器噪声,4 个象限噪声特性基本相同,其中一个象限的测得结果如图9所示,噪声电压标准差为3.6 mV。结合激光信号的脉冲时域特性,实测中将信号检测阈值信噪比设为3,此信噪比在实验室环境下可以准确无误地检测到激光信号,则4 个象限阈值灵敏度电压均为10.8 mV。

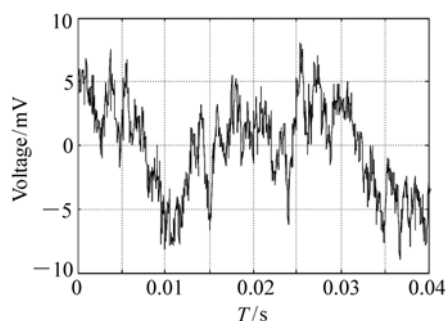


图8 探测器噪声电压

Fig.8 Noise voltage of the QD

探测器接收总功率电压在40 mV 左右时,开始能够检测信号并提取光斑中心位置,即开始获得线性视场。边缘线性视场时接收光功率最小的象限接收功率约为总功率2% 左右,则接收总功率达到500 mV 左右时,线性视场可接近理论设计值。

线性视场实际测试结果如图8 曲线所示,横坐标为探测器光敏面输出的总电压,对应接收到的激光总功率,纵坐标为对应的线性视场范围。

从图中可以看出,线性视场范围随着光敏面接收到的总功率增加而增加,从 0° 增加到 $\pm 9^\circ$,相同接收功率下, 0° 方向线性视场大于 45° 方向线性视场。实测结果与理论分析相符。

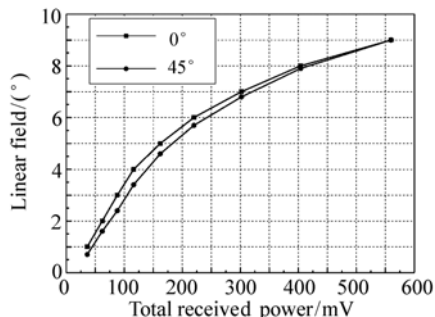


图9 线性视场与总接收功率关系

Fig. 9 Relationship between Linear field and total received power

5 结 论

本文研究一种大线性视场激光导引头光电探测系统,分析了不同视场下四象限探测器光敏面上的光斑功率分布,将接收能量最少的象限接收功率与探测灵敏度阈值相比较,得出了导引头线性视场随天气条件、目标特性和目标距离的变化关系,即导引头线性视场随接收功率增大而增大,导引头线性视场随着目标距离缩小,从接近 0° 扩大到接近光学理论最大视场。实验测试中,线性视场随着接收功率的增加从 0° 增大到 $\pm 9^\circ$,验证了该结论的正确性,可用于指导半主动激光制导系统设计。

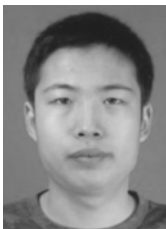
参考文献:

- [1] 孙宝彩,范军芳.全捷联小型弹药制导系统设计[J].红外与激光工程,2014,43(6):1960-1965.
SUN B C, FAN J F. Guidance system design for deeply-strapdown miniature munitions[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6):1960-1965. (in Chinese)
- [2] 袁亦方,林德福,祁载康,等.单兵全捷联图像制导弹药制导信息估计技术[J].红外与激光工程,2015,44(1):370-376.
YUAN Y F, LIN D F, QI Z K, et al. Techniques on estimating guidance information for strapdown image guided man portable munitions[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1):370-376. (in Chinese)
- [3] 鲍海阁.国外激光半主动寻的制导武器的发展[J].舰船电子工程,2010,30(5):21-25.
BAO H G. Development of the laser semi-active homing guidance weapons[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2010, 30(5):21-25. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] Elbit systems. [EB/OL]. [2015-03-17]. <http://www.elbitsystems-us.com>.
- [6] NAGLE B J. System analysis and design of a low-cost micromechanical seeker system[D]. Greene and Montgomery counties; United States Air Force Academy, 2008.
- [7] SANYAL S, MANDAL R, SHARMA P K, et al. Optics for Laser Seeker[C]. ICOP 2009-International Conference on Optics and Photonics, Chandigarh, India, 30 Oct. -1 Nov. 2009.
- [8] 胡博,常伟军,孙婷,等.激光半主动制导导引头光学系统设计[J].应用光学,2012,33(2):402-405.
HU B, CHANG W J, SUN T, et al. Laser semi-active seeking guided seeker optical system[J]. *J. Applied Optics*, 2012, 33(2):402-405. (in Chinese)
- [9] BARTH J, FENDT A, FLORIAN R, et al. Dual-mode seeker with imaging sensor and semi-active laser detector[J]. *SPIE*, 2007, 6542:65423B-1-7.
- [10] 薛珮瑶,吴耀,冯茜,等.大视场四象限探测光学系统设计[J].中国光学,2014,7(3):462-468.
XUE P Y, WU Y, FENG Q, et al. Design of the large field optical system for four-quadrant detecting[J]. *Chinese Optics*,

2014, 7(3):462-468. (in Chinese)

- [11] LAYTON A C. Binary optics SAL seeker:United States Patent. US7575191B2[P], Aug. 18, 2009.
- [12] 张跃,储海荣. 全捷联图像导引头制导的技术特点[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10):2825-2831.
ZHANG Y, CHU H R. Technical characteristics of strapdown image seeker guidance[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2825-2831. (in Chinese)
- [13] MANOJLOVIĆ L M, BARBARIŽ P. Optimization of optical receiver parameters for pulsed laser-tracking systems[J]. *IEEE*, 2009, 58(3):681-690.
- [14] 吴奇彬,陈海清,刘源. 四象限红外光电探测器噪声检测技术研究[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(5):26-29.
WU Q B, CHEN H Q, LIU Y. Noise automatic measurement of the four quadrant infrared optoelectronic detector[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, 3(5):26-29. (in Chinese)
- [15] 安毓英,曾晓东,冯喆璐. 光电探测与信号处理[M]. 北京:科学出版社, 2010.
AN Y Y, ZENG X D, FENG ZH J. *Photoelectric detection and signal processing* [M]. Beijing: Science press, 2010. (in Chinese)

作者简介:



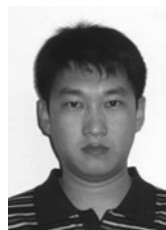
张鑫(1985—),男,吉林德惠人,助理研究员,2009年于天津大学获得硕士学位,主要从事光学技术、激光技术方面的研究。E-mail: xin_tju@163.com



白杨(1983—),女,辽宁鞍山人,副研究员,2011年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事软件工程、图像处理等方面的研究。E-mail: baiy776@163.com



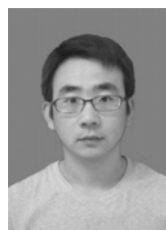
杜智远(1976—),男,山东莱州人,硕士,主要从事光电测量与控制方面的研究。E-mail: 51077993@qq.com



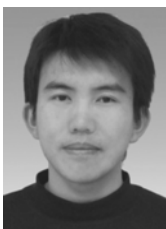
朱明超(1980—),男,吉林长春人,副研究员,2011年于吉林大学获得博士学位,主要从事惯性稳定平台运动学、动力学与控制方面的研究。E-mail: mingchaozhu@gmail.com



乔彦峰(1962—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1985年于东南大学获得学士学位,主要从事光电测量与控制方面的研究。E-mail: YanFengQiao@ciomp.ac.cn



刘立刚(1987—),男,吉林松原人,研究实习员,2013年于哈尔滨工程大学获得硕士学位,主要从事光电平台精密伺服控制方面的研究。Email: liuligang0304@163.com



刘慧(1983—),男,山西朔州人,副研究员,2011年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事光电平台精密伺服控制等方面的研究。E-mail: liuh6009@163.com



贾宏光(1971—),男,黑龙江五常人,研究员,博士生导师,2000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,主要从事光机电系统微小化与精确制导技术的研究。E-mail: jiahg@ciomp.ac.cn