

doi: 10.3788/gzxb20164504.0412004

高能激光精确指向监视系统设计及装调

王加科, 于霖晨, 高天元, 贺文俊

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘 要:为实现高能激光的有效发射,设计了一种高能激光精确指向监视系统.该系统通过调整主、次镜的相对位置来进行调焦,同时能够在 100~1000m 范围内对自然目标清晰成像.利用 ZEMAX 软件对光学系统进行设计优化,运用 ZYGO 干涉仪和大口径平行光管进行辅助装调,使成像系统成像角分辨率达到 $3.38\mu\text{rad}<5\mu\text{rad}$,光学系统同轴度达到 $4.75''\leq 5''$,满足设计指标要求.该系统能够捕获、识别、跟踪目标,从而引导高能激光进行精确打击.

关键词:高能激光;共口径系统;平行光管;辅助装调;误差分析

中图分类号:TN249

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)04-0412004-6

Design and Adjustment of High Energy Laser Precision Pointing Monitoring System

WANG Jia-ke, YU Ji-chen, GAO Tian-yuan, HE Wen-jun

(School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: For effective emission of superlaser, a kind of monitoring system was designed with precise pointing function. By adjusting the relative position of the primary mirror and the secondary mirror, the focusing system was carried out and could image the target clearly with distance of 100~1000m. ZEMAX software was applied to optimize the optical system, the ZYGO interferometer and the large aperture collimator were served as the auxiliary devices, making the resolution ratio reach $3.38\mu\text{rad}<5\mu\text{rad}$ and coaxiality meet the requirements of $4.75''\leq 5''$. The proposed system could capture, identify and track the target, thus leading to precise pointing.

Key words: High energy laser; Common aperture system; Collimator; Auxiliary equipment; Error analysis

OCIS Codes: 120.4820;120.4570;220.4830

0 引言

高能激光作为定向能量束,具有低成本、无放射性污染等优点,可通过光学系统对远距离目标进行有效打击,在军事等领域越来越受到重视.早在 1983 年 3 月,美国总统里根在《战略防御倡议》计划中提出运用激光武器进行战略防御的设想,并且在近年来许多国家都提出了多项导弹防御计划^[1-2].

美国雷声公司(Raytheon Company)在 2005 年投入生产的 AN/ASQ-228 瞄准前视红外(Advanced Targeting Forward Looking Infrared, ATFLIR)吊舱是

一种光电瞄准吊舱.系统由安全激光测距机、激光指示器、激光点跟踪器、光电传感器、目标捕获与导航前视红外传感器组成,它运用第三代热成像技术,使探测目标的距离比同类系统增加了 3 倍,并且大大提高了图像分辨率.该瞄准吊舱不仅能够实现对目标的探测、定位及指示,还可以对战场进行毁伤评估^[3].我国自身技术上的不足以及西方国家的技术封锁导致我国在该领域起步较晚.2005 年北京理工大学黄超等设计了一种实时双模光电跟踪系统,该系统具有单、双模作战能力,可根据不同的环境需求进行模式的切换,对目标进行实时捕获和跟踪^[4-5].2006 年,美国海军实验室

基金项目:国家自然科学基金(No.11474037)和吉林省自然科学基金(No.201215131)资助

第一作者:王加科(1983-),男,讲师,博士,主要研究方向为现代光学技术及工程应用. Email: yujccust@sohu.com

通讯作者:高天元(1970-),男,副研究员,博士,主要研究方向为现代光学技术及工程应用. Email: gty@cust.edu.cn

收稿日期:2015-11-11;录用日期:2016-01-26

<http://www.photon.ac.cn>

Phillip 等研制出基于激光天线结构的激光发射系统,发射系统的主镜口径为 500 mm. 2011 年欧洲导弹集团成功研制了一套激光发射系统,该系统采用反射式扩束结构使激光聚焦到目标处^[6-7].

本文介绍了一种高能激光精确指向监视系统,该系统采用共口径多光路设计,用 ZYGO 干涉仪和大口径平行光管进行辅助,用同一基准光管进行装调,实现 3 个通道的光轴一致性装调. 该系统不仅满足设计总体要求,而且也符合现阶段同类系统的发展方向及需求.

1 系统组成及设计

1.1 系统组成

高能激光精确指向监视系统主要由高能激光器、精确指向监视系统、激光发射系统组成. 但基于安全性考虑,在后续装调与测试中采用模拟激光束,波段为 1 064 nm.

1.2 系统设计

根据高能激光精确指向监视系统的总体技术指标要求,该系统需要具备激光发射、激光测距、可见光监视功能,因此需要设计 3 个光路,分别完成对应功能. 系统主要指标见表 1.

表 1 系统主要指标

Table 1 Main parameters of the system

Major parameter	Value
Entrance pupil diameter/mm	270
FOV/(°)	±0.1
Concentricity/(")	5
Angle resolution/ μ rad	5

由于接收系统为大口径的光学系统且需满足系统在 100~1 000 m 范围内调焦,考虑到成本、装调等多方因素,主系统在设计时采用了共轴折反式光学结构. 系统主、次镜均为球面,与以往的变焦系统不同,该系统是通过次镜的轴向移动来对系统进行调焦.

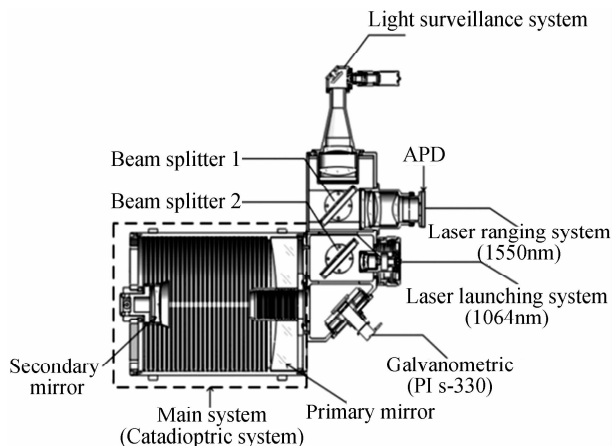


图 1 高能激光精确指向监视系统示意图

Fig. 1 High energy laser precision pointing monitoring

system schematic

图 1 为高能激光精确指向监视系统示意图. 主系统光路通过振镜折转与各个分系统连接. 振镜扫描台采用德国 PI 公司生产的 S-330 型号压电扫描台,其闭环摆角范围达 10 mrad,闭环角度分辨率 0.05~0.5 μ rad.

波长为 1 550 nm 的测距激光经过分光片和振镜反射后通过主系统出射到目标表面,部分激光回波返回到系统里,透射过 2 号分光片,并经 1 号分光片反射面折转到激光测距系统,测距系统探测器为雪崩光电二极管探测器(Avalanche Photo Diode, APD),其光谱响应范围为 1 000~1 680 nm.

激光测距系统像质评价如图 2. 通过图 2 的点列图可以看出接收系统在轴上弥散斑形状均匀,在轴外弥散斑也很小,其在 0.1°视场均方根半径 $8.744 < 9 \mu\text{m}$,通过能量集中度曲线可以看出轴上视场与 0.1°视场的能量集中度曲线也贴近衍射极限. 其余的可见光和少量残余激光透射过 1 号分光片进入到可见光监视系统,其相机采用的是德国 BALSER 公司 acA2000-50 型号的面阵相机,分辨率为 $2\ 048 \times 1\ 088$,像素尺寸为 $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$.

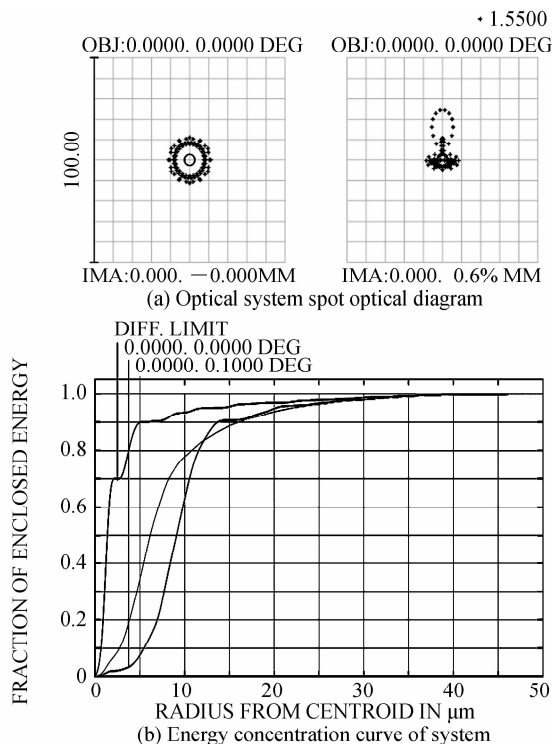


图 2 激光测距系统

Fig. 2 Laser ranging system

可见光监视系统成像质量如图 3. 由图可知轴上传递函数曲线接近衍射极限,0.7 视场内在 80 lp/mm 处传递函数大于 0.6,成像质量良好,满足系统设计要求. 当达到激光有效发射距离后,高能激光通过系统作用于目标表面.

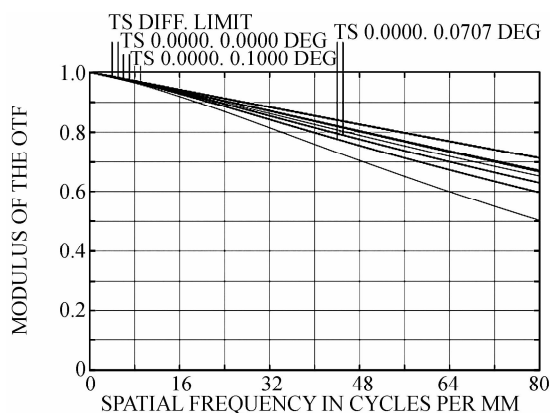
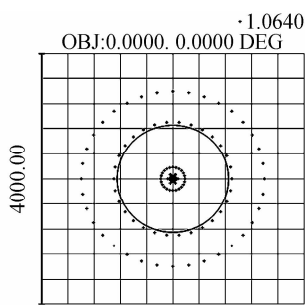


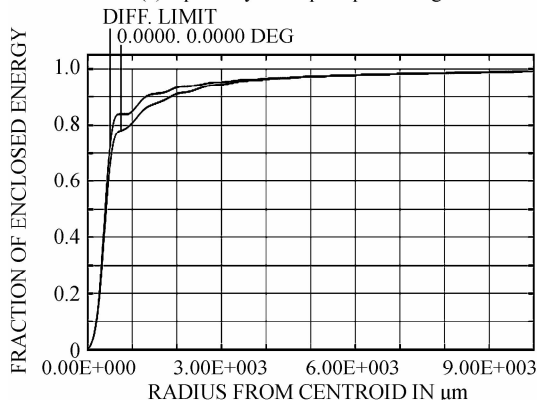
图3 可见光监视系统

Fig. 3 MTF of visible light monitoring system

激光发射系统像质评价如图4.通过点列图可知,发射系统激光光束的均方根半径为866 μm,而艾里斑半径为850 μm,二者非常接近,弥散很小,可以忽略不计.通过能量集中度曲线可以看出,能量集中度曲线接近衍射极限.另外,无论是放在地面还是车载使用,都需要提供一个能保证光学系统稳定工作并实现捕捉、跟踪、瞄准的光学平台,还需要有为全系统提供能源和运行的辅助设备^[4].



(a) Optical system spot optical diagram



(b) Energy concentration curve of system

图4 激光发射系统

Fig. 4 Laser emission system

2 系统装调

2.1 折反式系统的装调

由于折反式系统其主镜口径与质量相对较大,而次镜与之相比小很多,固定主镜为基准调整次镜比较

方便.系统需保证在100~1 000 m范围内随系统调焦而不改变后续成像组件相对位置,且能够对自然目标清晰成像,所以次镜位置装调的好坏对成像质量起到决定性作用,如果次镜位置偏移,会引入较大像散、彗差等像差,将影响最终成像质量.采用ZYGO干涉仪对折反式系统进行监视,调节次镜的位置,观察系统的Zernike系数,直至找到一个最优的次镜位置.图5为折反式系统最终装调完毕所采集的干涉图.

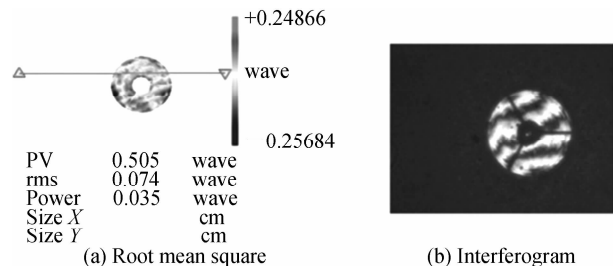


图5 主系统均方根和干涉图

Fig. 5 Root mean square and interferogram of main system

2.2 子系统多轴一致性装调

对于多光路光学系统来说,系统的同轴度将影响准精度、成像质量等一系列光学指标,所以多轴一致性的装调尤为重要.传统的多轴一致性检测方法有投影靶板法、激光光轴仪法、五棱镜法、大口径平行光管法和分光路投射法等^[5-7],分别适用于不同的实验环境和精度需求^[8].鉴于实际环境因素以及装调场地考虑,最终选用大口径平行光管法对子系统进行多轴一致性装调.装调示意如图6.以平行光管为发射端,对可见光成像光轴、激光测距接收轴进行装调,以平行光管为接收端,对激光发射轴、测距激光发射轴进行装调.

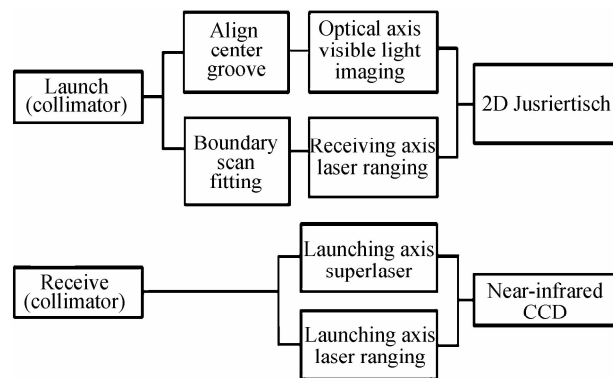


图6 装调示意图

Fig. 6 Schematic diagram

安装各个光路,利用ZYGO干涉仪通过机械对准的方式对光轴进行粗对准.为保证各个支路对波段的需求,采用全光谱、离轴式平行光管对三个支路的光轴一致性进行精调.平行光管焦距为4 500 mm,有效口径400 mm,包含可见光波段为0.4~1.1 μm,激光波段为1.06~1.55 μm,图7为装调原理图.

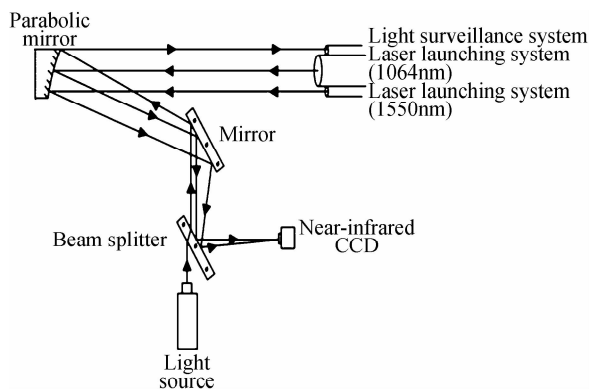


图7 多轴装调原理

Fig. 7 Schematic multi-axis alignment

1) 激光发射光路

该系统有两条发射支路,分别为高能激光发射支路和测距激光发射支路.首先将系统与大口徑平行光管对准,发射模拟高能激光与测距激光,会在平行光管的 CCD 相机上捕捉到光斑,若两光轴存在偏差,则产生的光斑相对于探测器中心会有一些的偏移量.最终通过探测器对点坐标的拾取,获得其坐标位置.通过调整激光器位置,重复上述步骤,直至光斑与探测器中心重合,达到要求.

2) 可见光监视支路

可见光监视支路的装调方法与激光发射支路装调方法基本相同,但可见光监视支路是成像支路,其光源由大口徑平行光管发出.提取光斑位置信息后可以用 Sobel 算子对图像进行处理^[9].

3) 测距激光接收支路

由于激光测距接收支路为非成像系统,不能以光斑提取的方式进行多轴一致性装调.为保证激光测距接收支路的有效装调,采用二维扫描组件对焦面以扫描的方式进行装调.比较常用的扫描方式有矩形扫描、螺旋扫描、玫瑰形扫描等.通过比较分析,采用基于一维搜索旋转矢量扫描法.该方法利用一维搜索的最优化原理,能以最少的扫描次数,快速搜索到视场的一个边界点^[10].图8为旋转矢量扫描原理图.

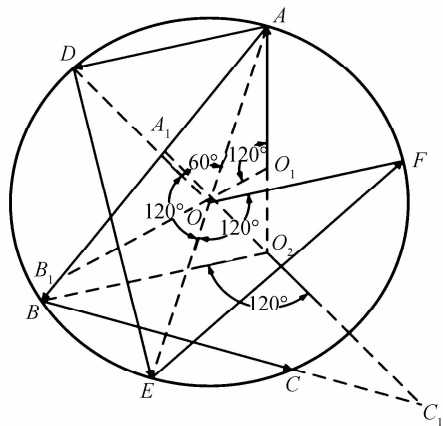


图8 旋转矢量扫描原理

Fig. 8 Scanning principle of clock diagram

在平行光管的后焦面上放置近红外 CCD 器件,将激光测距单元发出的激光脉冲耦合到光纤中,传输到平行光管的后焦点位置上出射,可模拟远处的激光脉冲回波,二维扫描组件能够使光纤出射头在光管后焦面上做二维扫描,以 O_1A 为初始扫描方向可捕获一个边界点 A ,以 O_1 为原点旋转 O_1A 120° 捕获疑似点 A_1 ,若 A_1 不是边界点,则以 AA_1 方向扫描捕获边界点 B . O_2 为 AB 对应的 120° 圆心角的顶点,以该顶点为原点旋转 O_2B 得到另一个边界点 C ,依此类推可获得其它多个边界点 D, E, F .根据三点定圆的原理,获得至少三个扫描边界点,确定了圆心数据,形成一个超定方程,可以采用最小二乘法拟合处理,最终获得位置坐标.

3 误差分析

3.1 自准直平行光管的误差

1) 平行光管的对准误差

平行光管的焦距为 4 500 mm,其探测器的像元尺寸为 $20 \mu\text{m}$,则平行光管的对准误差为

$$\delta_1 = \frac{1}{2} \times \frac{20 \times 10^{-3}}{4500} = 0.93'' \quad (1)$$

2) 平行光管的校准误差

平行光管星孔光路和 CCD 光路的光轴偏差可通过角锥棱镜校准,取校准棱镜的加工精度为 $3''$,所以其校准误差为 $\delta_2 = 3''$.

3) 平行光管的主次镜面形偏差均方根 (Root Mean Square, RMS) 值小于 $1/40$ 波长时,对平行光管平行性误差可以忽略不计,可以认为此时误差为 0.

所以,平行光管总的轴线偏差为

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2} = 3.14'' \quad (2)$$

3.2 可见光监视支路与平行光管光轴同轴偏差

可见光发射之路光源由平行光管发出,并由可见光探测器接收,探测器像素尺寸为 $5.5 \mu\text{m}$,则由接收引起的光轴偏差为

$$\delta_{r1} = \frac{5.5 \times 10^{-3}}{4500} = 0.25'' \quad (3)$$

自准直平行光管本身的平行度偏差为

$$\delta = 3.14''$$

则可见光监视支路光轴的偏差为

$$\delta_{vL} = \sqrt{\delta_{r1}^2 + \delta^2} = 3.15'' \quad (4)$$

3.3 激光接收轴与平行光管光轴平行度误差

激光接收轴由步进电机控制二维扫描进行获取,其精度主要取决于步进电机的步长,取步长为 0.05 mm ,可以计算出接收轴的偏差为

$$\delta_{r1} = \frac{0.05}{4500} = 2.29'' \quad (5)$$

自准直平行光管本身偏差为

$$\delta = 3.14''$$

则可以计算出激光接收轴的偏差为

$$\delta_{RCV} = \sqrt{\delta_{j1}^2 + \delta^2} = 3.89'' \quad (6)$$

4 测试结果

4.1 调焦成像清晰度测试

实验中,以不同距离的自然目标作为测试靶进行拍摄.图9为不同距离下拍摄的目标.

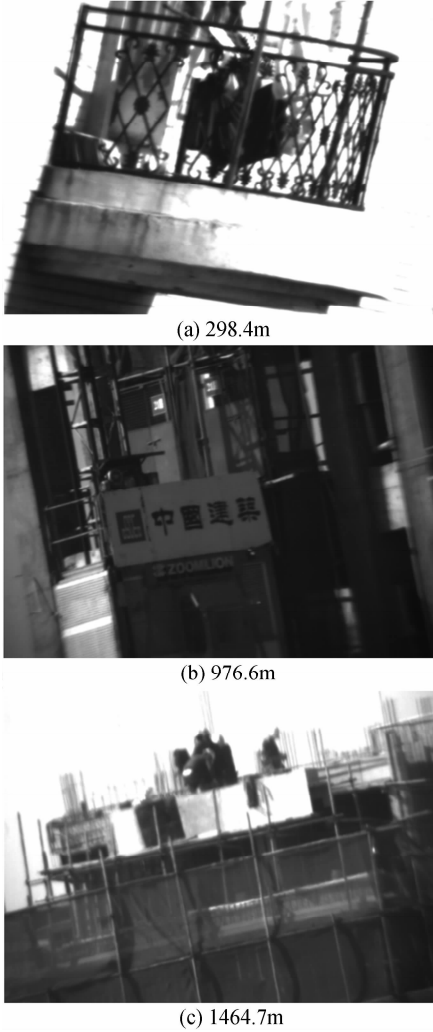


图9 不同距离下自然目标采集图像

Fig.9 Natural target acquisition images at different distances

通过人眼观察,在不同距离下的目标清晰可见,满足成像观察要求.

4.2 监视支路成像角分辨率测试

以鉴别率板作为测试标靶,测试距离为 L ,监视系统开机工作并拍摄图片.则角分辨率 α 为

$$\alpha = \frac{1}{L} \quad (7)$$

图10为监视支路所采集的鉴别率板图像.表2为不同距离下实测数据.

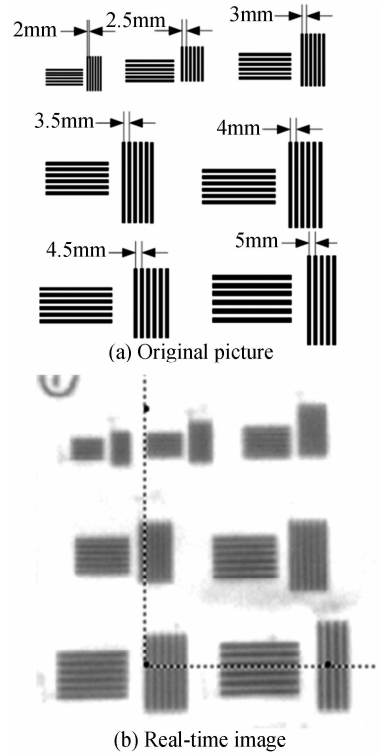


图10 监视支路采集的鉴别率板图像

Fig.10 Identification rate board image of the monitoring branch

表2 角分辨率测试

Table 2 Angular resolution test

L/m	l/mm	$\alpha/\mu rad$
200	0.5	2.5
344	1.0	2.9
675	2.5	3.8
789	3.0	3.8
909	3.5	3.9

则角分辨率 $\bar{\alpha}$ 为

$$\bar{\alpha} = 3.38 \mu rad$$

系统角分辨率 $3.38 \mu rad < 5 \mu rad$, 满足设计指标要求.

4.3 同轴度测试

以自然物体作为测试目标,测试点与被测目标距离为 L ,高能模拟激光光斑与目标中心偏移量为 Δy , 则同轴度 θ 为

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta y}{L}\right) \quad (8)$$

表3为不同距离下实测数据.

表3 同轴度测试

Table 3 Coaxial test

L/m	$\Delta y/mm$	$\theta/(\prime)$
200	4.5	4.64
344	7.8	4.68
675	15.6	4.77
789	18.3	4.78
909	21.5	4.87

则同轴度 $\bar{\theta}$ 为

$$\bar{\theta} = 4.75$$

5 结论

本文设计、装调了高能激光精确指向监视系统,并对系统进行了调焦成像清晰度与监视支路成像角分辨率测试。测试结果表明,系统对距离为298.4 m、976.6 m、1464.7 m的自然目标成像清晰,可以完成激光发射、测距、监视等功能,人眼识别无失配,发射激光光斑质量良好;系统成像角分辨率达到 $3.38\mu\text{rad}$,同轴度达到 $4.75'' \leq 5''$,满足设计指标要求。该研究对同类系统的装调具有借鉴意义。

参考文献

- [1] QIANG Xi-wen. System design and performance evaluation of high energy solidstate lasers system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(05s):41-44.
强希文. 高能固体激光系统设计及性能评估[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(05s):41-44.
- [2] SHE Hui, TAN Sheng. Development and application prospects of high-energy laser weapon[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**(3):267-271.
余辉,谭胜. 高能激光武器的发展和应用前景[J]. *红外与激光工程*, 2002, **31**(3):267-271.
- [3] FAN Kui-wei. Design and research of photoelectric imaging tracking system[D]. Nanchang Hangkong University, 2014
范奎伟. 光电成像跟踪系统设计与研究[D]. 南昌航空大学, 2014.
- [4] ZENG Gui-lin. Applications of TV tracking in electrooptic systems and its development[J]. *Journal of Applied Optics*, 2001, **22**(2):1-5.
曾桂林. 电视跟踪在光电火控系统中的应用及发展趋势[J]. *应用光学*, 2001, **22**(2):1-5.
- [5] HUANG Chao. The design of real-time dual-mode optoelectronic tracking system [J]. *Modern Defence Technology*, 2005, **33**(6):64-67.
黄超. 实时双模光电跟踪系统设计[J]. *现代防御技术*, 2005, **33**(6):64-67.
- [6] SPRANGLE P, TING A, PENANO J, et al. Incoherent combining and atmospheric propagation of high-power fiber lasers for directed-energy applications[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, **45**(2):138-148.
- [7] PROTZ R, ZOZ J, GEIDEK F, et al. High-power beam combining: a step to a future laser weapon system[C]. SPIE, 2012, **8547**(8):2-10.
- [8] SHI Ya-li, GAO Yun-guo, DENG Wei-jie. Novel method of beam monitoring and alignment for high-energy laser launching system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, (10):12-18.
史亚莉,高云国,邓伟杰. 高能激光发射系统光束监测与装调的新方法[J]. *光电工程*, 2008, **35**(2):29-33.
- [9] JIN Wei-qi, WANG Xia, ZHANG Qi-yang, et al. Technical progress and its analysis in detecting of multi-axes parallelism system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(3):526-53.
金伟其,王霞,张其扬,等. 多光轴一致性检测技术进展及其分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(3):526-53.
- [10] FU Yue-gang, WANG Zhi-jian, LI Bo, et al. The method of adjustment and examination of optical LAXIS'parallelism of multi-spectrum sensor optical system [J]. *Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*, 2001, **24**(4):11-14.
付跃刚,王志坚,李博,等. 多光谱光学系统光学平行性的调校和检验方法探讨[J]. *长春精密机械学院学报*, 2001, **24**(4):11-14.
- [11] FU Yue-gang, WANG Cheng-wei, WANG Zhi-jian. Discussing the principle of adjust collimator with penta prism method[J]. *Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*, 2002, **25**(1):11-13.
付跃刚,王成伟,王志坚. 用五棱镜法调校平行光节原理的探讨[J]. *长春光学精密机械学院报*, 2002, **25**(1):11-13.
- [12] LING Jun, LIU Bing-qi, ZHAO Xi-lin. The comparison and discussion of several testing methods about optical-axis parallelism[J]. *Journal of Applied Optics*, 2003, **24**(1):43-45.
凌军,刘秉琦,赵熙林. 几种光轴平行性测试方法的比较与探讨[J]. *应用光学*, 2003, **24**(1):43-45.
- [13] JIN Peng-fei. Improved algorithm for Sobel edge detection of image[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(4):625-628.
靳鹏飞. 一种改进的 Sobel 图像边缘检测算法[J]. *应用光学*, 2008, **29**(4):625-628.
- [14] LV Tao, FU Yue-gang, SUN Xiao-wei, et al. Laser receiving system optical axis calibration on one-dimensional clock diagram search method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, **32**(6):182-186.
吕涛,付跃刚,孙晓伟,等. 基于一维搜索旋转矢量扫描法的激光接收系统光轴标定[J]. *仪器仪表学报*, 2011, **32**(6):182-18.