

光电成像系统对 $1.06\mu\text{m}$ 激光光斑探测能力研究

安晓强 朱 斌 卿荣生

(西南技术物理研究所,成都,610041)

摘要: 分析与计算了光电成像系统对 $1.06\mu\text{m}$ 激光光斑的探测性能,根据计算结果,设计了一个与特定 CCD 摄像机相匹配的光学成像物镜,最后给出了实验结果。

关键词: 激光光斑 成像物镜 探测能力

Detective power of photoelectric imaging system on $1.06\mu\text{m}$ laser facula

An Xiaoliang, Zhu Bin, Qing Rongsheng

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, 610041)

Abstract: The detection performance of a photoelectric imaging system on $1.06\mu\text{m}$ laser facula is analyzed. Based on the result, an objective lens matching the CCD camera has been designed. Finally, the experiment results are presented.

Key words: laser facula objective lens detective power

引 言

自 20 世纪 60 年代初激光问世以来,激光在国防现代化领域已取得了广泛的应用,对以激光制导技术为原理的武器系统而言,影响其综合性能的主要因素是激光指示器对目标的照射精度,因此,获取激光指示器的照射精度无论对其本身的性能评价还是对武器系统的综合性能评价均有重要意义。要准确地测量激光指示器的照射精度,捕获高质量的激光光斑图像非常重要。我们以基本光电成像系统模型为例,对 $1.06\mu\text{m}$ 激光光斑的探测能力进行了理论分析与计算,依据分析、计算结果,设计了与特定 CCD 相匹配的光学成像物镜,从而可获得高质量的激光光斑图像,提高了 CCD 对 $1.06\mu\text{m}$ 激光光斑的探测能力,为激光指示器照射精度的准确测量提供了一种切实可行的途径。

1 光电成像系统对光斑探测能力的分析与计算

1.1 CCD 对光斑探测能力的理论分析

在光电成像系统的模型图(见图 1)中,照射器发出的激光束经大气传输投射到地面典型目标上,目标上的激光光斑经成像物镜成像于 CCD 靶面上,CCD 视频信号输入到监视器和后续的数据处理系统,我们仅对前端的光电成像系统进行分析。由图 1 可知,

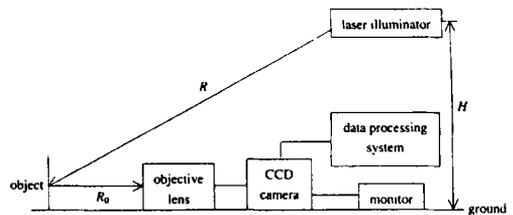


Fig. 1 Sketch of photoelectric imaging system

影响 CCD 对激光光斑探测能力的主要因素有大气对激光能量的衰减、目标表面漫反射、光电成像物镜的光学特性及 CCD 本身的灵敏度、光谱响应等。对特定 CCD 而言,下面主要分析激

光的大气衰减、目标表面漫反射及成像物镜光学特性对激光光斑探测能力的影响。

激光在大气中的能量衰减主要由吸收、散射、湍流、色散、折射等引起,对 1.06μm 的军用激光而言,大气散射是其能量衰减的主要因素。大气散射系数 μ 可由下面的经验公式^[1]计算:

$$\mu(R) = (3.912/V) \cdot (0.55/\lambda)^p \cdot \exp(-kR\sin\theta) \tag{1}$$

式中, V 为波长为 0.55μm 的光波沿水平路径或近于水平路径传输后,大气透过率为 2% 时的可见距离(用 km 表示),即能见度; λ 为用微米表示的波长; p 为经验参数,其数值由 0.7 ~ 1.6,相当于能见度由最坏变到最好; k 为粒子散射标高的倒数(k = 0.83km⁻¹); R 为大气斜路或水平传输距离(用 km 表示); θ 为激光传输方向与水平方向的夹角。

由上面的散射系数公式,可进一步推导出激光在大气中水平、垂直、斜路传输时大气透过率的计算公式,令 k₀ = (3.912/V) · (0.55/λ)^p,则有下面的关系式:

$$T = \exp(-\mu R) \quad (\text{水平传输, } \theta = 0^\circ) \\ T = \exp[-(k_0/k\sin\theta) \cdot (1 - e^{-kR\sin\theta})] \quad (\text{垂直、斜路传输, } \theta = 90^\circ) \tag{2}$$

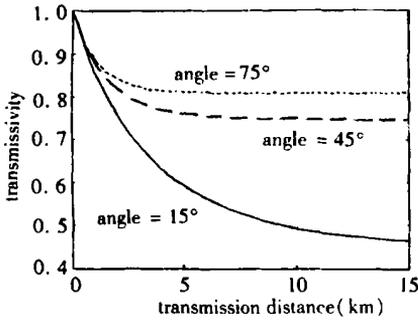


Fig. 2 Relationship between transmission distance and transmissivity of 1.06μm laser

图 2 给出了能见度为 V = 10km, 1.06μm 的激光沿不同方向(θ₁ = 15°, θ₂ = 45°, θ₃ = 75°)传输时,大气透过率 T 与传输距离 R 之间的关系。

我们定义目标是具有余弦特性的理想漫反射体,其表面的漫反射率为 ρ,照射器的光轴与目标表面法线方向的夹角为 θ₁,成像物镜的光轴与目标表面法线方向的夹角为 θ₂,地面目标到成像物镜入瞳面的距离为 R₀,激光在大气中传输 R, R₀ 时的透过率分别为 T, T₀,照射器发射系统脉冲能量为 E_e,若用 e_r 表示成像物镜入瞳面上接收到的激光能量密

度,则右边的等式^[2]成立: $e_r = E_e \cdot \rho \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 / R_0^2$ (3)

设成像光学系统的入瞳为 D,对 1.06μm 激光的透过率为 T_g,则在 CCD 靶面上接收到的激光能量为:

$$E_{laser(CCD)} = e_r \cdot T_g \cdot (D/2)^2 \tag{4}$$

设在标准海平面上,1.06μm 太阳背景光的单色辐照度为 E (Wm⁻²μm⁻¹),某地区的纬度为 φ₁,太阳光线仰角为 θ₂(θ₂ = 90° - φ₁),仰角为 θ₂ 与 90° 时 1.06μm 光波的大气透过率之比为 Q,某地区 1.06μm 太阳背景光的单色辐照度可用右式来计算: $E_{1.06} = E \cdot Q \cdot \cos\theta_1$ (5)

设摄像机的电子快门速率为 t_{aes},成像光学系统的带宽为 Δλ,成像光学系统物方视场所对应的目标表面面积为 S_{obj},可用下面的公式来计算目标表面上 1.06μm 太阳背景光的辐射能量:

$$E_{bg(obj)} = E_{1.06} \cdot t_{aes} \cdot \Delta\lambda \cdot S_{obj} \tag{6}$$

CCD 光敏面上接收到太阳背景光的辐射能量为:

$$E_{bg(CCD)} = 1/R_0^2 \cdot (D/2)^2 \cdot E_{bg(obj)} \cdot T_g \cdot \cos\theta_2 \tag{7}$$

F 为成像光学系统 f 数, L_{im} 为目标表面亮度,对远距离目标成像物镜而言,像面照度计算公式^[3]为:

$$E_{im} = (L_{im} / 4F^2) \cdot S_{obj} \tag{8}$$

由光度学的有关公式^[4,5]可知,11m 的 0.555μm 的单色光通量等于 1/683W 的辐射通量,即 11lm = 1/683W,假设每个像元光敏面面积为 S_{CCD},CCD 光敏面对 1.06μm 光波响应度为 R_{1.06},对 0.555μm 光波响应度的 1/a,取积分时间为 t(s),则靶面上每个像元能探测到 1.06μm 光波的

最低能量为：
$$E_{\text{element}} = E_{\text{im}} \cdot S_{\text{CCD}} \cdot a \cdot t / 683 \tag{9}$$

1.2 计算结果的分析与讨论

在图 1 中,照射器距地面的高度为 4km,光电成像系统到目标的距离为 1km,地面典型目标为静止不动的平面目标,其表面漫反射率为 0.2,大气能见度为 10km,照射器发射系统的能量为 100mJ,激光束散角为 0.3mrad,CCD 摄像机的最小照度为 $5 \times 10^{-4} \text{lx}$ ($F = 1.2$),有效像元数为 795×596 ,靶面大小为 6.4mm \times 4.8mm,像元占空比为 0.75,成像光学系统对 1.06μm 光波的透过率为 0.755。依据 1.1 节的基本理论分析,模拟计算了光电成像系统对 1.06μm 激光光斑的探测特性,计算结果如表 1,其中, α 为照射器的光轴与目标表面法线方向的夹角, β 为成像物镜的光轴与目标表面法线方向的夹角。另外,在我们的计算模型中,成像物镜的视场大小完全被覆盖于地面目标范围之内。

Table 1 The caculating result of detective performance of photoelectric imaging system

visual distance (km)	(degree)	(degree)	focal length (mm)	relative aperture	transmission distance (km)	contrast	the laser energy of each element $\times 10^{-17}(\text{J})$	the background energy of each element $\times 10^{-17}(\text{J})$	the minimum energy of each element $\times 10^{-18}(\text{J})$	
5	0	10	300	1/3	15	3.0885	14.372	4.6533	1.73	
	0	30			25	0.3422	1.4004	4.0920		
	10	0	600	1/5	15	3.0416	5.1738	1.7010		
	30	0			25	0.2964	0.5042	1.7010		
	15	0	10	420	1/7	15	3.0885	2.6397		0.8547
		0	30			25	0.3422	0.2572		0.7516
0		10	300	1/3	15	10.9493	73.455	6.7087		
0		30			25	2.9382	17.334	5.8995		
10		0	600	1/5	15	10.7829	26.444	2.4524		
30		0			25	2.5446	6.2402	2.4524		
5	0	10	420	1/7	15	10.9493	13.492	1.2322		
	0	30			25	2.9382	3.1838	1.0836		
	30	0	600	1/5	15	2.6748	4.5498	1.7010		
	15	0	30	300	1/3	15	10.9493	64.595	5.8995	

从表 1 可以看出,CCD 靶面上光斑图像对比度的大小与大气能见度 V 、激光照射距离 R 、激光器光轴与目标表面法线的夹角 α 有关,在 V 和 R 相同的条件下,夹角 α 越小,光斑图像的对比度越大。光学成像系统的相对孔径 D/f 、CCD 接收系统光轴与目标表面法线的夹角 β 对光斑图像对比度的影响很小,其大小与 CCD 靶面上接收到的光信号能量大小有关,在相同条件下,成像系统的相对孔径越大,CCD 靶面上接收到的光信号能量越大,但是,相对孔径太大,会使信号饱和而导致图像失真,相对孔径太小,会使像面照度值变小、亮度变暗,不能充分发挥 CCD 的探测性能,因此,对不同的摄像机而言,应选取合适的物镜相对孔径。结合实际实验系统的技术指标,我们确定成像系统光学参数的依据为:视场角要足够小,以有效抑制背景噪声,提高整个系统的测试精度;相对孔径宁大勿小,以保证足够的像面照度,捕获高质量的光斑图像。另外,从后续数据处理系统的角度而言,光学成像系统的焦距越长、视场角越小,激光光斑在 CCD 靶面上所占的面积越大,即占有更多的像素数,光斑图像的细节就越清晰,激光光斑能量中心的位置就分析得越准确,有利于提高整个测试系统的分析精度。根据上面的计算结果和实际测试系统的基本要求,确定成像光学系统的视场角为 $2 \sim 0.8^\circ$,焦距 $f = 600\text{mm}$,

相对孔径值 $D/f = 1/5$ 。

2 光电成像物镜的设计

根据上面的分析与计算结果,我们设计了一个与 CCD 摄像机相匹配的成像物镜,其焦距 $f = 609\text{mm}$ 、相对孔径 $D/f = 1/5$ 、视场角 $2\theta = 0.75^\circ$ 、工作波段中心波长 $\lambda_0 = 1.06\mu\text{m}$ 。由于成像物镜焦距比较长,为了减小整个成像系统外形结构的长度,在成像系统中加入 2 个平面反射镜,对系统光路进行 180 折叠,这样也解决了成像物镜的倒像问题。下面给出了光电成像系统的基本光学原理图,图 3 中,1 为双胶合成像物镜,2,3 为 2 个平面反射镜,4,5 为 2 个窄带干涉滤光片,6 为近红外黑白 CCD 摄像机。另外,该成像光学系统在光学结构设计上保证了双胶合成像物镜能沿系统光轴方向前后移动,其移动范围为 $\pm 2.5\text{mm}$,从而可增大光学成像系统的景深,因而,在保证对远距离目标成像的同时,也兼顾了近距离目标的成像。

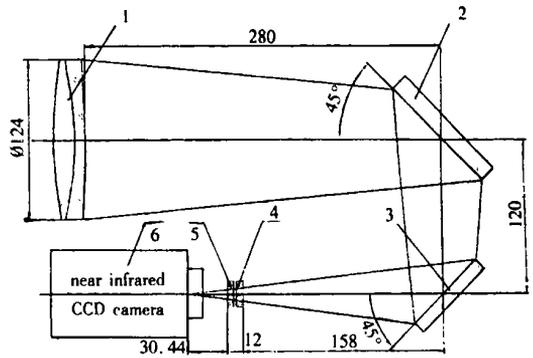


Fig. 3 The principle schematic of photoelectric imaging system

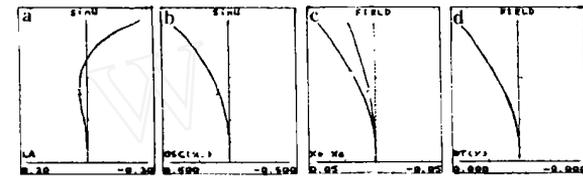


Fig. 4 Aberration of the objective lens

- a—spherical aberration
- b—sine aberration
- c—astigmatism
- d—distortion

滤光片的带宽为 8nm,以有效抑制背景光噪声,由于系统带宽很窄,在整个光学系统的设计过程中,我们重点考虑单色光像差,图 4 给出了光学成像物镜的设计结果曲线。

3 实验结果的分析讨论

该实验在成都平原进行,外界大气能见度约为 5km,地面目标是一个 6m × 6m 的竖直矗立于地面的布靶,其表面的漫反射率约

为 0.4,激光照射器的脉冲能量为 100mJ,束散角为 0.3mrad,CCD 摄像机的最小照度为 $3 \times 10^{-4}\text{lx}$,靶面大小为 6.4mm × 4.8mm,水平分辨率为 570TVL。在整个实验过程中,激光照射器和光电成像系统都位于地面,成像系统到地面靶标的距离为 500m,激光照射器到靶标的距离分别为 2km,5km 和 7km,光电成像物镜为一个焦距为 200mm 的光学镜头,有效口径为 50mm,在成像系统中加入一个窄带滤光片来抑制背景噪声,其带宽为 8nm,中心波长 1.06μm 的透过率为 80%,图 5 给出了在不同照射距离时所获得的激光光斑图像。

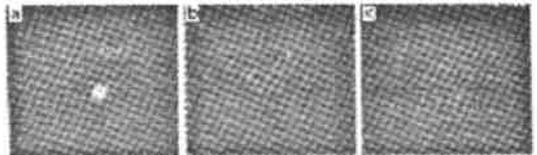


Fig. 5 Image of 1.06μm laser facula

- a—2km illumination
- b—5km illumination
- c—7km illumination

由图 5 可以看出,随着激光照射距离的增加,激光能量的大气衰减越大,激光光斑在目标面上的扩展面积越大,获得的光斑图像的对比度越小,光斑亮度越弱。同时,在实验过程中我们发现,在成像物镜相对孔径近似相同的情况下,选用小视场的成像物镜,可以有效地抑制背景噪声,增大光斑在 CCD 靶面上所占的面积,有利于提高成像系统地探测性能和获得高质量

半导体光纤环形腔激光器调谐特性的实验研究^{*}

潘 炜 张晓霞 罗 斌 吕鸿昌 陈建国

(西南交通大学计算机与通信工程学院,成都,610031) (四川大学光电系,成都,610064)

摘要: 采用国产半导体器件,组建了半导体光纤环形腔激光器(FRSLs)的实验装置及相应的测试系统,系统地研究了 FRSLs 的输出和调谐特性。结果表明,已实现高速调制情况下的动态单纵模调谐,并获得波长调谐范围大于 36nm 的稳定光脉冲输出。确立了 FRSLs 的阈值特性、输出功率等物理参量与振荡波长之间的关系,提出通过控制分光比来优化和兼顾 FRSLs 的调谐范围及输出功率。实验结果较好地与理论模拟结果相吻合,为进一步改善 FRSLs 的性能指标提供了实验依据。同时,这些分析与结论对于相关结构类型的激光器设计也具有一定的参考价值。

关键词: 半导体光放大器 光纤环形腔 波长调谐 耦合分光比

Tuning characteristics of fiber ring semiconductor lasers

Pan Wei, Zhang Xiaoxia, Luo Bin, L Ü Hongchang, Chen Jianguo^{}*

(Dept. of Computers & Communications Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

(* Dept. of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: A novel approach to achieve single frequency, widely tunable semiconductor laser oscillation is put forward. One appropriate candidate is a fiber ring semiconductor laser (FRSLs) with a semiconductor gain medium and an external cavity. The threshold current and output power with tuning wavelengths of FRSLs is experimentally studied. The singlemode oscillation is demonstrated and dynamic tuning of FRSLs is realized. The output optical pulses have been tuned over a wavelength range of 36nm. The analysis confirms that there is an optimum coupler splitting ratio to trade off between wavelength tuning width and output power. The experimental results are consistent with theoretical simulation results.

Key words: semiconductor optical amplifier fiber ring cavity wavelength tuning coupler splitting ratio

* 国家自然科学基金资助项目。

的光斑图像,这和前面的分析、计算结果是一致的。当然,在实验过程中,大气能见度很差、地平面的激光能量衰减很严重,是影响我们成像系统探测性能的重要因素。

参 考 文 献

- 1 祖耶夫 B E,卡巴诺夫 M B. 光信号在地球大气中的传输. 北京:科学出版社,1987:52
- 2 张承铨. 国外军用激光仪器手册. 北京:兵器工业出版社,1989:1
- 3 向世明,倪国强. 光电子成像器件原理. 北京:国防工业出版社,1999:40
- 4 王庆有,孙学珠. CCD 应用技术. 天津:天津大学出版社,1993:7
- 5 张以谟. 应用光学. 北京:机械工业出版社,1987:135

作者简介:安晓强,男,1971 年出生。硕士,工程师。主要从事光学设计、激光光斑监测等方面的研究。