

文章编号: 1001-3806(2007)04-0423-04

红外制导激光光束性能测试方法的研究

彭利军, 杨坤涛*, 章秀华

(华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为了研究激光半主动制导中 $1.06\mu\text{m}$ 和 $10.6\mu\text{m}$ 两种红外激光的能量分布和其它参数, 提出了一种通过摄取灰度图像进行测量的新方法。讨论了激光对靶面温度分布的影响、摄像机对回波信号的接收特性, 并建立了测量过程中光电图像信号转换的数学模型。针对某型 $10.6\mu\text{m}$ 激光指示器, 依据模型对输出进行了仿真, 得到了仿真灰度分布与真实灰度分布相似程度较好、其二维相关系数为 0.88995 的结果。结果表明, 模型是正确的, 可以采用此方法对这两种激光进行测试。

关键词: 激光技术; 能量分布; 摄影测量; 温度场; 灰度值

中图分类号: TN215; TJ765.3 **文献标识码:** A

Performance measurement of the infrared guided laser beam

PENG Li-jun, YANG Kun-tao, ZHANG Xiu-hua

(Institute of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to study the energy distribution and other parameters of $1.06\mu\text{m}$ and $10.6\mu\text{m}$ lasers in the laser semi-active guidance, a new measurement was put forward based on gray photograph. The influence of laser on the target temperature distribution and the receiving property of infrared video camera was discussed in detail. A mathematical model from optical signal to electric signal to image signal is built up. For a certain $10.6\mu\text{m}$ laser guided-instrument, its output was simulated according to the model. The obtained result was similar to the actual outcome and the 2-dimension correlative coefficient was 0.88995. The result shows that the model is correct and it can be used to test the $1.06\mu\text{m}$ and $10.6\mu\text{m}$ lasers.

Key words: laser technique; energy distribution; photography measure; temperature field; gray value

引言

在众多制导方式中, 激光制导由于具有高精度、低成本、高抗干扰能力的优点, 引起各国的高度重视, 其在现代战争中发挥越来越大的作用。迄今为止, 只有照射光束在弹外的激光半主动制导系统得到了广泛应用。

实际制导中, 常采用两种波长的激光——位于近红外波段的 $1.06\mu\text{m}$ 和远红外波段 $10.6\mu\text{m}$, 作战使用距离在 $3\text{km} \sim 20\text{km}$ 之间。研究这样两种激光在作战距离下与目标的相互作用、回波信号的空间分布以及它们的能量分布对于导引头抑制干扰、提高制导精度, 具有十分重要的作用。

1 系统组成

如图 1 所示, 系统由激光指示器、漫反射靶、红外摄像机、定标探测器、同步控制单元、光斑标定单元、脉

作者简介: 彭利军 (1981-), 男, 硕士研究生, 现从事激光检测、图像处理的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yangkuntao@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2006-04-19; 收到修改稿日期: 2006-06-28

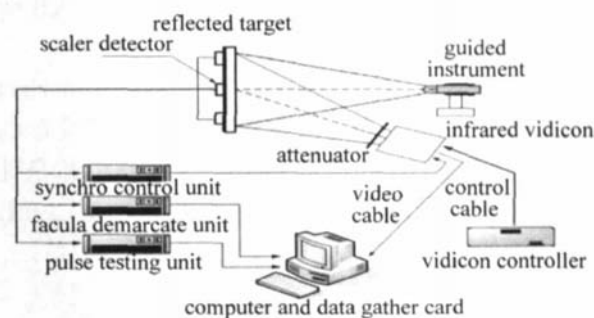


Fig 1 The structure of guided laser beam testing system
冲测量单元、数据采集卡、衰减片等几部分组成。

对于波长在 $1.06\mu\text{m}$ 的激光光束, 采用具有近红外响应的工业级 CCD 摄像机; 对波长在 $10.6\mu\text{m}$ 的激光光束, 采用响应波段在 $8\mu\text{m} \sim 14\mu\text{m}$ 的非制冷式红外热像仪获取图像。定标探测器选用光子型探测器, 在靶面由里到外等距各安装 3 个对两种波长响应的探测器, 提供脉冲激光的脉宽、频率、绝对能量密度、光斑变形信息。

漫反射靶放置在所要求的试验距离处, 可见光摄像机 (热像仪) 距离漫反射靶 20m 范围内, 夹角约为 45° , 选取合适镜头, 让视场覆盖漫反射靶面。然后指

示器发射激光,在控制电路作用下让红外摄像机摄取一帧完整的图像。最后根据图像的灰度分布和所建立的理论模型,在定标探测器的能量密度测量值标定下得出整个光斑的绝对能量密度分布、总能量等参数。

2 理论模型的建立

当激光照射到目标表面时,会同时产生反射与吸收现象。反射时,目标一般都能较好的遵循朗伯定律;吸收时,能量被迅速转化为目标内能并导致温度升高,使表面产生热辐射。因此,回波信号一般包括反射信号和辐射信号,经红外摄像机摄制成灰度图像。

2.1 激光束的功率

为了便于分析和计算不失一般性,将两种入射激光在靶面处的瞬时功率表示为以下形式:

$$P(x, y, t) = P_0 G(x, y) H(t) \quad (1)$$

式中, P_0 为峰值功率; $G(x, y)$ 为空间因子,其模为 1; $H(t)$ 为时间因子,其模为 1。

2.2 靶面的温度分布

表征物体的温度随时间和空间的变化关系三维非稳态导热微分方程为^[11,21]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \kappa \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \kappa \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \kappa \frac{\partial T}{\partial z} + Q(x, y, z, t) \quad (2)$$

式中, ρ 为密度, c 为比热容, κ 为导热系数, T 为温度, t 为时间, $Q(x, y, z, t)$ 为目标内部单位时间单位体积的发热量。

为了抓住激光传热过程的实质,并考虑到脉冲间隔为微秒级,可把靶材当半无限大物体^[3],则实际的热传导问题可以按一维导热处理^[4]。引入初始条件和边界条件后,靶材的温度随空间和时间的变化关系就由下面的方程决定:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{K} \frac{\partial T}{\partial t} = 0, (t > 0) \\ T = T_0, (t = 0) \\ \kappa \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_a P_0 G(x, y) H(t), (z = 0) \\ T = T_0, \kappa \frac{\partial T}{\partial z} = 0, (z \rightarrow +\infty) \end{cases} \quad (3)$$

式中, T_0 为环境温度; α_a 为靶面的吸收率; $K = \frac{\kappa}{\rho c}$ 为靶材料的热扩散率。

采用拉普拉斯变换法求解上述方程^[5],可以得到靶材的温度场分布为:

$$T = T_0 + \frac{\alpha_a P_0 G(x, y) \sqrt{Kt}}{\kappa} \int_0^t H(\tau) \frac{1}{\sqrt{\pi(t-\tau)}} \times \exp[-\frac{z^2}{4K(t-\tau)}] d\tau \quad (4)$$

因为脉宽非常小^[6],可认为激光的功率在发射时间内近视恒定,即 $H(\tau) = 1$ 时,有:靶材的温度场为:

$$T = T_0 + \frac{2\alpha_a P_0 G(x, y) \sqrt{Kt}}{\kappa} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\xi^2} - \xi \cdot \operatorname{erfc}(\xi) \right] \quad (5)$$

式中, $\xi = \frac{z}{\sqrt{4Kt}}$; $\operatorname{erfc}(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\xi}^{\infty} e^{-t^2} dt$ 。

在(5)式中,令 $z=0$ 就可以得到靶材表面的温度分布:

$$T(x, y, t) = T_0 + \frac{2\alpha_a P_0 G(x, y) \sqrt{Kt}}{\kappa} \quad (6)$$

2.3 靶面的空间辐射特性^[7]

靶面上单位面元向空间的定向辐射示意图见图 2。

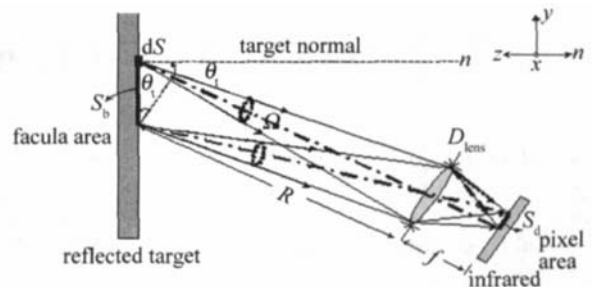


Fig 2 The beamed radiation of reflected target microunit

由辐射强度的定义,有靶面的单位面元向半球空间辐射的总通量为:

$$\Phi = \int_{\text{hemispherical space}} I d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_0 \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi = \pi I_0 \quad (7)$$

式中, Φ 为辐射通量; I 为辐射强度; Ω 为空间立体角。

把靶材当作灰体考虑,若其比辐射率为 ϵ ,则根据 Stefan-Boltzmann 定律可知其单位面元的总出射度为:

$$M = \epsilon \sigma T^4 \quad (8)$$

而对单位面元而言,总辐射通量 Φ 应等于其总出射度 M 。联立(7)式和(8)式得到靶材表面法向辐射强度与温度的关系为:

$$I_0 = \frac{M}{\pi} = \frac{\epsilon \sigma T^4}{\pi} \quad (9)$$

则可以根据朗伯定律得到靶面单位面元的定向辐射强度与温度的关系为:

$$I_\theta = \frac{\epsilon \sigma \cos\theta}{\pi} T^4 \quad (10)$$

靶材表面单位面元 dS 向与法线夹角为 θ_i 的方向上的单位立体角 $d\Omega$ 内的辐射功率为:

$$P_n = I_\theta d\Omega dS = \frac{\epsilon \sigma T^4}{\pi} \cos\theta_i \cdot d\Omega \cdot dS \quad (11)$$

2.4 靶面的定向反射功率

因为靶材为朗伯体,表面为漫反射时遵循朗伯定律。对靶面的单位面元 dS 而言,当波长为 λ ($1.06\mu\text{m}$

或 $10.6\mu\text{m}$) 的激光束入射到其上时,若靶材的反射率为 R_λ ,则其向半球空间反射的全部功率为:

$$P_r = R_\lambda \cdot P(x, y, t) dS \quad (12)$$

由 (8) 式的求取过程,同理可以得到与法线夹角为 θ 的方向上的反射的光强度为:

$$I_\theta = \frac{P_r}{\pi} \cos\theta \quad (13)$$

则经靶面单位面元 dS 反射进入与法线夹角为 θ_t 的方向上的单位立体角 $d\Omega$ 内的功率为:

$$P_{\theta_t} = I_\theta d\Omega dS = \frac{R_\lambda \cdot P(x, y, t)}{\pi} \cos\theta_t d\Omega dS \quad (14)$$

2.5 红外摄像机的接收功率

为了得到探测器每个阵列单元 (像元) 的输出电信号,必须计算出入射到此像元上的光通量。而此光通量是由靶面上与像元相对应的那部分材料发出的,其面积大小决定了光通量的大小,即决定了输出电信号的大小。为此,作如下规定。

2.5.1 靶表面可以离散成若干微小面元 如图 3 所示,假设 $ABCD$ 为靶材表面,当摄像机工作并对靶面摄

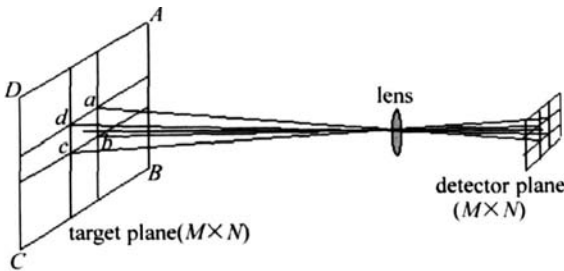


Fig 3 The discrete graph of target plane

取图像时,因探测器的各个单元都是分割开的,即像面是离散的,则与之对应的物面也被离散。

2.5.2 探测器每个单元只接收其在靶面上对应面元的光功率 物体能清晰成像,则像面上的每一个点与物面上唯一一点对应。这种对应关系反映出探测器平面上的每一个探测单元,只接收与其对应的靶面单元发射的光功率刺激。

由图 2 可知,若探测器每个单元的面积 S_d ,靶面到镜头的距离为 R ,焦距为 f ,直径为 D 。因为实际工作距离 R 远远大于靶面上光斑的半径,则其在靶面上对应的面元的面积 S_b 和透镜对此面元的立体张角 Ω_b 为:

$$S_b \approx S_d \left(\frac{R}{f} \right)^2 (\cos\theta_t)^{-1} \text{ 和 } \Omega_b \approx \frac{\pi D^2}{4R^2} \quad (15)$$

若红外摄像机中探测器的响应波段为 $[\lambda_1, \lambda_2]$,则此波段能量占总辐射能的份额为:

$$F_b(\lambda_1 \sim \lambda_2) = F_b(0 \sim \lambda_2) - F_b(0 \sim \lambda_1) \quad (16)$$

式中, $F_b(0 \sim \lambda)$ 为黑体辐射分布函数,其值可由普朗克函

数表或数值积分得出。

若透镜的透射率为 τ ,所以每个单元接收到的光功率为:

$$P_d = \int_{\Omega} \int_{S_b} (P_{r_h} + P_{r_t}) = \int_{\Omega} \int_{S_b} \tau \frac{F_b(\lambda_1 \sim \lambda_2) \varepsilon \sigma T^4 + R_\lambda \cdot P(x, y, t)}{\pi} \cos\theta_t d\Omega dS \quad (17)$$

若探测器的响应率为 δ ,则与此单元对应的输出电信号^[8,9]为:

$$V_d = \delta P_d = \frac{\delta \tau S_d}{4F^2} [F_b(\lambda_1 \sim \lambda_2) \varepsilon \sigma T^4 + R_\lambda \cdot P(x, y, t)] \quad (18)$$

式中, F 是透镜的相对孔径的倒数。

2.6 图像灰度与入射光功率的关系

若电压灰度转换系数为 γ ,则对于 $10.6\mu\text{m}$ 的激光束,热像仪接收靶面的反射和辐射光功率,因此成像光斑每个像素的灰度值为:

$$G = \gamma V_d = \frac{\gamma \delta \tau S_d}{4F^2} [F_b(\lambda_1 \sim \lambda_2) \varepsilon \sigma T^4 + R_{10.6} \cdot P(x, y, t)] \quad (19)$$

对于 $1.06\mu\text{m}$ 的激光束,CCD 摄像机只接收反射的光功率,因此每个像素的灰度值为:

$$G = \frac{\gamma \delta \tau S_d R_{1.06}}{4F^2} P(x, y, t) \quad (20)$$

由此可见,图像的灰度与指示器所发射的激光功率有上述特定关系。因此,可以通过图像处理的方法来求取激光的功率分布、形心、质心等重要参数。

3 模型的仿真与检验

由 (19) 式和 (20) 式可以看出, $1.06\mu\text{m}$ 激光束对应的模型是 $10.6\mu\text{m}$ 激光束对应的模型的子集,因此,只需对 $10.6\mu\text{m}$ 激光模型进行检验即可。

某型指示激光器为 CO_2 激光器,波长为 $10.6\mu\text{m}$;发射功率为 1.5MW ;脉冲宽度为 $1\mu\text{m}$;脉冲频率为 500Hz ;远红外摄像机探测器为 ULIS 公司产品 UL01011,其像素尺寸为 $45\mu\text{m} \times 45\mu\text{m}$,像素数为 320×240 。其它器件参数为: $R = 20\text{m}$; $\theta_t = 30^\circ$; $F = 1$; $\tau_{10.6} = 0.01$; $\delta_{10.6} = 1000\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$; $\gamma = 7\text{m} \cdot \text{V}^{-1}$; $\varepsilon = 0.305$; $\alpha_{10.6} = 0.17$; $R_{10.6} = 0.83$; $K = 0.93 \times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; $\kappa = 2.38 \times 10^2 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

利用上述参数和 (19) 式,可以仿真出灰度图 (见图 4a),将其与远红外摄像机摄取的真实图像 (见图 4b) 的比较可知:仿真的光斑的尺寸大于真实的光斑尺寸 (见图 5);光斑中心 x 方向的相对灰度分布,两者比较接近 (见图 5a);光斑中心处 y 方向的相对灰度分布,两

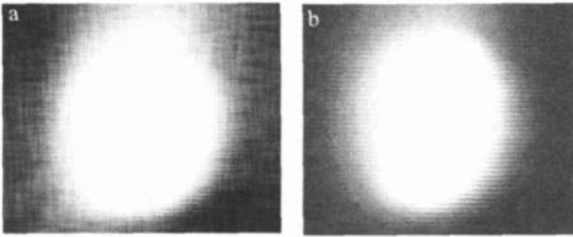


Fig 4 a—10.6 μm laser simulative gray picture b—10.6 μm laser true gray picture

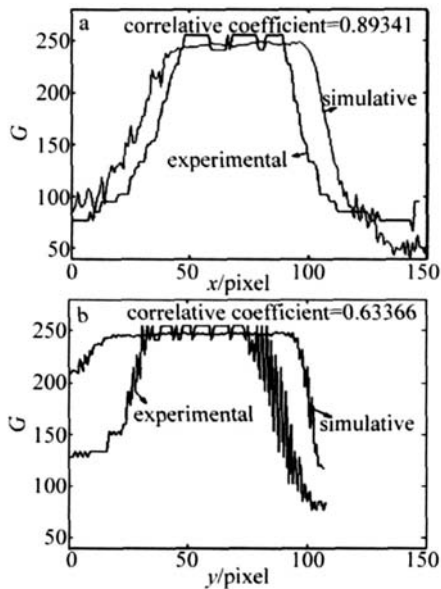


Fig 5 a—the gray distribution of x -axis in the center of facular b—the gray distribution of y -axis in the center of facular

者有差异 (见图 5b), 因为摄像机在此方向偏向放置。

仿真图与真实图的相似程度由其二维矩阵的相关系数表示。两者的二维相关系数为 0.88995; 光斑中心 x 方向的相关系数为 0.89341; y 方向的相关系数为 0.63366。可见, 文中所建立模型是正确的, 符合实际情况, 但需修正各种误差, 提高精度。

4 误差分析

本系统的误差来源有以下几个: (1) 激光远场传输特性与大气条件密切相关^[10], 因此大气条件会给系统带来误差; (2) 经靶反射而进入探测器的激光强度远远大于探测器 (特别是红外热像仪) 饱和功率, 在系统中采用了衰减片对反射激光进行衰减, 衰减片的不均匀会给系统带来误差; (3) 漫反射靶对反射激光光束的影响至关重要, 靶面朗伯性的好坏直接影响到上述模型的正确性^[11]; (4) 光学接收系统存在一定的像差, 会带来误差^[12]; (5) 红外摄像机的视轴方向与靶面的法线方向成一定角度, 圆形光斑成的像变成了失真的椭圆, 这意味着探测器每个像元在靶面对应微元

(靶面离散单元) 的面积不再相同, 会带来误差; (6) 光电转换和电压灰度转换过程中, 外围处理电路的噪声和环境的电磁干扰会叠加到信号上, 引入了误差; (7) 各种图像处理手段都是基于像素操作的, 其必然会引入一定的误差。

5 结束语

就激光制导中波长为 1.06 μm 和 10.6 μm 两种激光的能量分布提出了一种基于摄像的测量方法, 并给出了测试系统的结构。根据系统的工作原理建立了相应的数学模型, 对某型 10.6 μm 的激光指示器给出了仿真结果, 分析后表明模型是正确的, 本文中所提出的方法是可行的, 最后讨论了系统的各种误差来源。

对激光束能量分布的图像处理技术、噪声的抑制和消除技术、各种误差的修正方法等研究将在之后展开。

参考文献

- [1] ROBERT S. HOWELL J R. Thermal radiation heat transfer [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1972. 18~32
- [2] LU Y, CHENG L. Theory and analyze of heat transfer [M]. Beijing: Science Press, 1997. 1~58 (in Chinese).
- [3] LU J, NIX W, HE A Zh. The physics of reciprocity between laser and material [M]. Beijing: China Machine Press, 1996. 18~38 (in Chinese).
- [4] ZHENG Q G, GU J H. The reciprocity between laser and material [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996. 25~45 (in Chinese).
- [5] Mathematical Department of Sichuan University. Mathematical methods of physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 303~326 (in Chinese).
- [6] XIE X C. Research on decoding pulse width of laser seeker [J]. Electro-Optic Technology Application, 2005, 20 (4): 20~22 (in Chinese).
- [7] ZHANG J D, LI Y D, JIN W Q. Glimmering and infrared imaging technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995. 1~95 (in Chinese).
- [8] YE J X, CHANG D D, CHEN R J. Photoelectric system and signal processing [M]. Beijing: Science Press, 1997. 188~209 (in Chinese).
- [9] LI D W, HU Zh H, WANG H Sh. Research on building up guided seeker model of laser guided bomb [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2004, 5 (3): 33~36 (in Chinese).
- [10] WANG S C, ZHANG J S, GAO Z J. Precise laser attenuating model in the lab on laser-guided weapon simulation [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16 (2): 238~241 (in Chinese).
- [11] JIANG Y S, LI X L, CHENG H T. Studies of basic component part and guided process for a certain modal of sumounted laser-beam guided instrument [J]. Optical Technique, 2005, 31 (3): 354~356 (in Chinese).
- [12] SUN A X, WANG J, HE H X *et al*. Testing precision analysis of centrobatic of laser facula [J]. Laser Technology, 2004, 28 (6): 667~672 (in Chinese).