

文章编号: 1001-3806(2012)02-0230-03

激光致盲干扰效能分析研究

宋伟^{1,2}, 汪亚夫^{1,2}, 邵立^{1,2*}

(1. 电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037; 2. 中国电子科技集团公司 第五十三研究所 光电信息控制和安全技术重点实验室, 北京 101601)

摘要: 为了分析研究激光致盲干扰的作战能力, 评估激光致盲干扰的作战效能, 基于激光致盲干扰的干扰原理和干扰效果评估准则, 采用效能评估分析方法, 总结出激光致盲干扰的干扰方程, 从干扰方程出发, 提出了致盲距离、致盲概率两个效能分析指标, 给出了概念、计算模型, 并进行了理论分析和仿真验证。结果表明, 激光干扰机的输出功率越高, 光束质量越好, 致盲距离就越大; 激光干扰机的定位精度越高, 致盲概率就越大, 从而分析总结出影响激光致盲干扰效果的因素, 为激光致盲干扰研究奠定了基础。

关键词: 激光技术; 效能指标; 效能评估; 激光致盲干扰

中图分类号: TN249

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.02.022

Study on evaluation of laser blinded jamming effectiveness

SONG Wei^{1,2}, WANG Ya-fu^{1,2}, SHAO Li^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China; 2. Science and Technology on Electro-optical Information Security Control Laboratory, The 53th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 101601, China)

Abstract: In order to study and evaluate the operational effectiveness of laser blinded jamming, based on the theory of laser blinded jamming and evaluation rules, using effectiveness evaluation methods, the jamming equation of laser blinded jamming was deduced. From the jamming equation, both effectiveness indexes, including the blind range and blind probability were put forward for the first time, the concept and calculating models were provided, analyzed and simulated. The simulation results indicated that the higher the output power and the better the beam quality, the further the blind range; the higher the location accuracy, the higher the blind probability. Finally, some factors affecting the laser blinded jamming effectiveness were summarized, providing a base for further research of the laser blinded jamming.

Key words: laser technique; effectiveness index; effectiveness evaluation; laser blinded jamming

引言

激光致盲干扰作为一种应用越来越广泛的压制式光电有源干扰方式, 具有干扰速率快、干扰效果好、不易受电子干扰等优点, 在现代的战争中扮演着越来越重要的角色, 目前对于激光致盲干扰的研究主要集中在干扰原理、干扰方式以及干扰效果的分析等方面, 而对于激光致盲干扰作战效能评估的研究则相对较少, 且目前已有的评估方法, 多数是通过干扰前后敌方探测器被损伤程度来体现的, 并没有直接建立激光干扰

机本身作战效能的评估方法, 也没有提出评估激光致盲干扰作战效能的效能分析指标^[1-2]。

干扰效能是指电子干扰对敌电子设备效能的破坏程度。干扰效能的分析与计算对于发挥干扰机的最大作战效能起着至关重要的作用, 因此, 客观、准确、定量地评估激光致盲干扰的作战效能, 对于激光致盲干扰机的作战运用将有重要的参考意义。

1 激光致盲干扰效能评估准则

激光致盲干扰是通过发射高能量激光束, 对敌光电成像系统的探测器件、光学元件等部件的损伤, 而使其光电系统暂时或永久失效来达到干扰目的的。

致盲可分为软损伤和硬损伤两种状态, 若激光的光强仅仅是使探测器饱和而无法正常工作, 但不足以烧伤探测器, 这种状态称为软损伤状态, 软损伤状态是一种可逆转状态, 它所对应的最低激光平均功率 P_{th1}

基金项目: 光电信息控制和安全技术重点实验室资助项目(20100713-003)

作者简介: 宋伟(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电子对抗效能评估。

* 通讯联系人。E-mail: shaoli-eei@163.com

收稿日期: 2011-07-07; 收到修改稿日期: 2011-08-24

称为第一阈值;若照射到探测器上的激光光强足以使探测器烧伤,称为硬损伤,硬损伤不可逆转,对应的最低激光平均功率 P_{th2} 称为第二阈值^[3]。

根据探测器接收到的功率 P_r 和 P_{th1} 、 P_{th2} 的关系,可以建立激光致盲干扰效能评估准则:

$$\begin{cases} P_r < P_{th1} & (\text{无法致盲}) \\ P_{th1} \leq P_r < P_{th2} & (\text{软损伤致盲}) \\ P_r \geq P_{th2} & (\text{硬损伤致盲}) \end{cases} \quad (1)$$

为了简便,在下面计算中,致盲阈值统一用 P_{th} 表示,不再具体区分第一阈值和第二阈值,当 $P_{th} = P_{th1}$ 时,表示软损伤情形;当 $P_{th} = P_{th2}$ 时,表示硬损伤情形。

2 致盲干扰方程的建立

要达到激光致盲干扰的效果,必须要求激光干扰机发出的激光进入探测器视场内的功率大于探测器的致盲阈值功率 P_{th} 。

如图 1 所示,设探测器表面法线与激光轴线的夹角为 θ_1 ,探测器表面中心与激光轴线的距离为 r ,对于激光光束截面的功率分布是均匀的情况,辐照到探测器的功率为^[4]:

$$P_r = \frac{P\tau_a}{\pi\left(\frac{\theta_0 R_j}{2}\right)^2} \tau_0 A_0 \cos\theta_1 \quad (2)$$

式中 P 为激光干扰机输出功率; θ_0 为激光干扰机输出激光的光束发散角; τ_a 为大气的平均透过率; R_j 为激光干扰机距离探测器的距离; τ_0 为光学接收系统透过率; A_0 为探测器接收面积, $A_0 = \pi d^2/4$, d 为探测器光学系统的直径。

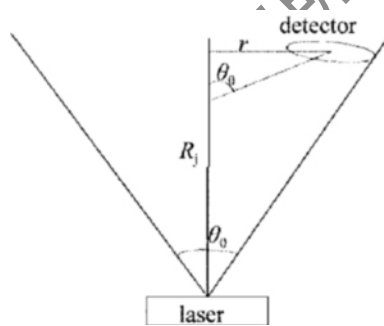


Fig. 1 Light field theory of laser blinded jamming

对于高斯光束的情形,远距离干扰条件下,接收镜头相对于激光光斑尺寸来说可近似为一个点,则可用探测器表面中心的光强度作为整个探测器面的平均光强度,则^[4]:

$$P_r = \frac{P\tau_a}{\pi w^2(R_j)} \tau_0 A_0 \cos\theta_1 \exp\left[-2\frac{r^2}{w^2(R_j)}\right] \quad (3)$$

式中 $w(R_j)$ 表示 R_j 处高斯光束的光斑半径。

为了计算方便,假设激光光束能量分布均匀(其

它情形考虑方法一致),则根据上述计算,可以得到激光致盲干扰的干扰方程为^[5-6]:

$$\frac{4P\tau_a}{\pi(\theta_0 R_j)^2} \tau_0 A = P_{th} \quad (4)$$

式中 $A = A_0 \cos\theta_1$ 称为有效接收面积。

根据致盲干扰方程,可以得到有效实施激光致盲干扰的条件为:

$$\frac{4P\tau_a}{\pi(\theta_0 R_j)^2} \tau_0 A \geq P_{th} \quad (5)$$

将上式变换,可以得到:

$$R_j^2 \leq \frac{4P\tau_a \tau_0 A}{\pi\theta_0^2 P_{th}} \quad (6)$$

如果以干扰机所在位置为坐标原点,建立空间直角坐标系,则:

$$R_j^2 = x^2 + y^2 + z^2 \leq \frac{4P\tau_a \tau_0 A}{\pi\theta_0^2 P_{th}} \quad (7)$$

根据干扰压制区的概念:对敌实施有源压制性干扰时,使其不能正常工作的空间范围。(7)式表示的区域即为激光致盲干扰的有效压制区,它表示一个以干扰机所在位置为原点的实心球体。由于激光干扰机自身有方位角和俯仰角的限制,假设激光干扰机的方位角范围为 $[0, 2\pi]$,俯仰角范围为 $[0, \theta]$,所以有效压制区应为一个圆锥球体,如图 2 所示。

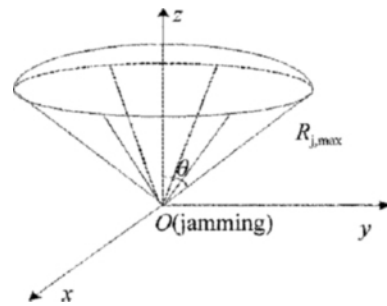


Fig. 2 Blanketed zone of laser blinded jamming

3 致盲距离与致盲概率的计算^[7-10]

评估激光致盲干扰的作战效能,首先需要建立合理的效能指标。为了综合评价激光干扰机的作战能力,作者提出致盲距离和致盲概率的概念,作为激光致盲干扰效能分析的指标。

3.1 致盲距离

致盲距离定义为当激光干扰机的发射功率、发散角一定时,激光干扰机能够有效实施致盲干扰的最大作用距离。

致盲距离是激光致盲干扰机的重要性能指标之一,它决定了激光致盲干扰机能够在多大的距离上对敌光电探测器实施有效致盲干扰,致盲距离主要取决于激光致盲干扰机的本身性能、大气环境以及探测器

的相关特性。根据致盲干扰方程,可以得到:

$$R_{j,max} = \left(\frac{4P\tau_a\tau_oA}{\pi\theta_0^2 P_{th,min}} \right)^{1/2} \quad (8)$$

式中 $P_{th,min}$ 为探测器饱和和致盲的最小阈值功率。

由致盲距离的计算公式,可以看出 $R_{j,max} \propto P^{1/2}$, $R_{j,max} \propto \frac{1}{\theta_0}$,所以要提高激光干扰机的致盲距离,就要增大激光干扰机的输出功率,且光束发散角越小越好。

3.2 致盲概率

致盲概率定义为激光干扰机实施致盲干扰时,照射到探测器且被探测器表面所接收的激光功率大于探测器致盲阈值的概率。

致盲概率是综合反映致盲干扰作战效能的指标,它能反映在某一次致盲干扰过程中,干扰成功的可能性有多大。根据致盲概率的定义,结合激光致盲干扰的工作过程,可将致盲概率分为发现识别目标的概率,激光上靶概率,探测器接收到的激光功率大于致盲阈值的概率来分别进行计算,其中发现识别目标的概率,由告警设备完成,在此先不予考虑,所以:

$$\text{致盲概率} = \text{激光上靶概率} \times \text{接收功率大于阈值的概率} \quad (9)$$

3.2.1 激光上靶概率的计算 在激光光束瞄准探测器中心时,由于定位精度(假设定位精度角为 $2\alpha_0$)的影响,使得光轴线在立体角 $2\alpha_0$ 的集合内随机抖动,从而使激光能量中心与探测器光敏面中心存在随机偏差,可以推导出光轴线与光敏面的交点 a 在以探测器中心为圆心, $\alpha_0 R_j$ 为半径的圆内服从正态分布。即:

$$a \sim N(0, (\alpha_0 R_j)^2) \quad (10)$$

如图3所示,由于定位精度的影响,激光光轴对探测器的定位点将随即分布在以探测器为圆心,半径为 $\alpha_0 R_j$ 的圆内,且服从正态分布。因为定位点分布区域为一个圆,且该分布没有方位选择性,在某点的分布情况只与该点离圆心的距离有关,而与某个方位无关,所以在任一直径方向上,定位点的分布特性是一致的,且探测器本身,也可以视为一个圆形区域,如图4所示。



Fig. 3 Light field location accuracy

因此为了计算方便,把2维概率密度函数,转化为1维概率密度函数,则根据正态分布的特性,概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{x^2}{2(\alpha_0 R_j)^2}\right] \quad (11)$$

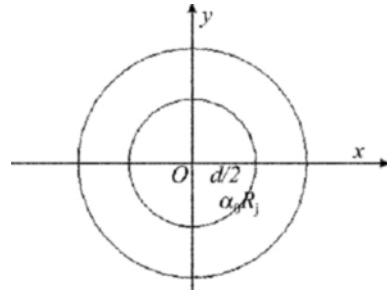


Fig. 4 Light field calculation

所以激光上靶概率为:

$$p_t = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-d/2}^{d/2} \exp\left[-\frac{x^2}{2(\alpha_0 R_j)^2}\right] dx = 2\Phi\left(\frac{d}{2\alpha_0 R_j}\right) - 1 \quad (12)$$

式中 d 为探测器的直径。

3.2.2 接收功率大于阈值功率概率 激光经过大气传输以后,到达探测器表面,被探测器所接收,根据致盲干扰的功率准则,可以计算接收功率大于阈值功率的概率:

$$p_{more} = \begin{cases} 0 & (P_r < P_{th}) \\ 1 & (P_r \geq P_{th}) \end{cases} \quad (13)$$

利用阶跃函数的性质,(13)式可改写为:

$$p_{more} = u(P_r - P_{th}) \quad (14)$$

根据致盲概率的计算思路可得致盲概率为:

$$p_b = p_t \cdot p_{more} = \left[2\Phi\left(\frac{d}{2\alpha_0 R_j}\right) - 1\right] \cdot u(P_r - P_{th}) \quad (15)$$

如果激光功率可以满足要求,则:

$$p_b = p_t = 2\Phi\left(\frac{d}{2\alpha_0 R_j}\right) - 1 \quad (16)$$

根据(16)式,可以得到致盲概率与激光干扰机定位精度角的关系,如图5所示。

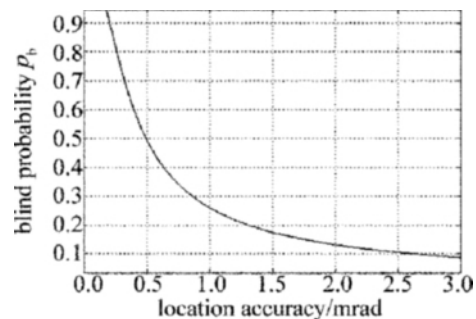


Fig. 5 Relation among blind probability and location accuracy

由图5可以看出,随着激光干扰机定位精度角的增大,致盲概率在逐渐的减少,所以,为了提高激光干扰机的致盲概率,必须让激光干扰机具有较高的定位精度,从定位精度与致盲概率的关系,也可以看出干扰距离 R_j 对致盲概率的影响,干扰距离 R_j 越小,致盲概率越大,所以在实施激光致盲干扰时,在作战环境允许 (下转第237页)

系统的准确性,即与表征值的一致性, C_a 值越小说明系统准确性越高; C_{PK} 值则表征了系统的整体精度,即准确性和精密性的综合品质。在表征系统稳定性的 C_p 值变化不大的情况下, CPK 的值有了较大增长,平均值达到或已经超过2,达到了很高的系统精度水平,说明光斑补偿有效地提高的整体系统的精度^[12]。

3 结论

基于3维扫描线数据重建算法,解决了激光改性3维图形半径补偿的难点,并对补偿后的3维图形进行了3维重建。通过对两个关键尺寸30个样本的测量,尺寸平均下降0.07mm,平均值更加接近标准值,消除了材料表面激光3维改性系统的系统误差;同时对所得测量值的 CPK 值进行了分析,定量分析了系统的准确度和精密度,且补偿后的图形改性尺寸 CPK 达到或超过2,达到了很高的系统精度水平。该算法适应性强,为提高材料表面3维改性的精度提供了一种广泛适用的算法。

参考文献

- [1] ZHANG G Sh. Laser manufacturing technology today [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 194-205(in Chinese) .
- [2] PAN X, MO J H, FENG X, *et al.* Research on scanning of variable radius compensation in SLA [J]. Laser Journal, 2007, 28(4): 75-76(in Chinese) .
- [3] WANG Ch, ZENG X Y. Experimental study about 3-D laser carving of Al_2O_3 ceramic [J]. Laser Technology, 2007, 31(1): 18-21(in Chinese) .
- [4] XIE J, DUAN Zh Ch, SHI Y Sh. Study of key technologies for galvanometric scanning system used in selective laser sintering [J]. Manufacturing Automation, 2004, 26(4): 9-12(in Chinese) .
- [5] XU B Zh, LIU T G, WANG M. Research on laser marking technology for free-form surface [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2165-2169(in Chinese) .
- [6] TANG G Q. Analysis and comparison of several calculation methods of beam spot center [J]. Journal of Beijing Institute of Machinery, 2009, 24(1): 61-64 (in Chinese) .
- [7] SHI J G, ZHANG Y K, GU Y Y, *et al.* Study on sheet metal punched by laser shock waves [J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 639-645 (in Chinese) .
- [8] ZHANG G Sh, WANG M, LIU T G, *et al.* An auto laser welding in rechargeable battery manufacture [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(11): 1693-1697(in Chinese) .
- [9] WANG J L, YU G, JIA Y H. Trace generation and optimization of free-form surface in laser hardening [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(11): 1567-1570(in Chinese) .
- [10] WU L Sh, WANG X Ch, YANG J. Laser ranging parameter analytical system based on VC [J]. Ordnance Industry Automation, 2007, 26(10): 93-94(in Chinese) .
- [11] MA R, WANG Sh X, WANG B B. Application of normal school function in CPK [J]. Computer Technology and Development 2006, 16(3): 188-190(in Chinese) .
- [12] LIU H J, GONG M, ZHAO M Y. Error analysis and calibration of a 4-DOF parallel Mechanism [J]. Robot 2005, 27(1): 6-9(in Chinese) .
- (上接第232页)的情况下,干扰机应尽量靠前布设。
- [1] LU M Ch, LIANG H W. High energy laser weapons and the development of their technologies [J]. Laser Journal, 2008, 29(1): 1-3(in Chinese) .
- [2] JIANG Y T, PAN L N. Active laser interference and its present development [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 438-441(in Chinese) .
- [3] CHEN F M, YI X J. The evaluation criterion and math simulation on jamming effect of the laser blinding [J]. Journal of Wuhan University of Science and Engineering, 2006, 19(10): 1-4(in Chinese) .
- [4] NIU Y X, ZHANG P, YAO J Q, *et al.* Investigation of laser disturbance and damage to satellite-borne photoelectric detecting system [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(7): 793-796(in Chinese) .
- [5] SHAO G P. Tactics calculating method of electronic warfare [M]. Beijing: The Publishing House of PLA, 2010: 176-201(in Chinese) .
- [6] SUN X Q, LU Y G. Principle and technology of laser countermeasure [M]. Beijing: The Publishing House of PLA, 2000: 84-104(in Chinese) .
- [7] XIANG J Y, XIONG X W, LIU Sh Q. Quantitatively evaluating of laser blinding countermeasure and its simulation technology [J]. Journal of Xidian University, 1997, 24(2): 267-272(in Chinese) .
- [8] GAO W. Study on evaluation of high energy laser blinding jamming effectiveness [J]. Optical Technique, 2006, 32(3): 468-471(in Chinese) .
- [9] BIAN J, NING T F, XU H. Design practice of high power laser weapon and analysis of action effect [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(6): 528-530(in Chinese) .
- [10] TAO X H, SUN X Q, CAI X Ch. Research of laser disturbing satellite-based CCD [J]. Laser Technology, 2005, 29(4): 414-416(in Chinese) .