

# 脉冲激光干扰面阵 CCD 实验的模糊评估

张景阳<sup>1</sup>, 王海晏<sup>1</sup>, 雷 威<sup>1,2</sup>

(1. 空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 中国人民解放军 95321 部队, 湖北 武汉 430222)

**摘要:** 为了确定脉冲激光对 CCD 探测器的干扰效果, 同时针对干扰效果受到多方面因素的影响, 采用模糊评估方法对干扰效果进行评估。介绍了模糊评估方法的实施过程, 将激光干扰对准程度、干扰功率、大气环境影响以及探测器表面材料质量作为评估主要因素。通过实验与理论结合的方式验证了模糊评估方法的适用性。

**关键词:** 模糊综合评估; 干扰功率; CCD 探测器

**中图分类号:** TN977      **文献标识码:** A

## Fuzzy evaluation for jamming effect of pulse laser on CCD array detector

ZHANG Jing-yang<sup>1</sup>, WANG Hai-yan<sup>1</sup>, LEI Wei<sup>1,2</sup>

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. No. 95321 Unit of PLA, Wuhan 430222, China)

**Abstract:** Taking into account various impacting factors, a fuzzy evaluation method is presented in this paper to assess the jamming effect of CCD array detector by pulse laser. The implemental process of the fuzzy evaluation method is introduced. At the same time, the degree of collimation, laser power, atmospheric condition and surface quality of detector's material are the main inputs of the fuzzy evaluation. The applicability of the fuzzy evaluation is verified by combining experimental and theoretical methods.

**Key words:** fuzzy synthetic evaluation; interfering power; CCD detector

### 1 引言

激光干扰技术<sup>[1]</sup>是近年来发展起来的新兴技术,主要是对光电探测设备进行干扰。目前世界上大多数国家的探测设备都向以 CCD 探测为核心的方向发展。为确定脉冲激光对 CCD 探测器的干扰效果,采用 632.8 nm 的脉冲激光对面阵 CCD 进行干扰实验,并对干扰效果进行评估。

激光干扰效果评估是对实施激光干扰后所产生的干扰、损伤或破坏效应的定性或定量评价。目前很多情况下,对激光干扰效果评估还是取决于作战人员的经验总结而不能做到定量评估。为了对激光干扰效果进行定量评估,以及考虑干扰效果受到多方面因素的影响,采用模糊综合评估方法来进行评

估。文中介绍模糊综合评估法的实施过程,以及建立各种评估模型来对激光干扰进行评估。用所做的具体实验来验证模糊评估结果。得出模糊评估方法可以作为评估激光干扰效果的评估方法。

### 2 模糊综合评估法的实施过程

模糊综合评估法可以分为一级评估、二级评估以及多级评估。结合实验所涉及到的考虑因素,同时针对模糊评估数学方法的应用,这里采用一级评估,其过程框图如图 1 所示。

基金项目:2110 实验室建设项目资助。

作者简介:张景阳(1987-),男,硕士生,研究方向为光电探测与对抗。E-mail:xf09woshiwo@yahoo.cn

收稿日期:2010-12-08;修订日期:2011-01-04

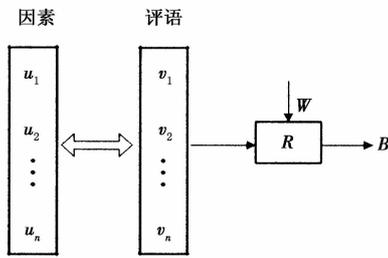


图 1 模糊综合评价的过程框图

Fig. 1 block diagram of fuzzy comprehensively evaluation

2.1 模糊综合评价的实施步骤

(1) 确定因素集  $U$

在模糊综合评估中,首先确定影响评估因素集,

$$u_i = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}。$$

(2) 设定评语集  $V$

$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ , 它是对评语的等级分类集合。

(3) 确定权重向量集  $W$

$W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_n\}$ , 其中  $0 < w_i < 1$ , 它是各个评估指标重要程度的量化系数。

(4) 确定模糊评估矩阵

通过选取合适的隶属函数来确定模糊评估的模糊矩阵。隶属函数的确定是根据评估对象而定,选择合适的隶属函数是评估的关键。

模糊矩阵通常可表示为:

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \dots \\ R_j \\ \dots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1j} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2j} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ij} & \dots & r_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nj} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

(5) 进行模糊评估

权重系数的模糊综合评估矩阵为:

$$B = W \circ R$$

$$= \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_n\} \circ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1j} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2j} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ij} & \dots & r_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nj} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

$$= (b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n)$$

$$b_j = \sum_{i=1}^n \omega_i r_{ij}; j = 1, 2, \dots, m$$

其中,  $b_j$  为向量  $B$  的第  $j$  个向量, 也即模糊综合评估中各个指标对第  $j$  个评语隶属度。按最大隶属度原

则, 取  $\max\{b_1, b_2, b_3, \dots, b_m\}$ , 进行模糊综合评价。

3 脉冲干扰实验及实验效果评估

3.1 脉冲干扰实验

3.1.1 激光器的选择

实验中采用波长 632.8 nm, 脉宽 10 ns 的脉冲激光, 重复频率为 100 Hz。选择该激光器的主要原因为: ① 632.8 nm 的激光为红光, 通常红光在大气中衰减较少, 传输距离更远, 适宜作远距离激光干扰源; ② 氦氖激光器、半导体激光器均能产生 632.8 nm 的激光, 技术相对成熟, 且半导体激光器能产生相对较大的功率, 而自身体积小、质量轻, 适于装载到飞机平台和其他平台上使用。

3.1.2 实验的过程

所选的 CCD 探测器的视场角为  $5^\circ$ , 在视场内开展脉冲激光干扰面阵 CCD 探测器实验。实验装置<sup>[2]</sup>如图 2 所示。

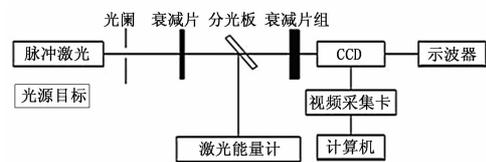


图 2 632.8 nm 脉冲激光对 CCD 的辐照干扰实验装置示意图

Fig. 2 experiment's structure of irradiating CCD by

632.8 nm pulse laser

实验的具体步骤为: ①按照实验装置图, 在 DH-OT 系列防振平台上连接实验装置器件, 并且校正光路; ②先开起 CCD 探测器, 然后打开光源目标, 将 CCD 中的视频图像传输到计算机, 再利用 MATLAB 编译的图像匹配程序, 使 CCD 镜头捕获光源目标; ③打开脉冲激光器, 根据需要仿真的具体环境, 估算出经过具体距离和能见度后, 辐照到探测器的能量, 然后调整光路中的衰减片组, 使能量符合仿真数据, 按所需频率参数对激光进行调制, 观测到 CCD 探测器在干扰后出现饱和, 丢失真目标, 成功实施干扰。实验中未干扰及干扰后 CCD 的成像情况分别如图 3 和图 4 所示。

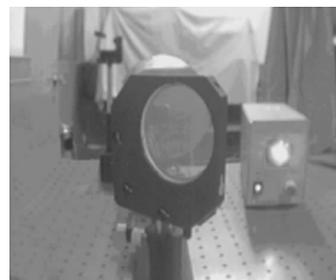


图 3 脉冲激光实施干扰前 CCD 正常捕获目标

Fig. 3 area array CCD acquires target before pulse laser interfering

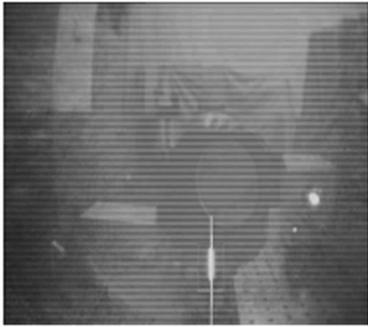


图4 CCD 受到脉冲激光干扰后捕捉到假目标丢失真目标

Fig.4 area array CCD acquires decoy target and loses real target after pulse laser interfering

### 3.2 对脉冲干扰实验进行评估

在激光辐照 CCD 干扰实验中,影响干扰效果的因素涉及干扰时机、干扰方式选取、大气环境、激光干扰功率、激光束对 CCD 的瞄准程度、干扰激光工作波长的选取、光电探测器抗干扰程度等。为了对干扰评估进行简化,结合本实验将激光的干扰瞄准程度、干扰功率、大气环境状况和探测器表面材料的质量确定为干扰效果评估的因素集<sup>[3]</sup>,然后将影响因素进行建模分析。

#### 3.2.1 建立评估模型

采用干扰瞄准系数  $E_r$  评估干扰瞄准状态,  $E_r$  正比于干扰激光光斑与导引头接收孔径的对准程度,如图 5 所示。当远场 CCD 探测器位于激光器距离为  $R$  处的平面时,激光光斑中心坐标为  $O_1(x_1, y_1)$ , 半径为  $r_1$ , CCD 探测器孔径中心坐标为  $O_2(x_2, y_2)$ , 半径为  $r_2$ 。以激光光斑中心与 CCD 探测器孔径中心的连线建立新的坐标轴,新坐标轴与激光光斑边缘分别相交于  $r_a$  和  $r_d$ , 与探测器边缘分别相交于  $r_b$  和  $r_c$ 。当激光传输一定距离,可以确定激光光斑的半径  $r_1$  远大于探测器半径  $r_2$ 。在此情况下,如果激光

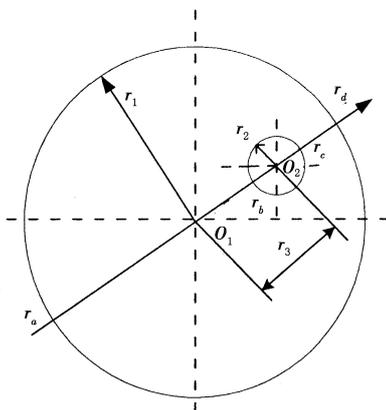


图5 干扰对准程度

Fig.5 the image of interfering aim

光斑对准探测器,则瞄准系数为常数,否则可以判定光斑偏离探测器程度。所以  $E_r$  可描述为:

$$E_r = [\min(r_c, r_d) - \min(r_a, r_b)] / 2r_2 \quad (1)$$

用能量密度效益系数  $E_n$  评价脉冲激光干扰效能,  $E_n$  表示不同激光能量密度对干扰效果的影响。将脉冲激光的能量效益系数简单定义为:

$$u_E = \begin{cases} 0.5 \frac{e}{e_{th1}}, & e < e_{th1} \\ 0.3 \frac{e - e_{th1}}{e_{th2} - e_{th1}}, & e_{th1} < e < e_{th2} \\ 0.8, & e_{th2} < e < e_{th3} \\ 1, & e_{th3} < e \end{cases} \quad (2)$$

对于脉冲激光,评估中采用能量密度阈值,  $e$  为脉冲激光器发射的能量密度,  $e_{th1}$  为导引头靶面部分相元饱和,  $e_{th2}$  为导引头靶面饱和,  $e_{th3}$  为探测器发生硬毁伤阈值。

用大气条件系数  $E_a$  来评价实验时的环境状况。在大气环境良好的情况下,  $E_a$  通常取值在 0 ~ 1 之间,通过经验可知,  $E_a$  取值在 0.8 附近更加符合事实,所以在大气状况良好时,  $E_a$  的取值为 0.8。在大气状况一般和较差时  $E_a$  的确定和大气环境良好的模型一样。设能光度为  $V$ ,可列出各种大气条件下的  $E_a$  取值:

$$E_a = \begin{cases} 0.8 & V \geq 20 \text{ km} \\ 0.5 & 20 \text{ km} > V \geq 5 \text{ km} \\ 0.2 & V \leq 1 \text{ km} \end{cases} \quad (3)$$

用  $E_s$  来评价实验中探测器表面材料。根据文献[4]、[5]可知激光干扰效果与探测器材料有很大的关系。光泽度较好的材料对入射激光有较大的反射,这对激光干扰光电探测器非常不利。在通常情况下,探测器表面材料可分为粗糙、光滑和抛光面等。  $E_s$  取值可表示为:

$$E_s = \begin{cases} 0.9, \text{粗糙表面} \\ 0.6, \text{光滑表面} \\ 0.2, \text{抛光面} \end{cases} \quad (4)$$

#### 3.2.2 定量评估

根据第 2.1 节模糊综合评估方法的评估过程,各步骤中参数定量如下:

(1) 评估指标集  $u_i$

$$u_i = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}, i = 1, 2, 3, 4, \text{其中:}$$

$$u_1 = \{\text{干扰瞄准程度 } E_r\};$$

$u_2 = \{ \text{干扰功率 } E_n \};$   
 $u_3 = \{ \text{大气环境状况 } E_a \};$   
 $u_4 = \{ \text{探测器表面材料的质量 } E_s \}.$

(2) 评语集  $V$ : 对于干扰效果评估简单划分为四个级别, 分为:

$V = \{ \nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4 \} = \{ \text{差, 一般, 较好, 好} \}.$

干扰效果评估的等级如表 1 所示.

表 1 干扰效果评估四个等级

Tab. 1 four scales of interfering effective evaluation

等级 $\nu_i$	$\nu_1$	$\nu_2$	$\nu_3$	$\nu_4$
指标范围	$a_0 \sim a_1$	$a_1 \sim a_2$	$a_2 \sim a_3$	$a_3 \sim a_4$
$a_{i-1} \sim a_i$	0 ~ 0.25	0.25 ~ 0.5	0.5 ~ 0.75	0.75 ~ 1
效果评价	差	一般	较好	好

对于激光干扰, 等级  $\nu_1$  代表没有任何像元达到饱和, 干扰无效等级, 等级  $\nu_2$  代表实现部分像元饱和, 等级  $\nu_3$  代表实现对探测器靶面饱和,  $\nu_4$  代表实现对探测器硬损伤.

(3) 权重向量集  $W$

根据文献[6]以及所做的实验, 可以得出脉冲激光对 CCD 的干扰效果主要受到入射脉冲激光的能量影响, 对准程度次之, 最后考虑的是大气环境因素和探测器表面材料质量. 所以确定权重系数向量为  $[0.2 \ 0.5 \ 0.15 \ 0.15]$ , 即:  $W = \{0.2, 0.5, 0.15, 0.15\}$ .

(4) 建立模糊隶属度矩阵的建立

采用文献[7]中指标评价效益函数, 根据其函数分布并结合本文所述问题, 对所有因素指标构造同一隶属函数<sup>[8]</sup>  $r_{ij}(x_j)$  以进行单因素评价. 隶属函数为:

$$r_{ij}(x_j) = \begin{cases} 1, & a_0 \leq x_j < a_1 \\ \frac{a_2 - x_j}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x_j < a_2 \\ 0, & a_2 \leq x_j \leq a_4 \end{cases} \quad (5)$$

$$x_{ij}(x_j) = \begin{cases} 0, & a_0 \leq x_j < a_{i-2} \\ \frac{a_{i-2} - x_j}{a_{i-2} - a_{i-1}}, & a_{i-2} \leq x_j < a_{i-1} \\ 1, & a_{i-1} \leq x_j < a_i, 2 \leq i < 3 \\ \frac{a_{i+1} - x_j}{a_{i+1} - a_i}, & a_i \leq x_j < a_{i+1} \\ 0, & a_{i+1} \leq x_j \leq a_4 \end{cases} \quad (6)$$

$$r_{4j}(x_j) = \begin{cases} 0, & a_0 \leq x_j < a_2 \\ \frac{x_j - a_2}{a_4 - a_3}, & a_2 \leq x_j < a_3 \\ 1, & a_3 \leq x_j < a_4 \end{cases} \quad (7)$$

下面开始对实验中所做的实验干扰效果进行模糊评估. 已知面阵 CCD 探测器的镜头焦距为 50.36 mm, 光圈  $F = 1.2$ , 探测器镜头到 CCD 焦面的透光率为  $\tau$ , 用波长 632.8 nm 的 HeNe 激光经调制作为干扰源. 脉冲激光入射能量为  $E$ , 靶面激光能量密度为  $e$ , SONY EXVIEW HAD 型面阵 CCD 光电探测器作为被干扰对象, CCD 探测器场频 50 Hz, 激光光源与 CCD 探测器相距 10 m, 脉冲激光能量密度为:

$$e = \frac{E_\tau}{\pi r^2} \quad (8)$$

式中,  $r$  为光斑的半径. 实验中所采用的脉冲激光能量为  $1 \times 10^{-3}$  J, 根据实验所建立的评估模型式(1)到式(4), 可得到  $E_r = (r_c - r_b)/2r_2 = 1$ ;  $E_n = 0.8$ ;  $E_a$  取 0.8;  $E_s$  取 0.6, 各项评估指标  $x$  为  $[1, 0.8, 0.5, 0.6]$ ; 将其分别代入梯形隶属函数式(5)~式(7)后计算得到模糊矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.6 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0.4 \end{bmatrix} \quad (9)$$

(5) 模糊评估

考虑加权权重系数, 因此各指标集的模糊评判矩阵为:

$$B = W \cdot R$$

$$= \{0.2 \ 0.5 \ 0.15 \ 0.15\} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.6 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0.4 \end{bmatrix}$$

$$= [0.15 \ 0.15 \ 0.8 \ 0.51]$$

$\max B = 0.8$ , 由最大隶属度原则<sup>[9]</sup>知, 脉冲激光干扰的模糊综合评价结果为  $\nu_3$ , 即代表实现对探测器靶面饱和.

4 结束语

从评估的结论可以看出, 通过模糊评估得到的干扰效果结论与实验结果一致. 验证了模糊评估方法作为激光干扰评估方法的合理性, 减少了激光干扰评价主观性. 同时该方法也可用来对比在不同环境下干扰探测器之类设备的干扰效果, 给作战人员提供参考.

## 参考文献:

- [1] Zhang Hongyan, Li Yanjun, Zhang Ke, et al. Current situation and development trend of the laser anti-jamming technology[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(1): 14 - 17. (in Chinese)  
张鸿雁, 李言俊, 张科, 等. 激光干扰技术的现状与发展趋势[J]. 激光与红外, 2007, 37(1): 14 - 17.
- [2] Lei Wei, Wang Haiyan, Niu Chong. Study on CCD detector's saturation irradiated by pulsed laser[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(9): 65 - 68, 73. (in Chinese)  
雷威, 王海晏, 牛翀. 脉冲激光辐照 CCD 探测器饱和阈值分析[J]. 电光与控制, 2010, 17(9): 65 - 68, 73.
- [3] Xie Jiping, Liu Chengping. Fuzzy mathematics and its application[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2008. (in Chinese)  
谢季平, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2008.
- [4] Xu Jie, Zhao Shanghong, Zhan Shengbao, et al. The analysis of damage factors and their causes in laser induced detector damage[J]. Laser Journal, 2006, 27(5): 43 - 44. (in Chinese)  
胥杰, 赵尚弘, 占生宝, 等. 光电探测器激光损伤因素及其成因分析[J]. 激光杂志, 2006, 27(5): 43 - 44.
- [5] M Reiching, et al. Nanosecond UV laser damage and ablation from fluoride crystals polished by different techniques[J]. Applied Physics A, 1999, 138(4): 154 - 158.
- [6] Jiang Nan, Zhang Chu, Niu Yanxiong, et al. Numerical simulation of pulsed laser induced damage on CCD arrays[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(10): 1004 - 1007. (in Chinese)  
姜楠, 张雏, 牛燕雄, 等. 脉冲激光辐照 CCD 探测器的硬破坏效应数值模拟研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(10): 1004 - 1007.
- [7] Wang Guoyu, Wang Liandong. Radar electronic warfare systems simulation and assessment of mathematics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004. (in Chinese)  
王国玉, 汪连栋. 雷达电子战系统数学仿真与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [8] Chen Jian, Wang Zhiqiang, Li Zhongming, et al. Determination of missile equipment's weight value by improved AHP[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(1): 391 - 393. (in Chinese)  
陈建, 王志强, 李忠名, 等. 基于改进 AHP 法计算导弹装备权重[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(1): 391 - 393.
- [9] Qu Junfeng, Zhang Linfeng, Wang Haijun, et al. A research of maximum membership degree in track co-relation algorithm[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(2): 1230 - 1232. (in Chinese)  
瞿军锋, 张林锋, 王海军, 等. 基于最大隶属度在航迹相关算法中的研究[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(2): 1230 - 1232.