

## 神经网络在光电干扰效能预测中的应用

郭豹, 李忠华, 杨寿佳, 张兵  
(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 郑州 450047)

**摘要:** 介绍了闭环光电对抗的发展现状。为了实现干扰效能的预测评估,通过分析激光干扰导引设备的原理及影响因素,采用BP神经网络方法建立了干扰效能预测模型,并进行了干扰试验。经过预测结果和试验结果的对比分析,验证了预测模型的准确性,为该方法在闭环光电对抗中的可行性分析提供了一定的应用研究基础。

**关键词:** 光电干扰; 神经网络; 预测模型

**中图分类号:** O436      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2015)09-0060-04

## Application of Neural Network in Forecast of Photoelectric Jamming Effect

GUO Bao, LI Zhong-hua, YANG Shou-jia, ZHANG Bing

(The 27th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China)

**Abstract:** The development status of closed-loop electro-optic countermeasure technology was introduced. In order to obtain the forecast evaluation of photoelectric jamming effectiveness, a forecast evaluation model was built up based on BP neural network by analyzing the technical principle and influence factors of laser jamming to optical seeker, and some photoelectric jamming experiments were implemented. After the comparative analysis to forecast result and experiment result, the accuracy of the prediction model was verified. The research can provide an application foundation for feasibility analysis of this method in photoelectric countermeasure.

**Key words:** photoelectric jamming; neural network; forecast evaluation model

### 0 引言

光电类精确制导武器已发展成为当代高科技局部战争中的主要作战兵器,光电对抗是通过采取相应的光电干扰手段,削弱、破坏敌方光电导引设备的作战效能,保护己方目标所采取的措施<sup>[1]</sup>。

目前多个国家正在研究或已装备了光电对抗系统,但普遍存在无法准确判断是否干扰成功,实现闭环对抗。美国于2001年5月在白沙导弹靶场对激光器“闭环”定向红外干扰系统进行了导弹实弹试验,但所谓的“闭环”,仅是一种红外威胁分类识别,然后用与此威胁对应的红外干扰调制技术实施干扰,与此类似的还有已公布的“采用高帧速红外接收器的闭环红外对抗系统”专利<sup>[2-3]</sup>及文献<sup>[4]</sup>提出的红外导引头干扰共光路闭环

系统的设计。国内外一些学者对利用“猫眼效应”实施激光主动探测进行了研究,并提出了根据来袭目标的航迹变化进行判断是否干扰成功的思路<sup>[5-9]</sup>。

本文利用BP(Back Propagation)神经网络算法所特有的分类与识别能力,依据激光干扰导引模拟设备成像单元试验,进行了干扰效能预测模型设计,对比分析了预测结果与试验结果,成功实现了较高的预测准确率,为光电对抗系统的光电干扰效能评估、闭环光电对抗研究提供了初步的工程化应用研究。

### 1 激光干扰原理分析

激光在传输过程中,主要受大气吸收、大气散射和大气湍流等因素影响<sup>[1]</sup>,到达导引设备成像单元前的干扰激光能量 $E_\lambda$ 可简化计算为

$$E_\lambda = \frac{E_0 e^{-\alpha L}}{\pi(\theta_r L/2)^2 \times 10^4} \quad (1)$$

式中: $E_0$ 为激光器的出射能量; $\alpha$ 为大气衰减系数; $\theta_r$ 为激光发散角; $L$ 为传输距离。若成像单元的干扰阈

值为  $E_1$ , 损伤阈值为  $E_2, E_1 < E_2$ , 则对导引设备的干扰效果通常分为: 1) 当  $E_k < E_1$  时, 无干扰效果出现; 2) 当  $E_1 \leq E_k < E_2$  时, 出现有效干扰或部分损伤干扰效果; 3) 当  $E_k \geq E_2$  时, 出现完全损伤干扰效果。

在实际对抗作战中, 激光干扰设备对导引设备成像单元的干扰效果不仅与激光波长、出射能量、发散角、传输距离等可直接测量的指标有关, 更与不可精确测量的大气衰减系数密不可分, 且其在激光传输光路上呈现非均匀分布特点, 因此, 激光对导引设备的干扰过程属于典型的不确定性或高度非线性的研究对象。

## 2 干扰效能预测模型

### 2.1 BP 神经网络

BP 神经网络具有较强的适应和学习功能, 可以实现逼近任意非线性系统, 因此, 采用 BP 神经网络算法来建立干扰效能预测模型。

典型的三层 BP 神经网络结构由输入层、隐含层、输出层神经元组成。神经网络的输入向量  $X = (x_0, x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  由干扰试验中的多个特征参数组成; 隐含层神经元的输出向量  $Y = (y_0, y_1, y_2, \dots, y_m)^T$  同时作为输出层神经元的输入向量; 神经网络的输出向量  $O = (o_0, o_1, o_2, \dots, o_p)^T$  由干扰效果决定。  $V = (v_0, \dots, v_m)^T, W = (w_0, \dots, w_l)^T$ , 分别为神经网络输入层至隐含层、隐含层至输出层的权值。

单个神经元数学模型为

$$O_j = f\left(\sum_{i=1}^n x_i * w_{ij} - \theta\right) \quad (2)$$

式中:  $x_i$  表示神经元  $j$  接收到的来自第  $i$  个神经元的输入信息;  $w_{ij}$  表示从神经元  $i$  到神经元  $j$  之间的权值;  $\theta$  为第  $j$  个神经元的输出阈值。

s 型函数的输入和输出范围是 0 ~ 1, 符合各参数指标的取值范围, 因此选用 s 型函数作为 BP 神经网络的激活函数, 即

$$f(u) = \frac{1}{1 + e^{-u}} \quad (3)$$

隐含层神经元个数  $m$  确定为

$$m = \sqrt{n + p} + \alpha \quad \alpha \in (1, 10) \quad (4)$$

式中:  $n$  为输入层神经元数;  $p$  为输出层神经元数。

在确定好输入层、隐含层、输出层及激活函数后, 开始对神经网络进行训练。其训练过程、计算步骤如下所述。

- 1) 设定神经网络的输入层、隐含层、输出层神经元个数, 确定网络结构。
- 2) 设置网络训练误差指标  $\varepsilon$  和学习率  $\eta$ 。
- 3) 对网络的权值和阈值使用随机数进行赋值。

4) 依据样本数据进行网络训练, 逐次计算网络各层神经元的输出值。

5) 统计并判断期望输出与实际输出的误差值  $E$  是否满足设定要求, 若满足则转至步骤 7), 不满足则转至步骤 6)。

6) 计算权值修正量, 并修正权值。对于隐含层和输出层之间的权值

$$w_{jk}(s+1) = w_{jk}(s) + \eta \delta_k y_j, \quad j \in (0, m), k \in (0, p), \quad (5)$$

对于输入层和隐含层之间的权值

$$v_{ij}(s+1) = v_{ij}(s) + \eta \delta_j x_i, \quad i \in (0, n), j \in (0, m), \quad (6)$$

式中:  $\delta_k$  称为第  $k$  个神经元的敏感度;  $\eta$  为调整因子。

7) 判断网络训练是否达到最大学习次数, 若是则终止学习; 否则转至步骤 3) 继续。

把从试验过程中获取的试验样本及对应于干扰效果量化值输入到 BP 神经网络中, 经过一系列的运算, 当满足计算结果与期望结果的误差条件时, 完成 BP 神经的训练过程, 实现干扰效能预测模型的建立。

### 2.2 归一化算法

数据归一化是将各个非关联的特征数据进行综合处理, 统一到 [0 1] 区间。归一化后的数据对神经网络的学习速度、训练精度及训练过程的成功与否有至关重要的影响。

由于本文中的试验数据涉及多种量纲, 且不同特征参量之间缺少联系, 采用常规的最值法、和值法、峰值法等算法易造成归一化程度不够、网络收敛较慢的问题。针对本文数据特点, 采用联合归一化法<sup>[10]</sup>, 分别对样本空间中同一量纲的特征向量按峰值法进行归一化后, 再对不同量纲特征向量按最值法进行归一化处理。

## 3 干扰试验与效果验证

### 3.1 干扰试验

干扰试验组成如图 1 所示, 该试验由激光器、衰减片组、光电导引设备成像单元(与电视制导模拟导引头相同)、便携式计算机组成。

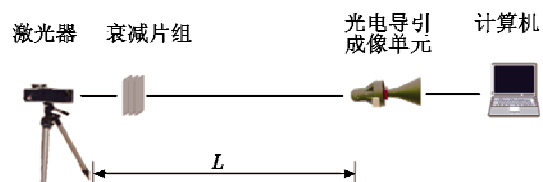


图 1 干扰试验组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the photoelectric jamming experiment

试验过程中, 采用衰减片组的方式模拟不同大气传输条件, 以期缩短试验时间, 获得近似相同天气情况下的试验数据, 尽可能增加效能预测模型的准确性。通过

改变激光器参数及不同的衰减倍率和试验距离,获得不同的试验结果,利用便携式计算机对试验过程、试验数据及结果进行记录分析。

### 3.2 效果验证

试验中涉及的试验设备参数及试验条件包括激光波长(1.064  $\mu\text{m}$ , 0.532  $\mu\text{m}$ ),激光能量( $\leq 120$  mJ),频率(1~10 Hz),衰减倍率(0~25 dB)和试验距离(0.5~3 km)。依据激光对光电制成像单元的干扰程度,即激光对成像单元的毁伤程度、可恢复性,将干扰试验结果量化为有效干扰(1 0 0)、部分损伤(0 1 0)、完全损伤(0 0 1)3种。

选取试验中15组数据,对其中12组训练样本数据进行归一化处理后的数据如表1所示。

表1 训练样本数据

Table 1 Training sample data

样本序号	特征向量					干扰效果		
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$o_0$	$o_1$	$o_2$
1	0.2380	0.8119	1.0000	0.0783	0.0235	0	0	1
2	0.2380	0.8119	1.0000	0.1101	0.0235	0	1	0
3	0.2380	0.8119	1.0000	0.1527	0.0235	1	0	0
4	0.2380	0.8119	1.0000	0.3053	0.0235	1	0	0
5	0.1190	0.2030	0.1000	0.2290	0.0235	0	0	1
6	0.1190	0.2030	0.1000	0.2748	0.0235	0	1	0
7	0.1190	0.2030	0.1000	0.3053	0.0235	0	1	0
8	0.1190	0.2030	1.0000	0.3817	0.0235	1	0	0
9	0.1190	0.2030	1.0000	0.0496	0.0470	0	0	1
10	0.1190	0.2030	1.0000	0.0783	0.0470	0	1	0
11	0.1190	0.2030	1.0000	0.0250	0.0941	1	0	0
12	0.1190	0.2030	1.0000	0.0000	0.1411	1	0	0

根据试验条件,干扰效能预测模型采用5-5-3网络结构,即输入层神经元个数为5,隐含层的神经元个数按试凑法取5,输出层神经元个数为3。训练目标误差设定为 $10^{-4}$ ,训练总步长设定为2000。网络训练曲线如图2所示,可以看出,在训练步长达到500次时即达到了设定目标误差。

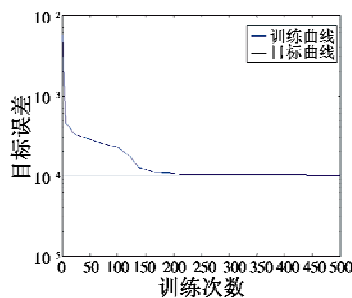


图2 BP神经网络训练曲线

Fig. 2 BP neural network training

利用训练完成的干扰效能预测模型,对样本数据进行仿真运算,其结果如表2所示,通过与表1干扰效果对比可以看出,仿真结果与实际试验结果较为一致。

表2 训练样本仿真结果

Table 2 Simulation results of the training sample data

样本序号	仿真结果			样本序号	仿真结果		
1	0.0035	0.1317	0.8658	7	0.0003	0.9958	0.0236
2	0.0103	0.7221	0.1286	8	0.9996	0.0417	0.0001
3	0.9315	0.1967	0.0018	9	0.0534	0.0819	0.6342
4	1.0000	0.0064	0.0000	10	0.0057	0.9195	0.1013
5	0.0090	0.0172	0.9160	11	0.9163	0.0088	0.2051
6	0.0004	0.9651	0.1146	12	0.9787	0.0125	0.0583

利用余下的3组测试数据进行仿真测试,结果如表3所示。

表3 测试样本及仿真结果

Table 3 Simulation results of the test sample data

样本序号	测试样本数据					仿真结果		
13	0.1190	0.2030	1.0000	0.0250	0.0942	0.9701	0.0127	0.2336
14	0.1190	0.2030	1.0000	0.0496	0.0942	0.8537	0.0312	0.1124
15	0.1190	0.2030	1.0000	0.0783	0.0942	0.6953	0.4406	0.0113

从表3中可以看出,仿真结果均达到了有效干扰的程度,与之对应的是,实际试验过程中,此3组数据的获取仅是在改变不同衰减倍率的情况下获得的,且均为有效干扰,若以训练样本4中所获得的有效干扰效果为基准,与3组测试样本数据的干扰图像对比,如图3所示。

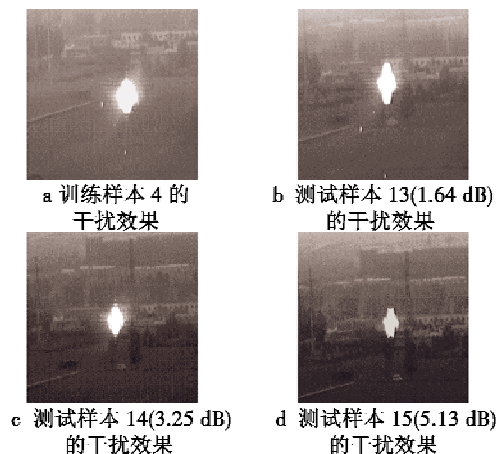


图3 改变衰减倍率条件下的试验结果

Fig. 3 Results under different attenuation coefficients

通过表3和图3可知,相对于训练样本4中的干扰效果,在1.64 dB,3.25 dB,5.13 dB衰减倍率情况下,根据干扰效能预测模型所得到的有效干扰程度分别为0.9701,0.8537,0.6953,同时通过对比干扰亮斑发现,随着衰减倍率的增加,干扰亮斑面积分别为其95.5%,80.7%,66.3%,与预测结果相对应,由此进一步说明了该模型具有较高的预测准确率。

## 4 总结

本文设计并实现了光电干扰效能预测模型,预测

结果与试验结果的对比分析表明,该模型可以进行光电干扰效能预测,即可将神经网络算法应用于光电闭环对抗技术中。

但本文试验方案中存在一定的缺陷,如采用衰减片无法完全模拟所有大气传输条件的问题,以及试验对象单一、试验数据量小、未对无效干扰情况进行分析等缺点。因此,在下一步的研究中,需要对多种光电导引设备成像单元进行大量的试验数据采集,以建立不同的预测模型,实现干扰效能的预评估,并结合激光主动探测技术,完成工程化条件下的闭环光电对抗技术应用研究。

### 参考文献

- [1] 叶盛祥. 光电干扰防护系统技术[M]. 北京:国防工业出版社,2005:160-203. (YE S X. Technology of protection system by photoelectric interference[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005:160-203.)
- [2] 洛克希德·马丁空间系统公司. 采用高帧速红外接收器的闭环红外对抗系统:美国,6369885[P]. 2002-04-09. (Lockheed Martin Space Systems Company. Closed-loop infrared countermeasure system using high frame rate infrared receiver; US, 6369885[P]. 2002-04-09.)
- [3] 柯边. 对抗红外制导导弹的激光器基闭环红外干扰系统[J]. 航天电子对抗,2001(5):21. (KE B. Closed-loop infrared countermeasure system using laser for confronting infrared guided missile [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2001(5):21.)
- [4] 苗用新,张堃,郭劲. 机载定向对抗共光路闭环系统设计[J]. 光机电信息,2008,25(6):45-49. (MIAO Y X, ZHANG K, GUO J. Design of the common path closed loop equipment of the airborne directed countermeasure system[J]. OME Information, 2008, 25(6):45-49.)
- [5] RABINOVICH W S, MAHON R, GOETZ P G, et al. A cat's eye multiple quantum well modulating retro-reflector[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(3):461-463.
- [6] 赵勋杰,高稚允,张英远. 基于“猫眼”效应的激光侦察技术及其在军事上的应用[J]. 光学技术,2003,29(4):415-417. (ZHAO X J, GAO Z Y, ZHANG Y Y. Technique of active laser reconnaissance and the applications in the military[J]. Optical Technique, 2003, 29(4):415-417.)
- [7] MIEREMET A L, SCHLEIJPEN R M A, POUCHELLE P N. Modeling the detection of optical sights using retro-reflection[C]//SPIE, 2008, 6950:280-286.
- [8] 赵延仲,孙华燕,宋丰华,等. 猫眼效应用于激光主动探测技术的研究现状与发展趋势[J]. 激光与光电子学进展,2010,47(10):102802-1-202802-10. (ZHAO Y Z, SUN H Y, SONG F H, et al. Research and prospect of cat-eye effect used for active laser detection technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(10):102802-1-202802-10.)
- [9] 孙华燕,赵延仲,郑勇辉. 基于猫眼效应的激光主动探测技术研究与应用[J]. 装备学院学报,2012,23(6):6-13. (SUN H Y, ZHAO Y Z, ZHENG Y H. Research and application of active laser detection technique based on cat-eye effect [J]. Journal of Academy of Equipment, 2012, 23(6):6-13.)
- [10] 柳小桐. BP神经网络输入层数据归一化研究[J]. 机械工程及自动化,2010(3):122-123,126. (LIU X T. Study on data normalization in BP neural network[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2010(3):122-123, 126.)
- [11] 周洪波,裴海龙,贺跃帮,等. 状态受限的小型无人直升机轨迹跟踪控制[J]. 控制理论与应用,2012,29(6):778-784. (ZHOU H B, PEI H L, HE Y B, et al. Trajectory tracking control for small unmanned helicopter with state constraints [J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(6):778-784.)
- [12] BESNARD L, SHITESSEL Y B, LANDRUM B. Control of a quadrotor vehicle using sliding mode disturbance observer[C]//Proceedings of the American Control Conference, New York City, USA, 2007:5230-5235.
- [13] 曾宪法,王洁瑶,王小虎,等. 基于SMDO的滑模控制器设计及其在导弹上的应用[J]. 航空学报,2011,35(5):873-880. (ZENG X F, WANG J Y, WANG X H, et al. Design of sliding mode controller based on SMDO and its application to missiles control [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 35(5):873-880.)

(上接第41页)

37(4):43-47.)