

高重频激光对激光导引头的干扰机理实验研究

王云萍^{1,2}, 张海洋¹, 郑星元¹, 冯爽¹, 赵长明¹

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081; 2. 北京跟踪与通信技术研究, 北京 100094)

摘要: 研究高重频激光对半主动激光制导导引头的干扰效果与导引头的信息处理能力和干扰信号样式的关系. 设计了一套激光半主动制导对抗半实物仿真系统, 从信号级研究了导引头的工作原理并设计了多种抗干扰算法进行信号处理, 提供了干扰效果评估方案. 分析了导引头在搜索阶段高重频激光对导引头编码识别过程的影响, 以及导引头在跟踪阶段高重频激光的干扰频率、能量、位置和干扰时机对导引头不同抗干扰措施条件下的干扰效果. 实验结果表明, 干扰脉冲的能量越大, 干扰源与目标的夹角越大, 干扰效果越明显; 提高干扰激光脉冲的频率会提高干扰成功的概率, 缩小导引头的时间波门的宽度会增强导引头的抗干扰能力.

关键词: 高重频激光; 激光导引头; 干扰机理; 干扰效果

中图分类号: TN 97 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0645(2014)08-0858-06

The Experimental Research of the Jamming Effect of High-Repetition-Laser for Laser Seeker

WANG Yun-ping^{1,2}, ZHANG Hai-yang¹, ZHENG Xing-yuan¹,
FENG Shuang¹, ZHAO Chang-ming¹

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: This paper is devoted to the relationship between the jamming effect of high-repetition-laser for semi-active laser guidance seeker and the capacity of seeker information processing and the style of the jamming signal. In this paper a set of semi-active laser guidance countermeasure of semi-physical simulation system was designed. The principle of the seeker was investigated from the signal level, and a variety of anti-jamming algorithm for signal processing was designed, and assessment scheme of jamming effect was provided. In the seeker search stage lays emphasis on the research of the influence of high-repetition-rate laser for seeker coding identification process. In the seeker tracking stage, the interference effect of different anti-interference measures was studied, such as the interference frequency, energy, position and interference time. The experimental results show that, the interference pulse energy is larger, interference source and target angle is larger and interference effect is more obvious. Improving the frequency of interference laser pulse will increase the probability of success of the interference, and reducing the width of the time window of seeker will enhance seeker anti-interference ability. A signal jamming effect evaluation scheme is provided to offer a full set of experimental platform and theory foundation for the through discussion of laser semi-active guidance interference.

Key words: high-repetition-rate laser; laser seeker; jamming; jamming effect

高重频激光干扰因具有下述优点而备受关注:设备结构简单,体积小,无需对敌方激光脉冲信号进行编码识别和复制就能使干扰信号进入敌方导引头的信号处理系统,具有较强的对抗主动性和适应能力^[1-4]。针对不同编码体制的制导方式、干扰时机和不同的战术应用条件,高重频激光对激光导引头的干扰效果表现形式不同,其不确定性与较多因素有关^[5-7]。文献大多在理论上从时域分析了高重频激光脉冲对导引头信息处理过程的影响,或者在外场开展了对导引头系统的干扰试验,获得了一些干扰效果的试验数据,但多为定性或基于干扰现象的分析和推断。本文搭建信号级干扰机理实验研究平台,基于 4 象限探测器 4 路输出信号,设计不同抗干扰算法,研究不同干扰条件和抗干扰算法对干扰效果的影响,以获得影响干扰效果的系列因素,为光电对抗干扰效果评估和导引头设计等提供参考。

1 实验设备组成

实验设备主要包括:高重频激光干扰信号源、激光导引头、激光目标指示器、漫反射板(目标),计算机控制设备、激光信号测量设备、转台、衰减片等,实验设备布局如图 1 所示。各实验设备的主要性能参数如下。

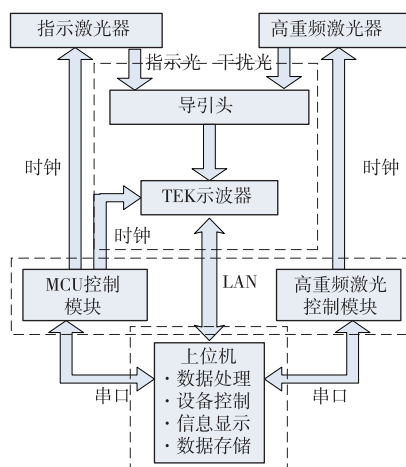


图 1 实验系统接口关系

Fig. 1 The relations of system interface

① 高重频激光干扰信号源为 $1.064\ \mu\text{m}$ 高重频激光器,由 RS232 串口控制,通过输入字符串可以控制其输出频率和输出能量,脉冲频率可为 100 kHz 和 200 kHz,平均功率范围 $1.5\sim 5.0\ \text{W}$,可以由 4 个电流档位调节控制;

② 激光目标指示器为 $1.064\ \mu\text{m}$ 脉冲激光器,

输出能量由自身电压控制,频率和编码^[8]可以选择内部或外部时钟电路触发控制;

③ 激光导引头供电电压为 $\pm 12\ \text{V}$,偏压为 $-30\ \text{V}$ ^[3],可以直接输出 4 象限探测器的 4 路电信号,有使能端可以控制其工作状态;

④ 导引头 4 象限探测器输出信号的采集由 TEK-TDS5014B 示波器完成,示波器可以同时显示 4 路信号并以数组形式传输到仿真系统进行处理;

系统控制与信号处理由基于 Labview 仿真系统完成,实验系统接口关系见图 1。

2 系统功能与实现

2.1 控制模块

① 2 台激光器的控制。

控制目标指示激光器,需要输出一定频率的脉冲激光,且由外部时钟上升沿有效,所以选择通过上位机对单片机的控制来输出 TTL 电平。在系统中,由上位机主动向 MCU 发送数据,类型为字符串,MCU 处于输出 TTL 电平状态,窗口数据读取设为中断,当上位机向 MCU 发送数据后,MCU 响应中断,识别串口传输信号。设定固有的频率和触发方式,根据要求输出相应的频率 TTL 电平,进而驱动激光器发射一定频率的脉冲激光。

对于高重频干扰激光器,响应方式为字符串。当上位机向激光器传输一定字符串时,激光器驱动根据字符串内容相应输出一定要求的激光。控制命令包括激光器的输出功率和频率。

系统可以根据高重频激光器工作与目标指示激光器工作的延迟时间要求对它们进行时间补偿,控制开机时序,使之达到要求。

② 示波器的控制和导引头时间波门的实现。

实验中,探测器一直处于工作状态,选择示波器触发作为时间波门^[9]的触发,扫描一帧的数据作为波门宽度内数据,将示波器采集一帧数据的时间定为 $10\ \mu\text{s}$,数据采集触发使用外部时钟触发,通过调整延时来使目标指示激光信号进入时间波门,使之位于中心位置,相当于对激光信号进行波门录取。上位机采集示波器信号,提取每个波门内的信号,选取其中的某一数据作为信号量,进行运算并显示结果。

2.2 信号处理与显示模块

由时钟触发激光目标指示器工作,照射在漫反射板上的目标光斑被导引头接收,同时该时钟同步

触发示波器接收指示脉冲信号,将示波器作为高速采集卡,调整示波器延迟时间,在一个波门内显示一个指示激光脉冲.开启上位机,在Labview环境中通过LAN接口和TEK-TDS5014B示波器相连接,读取缓冲区内容得到示波器的4个通道的波形,根据所要求的算法进行运算,根据系统实时计算出的光斑位置,记录测试数据.

激光脉冲信号通过导引头光学系统在4象限探测器形成4路电信号,由于激光能量在目标偏移光轴时,在4象限上分布不等,经运算后可得出目标位置偏差的大小.4路电信号由示波器采集并以数组形式传输到基于Labview的仿真系统内,通过一定的运算方法确定出指示信号的位置信息.实验所采用的定向方法是和差电路的形式,用和差电路法^[10]确定光斑中心位置(X,Y)公式为

$$\begin{cases} X = K \frac{V_A + V_D - V_B - V_C}{V_A + V_B + V_C + V_D}, \\ Y = K \frac{V_A + V_B - V_C - V_D}{V_A + V_B + V_C + V_D}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_A, V_B, V_C, V_D 为电信号的幅值; K 值与系统设计有关,为恒定值.

2.3 导引头工作模式控制

将导引头工作状态分为搜索模式和跟踪模式,实验时分别针对这两种情况下的干扰机理进行研究.

① 搜索模式.

导引头在末制导初期,启用搜索模式,此时主要的工作为搜索指示目标信号并对信号进行码型处理匹配,所以在搜索阶段主要研究高重频激光对导引头编码识别过程的影响.利用单片机对目标指示激光进行编码.系统采用脉冲间隔编码,且间隔周期固定.判别码型时,采用对采样点有效点间隔实现.

② 跟踪模式.

当导引头经过搜索阶段确认攻击目标后,即进入跟踪模式阶段,此阶段主要实现目标信号的采集和实时校正跟踪误差.对信号识别处理方式分为两种进行研究:脉冲能量峰值检测和首脉冲锁定.峰值检测是指在时间波门内选取探测信号的最大值作为信号数据进行运算.首脉冲锁定检测指选择时间波门中的第一个脉冲的信息作为目标指示信息进行计算.

3 实验及结果分析

3.1 实验前的测试准备工作

在进行实验前,首先测试了目标指示激光脉冲宽度与高重频激光脉冲宽度,以及导引头探测器的脉冲响应宽度,分别为:指示激光脉冲宽度20~25 ns,探测器响应脉宽为1.3 μ s;高重频激光干扰脉冲宽度为5~10 ns,探测器响应后展宽至0.5 μ s.

3.2 导引头搜索阶段的干扰效果

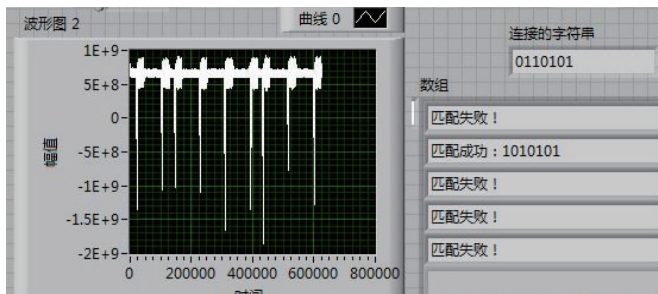
实验中指示激光编码采用7位脉冲间隔编码.编码识别时,首先确定第1个和第2个脉冲的时间间隔,然后根据此间隔去判断编码类型.对目标指示激光共设置了5种码型,实验中对编码的识别情况如表1和图2~图4所示.编码识别实验结果表明:当加入高重频激光干扰时,编码识别结果取决于能量阈值,当阈值设置得较高时,能够正确判断判断码型,否则会造成误判或者根本识别不出结果.

表1 编码识别实验结果

Tab. 1 The experiment results of code identification			
预置码型	无干扰时识别的码型	高阈值干扰时识别的码型	低阈值干扰时识别的码型
1111111	1111111/正确	1111111/正确	1111111/错误
1110111	1110111/正确	1110111/正确	1111111/错误
1101110	1101110/正确	1101110/正确	1111111/错误
1100110	1100110/正确	1100110/正确	1111111/错误
1101010	1101010/正确	1101010/正确	1111111/错误



(a) 1101010编码波形图



(b) 无干扰匹配结果

图2 编码波形及识别结果

Fig. 2 The coding waveform and the identification results

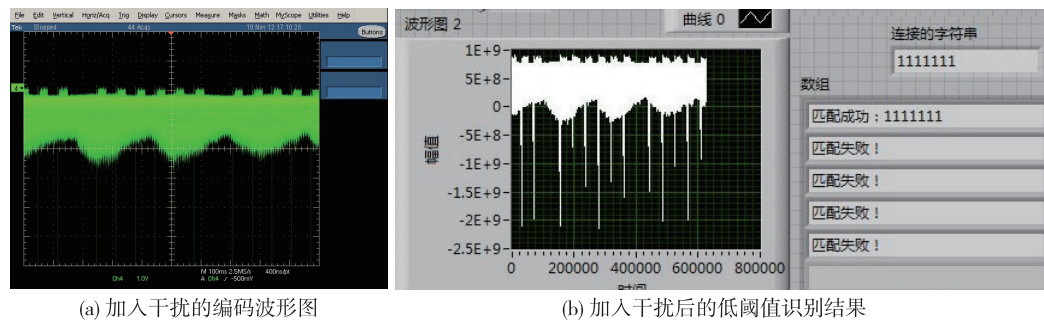


图 3 加入干扰的编码波形图与低阈值识别

Fig. 3 The coding waveform diagram after interference (left) and the result of low threshold discriminate

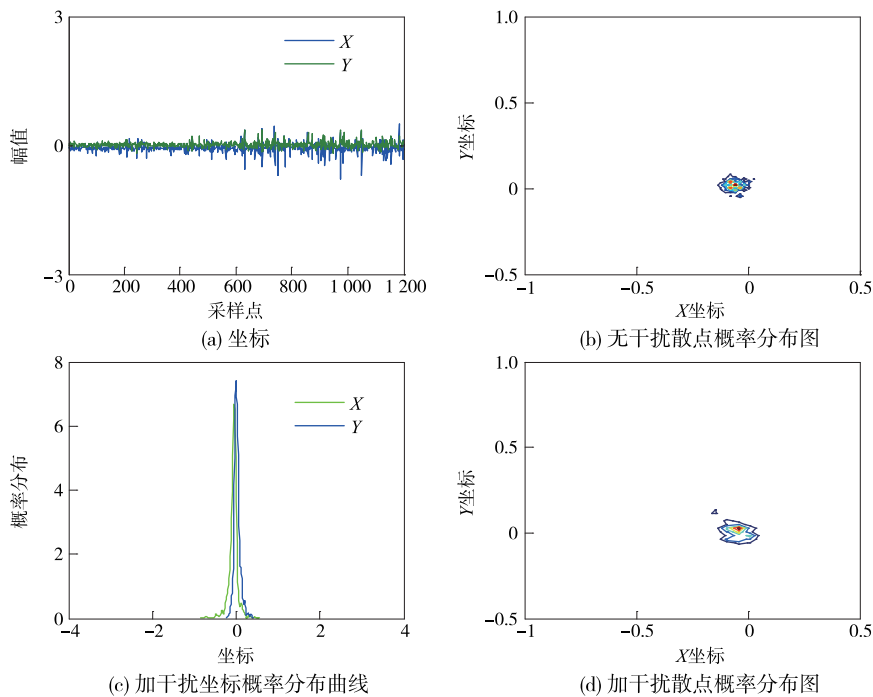


图 4 200 kHz/2 A 的实验结果

Fig. 4 The result of 200 kHz/2 A

3.3 导引头跟踪阶段的干扰效果

3.3.1 峰值检测条件下的干扰效果

实验中根据不同的干扰源位置和干扰光能量进行了分组实验,实验结果如表 2 和图 4 所示。

表 2 不同干扰能量与干扰位置对应的干扰有效概率

Tab. 2 Different interference energy and interference position corresponding interference effective probability

干扰与目标 夹角/(°)	干扰有效概率/%					
	1.59 W	2.83 W	4.2 W	4.82 W	1.66 W	4.22 W
0.2	20.80	28.79	36.44	46.26	24.96	46.26
0.4	21.96	29.45	37.27	49.92	34.11	59.57
0.6	22.80	30.45	39.43	65.89	38.77	60.23
0.8	25.12	37.77	50.92	91.51	39.77	62.90
1.0	27.79	35.61	76.87	89.18	40.77	81.36

图 4(a)前一阶段为未加干扰时指示光的位置坐标曲线(基本分布在坐标原点),后一阶段为加上

不同干扰时,其坐标位置的变化。从图 4 中可以看出,未加干扰时其坐标分布比较稳定,集中分布在原点附近。当加上干扰时,由于干扰的存在,激光的位置分布曲线稳定性下降,出现波动。图 4(c)可以看出,加上干扰时,坐标概率密度发生变化。比较图 4(b)和图 4(d)可以看出加上干扰后其概率分布范围变大,并且向干扰源方向漂移。当干扰源能量越大或者干扰源与视场中心轴夹角越大,其干扰越明显,此时,图 4(a)后段波动越大,图 4(c)概率密度分布越不集中,图 4(d)密度集中点越向干扰点位置漂移。

将实验数据统一绘制比较如图 5,图 6 所示,对于导引头采用脉冲能量峰值检测时的干扰效果实验,可以得出下述结论。

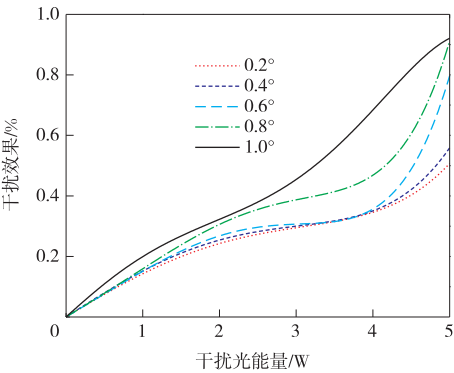


图 5 干扰效果与干扰源能量和位置的关系

Fig. 5 The relationship between the interference effect and the energy and position

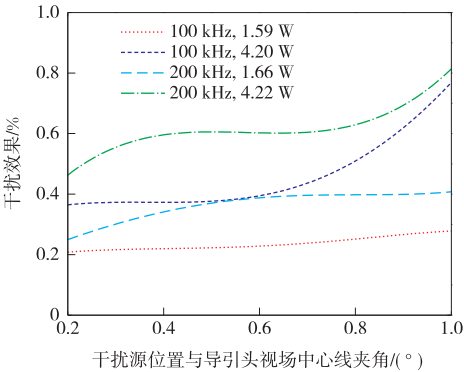
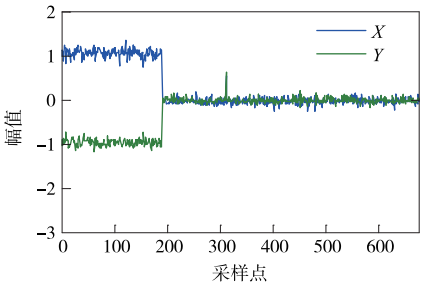


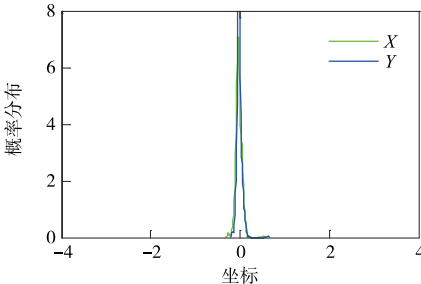
图 6 干扰效果与干扰源位置和频率关系

Fig. 6 The relationship between the interference effect and the position and frequency

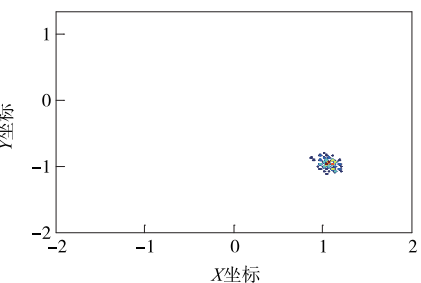
① 当干扰频率和干扰源位置恒定时, 干扰光能



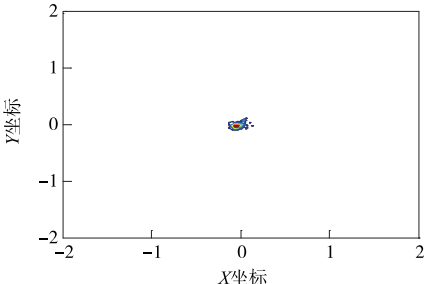
(a) 坐标



(c) 加干扰坐标概率分布曲线



(b) 无干扰散点概率分布图



(d) 加干扰散点概率分布图

图 7 200 kHz, 40 μ s 波门的干扰效果

Fig. 7 The interference effect of 200 kHz laser and 40 μ s wave door

量越强, 探测器响应偏差信息越大, 干扰效果越明显.

② 当干扰频率和干扰源能量恒定时, 干扰源和视场中心轴(目标)的夹角越大, 干扰效果越明显.

③ 对于同一干扰位置, 增大干扰能量或者提高干扰脉冲频率都会增强干扰效果, 但是能量是主要影响因素, 其作用明显高于频率的作用.

3.3.2 首脉冲检测条件下的干扰效果

在脉冲能量不变的条件下, 实验中测试不同波门宽度和不同干扰光频率对干扰效果的影响, 实验结果如表 3 所示.

表 3 首脉冲锁定干扰效果

Tab. 3 The interference effect of first pulse locking

干扰频率/kHz	干扰效果/%	
	10 μ s	40 μ s
100	75	100
200	100	100

实验结果表明, 提高干扰激光脉冲的频率会提高干扰成功的概率, 缩小导引头时间波门的宽度会增强导引头的抗干扰能力. 对于 10 μ s 波门、100 kHz 干扰光的情况, 输出信号在指示光和干扰光之间波动, 干扰成功概率达到 75%. 对于 10 μ s 波门、200 kHz 干扰光和 40 μ s 波门的情况, 因为干扰光几乎始终会出现在指示光的前面, 其干扰成功概率达到 100%. 其中, 40 μ s 波门和 200 kHz 条件下的干扰效果如图 7 所示.

4 结 论

基于自主设计的高重频激光对激光导引头干扰机理实验研究平台,以半主动激光制导系统所用的4象限探测器为干扰对象,从信号级研究了不同条件下高重频激光对激光导引头信号处理过程的影响。大量的实验证实高重频激光是一种有效的对抗半主动激光制导武器的对抗方式,其干扰效果与导引头信息处理部分的抗干扰措施,以及干扰信号的样式和干扰方式的运用密切相关。在导引头搜索阶段,高重频激光脉冲主要影响导引头编码的识别。在导引头跟踪阶段,高重频激光的干扰频率、能量、入射角度都会影响最终的干扰效果。

文中的实验系统是基于实验室条件下研制的,注重于时域信号的模拟而忽略了一些子系统的真实功能模拟,如导引头自动增益控制,实时波门控制等,需要进一步完善。同时,也应对系统采用的算法进行更深入的研究,以形成更为完整的实验能力。

参考文献:

- [1] 曾钦勇,龚赤坤,苏心智,等. GJB6452-2008-高重频激光干扰机规范[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部,2008.
Zheng Qinyong, Gong Chikun, Su Xinzhi, et al. GJB6452-2008 Standard of high repetition rate laser jammer [S]. Beijing: Publishing Department of COSTIND, 2008. (in Chinese)
- [2] 童忠诚. 激光有源干扰信号的发射方式研究[J]. 光电技术应用,2006(6):1-3.
Tong Zhongcheng. Research on laser transmitting technology for laser active jamming[J]. Electro-Optic Technology Application, 2006(6):1-3. (in Chinese)
- [3] 柴宏亮,孙晓泉. 高重频激光干扰参数分析[J]. 光电子技术与信息,2005,18(6):26-28.
Chai Hongliang, Sun Xiaoquan. Parameter analysis of high-repetition-frequency laser interference [J]. Optoelectronic Technology and Information, 2005, 18 (6):26-28. (in Chinese)
- [4] 何衡湘,陈亦庆,赵刚. 激光导引系统主要技术参数分析[J]. 红外与激光工程,2009,38(3):428-432.
He Hengxiang, Chen Yiqing, Zhao Gang. Analysis of the main parameters of the laser guided system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009,38(3):428-432. (in Chinese)
- [5] 谢小川. 高重频激光对激光导引头干扰性能的研究[J]. 航天电子对抗,2005(5):23-25.
Xie Xiaochuan. Performance of high-repetition-rate laser jamming laser seeker [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2005(5):23-25. (in Chinese)
- [6] 车进喜,薛建国,陈勇. 高重频激光对半主动激光制导武器干扰机理分析及实施方法探讨[J]. 光电技术应用,2006(6):29-33.
Che Jinxi, Xue Jianguo, Chen Yong. Analysis of jamming principle and discussion of implement means of HRP laser against semi-active laser-guided weapon[J]. Electro-Optic Technology Application, 2006(6):29-33. (in Chinese)
- [7] 徐代升,王建宇. 高重频激光压制干扰与激光制导系统相互作用效应研究[J]. 量子电子学报,2006,23(2):209-211.
Xu Daisheng, Wang Jianyu. Interactional effect between a suppressive laser jammer with high frequency and a laser guidance system[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006,23(2):209-211. (in Chinese)
- [8] 安化海,闫秀生,郑荣山. 激光制导信号的编码分析及识别处理技术[J]. 光电对抗与无源干扰,1996(3):26-30.
An Huahai, Yan Xiusheng, Zheng Rongshan. Analysis of laser-guided signal code and recognition processing technology [J]. Electro-Optics & Passive Countermeasures, 1996(3):26-30. (in Chinese)
- [9] 许鹏程,孙晓泉. 高重频激光对实时波门选通信号干扰的分析[J]. 光电技术应用,2005(1):21-23.
Xu Pengcheng, Sun Xiaoquan. Analysis of high repetition frequency laser interference with real time gate signal[J]. Electro-Optic Technology Application, 2005,20(1):21-23. (in Chinese)
- [10] 冯龙龄. 浅谈四象限光电探测器系统中信号处理的技巧[J]. 光学技术,1995,21(3):12-17.
Feng Longling. Simple analysis of signal-processing skill for four-quadrant opto-electronic detective system [J]. Optical Technology, 1995,21(3):12-17. (in Chinese)

(责任编辑:李兵)