

## 高重频激光干扰制导武器建模与仿真评估研究

张 帅,刘志国,王仕成,赵 乾

(火箭军工程大学,陕西 西安 710025)

**摘 要:** 为有效评估高重频对抗制导武器的效果,研究干扰频率、波门宽度、编码方式和干扰时机等因素对激光高重频干扰效果的影响,首先,通过深入分析导引头抗干扰关键技术和高重频干扰机理,建立了码型识别模型、波门设置模型和高重频干扰模型;而后,设计了弹道仿真流程,基于过重力补偿比例制导导弹弹道仿真平台,评估了不同影响因素对高重频干扰效果的影响。仿真结果表明:干扰频率和波门宽度对高重频干扰效果的影响较大,频率越高、波门宽度越大干扰效果越好;LFSR 状态码对高重频干扰的抗干扰性能比二间隔码好;且在干扰频率达到 100 kHz 时,高重频对波门宽度为 20  $\mu\text{s}$  的二变间隔码的干扰效率能达到 100%,脱靶量达到 510.4 m;而干扰时机对干扰效果影响较小。文中的研究成果可为高重频干扰装备研制和战术使用提供一定的参考和依据。

**关键词:** 高重频; 干扰建模; 弹道仿真; 时间波门; 激光编码

**中图分类号:** TN977 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0306008

## Research on modeling and simulation of high repetition laser jamming laser guidance weapon

Zhang Shuai, Liu Zhiguo, Wang Shicheng, Zhao Qian

(The Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** To evaluate the jamming effect effectively, the research on the jamming influence of the laser high repetition which is made by interference factors of interfering frequency, wave door width, encoded mode and jamming moment was carried out. Firstly, three models of wave gate setting, coding identification and high repetition jamming were set up through deeply analyzing the anti-interference key technology and jamming mechanism. Secondly, a scheme was put forward, which was about judging the jamming signal in time gate and simulating the trajectory by the judge. Finally, based on the proportional guidance with over gravity compensation trajectory simulation platform, the effects of different factors on the high frequency jamming were evaluated. The result shows that interference frequency and wave gate width have a greater influence on the jamming effect, and the higher the frequency and the wider the wave gate are, the better the jamming effect is; the anti-interference performance of long cycle code is better than short cycle code; when the interference frequency reaches 100 kHz and wave door width reaches 20  $\mu\text{s}$ , two space code can be completely jammed and miss distance can reach 510.4 m; jamming

收稿日期:2015-07-10; 修订日期:2015-08-12

基金项目:国家自然科学基金青年基金(61004128);陕西省工业攻关计划(2012GY2-34)

作者简介:张帅(1990-),男,博士生,主要从事激光制导仿真、激光对抗方面的研究。Email:zhangshuai\_wonder@163.com

导师简介:王仕成(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事导航、制导与控制、控制理论与工程方面的研究。Email:wshcheng@vip.163.com

moment has a smaller effect on jamming effect. The results may provide some reference and basis for the development and application of high repetition jamming equipment.

**Key words:** high repetition; interference modeling; trajectory simulation; time gate; laser code

## 0 引言

激光高重频干扰作为新型激光有源干扰方式,因其无需识别制导脉冲信号、干扰主动性强且干扰效率高而成为研究的热点<sup>[1]</sup>。所谓激光高重频干扰,即通过发射频率极高的激光脉冲至导引头信号处理系统中,干扰脉冲强行挤入导引头时间波门内,致使导引头提取错误信息而达到诱偏激光制导武器的目的<sup>[2-3]</sup>。

从目前发表的文献看,有关激光高重频干扰方面的研究多集中于干扰机理分析<sup>[4-6]</sup>和对导引头信号处理过程的干扰研究<sup>[7-8]</sup>,且大多从高重频干扰参数和信号的相关性等角度开展的研究,而对高重频干扰效果弹道仿真方面的研究相对较少,究其原因一方面缺乏来袭激光制导武器,另一方面影响高重频干扰效果的因素较多,相互影响、叠加情况复杂,评估难度较大。

文中主要基于过重力补偿比例式制导导弹数学仿真平台,开展了高重频激光干扰效果弹道仿真研究,具体内容有:第一,梳理和研究了激光编码和时间波门设置的机理,在无干扰制导导弹导引头信号处理环节中加入抗干扰关键技术,并建立了波门设置模型、码型识别和高重频干扰模型;第二,设计了弹道仿真流程,提出了在导引头时间波门内对脉冲信号进行干扰判断的方案。第三,基于弹道仿真平台,研究了干扰频率、波门宽度、编码方式和干扰时机等因素对高重频干扰效果的影响。

## 1 激光导引头抗干扰关键技术

激光导引头是制导武器的核心部件,通过信号接收、信号处理和指令传输等过程为导弹控制系统提供弹目运动信息和导引指令。因此,激光制导武器的抗干扰性能主要由导引头信号处理部分的抗干扰能力决定<sup>[7,9]</sup>。目前,导引头采用的抗干扰关键技术主要包括激光编码技术和时间波门技术。

### 1.1 激光编码技术

激光编码指对指示器发出的激光脉冲进行调制

和统一编码,使其携带预定信息。通过这种有规律的脉冲间隔调制,可以降低敌方设备的干扰效率,也可以避免制导武器打击目标时相互干扰。激光编码按周期可以分为短周期码和长周期码<sup>[10]</sup>,前者主要包括:精确频率码、二变间隔码、五位随机周期码、等差型码等,后者主要包括 LFSR 状态码、脉冲调制码和唯一间隔对编码等。二变间隔码在整个编码过程中以相邻两个脉冲间隔为一个周期进行循环编码;LFSR 状态码采用反馈函数扩大编码周期,在移位寄存器中按照规律产生的一种伪随机编码,编码周期一般较长<sup>[11]</sup>。

以 LFSR 状态码为例,取八位移位寄存器  $\Delta T_c=48.38\text{ ms}$ ,  $\Delta t_u=0.1\text{ ms}$ (见参考文献[1]),其脉冲间隔序列如图 1 所示。

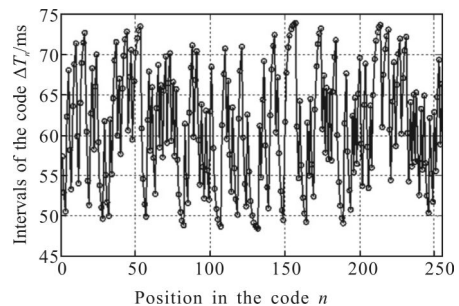


图 1 LFSR 状态码脉冲间隔

Fig.1 Pulse interval of LFSR state code

### 1.2 时间波门技术

激光导引头内部信号处理部件普遍采用时间波门技术来提高导引头的抗干扰性能。时间波门技术是指在导引头接收到制导脉冲或者干扰脉冲后,在极短的时间段内实现对信号判断和处理,而对时间波门外的信号不予处理。时间波门通常分为固定波门、实时波门和偏置波门<sup>[1]</sup>。

固定波门在导引头识别制导信号、找到时间同步点后,以该同步点为基点统一设置波门宽度;实时波门以上一时刻到来的脉冲为时间同步点设置波门;偏置式波门是近些年新兴的波门设置方式,实时波门是以制导脉冲期望的到达时刻为中心设置的波门,而偏置式波门则在其基础上附加偏置量。其设置

原理如图 2 所示。

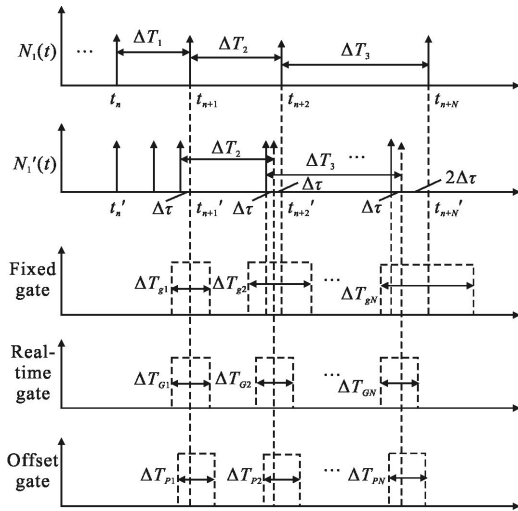


图 2 波门设置原理图

Fig.2 Schematic diagram of time wave gate

图 2 中,  $N_1(t)=\Delta T_1\Delta T_2, \dots, \Delta T_N$  为预置激光编码脉冲,  $t'_n$  为导引头检测到的激光脉冲到来时刻,  $t_n$  为预置编码脉冲到来时刻,  $\Delta\tau$  为激光脉冲到来不确定时间误差,  $\Delta T_{gN}$  为固定波门设置宽度,  $\Delta T_{gN}$  为实时波门设置宽度。由图 2 可以看出, 固定波门存在累计误差, 波门设置较宽; 实时波门能够消除累计误差, 波门设置宽度仅由脉冲间隔不确定度决定; 偏置波门在实时波门的基础上改变波门设置的中心, 通过限制超前时间来实现抗干扰。假设, 波门宽度设置为  $10\ \mu\text{s}$ , 脉冲期望到达时刻若为  $0\ \text{s}$ , 实时波门设置为  $-5\sim 5\ \mu\text{s}$ , 则偏置波门可以设置为  $-2\sim 8\ \mu\text{s}$ , 此时若干扰信号超前制导信号时间大于  $3\ \mu\text{s}$ , 则不能进入时间波门内, 从而消除了干扰。

## 2 高重频干扰建模

开展高重频干扰弹道仿真研究, 首先在分析导引头采用的抗干扰技术后, 建立高重频干扰模型。而后, 在无干扰的制导导弹弹道仿真基础上, 基于高重频干扰模型, 开展高重频干扰弹道仿真研究。

### 2.1 高重频干扰机理分析

激光高重频干扰实质是相位超前的干扰脉冲强行挤入导引头时间波门内, 干扰或淹没真实制导信号, 使导引头提取不出信号或者提取错误信号, 增大制导武器的制导误差和脱靶量。高重频干扰不需要识别和复制激光制导编码脉冲, 理论上讲, 只要干扰

重复频率足够高就可以保证每个波门内有干扰信号, 干扰成功率就高, 但实际干扰效果与较多影响因素有关。

影响高重频干扰效果的因素主要包括两个方面: 高重频干扰参数和制导武器采用的抗干扰技术。前者主要包括干扰机发射功率、重复频率、脉宽、干扰持续时间等, 后者主要指制导武器的编码方式和导引头时间波门宽度等。文中主要通过弹道仿真, 研究高重频干扰频率、编码方式和时间波门宽度、干扰时机对高重频干扰效果的影响。

### 2.2 高重频干扰建模

研究高重频的干扰建模是开展高重频干扰效果弹道仿真的基础。高重频干扰首先需要按照编码方式建立码型识别模型、波门设置模型, 进行弹道仿真时需要建立高重频干扰模型。

#### 2.2.1 码型识别模型

编码识别模型主要用于搜索识别阶段对脉冲信号进行判断, 为后续波门设置和锁定跟踪做准备。利用脉冲间隔子序列自相关函数等于 1 的性质可以实现激光导引头搜索识别阶段的解码。

定义归一化互相关函数:

$$r_{gc} = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{N-1} g(n)y(n+k)$$

式中:  $g(n)$  为高重频和制导脉冲混合序列;  $y(n)$  为预置激光编码脉冲序列;  $N$  为两序列的长度;  $M$  为序列中包含的编码信号个数。

用互相关函数实现滑动匹配过程, 若  $r_{gc}=1$ , 则识别成功, 说明导引头已经搜索到目标; 若  $r_{gc}$  越接近 1, 则二者匹配程度越高, 说明混合脉冲序列中含有与制导编码脉冲同相位的脉冲信号越多, 导引头以真实制导脉冲信号的机率越大; 反之干扰脉冲信号较多, 导引头有可能误判。

#### 2.2.2 时间波门设置模型

对于固定型波门, 由于其波门宽度随脉冲不断变化, 设  $T_{jl}$  为编码脉冲第  $j$  周期的第  $l$  个脉冲达到时刻,  $T_{jn}$  为编码脉冲第  $j$  周期的第  $l$  个脉冲的下一个脉冲  $n$  到达时刻, 波门设置模型可为:

$$\begin{cases} T_{g1} = T_{jl} - \frac{1}{2} |T_{jn} - T_{jl}| + \frac{1}{2} \Delta\tau \\ T_{g2} = T_{jl} + \frac{1}{2} |T_{jn} - T_{jl}| + \frac{1}{2} \Delta\tau \end{cases}$$

对于实时波门有:

$$\begin{cases} T_{g1}=T_{j1}-\frac{1}{2}\Delta t+\frac{1}{2}\Delta\tau \\ T_{g2}=T_{j1}+\frac{1}{2}\Delta t+\frac{1}{2}\Delta\tau \end{cases}$$

式中： $\Delta\tau$ 为激光脉冲到来不确定时间误差； $\Delta t$ 为实时波门宽度； $T_{g1}$ 为波门开启时刻； $T_{g2}$ 为波门关闭时刻。

### 2.2.3 高重频干扰模型

导引头搜索到目标后，为研究整个干扰过程，首先在一个波门内建立高重频干扰模型。假设激光编码序列预置脉冲到达时刻为  $T_1T_2T_3, \dots, \Delta T_n$ ，导引头采用实时波门技术，时间波门宽度设置为  $\Delta t$ ，高重频干扰重复频率为  $f$ ，且导引头在波门内采用首脉冲采样技术<sup>[7]</sup>，则在第  $k$  波门内干扰成功时，有：

$$\begin{cases} T_k-1/2\Delta t \leq mf \leq T_k \\ T_k-1/2\Delta t \leq lf \leq T_k \\ |l-m| \geq 0 \end{cases}$$

式中： $m$  和  $l$  取整数，表示第  $m$  和  $l$  高重频激光脉冲。在对每一个波门内信号进行判断后，记录下干扰成功的波门，而后对后续波门进行判断。

若在整个制导周期内共有  $s$  个波门受到干扰，则在该频率下高重频干扰效率为  $P(f, \Delta t) = \frac{s}{n} \times 100\%$ 。

## 3 弹道仿真与结果分析

### 3.1 仿真流程设计

以某型过重力补偿比例制导导弹为基础，在其导引头信号处理环节加入激光编码和时间波门技术，用以模拟来袭激光制导武器。以改进后的激光制导导弹为研究对象，研究各因素高重频激光干扰效果的影响。其仿真流程如图3所示。

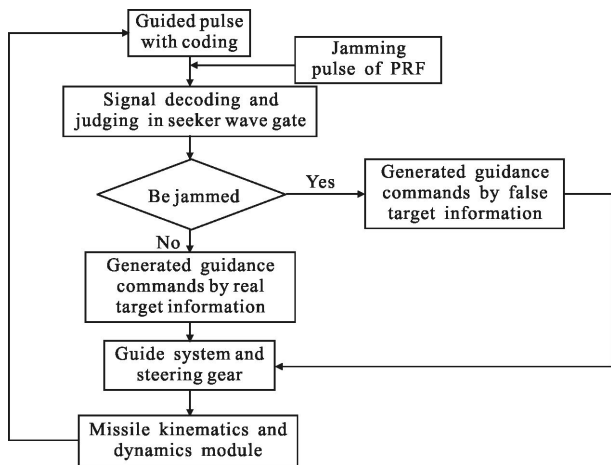


图 3 弹道仿真流程图

Fig.3 Flow diagram of trajectory simulation

首先，在导引头接收到目标回波脉冲后进行解码，以确定编码脉冲时间同步点，以此设立实时波门；而后，在每一个波门内进行信号判断，如果高重频干扰有效，则以假目标信息为制导信息，否则以真实目标信息生成制导指令；其次，将导引头生成制导指令输入到控制系统和舵机模型中，生成舵偏信号；最后，根据导弹运动学和动力学模型，解算导弹运动和姿态参数，形成闭环仿真。

### 3.2 仿真试验与结果分析

基于以上理论分析和建立的模型，基于弹道仿真，以脱靶量为评估标准，研究激光编码方式、波门设置宽度、高重频干扰频率和干扰时机等因素对高重频干扰效果的影响<sup>[11-12]</sup>。

首先，按照预定编码方式对激光脉冲进行编码，对导引头接收到的脉冲进行解码，按照波门设置模型设置实时波门；

其次，基于 2.2 节建立的高重频干扰模型，在时间波门内进行干扰信号判断，根据过重力补偿比例制导模型解算制导指令；

最后，根据控制系统模型、舵机模型和导弹运动学和动力学方程，实时解算弹道。

仿真初值：在发射系下导弹在空中的初始位置为(0 m, 2 000 m, 0 m)，固定目标方位为(3 000 m, 0 m, -400 m)，仿真解算步长设为 0.001 s，制导信号更新频率为 20 Hz，高重频干扰机方位为(3 500 m, 0 m, -500 m)。

#### 3.2.1 波门宽度和编码方式对干扰效果的影响

(1) 波门宽度设置为  $10 \mu\text{s}$  和  $20 \mu\text{s}$ ，编码方式为二变间隔码(72.21 ms 和 79.48 ms)，导弹发射 2 s 后引入高重频干扰，图 4 所示干扰频率为 100 kHz 时的两个不同波门宽度对应的弹道曲线，图 5 所示为脱靶量随高重频频率变化结果：

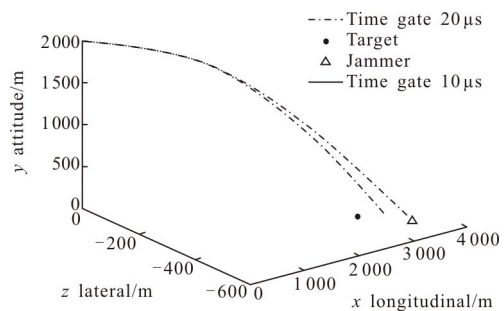


图 4 干扰频率为 100 kHz 时的弹道曲线

Fig.4 Ballistic curve when high frequency reaches 100 kHz

由图 4 可以看出,高重频频率在 100 kHz,波门宽度设置为 20 μs 时,干扰弹道偏离目标点较远,在制导过程中导引头信息处理过程受到干扰较大。

由图 5 可知,采用二变间隔码时,脱靶量随着干扰频率的增大在不断增大,但存在某个频率使干扰效果比较好,如频率为 50 kHz 比 60 kHz 干扰效果好,频率为 90 kHz 比 100 kHz 干扰效果好,这与编码参数设置有关;在干扰频率相同时,波门宽度设置越宽,导弹制导误差越大,脱靶量越大,干扰效果越好。

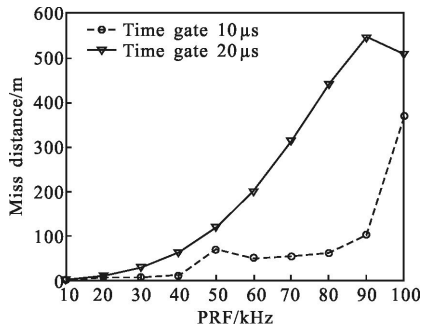


图 5 波门宽度对脱靶量的影响

Fig.5 Effect of wave door width on miss distance

(2) 波门宽度设置为 20 μs,编码方式分别设置为二变间隔码、LFSR 状态码,导弹发射 2s 后引入高重频干扰,LFSR 状态码参数设置与图 1 相同,两种编码方式下脱靶量随高重频频率变化结果如图 6 所示。

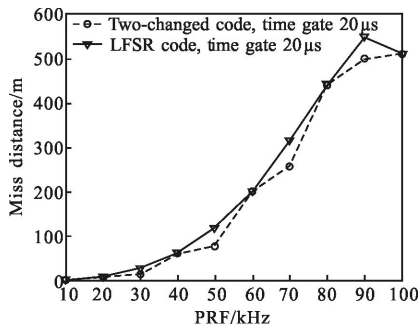


图 6 编码方式对脱靶量的影响

Fig.6 Effect of encoded mode on miss distance

图 6 所示,在波门宽度、干扰频率相同时,编码方式对高重频干扰效果有影响,二变间隔码对应的脱靶量比 LFSR 状态码大。相比于二变间隔码,LFSR 状态码的抗干扰效果更好。

此外,上述三种情况下高重频干扰效率如图 7 所示。在干扰频率相同时,高重频干扰效率由小到大依次为波门宽度为 10 μs 的二变间隔码、波门宽度为

20 μs 的 LFSR 状态码、宽度为 20 μs 下的二变间隔码。从图 5 和图 6 可知,上述三种状态对应的高重频干扰效率与脱靶量反应的三种情况编码的抗干扰性能是一致的。

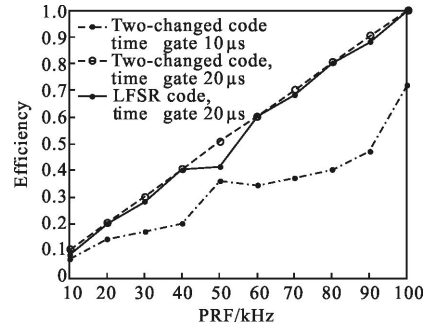


图 7 不同波门宽度下的高重频干扰效率

Fig.7 Jamming efficiency at different wave width

### 3.2.2 干扰加入时机对干扰效果的影响

为研究干扰时机对干扰效果的影响,波门宽度设置为 20 μs,编码方式为二变间隔码,高重频干扰频率设为 40kHz,干扰加入时机依次设为第 2s、第 4s、第 6s、第 8s 和第 10s。图 8 为第 6s 和第 10s 加入干扰后对比结果,表 1 为干扰加入不同时间对应的脱靶量。

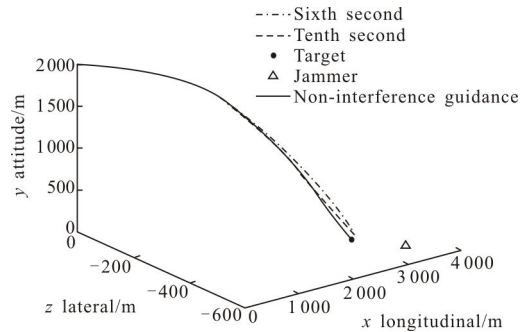


图 8 加入干扰后的弹道曲线

Fig.8 Ballistic curve at different jamming moment

表 1 不同干扰时机脱靶量变化(单位:m)

Tab.1 Miss distance at different jamming moment

(Unit:m)

| Flight time /s | Jamming efficiency | Coordinate of the impact/m | Miss distance/m |
|----------------|--------------------|----------------------------|-----------------|
| 2 s            | 13.54              | (3 060.8,0,-408.1)         | 61.34           |
| 4 s            | 13.50              | (3 059.3,0,-407.5)         | 59.77           |
| 6 s            | 13.48              | (3 056.6,0,-405.4)         | 56.85           |
| 8 s            | 13.50              | (3 055.3,0,-406.5)         | 55.68           |
| 10 s           | 13.54              | (3 061.6,0,-407.4)         | 62.04           |
| 12 s           | 13.37              | (3 020.3,0,-402.7)         | 20.48           |
| 13 s           | 13.35              | (3 000.5,0,-397.8)         | 2.26            |
| 14 s           | 13.31              | (3 000.1,0,-398.1)         | 1.90            |

根据图 8 弹道曲线和表 1, 加入干扰后弹道明显发生变化, 干扰加入时机不同导弹飞行状态不同, 脱靶量也有变化, 但相比于波门宽度、干扰脉冲频率和编码方式等因素, 干扰加入时机对脱靶量的影响较小。由于导弹无干扰飞行时间为 13.31 s, 从仿真结果可知, 在落点之前引入干扰效果较差。

综上所述, 波门宽度和干扰频率对高重频干扰效果的影响较大; 编码方式对干扰效果也有影响, 表现为长周期码的抗干扰性能比短周期好; 干扰时机对干扰效果影响较小。当波门宽度和编码方式一定时, 在一定频率范围内存在干扰频率使干扰效果最佳。

#### 4 结束语

文中通过分析导引头抗干扰技术和高重频干扰原理, 建立了高重频干扰模型。设计了高重频干扰弹道仿真流程, 基于建立的模型和某型过重力补偿比例制导导弹仿真平台, 研究了激光编码方式、波门设置宽度、干扰频率和干扰时机对高重频干扰效果的影响<sup>[13]</sup>。在干扰频率达到 100 kHz 时, 高重频对波门宽度为 20 μs 的二变间隔码的干扰效率能达到 100%, 脱靶量达到 510.4 m, 高重频干扰效果最佳。对高重频干扰效能评估和装备的战术使用具有一定的参考意义。同时, 文中的研究也为下一步高重频干扰效果半实物仿真试验和外场试验做了有益的尝试。

#### 参考文献:

[1] Wei Wenjian. Key techniques and system study on HWIL simulation for laser guidance and electro-optical countermeasures [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)

[2] Huang Feng, Wang Yuefeng, Wang Jinyu, et al. Study on application of high repetition rare solid atate lasers in photoelectric countermeasure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 33(5): 465–367. (in Chinese)

[3] Chen Hongzhe. The review of laser active jamming

technology [J]. *Photoelectric Counter and Passive Inference*, 1996, 3: 31–36. (in Chinese)

[4] Jiang Yaoting, Yang Jie, Zhou Xiaosong. Developing status quo of laser interference technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(5): 387–390. (in Chinese)

[5] Li Hui, Li Yan, Liu Bingfeng, et al. Status, development and key technique analysis of laser jamming technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 48: 081407. (in Chinese)

[6] Zhu Chencheng, Nie Jinsong, Tong Zhongchen. Analysis on the mode of high repetition laser jamming [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 1060–1063. (in Chinese)

[7] Xing Hui, Lei Ping, Ma Na. Experiment and analysis on time sequence anti-jamming technology of semi-active laser seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 461–465. (in Chinese)

[8] Zhang Hengwei, Zhao Wei, Ji Xiang, et al. Jamming effect of the high-repetition-frequency laser to the laser seeker [J]. *Electro-Optec Technology Application*, 2009, 24(1): 26–28. (in Chinese)

[9] Zhou Hu, Zhu Jigui, Zhang Zili, et al. Design of dynamic tracking and guiding system for laser-electronic theodolite [J]. *Opt Precision Eng*, 2011, 19(11): 2672–2627. (in Chinese)

[10] Wei Wenjian, Qin Shiqiao, Zhan Dejun, et al. Research on laser encoding laser semi-active homing guidance [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(12): 1199–1203. (in Chinese)

[11] Tong Zhongcheng, Sun Xiaoquan, Yang Xiwei, et al. Simulation of high-repetition-frequency laser jamming laser guided weapon [J]. *Journal of Ballistics*, 2008, 20(1): 106–110. (in Chinese)

[12] Fang Yanchao, Guo Lihong, Li Yan, et al. Jamming effectiveness analysis of the weather vane-type laser-guided bombs by laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(5): 656–664. (in Chinese)

[13] Li Shuanggang, Nie Jinsong, Li Hua, et al. Assessment of effectiveness on angle deceptive jamming to semi-active laser-guided weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 41–45. (in Chinese)