

文章编号:1001-5078(2026)02-0227-05

· 激光应用技术 ·

# 高重频激光干扰伪随机码激光导引头试验研究

王灿召,王瀚,张兵,张澍霖,曹祥杰  
(中国电子科技集团公司第二十七研究所,河南 郑州 450047)

**摘要:**为研究高重频激光对伪随机码激光半主动导引头干扰效能,在分析高重频激光干扰机理基础上,计算了不同干扰效果所需激光重复频率和到靶功率密度。研制最高重复频率20 MHz变频1064 nm激光器,开展了不同边界条件下的干扰试验。结果表明,干扰激光到靶功率不低于目标指示器回波功率情况下,兆赫兹量级激光重复频率能够对导引头产生压制干扰,使其信息处理单元失效,该研究可为高重频激光干扰伪随机码激光制导武器提供工程应用参考。

**关键词:**高重频;压制干扰;伪随机码;激光半主动导引头

**中图分类号:**TN977;TJ765 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2026.02.011

## Experimental research on high-repetition-rate lasers jamming for pseudo-random code laser seekers

WANG Can-zhao, WANG Han, ZHANG Bing, ZHANG Shu-lin, CAO Xiang-jie  
(The 27th Research Institute of CETC, Zhengzhou 450047, China)

**Abstract:** To investigate the jamming effect of high-repetition-rate lasers on pseudo-random code laser semi-active seekers, the required laser repetition rates and on-target power densities for different jamming effects are calculated based on an analysis of the jamming mechanism of high-repetition-rate lasers. A tunable 1064 nm laser with a maximum repetition rate of 20 MHz is developed, and jamming experiments are conducted under various conditions. The results demonstrate that when the on-target power density of jamming laser meets or exceeds the return signal of the target designator, jamming laser with a repetition rate above MHz range can achieve suppressive jamming on seekers, causing the seekers' information processing units to fail. The research can provide engineering application references for high-repetition-rate laser jamming against pseudo-random code laser-guided weapons.

**Keywords:** high-repetition-rate; suppressive jamming; pseudo-random code; laser semi-active seekers

### 1 引言

近年来,以激光半主动制导为代表的光电精确制导武器已成为我高价值目标的主要威胁源之一。针对激光半主动制导武器,目前主要有激光诱偏、烟幕遮蔽和高重频激光干扰三种对抗方式,相关装备均已得到应用。激光诱偏<sup>[1]</sup>通过解码来诱偏激光半主动制导武器目标指示信号,发射相同编码干扰激

光脉冲实现角度欺骗,可对抗精确频率码、变间隔码等短周期编码(3~12位)激光导引头。烟幕遮蔽通过在保护目标周围快速成烟以阻断来袭激光半主动制导武器的目标指示信号,实现遮蔽对抗。高重频激光干扰通过发射重复频率几十千赫兹~上百千赫兹的干扰激光脉冲,进入导引头选通波门扰乱其制导回路,使导引头无法稳定跟踪目标。

**基金项目:**国防科技应用推进项目(No. 2022GFYY01)资助。

**作者简介:**王灿召(1981-),男,硕士,高级工程师,主要从事光电对抗及其工程应用研究。E-mail:wangcanzhao2003@163.com

**收稿日期:**2025-05-20

为提升抗干扰能力,激光半主动导引头正朝着码型复杂化、制导引信一体化的方向发展,伪随机码激光制导可实现攻击过程中编码信息不重复,造成已有激光诱偏装备防护效能降低,高重频激光干扰因目前干扰激光重复频率较低,仅能实现角度欺骗干扰。因此,急需发展新的压制对抗手段应对伪随机码激光半主动制导武器的威胁打击。

本文采用高速脉冲 LD 驱动和增益光纤放大技术,研制最高重复频率 20 MHz 变频大功率 1064 nm 激光器。在此基础上,开展了不同条件下对伪随机码激光半主动导引头的干扰试验,能够造成导引头信息处理单元功能失效,实现对其压制干扰,具有良好的工程应用前景。

## 2 干扰机理分析

高重频激光干扰机理较为复杂,干扰效果受导引头的选通波门宽度和信息处理能力、干扰激光的重复频率和到靶功率、干扰时机以及作战使用方式等多种因素影响,干扰效果主要表现为角度欺骗干扰和压制干扰两类<sup>[2]</sup>。

激光半主动制导武器通常设置实时型窄选通波门(典型值 10 ~ 30  $\mu\text{s}$ )、伪随机码等抗干扰措施。由于伪随机码在制导武器整个攻击过程中可以实现码型不重复,造成激光告警设备无法解码,因此激光诱偏设备无法对其实施有效对抗<sup>[3-4]</sup>。

设定导引头选通波门宽度 10  $\mu\text{s}$ 、四象限探测组件采用自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC)电路。以下分析高重频激光对伪随机码激光半主动导引头的干扰机理。

### 2.1 角度欺骗干扰

设置干扰激光重复频率大于 100 kHz,则存在干扰信号先于制导信号进入导引头选通波门情况。图 1 中,由于 AGC 电路存在增益调整时间,不能完成对信号瞬时放大,随着干扰信号(虚线段)成为首脉冲且能量大于制导信号(实线段),AGC 电路按干扰信号幅值调整增益系数,导致制导信号放大后幅值过小(短实线段),造成波门被拉偏,此现象称为高重频激光干扰牵引效应<sup>[5-6]</sup>。

### 2.2 压制干扰

设置干扰激光重复频率大于 1 MHz,则存在  $n$  个激光干扰脉冲( $n \geq 10$ )同时进入导引头选通波门情况,经前置放大和主放大电路后被展宽,形成粘连效应,导致后续数字电路无法处理,导引头信息处理单元失效,丧失制导功能。此现象称为高重频激光干扰粘连效应。

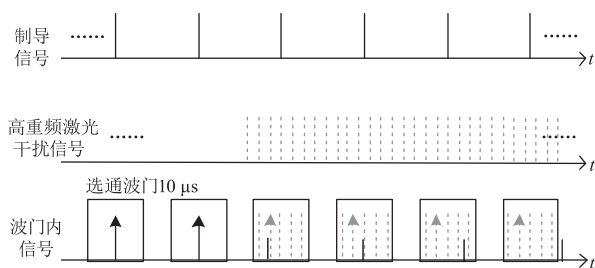


图 1 高重频激光角度欺骗干扰牵引效应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pull-off effect for high-repetition-rate laser angle deception jamming

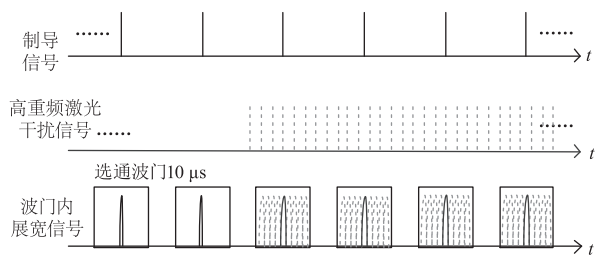


图 2 高重频激光压制干扰粘连效应示意图

Fig. 2 Schematic diagram of adhesion effect for high-repetition-rate laser suppression jamming

## 3 试验研究

基于以上干扰机理,计算不同干扰效果所需激光器重复频率和到靶功率密度,研制 MHz 重复频率 1064 nm 激光器并开展对伪随机码激光半主动导引头的干扰试验,验证机理分析的有效性,为工程应用提供试验参考<sup>[1-7]</sup>。

### 3.1 指标核算

#### 3.1.1 激光重复频率

为确保干扰有效,需保证导引头选通波门内至少有一个干扰脉冲,确保信号处理电路较大概率处理干扰信号,使其无法形成制导指令。

激光重复频率需满足下式:

$$f \geq 1/\tau \quad (1)$$

式中, $f$ :干扰激光重复频率,单位 Hz; $\tau$ :导引头选通波门宽度,单位 s。

当  $\tau = 10 \mu\text{s}$  时, $f$  不小于 100 kHz。当  $f \geq 1 \text{ MHz}$  时,能够确保 10 个以上干扰脉冲同时进入选通波门,出现粘连效应,形成压制干扰。

在到靶干扰激光功率不小于目标指示回波激光功率条件下,激光重复频率越高,干扰效果越好。若激光器重复频率提升至兆赫兹量级,将造成导引头信号处理电路无法输出制导误差信号,实现压制干扰。

#### 3.1.2 到靶功率密度

为实现对激光半主动导引头高重频干扰,应确

保导引头接收到的干扰激光功率高于接收到的目标指示器漫反射回波激光功率,使制导信号湮没在噪声信号中。

典型激光半主动制导武器目标指示器峰值功率为  $P_i = 10 \text{ MW}$ ,制导武器作用距离  $L$  为  $5 \sim 8 \text{ km}$ ,则导引头接收到的漫反射回波激光功率密度由下式计算:

$$E_{\min} = \frac{P_i \cdot e^{-2\alpha L} \sigma}{\pi(\tan 30^\circ \times L)^2} \quad (\text{大目标,反射角 } 60^\circ \text{情况}) \quad (2)$$

式中:  $E_{\min}$ :导引头接收到的漫反射回波激光功率密度,单位  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $P_i$ :激光峰值功率,单位  $\text{W}$ ;  $\alpha$ :大气衰减系数,取  $0.12/\text{km}$ ;  $L$ :作用距离,单位  $\text{km}$ ;  $\sigma$ :反射系数,取  $0.3$ ;则  $5 \text{ km}$  处导引头接收到的回波激光功率密度  $E_{\min} = 0.035 \text{ W}/\text{m}^2$ ,  $7 \text{ km}$  处回波激光功率密度为  $0.011 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

根据激光峰值功率密度与干扰距离公式,计算高重复激光在导引头处激光峰值功率密度:

$$E = \frac{4P_j \cdot e^{-\alpha L}}{\pi(\theta \times L)^2 \times \tau_1 \times f} \quad (3)$$

式中,  $E$ :干扰激光在导引头处峰值功率密度,单位  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $P_j$ :激光平均功率,单位  $\text{W}$ ;  $\alpha$ :大气衰减系数,取  $0.12 \text{ km}$ ;  $\theta$ :激光束散角,单位  $\text{mrad}$ ;  $L$ :作用距离,单位  $\text{km}$ ;  $\tau_1$ :激光脉冲宽度,单位  $\text{m}$ ;  $f$ :激光重复频率,单位  $\text{Hz}$ 。

计算得到不同干扰参数对应到靶激光功率密度如表 1 所示,选用干扰激光器(重复频率  $1 \text{ MHz}$ 、脉宽  $6.4 \text{ ns}$ 、平均功率  $32 \text{ W}$ 、束散角  $3^\circ$ ),能够实现对激光半主动导引头  $7 \text{ km}$  压制干扰。选用干扰激光器(重复频率  $20 \text{ MHz}$ 、脉宽  $5.6 \text{ ns}$ 、平均功率  $56 \text{ W}$ 、束散角  $1^\circ$ ),能够实现对激光半主动导引头  $7 \text{ km}$  压制干扰。

表 1 不同干扰参数对应到靶功率密度

Tab. 1 Target irradiance under varying jamming parameters

序号	激光重复频率 /MHz	脉冲宽度/ns	平均功率/W	束散角/mrad	干扰阈值 $E_{\min}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	到靶功率密度 $E/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
1	1	6.4	32	1	0.035(5 km) 0.011(7 km)	139.8(5 km) 56.1(7 km)
2	1	6.4	32	17.4	0.035(5 km) 0.011(7 km)	0.46(5 km) 0.19(7 km)
3	1	6.4	32	52.2	0.035(5 km) 0.011(7 km)	0.051(5 km) 0.021(7 km)
4	20	5.6	56	1	0.035(5 km) 0.011(7 km)	13.9(5 km) 5.6(7 km)
5	20	5.6	56	17.4	0.035(5 km) 0.011(7 km)	0.046(5 km) 0.019(7 km)
6	20	5.6	56	52.2	0.035(5 km) 0.011(7 km)	0.005(5 km) 0.002(7 km)

### 3.2 兆赫兹大功率激光器

基于高速电调 LD 驱动和多级光纤放大的技术体制,研制兆赫兹重复频率  $1064 \text{ nm}$  大功率激光器。LD 驱动电路采用高速大功率 MOS 管放电开关,具有简单高效、峰值功率大、上升时间短、参数可调等优点。

兆赫兹重复频率  $1064 \text{ nm}$  激光器技术途径如图 3 所示。首先对光纤耦合  $1064 \text{ nm}$  LD 种子源进行高速电调制,获得最高重复频率  $20 \text{ MHz}$ 、峰值功率  $200 \text{ mW}$ 、脉冲宽度  $3 \sim 5 \text{ ns}$  种子激光,经多级光纤放大得到平均功率为  $56 \text{ W}$ 、重复频率  $700 \text{ kHz} \sim 20 \text{ MHz}$  可调、脉冲宽度  $5.6 \text{ ns}$  高重复频率脉冲激光输出。

$1064 \text{ nm}$  分布反馈式 (DFB) 种子源光谱如图 4 所示。波长范围为  $1059 \sim 1069 \text{ nm}$ ,采用脉冲调制信号 (PWM) 驱动种子源,实现频率最大调节范围

$2 \sim 22 \text{ MHz}$ ,脉冲宽度最大调节范围  $2 \sim 11 \text{ ns}$  的激光输出。

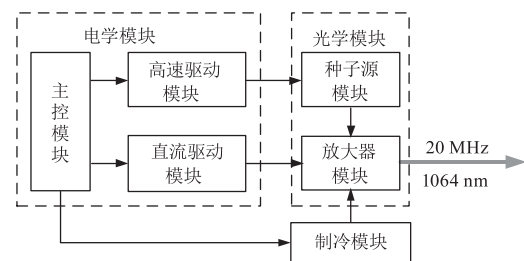


图 3 1 MHz 重复频率  $1064 \text{ nm}$  激光器技术途径

Fig. 3 Technical approach for a 1 MHz-repetition-rate  $1064 \text{ nm}$  laser

激光脉冲测试波形如图 5 所示。重复频率  $705 \text{ kHz}$  和  $1 \text{ MHz}$  时脉冲宽度  $6.4 \text{ ns}$ ,重复频率  $10 \text{ MHz}$  和  $20 \text{ MHz}$  时脉冲宽度  $5.6 \text{ ns}$ 。

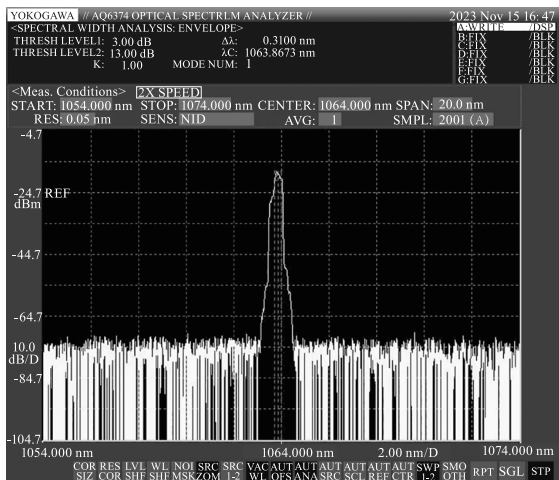


图4 1064 nm DFB种子源光谱图  
Fig. 4 Optical spectrum of a DFB seed source

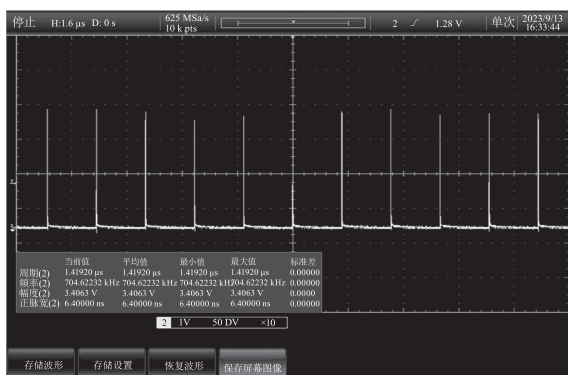


(d) 重复频率20 MHz, 脉宽5.6 ns  
图5 MHz重复频率1064 nm大功率激光器测试波形图

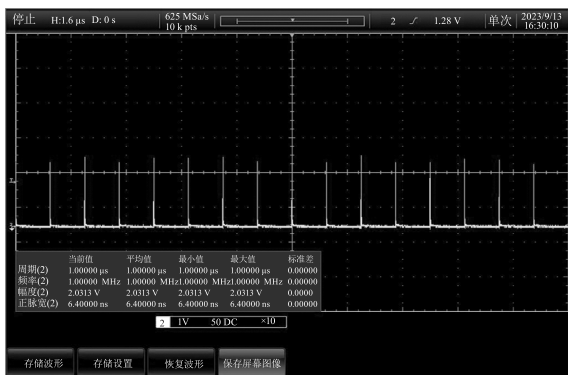
Fig. 5 Experimental wave graph of a MHz-repetition-rate 1064 nm high-power laser

### 3.3 干扰试验

试验布局如图6所示,高重频激光干扰机、激光半主动导引头、激光目标指示器分别布设于A、B、C三个位置。设置伪随机编码、选通波门宽度 $10\ \mu\text{s}$ 。导引头和目标指示器加电工作,设置干扰激光参数并选择干扰时机(搜索段或跟踪段),发射干扰激光照射导引头。记录干扰后导引头角度误差数据变化情况,以此判定干扰效果。



(a) 重复频率705 kHz, 脉宽6.4 ns



(b) 重复频率1 MHz, 脉宽6.4 ns



(c) 重复频率10 MHz, 脉宽5.6 ns

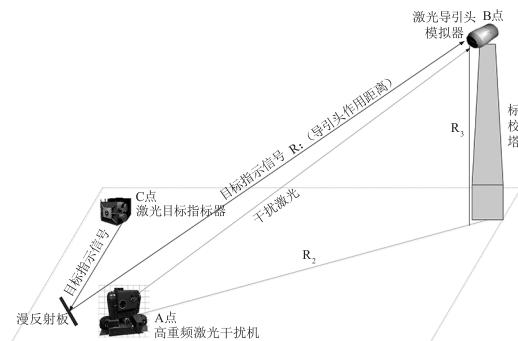


图6 高重频激光干扰导引头试验布局  
Fig. 6 Experimental setup for seeker jamming test with high-repetition-rate laser

设定干扰激光重复频率为 $f$ ,干扰激光与目标指示器回波激光功率比为 $\varepsilon$ 。不同干扰参数对应干扰效果及使用建议如表2所示。

试验1: $f$ 取值100 kHz~500 kHz, $\varepsilon$ 取值0.8~1.2。

干扰效果:若选择搜索段干扰,较大概率实现角度欺骗干扰;若选择跟踪段干扰,在波门牵引效应作用下,难以形成有效干扰。

试验2: $f$ 取值100 kHz~500 kHz, $\varepsilon$ 取值大于10。

干扰效果:选择搜索段或跟踪段干扰,均能实现

角度欺骗干扰效果。

试验 3:  $f$  取值 500 kHz ~ 1 MHz,  $\varepsilon$  取值大于 1。

干扰效果: 选择搜索段或跟踪段干扰, 均能实现压制干扰效果。

试验 4:  $f$  取值 1 MHz ~ 20 MHz,  $\varepsilon$  取值大于 1。

表 2 不同干扰参数对应干扰效果及使用建议(导引头配置 AGC 电路)

Tab. 2 Jamming effects and implementation guidelines under varying jamming parameters (when seekers incorporate AGC circuit)

序号	激光重复频率/kHz	干扰激光功率/目指回波激光功率	选通波门/ $\mu\text{s}$	干扰效果	使用建议
1	100 ~ 500	0.8 ~ 1.2	10	搜索段实施干扰, 在波门牵引效应作用下, 实现角度欺骗。跟踪段较难形成有效干扰。	与被保护目标拉开一定安全距离布设, 在导引头搜索段实现对其角度欺骗干扰。
2	100 ~ 500	$\geq 10$	10	在 AGC 电路和波门牵引效应作用下, 产生角度欺骗干扰。	与被保护目标拉开一定安全距离布设, 在导引头搜索段和跟踪段实现对其角度欺骗干扰。
3	500 ~ 1000	$\geq 1$	10	在粘连效应作用下产生压制干扰	在被保护目标附近布设, 在导引头搜索段和跟踪段实现对其压制干扰。
4	1000 ~ 20000	$\geq 1$	10	在粘连效应作用下产生压制干扰。	在被保护目标附近布设, 在导引头搜索段和跟踪段实现对其压制干扰。

#### 4 结论

本文针对要点目标对伪随机码激光半主动制导武器防护需求, 通过对高重频激光角度欺骗和压制干扰机理分析, 研制最高激光重复频率 20 MHz 大功率 1064 nm 激光器, 开展了不同条件下干扰试验研究。结果表明, 兆赫兹大功率 1064 nm 激光具备对伪随机码激光半主动导引头压制干扰能力。该研究结果为我要点目标抗伪随机码激光半主动制导武器防护提供了一种新的技术路线。

#### 参考文献:

- [1] Liu J J. Technology and system of electro-optical countermeasure [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2004. (in Chinese)  
刘京郊. 光电对抗技术与系统[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2004.
- [2] Zhu C C, Nie J S, Tong Z C. Analysis on the mode of high repetition laser jamming[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(6): 1060 - 1063. (in Chinese)  
朱陈成, 聂劲松, 童忠诚. 高重频激光干扰模式的分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 1060 - 1063.
- [3] Cao X H, Zhu B, Shang J R, et al. Decoding technique of laser-guided pseudo-random coded signals [J]. Laser Technology, 2021, 45(2): 155 - 161. (in Chinese)

干扰效果: 选择搜索段或跟踪段干扰, 均能实现压制干扰效果。

试验结果表明干扰激光重复频率达到 MHz 量级时, 能够实现对伪随机码激光半主动导引头的压制干扰。

曹晓荷, 朱斌, 尚建蓉, 等. 激光制导伪随机编码信号解码技术[J]. 激光技术, 2021, 45(2): 155 - 161.

- [4] Qiu X, Liu Z G, Wang S C. Pseudo-random coding of semi-active laser-guided weapon [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0801008. (in Chinese)  
邱雄, 刘志国, 王仕成. 半主动激光制导武器的伪随机编码[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0801008.
- [5] Liang W W, Yin R G, Zhang W P, et al. Analysis of jamming effect of high-repetition rate laser based on different amplification circuits [J]. Laser Technology, 2015, 39(5): 674 - 678. (in Chinese)  
梁巍巍, 殷瑞光, 张文攀, 等. 基于不同放大电路的高重频激光干扰效果分析[J]. 激光技术, 2015, 39(5): 674 - 678.
- [6] Chen C, Zhao L Y, Ma X P. State-of-art of key technological issues of laser seekers [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(2): 131 - 136. (in Chinese)  
陈成, 赵良玉, 马晓平. 激光导引头关键技术发展现状综述[J]. 激光与红外, 2019, 49(2): 131 - 136.
- [7] Zhang S, Liu Z G, Wang S C, et al. Research on modeling and simulation of high repetition laser jamming laser guidance weapon [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(3): 0306008. (in Chinese)  
张帅, 刘志国, 王仕成, 等. 高重频激光干扰制导武器建模与仿真评估研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0306008.