高重频激光对激光导引头解码干扰的研究

赵 乾,刘志国,王仕成,张 帅

(第二炮兵工程大学,陕西 西安 710025)

摘 要:为有效评估高重频激光对导引头解码过程的干扰效果,针对解码过程中的搜索识别和锁定跟踪阶段,分别建立了干扰效果量化评估模型。通过仿真,重点研究了高重频激光频率因素对采取了抗干扰技术下的导引头的干扰影响。结果表明:干扰效果与干扰激光频率、编码方式、离散化时间宽度以及时间波门宽度有关;高重频对搜索识别阶段的干扰效果要好于锁定跟踪阶段,当频率达到一定值后对两阶段均可实现 100%干扰。

关键词:高重频激光; 干扰; 解码; 激光导引头

中图分类号:TN977 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2015)05-1438-06

Jamming effect of high repetition laser on laser guidance′s decoding

Zhao Qian, Liu Zhiguo, Wang Shicheng, Zhang Shuai

(The Second Artillery Engineering University, Xi′an 710025, China)

Abstract: To estimate the jamming effect of high repetition laser on laser seeker′s decoding effectively, two quantized model were adopted, which were concerning to code distinguishing stage and code locking stage respectively. During simulation, the research emphasis was put on the effect of laser frequency on the laser seeker which adopted anti-interference technology. The simulating results show that the jamming effect is affected by laser frequency, coding pattern, sampling period, the width of time-gate, and so on. And the jamming effect during code distinguishing stage is better than code locking stage, but both stages could be jammed successfully when the frequency become higher than a certain value.

Key words: high repetition laser; jamming; decoding; laser guidance

收稿日期:2014-09-11; **修订日期**:2014-10-20

作者简介:赵乾(1991-),男,硕士生,研究方向为激光制导仿真,激光对抗。Email: zhaoqian_cool@163.com

导师简介:王仕成(1962-),男,教授,博士生导师,研究方向为导航、制导与控制,控制理论与工程。
Email: wshcheng@vip.163.com

0 引 言

近几年，随着激光半主动制导武器相关技术的不断成熟,采用的编码技术日趋复杂、时间波门技术不断改进，快速识别并有效干扰敌方制导信号的难度增大[1],传统的应答式及转发式角度欺骗干扰对抗敌激光制导武器打击的效果越来越弱。

高重频激光干扰作为一种新型激光干扰配置，通过发射频率极高的干扰激光，将制导信号淹没在干扰信号中或强行挤入导引头波门内，使导引头提取不出正确信息或得到错误信息，从而达到有效干扰的目的[2]。由于无需对敌方制导信号进行精确识别，在告警装置的配合下对抗的主动性得到了极大提高,高重频激光干扰技术前景广阔。

然而,目前的研究发现,高重频激光干扰效果与较多因素有关且具有不确定性。通过文中的研究,旨在确定高重频激光干扰导引头的主要影响因素及其效果。从公开发表的文献来看,影响高重频激光干扰效果的主要因素有 3 个[3]:高重频激光频率、能量以及导引头采用的抗干扰措施。目前的高重频激光单脉冲能量较低,故在文中假定高重频激光能量满足导引头接收的能量阈值,但不考虑能量变化因素。文中针对搜索识别和锁定跟踪这两个不同的制导阶段,分析高重频激光的频率因素对采用抗干扰措施状态下的激光导引头解码的干扰机理、干扰效果。

1 常用激光制导信号编码分析

目前国内采用的编码多为脉冲间隔调制编码,主要有以下几种[4]:二间隔码、有限位随机周期码、精确频率码、脉冲调制(PCM)码、等差型编码以及伪随机码。

前 5 种编码相关文献介绍较多，也比较容易理解,下面主要介绍一下伪随机码。伪随机编码一般由线性反馈移位寄存器(LFSR)产生,由于存在反馈函数，编码周期得到极大扩展。若伪随机编码直接由 LFSR 产生的 0-1 序列给出，则称为 LFSR 调制码；若通过 LFSR 产生的 0-1 序列的状态转移图进行编码,则称为 LFSR 状态码,具体编码方法为[5]:

$$\Delta T_n=\Delta T_0+\Delta t\times[a_i]_{2\to 10} \tag{1}$$

式中:$a_i=(a_1a_2\cdots a_8)_i$ 为线性反馈移位寄存器各时刻的状态;ΔT_0 为移位寄存器的常值时钟周期;Δt 为时间基元;$[\cdot]_{2\to 10}$ 为二进制转换为十进制。

根据公式(1)取时钟周期 ΔT_0=49.63 ms,时间基元 Δt=0.1 ms，则其产生的 LFSR 状态码序列的脉冲间隔如图 1 所示。

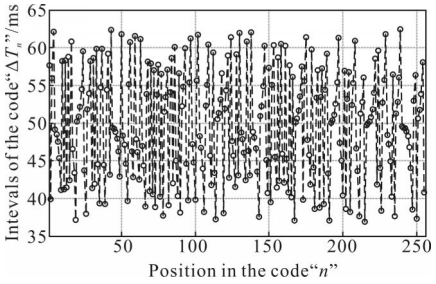


图 1 LFSR 状态码的脉冲间隔序列

Fig. 1 Pulse intervals of the code producing by LFSR′s status

将编码序列置于时间轴上分析，其脉冲间隔的变化实际上类似于相位的变化。根据脉冲间隔的变化程度,上述编码可分为三类:

(1) 二间隔码及有限位随机周期码。这两种编码采用两个或多个随机的脉冲间隔,周期比较短,脉冲间隔变化较少,相位变化也相对固定。

(2) 精确频率码、脉冲调制码、短周期伪随机编码以及 LFSR 调制码。它们的脉冲间隔 ΔT 都有一个共同特点:

$$\Delta T=k\times\Delta T_{\min},k=1,2,\cdots \tag{2}$$

即脉冲间隔为某一固定时间的整数倍，该时间一般为硬件触发的时钟周期。因此,这类编码一旦确定时钟周期,相位变换更加单一。

(3) 等差型编码及 LFSR 状态码。这两种编码的脉冲间隔一直在变化且周期较长，一般在整个制导周期内不会出现重复的脉冲间隔。但相比于后者,前者脉冲间隔的变化规律较强且幅度较小，相位变换的随机性即混乱程度不如后者。

2 激光导引头解码原理

对于激光制导武器来说，激光解码是保证其制导精度的前提。只有快速识别出激光指示信号并在制导过程中排除干扰、持续提供被攻击目标的制导方位,才能保证激光制导武器准确命中目标,而这正是激光编码、解码的目的。

激光解码的过程是与激光导引头的工作过程密切相关的。在整个制导过程中,根据激光导引头的工作状态,解码也分为两个阶段[6]:首先是搜索识别阶段,该阶段导引头搜索、捕获视场内的激光脉冲信号,通过预设编码进行识别匹配;导引头识别出指示激光信号后,转入锁定跟踪阶段,根据指示信号到达导引头时刻及预设编码规律设置时间波门,有效排除干扰信号。下面基于两过程分析激光解码原理并分别建立高重频激光干扰模型。

2.1 搜索识别阶段

2.1.1 编码信号的识别原理

搜索识别阶段激光解码的任务是:从捕获的激光脉冲信号中识别出制导信号,确定其在预设制导编码序列中的位置。信号处理过程分为两步:

第一步 将接收到的信号进行离散化处理[7]。

将捕获到信号的时间段分割成时间宽度为 b 的等间隔单元,包含激光脉冲信号的时间单元记为 1,否则记为 0,这样就实现了激光脉冲的离散化。

第二步 将离散化后的 0-1 序列与预设编码进行滑动相关匹配[8]。

定义归一化互相关函数:

$$r_{xy}=\frac{1}{A}\sum_{k=0}^{N-1}x(n)y(n+k) \tag{3}$$

式中:$x(n)$为导引头接收的脉冲信号经离散化后的脉冲序列;$y(n)$为预设编码子序列;N 为两序列的长度;A 为子序列中包含的编码信号个数。

若 $r_{xy}=1$,则说明匹配成功,识别出编码信号,同时也确定了制导信号在预设编码序列中的位置,为后续锁定阶段的工作提供了基准。

2.1.2 高重频激光与制导编码的相关度模型

根据编码信号的识别原理,将高重频激光信号离散化后的序列 $z(n)$与预设编码信号进行归一化互相关,可建立高重频激光与制导编码的相关度模型:

$$r_{yz}=\frac{1}{A}\sum_{k=0}^{N-1}z(n)y(n+k) \tag{4}$$

式中各个量的定义与公式(3)相同。

相关度用来衡量高重频激光与制导编码的匹配程度,r_{yz}越接近 1 相关度越大,则二者匹配程度越高,说明高重频激光序列中含有与制导编码信号同相位的干扰信号越多,对编码识别的干扰也越大。

2.2 锁定跟踪阶段

2.2.1 编码信号的锁定

锁定跟踪阶段激光解码的任务是完成后续编码到达时刻的判断和波门设置。

确定接收的脉冲信号在编码序列中的位置后,导引头进入锁定跟踪阶段,编码信号的锁定是借助时间波门技术[9]实现的。在该阶段,导引头根据预设编码序列确定后续编码到达的时刻,并将该时刻设置为时间波门的中心。通过采用时间波门技术,导引头仅处理波门内的脉冲信号,有效排除了干扰信号,提高了抗干扰能力。对于实时波门,波门宽度一般为 10~50 μs。

2.2.2 高重频激光对编码锁定阶段的干扰概率模型

由于该阶段采用了时间波门技术,激光高重频干扰的效果取决于整个制导周期内干扰信号进入波门的个数及其与制导信号的关系。高重频激光脉冲间隔是相等的,每一个脉冲到达导引头的时刻是确定的,因此可以根据制导信号与高重频信号到达导引头的时间关系来评估干扰效果。

以重复频率为 a 的高重频信号干扰波门宽度为 t_{gate} 的导引头为例,采用首脉冲检测准则,假设正确的制导信号到达波门的时刻为 T_{true},则高重频信号能有效干扰需要满足的条件为:

$$\begin{cases}T_{true}-k/a\leqslant t_{gate}/2\\ k/a\leqslant T_{true}\leqslant(k+1)/a\end{cases} \tag{5}$$

式中:k 为正整数,高重频信号 a 的单位为 kHz,T_{true}、t_{gate} 的单位为 ms。

用公式(5)对整个制导周期的脉冲进行计算,可得到整个制导周期内形成有效干扰的高重频信号个数 m,假设整个制导周期的脉冲个数为 M,则重复频率为 a 的高重频激光对导引头干扰成功的概率为:

$$P(a)=\frac{m}{M} \tag{6}$$

$P(a)$越大说明干扰成功的高重频信号个数越多,对激光制导武器的干扰效果就越好。

3 高重频激光干扰效果仿真

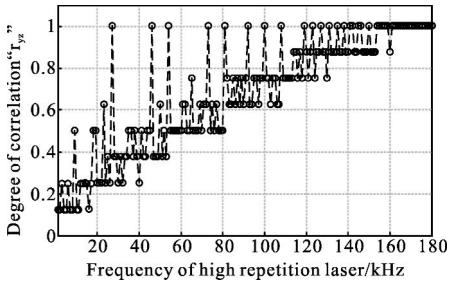
根据上述理论分析及建立的模型,分别对搜索识别阶段和锁定跟踪阶段的高重频激光干扰效果进行仿真验证,并通过仿真结果分析高重频激光干扰机理。

3.1 干扰效果仿真

3.1.1 对搜索识别阶段的干扰仿真

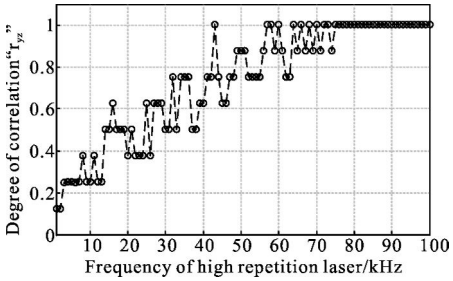
导引头对编码的识别，实际上是通过对编码脉冲间隔的匹配实现的，因此高重频干扰实质上就是高重频脉冲间隔与编码脉冲间隔的匹配。根据文中对编码间隔的分析,二间隔码、有限位随机周期码均可看作 LFSR 状态码的特例,故选择 LFSR 调制码和 LFSR 状态码进行干扰效果仿真。两种编码采用的移位寄存器的时钟周期 ΔT_0=49.63 ms,LFSR 状态码的时间基元 Δt=0.1 ms。

仿真结果如图 2 所示，取 A=8 研究了不同重复频率的高重频激光对两种编码的干扰效率。其中图 2(a)采用 LFSR 调制码,离散化时间宽度b=0.005 ms；图 2(b)采用 LFSR 状态码,离散化时间宽度 b=0.01 ms；图 2(c)采用 LFSR 状态码,离散化时间宽度 b=0.005ms。



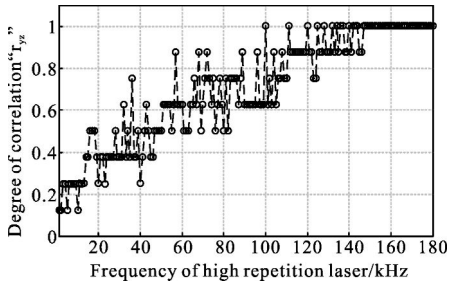
(a) LFSR 调制码,b=0.005 ms

(a) Code producing by LFSR′s modulation, b=0.005 ms



(b) LFSR 状态码,b=0.01 ms

(b) Code producing by LFSR′s status, b=0.01 ms



(c) LFSR 状态码,b=0.005

(c) Code producing by LFSR′s status, b=0.005

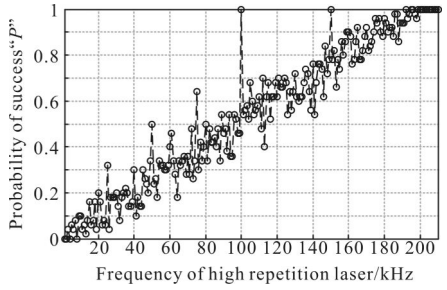
图 2 高重频激光与不同编码的互相关度

Fig.2 Relevance degree between high-repetition laser and different codings

由图 2 可知，高重频干扰激光的重复频率越高,对导引头识别编码信号的干扰效果越好。通过图 2(a)、图 2(c)对比可知,高重频激光对不同类型的激光编码识别的干扰效果是不同的，对脉冲间隔比较单一的激光编码的干扰效果较好，较低重复频率下即可达到 100%干扰,如图 2(a)中的 27 kHz、46 kHz、56 kHz；激光编码的脉冲间隔越混乱、伪随机性越大、干扰效果越差。由图 2(b)、图 2(c)对比可知,高重频激光干扰导引头识别编码的效果与离散化时间宽度 b 有关,干扰效果随着 b 的减小而降低;当高重频激光频率达到一定值时,可以 100%干扰导引头对编码的识别,这一频率值与离散化时间宽度有关。

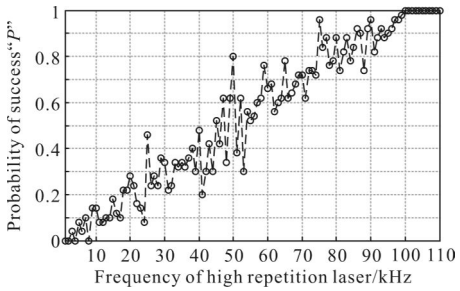
3.1.2 对锁定跟踪阶段的干扰仿真

通过上述 2.2 节分析可知,锁定阶段不需要考虑编码方式，仅通过判断设置波门后干扰脉冲与制导信号的时间关系即可得出干扰概率，故在仿真中仅采用了 LFSR 状态码，分别设置波门宽度为 10 μs、20 μs,仿真结果如图 3 所示。



(a) 波门宽度 10

(a) Width of the time-gate is 10



(b) 波门宽度 20

(b) Width of the time-gate is 20

图 3 高重频激光在不同波门宽度下的干扰成功概率

Fig.3 Success probability of high-repetition laser jamminig with different widths of time-gate

由图 3(a)、图 3(b)可知,随着高重频激光重复频率的增加，干扰成功概率不断增大；波门设置的越窄,干扰效果越差。图 3(a)中,当重复频率为 100 时干扰成功概率为 100%,原因在于编码间隔最小单位为 0.01,而 100 的高重频脉冲间隔也为 0.01。

研究还发现,对于特定的干扰频率,干扰成功概率还受编码匹配成功时间以及高重频干扰脉冲发射时间影响，这种影响是由于改变了锁定跟踪阶段制导信号及高重频干扰信号到达导引头的时间造成的，但这种影响并不改变干扰概率随重复频率的增加而增大这一趋势。

3.2 频率影响因素的机理分析

由仿真结果可知，搜索识别阶段高重频激光干扰效果主要受干扰激光频率、离散化时间宽度、编码类型影响，从本质上来说这一结果与该阶段的干扰机理有关。搜索识别阶段的干扰效果,实际上取决于指示激光与高重频干扰激光的匹配程度，也就是二者的脉冲间隔是否成整数倍关系：当成整数倍关系时,可完全匹配;当不成整数倍关系时,二者的相位不断变化,造成在进行相关识别时部分匹配成功。

上述两种情况也对应了高重频对导引头编码识别的两种干扰效果:一是完全干扰导引头识别,使得导引头将高重频信号识别为制导信号；二是导引头对编码的识别出现混乱,无法正确提取出编码信号,使得导引头一直处于搜索识别阶段而没有制导信号输出。

在锁定跟踪阶段,由于不存在相关识别的过程,因此干扰的关键就是干扰信号能否进入波门并且与制导信号具有某种确定的时间关系，该阶段干扰效果的主要影响因素是干扰激光频率和导引头设置的波门宽度。

通过两阶段的仿真结果可以看出:高重频激光干扰对搜索识别阶段的干扰效果要优于锁定跟踪阶段,原因在于前者离散化后进行了滑动相关,增强了干扰信号与预设编码匹配的概率;频率因素是影响高重频激光干扰效果的重要因素之一,当高重频激光干扰频率达到一定值后,两阶段均可达到 100%干扰。

4 结束语

通过分析激光导引头工作原理，研究了高重频激光对导引头解码过程的干扰效果，其中干扰激光的频率是最重要的影响因素之一，频率越高干扰效果越好;同时,编码识别时的离散化时间宽度、编码类型，编码锁定时的波门宽度对干扰效果也有较大影响。高重频激光对编码识别的干扰效果更为明显,且可搭配告警系统进行超前干扰，凸显出其相比于角度欺骗干扰的独特优势。

对于编码识别,离散化时间宽度越小,抗干扰能力越强。因此导引头内部电路对脉冲信号的分辨识别能力、采样速度和处理速度也是影响高重频激光干扰效果的因素。同时,由于导引头敏感的是脉冲能量，要提高干扰效果，除了提高干扰激光器输出频率，提高单脉冲输出功率也是另外一个重要影响因素,需要在后续的研究中进行分析。

参考文献:

[1] Zhu Chencheng, Nie Jinsong, Tong Zhongcheng. Analsis 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

[2] Zhang Hengwei, Zhao Wei, Ji Xiang, et al. Jamming effect of the high repetition frequency laser to the laser seeker[J]. ***Elector-Optic Technology Application***, 2009, 24(1): 26-28, 45. (in Chinese)
张恒伟, 赵威, 冀翔, 等. 高重频激光对激光导引头的干扰效果[J]. 光电技术应用, 2009, 24(1): 26-28, 45.

[3] Huang Feng, Wang Yuefeng, Wang Jinyu, et al. Study on application of high-repetition-rate solid state lasers in photoelectric countermeasure [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2003, 32(5): 465-467. (in Chinese)
黄峰, 汪岳峰, 王金玉, 等. 高重频固体激光器在光电对抗中的应用研究[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(5): 465-467.

[4] Zhou Zhongliang, He Yongqiang, Zhou Bing, et al. Study on identification technique of guiding laser code information[J]. ***Laser & Infrared***, 2011, 41(6): 660-663. (in Chinese)
周中亮, 何永强, 周冰, 等. 制导激光编码信息识别技术研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(6): 660-663.

[5] 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)

魏文俭. 激光制导光电对抗半实物仿真关键技术与系统研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.

[6] Xue Jianguo, Chen Yong. Research on the jamming effect of the high repetition laser to the laser guidance [J]. ***Aero Weaponry***, 2006, 3(6): 30–32. (in Chinese)
薛建国, 陈勇. 高重频激光对激光导引头的干扰研究[J]. 航空兵器, 2006, 3(6): 30–32

[7] Cheng Yubao, Nie Jinsong. Method to solving laser–coded period by autocorrelation[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 37(S): 214–217. (in Chinese)
程玉宝, 聂劲松. 激光编码周期的自相关解算[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S): 214–217

[8] Wang Tingfeng. Study on photoelectric detection technique and information identification technique for countermeasuring tunable laser guidance weapon [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2005: 67–72. (in Chinese)
王挺峰. 对可调谐激光制导武器的光电探测与信息识别技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005: 67–72.

[9] 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)
邢晖, 雷萍, 马娜. 激光导引头时序抗干扰技术分析及实验[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 461–465.