

高重频激光对不同编码体制的干扰效果研究

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:针对高重频激光干扰与不同激光编码之间关系的研究不够深入这一问题,采用归一化互相关函数法,量化分析了高重频激光干扰在搜索识别阶段对不同编码体制的干扰效果。仿真结果表明,高重频激光对不同编码体制的干扰效果存在差异;重复频率高于120kHz时,对所有编码体制的干扰概率几乎均为100%,各编码体制间无明显差别。

关键词:激光干扰;高重频;编码体制;干扰效果

中图分类号: TN977 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2014.04.014

Research on the effect of high-repetition-frequency laser jamming on different coding systems

ZHAO Qian, LIU Zhi-guo, WANG Shi-cheng, ZHANG Shuai
(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: Focusing on the fact that the study of high-repetition-frequency laser jamming to different coding systems is little, the normalized cross-correlation function is adopted to quantify the effect of high-repetition-frequency laser jamming on different coding systems in classification process. Simulation results indicate that the effect of high-repetition-frequency laser jamming to different coding systems exists differences; When the laser frequency exceeds 120kHz, the efficiencies of the jamming to different coding systems are almost 100% and there is no significant difference between the coding systems.

Key words: laser jamming; high-repetition-frequency; coding system; jamming effect

1 引 言

激光制导半主动寻的武器由于其制导精度高、成本低、结构简单、抗干扰能力强^[1]等特点,在精确制导武器中所占比重越来越大。同时,作为激光半主动寻的制导武器实现同时攻击多目标和提高抗干扰性^[2]的重要手段,各军事大国均大力发展激光编解码技术。

随着较为复杂的编码技术和先进的窄波门技术的发展,激光制导武器的抗干扰能力越来越强^[3]。角度欺骗干扰作为目前最主要的激光有源干扰方式,其快速识别编码规律,并在波门开放的短暂时间内进入波门,形成有效干扰越来越困难。因此,高重频激光干扰作为一种全新的光电对抗方式,无需对敌方激光脉冲信号进行编码识别和复制就能使假目

标信号进入敌方信号处理系统,大大提高了对抗的主动性和适应能力^[4],逐渐成为一种非常有效的干扰方式,受到越来越多的重视和研究。

目前高重频激光干扰的研究主要集中在作用机理、关键参数、实施方式、工作模式等方面,而高重频激光干扰对不同编码体制干扰效果的研究较少且分析的编码体制不够全面^[5]。本文采用一种新的评估方法——归一化互相关函数法来描述高重频激光干扰对不同编码体制的干扰效果。根据仿真实验结果,分析高重频激光对不同编码体制的干扰机理,为提高高重频激光干扰效果提供依据。

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。E-mail: zhaopian_cool@163.com

收稿日期: 2013-08-23

2 高重频激光干扰

高重频激光干扰可分为欺骗式干扰和压制式干扰两种工作模式,目前大部分文献中所提到的高重频激光干扰是欺骗式高重频激光干扰,它是指采用高重频激光器作为激光干扰源,通过直接向激光导引头发射或者由激光导引头视场内的假目标反射的方式,使脉冲重复频率足够高的高重频激光脉冲进入激光导引头的时域波门内,将制导信号淹没在干扰信号中,使激光导引头对目标检测的不确定性增加,目标信息的截获概率降低,致使激光制导武器因提取不出信息而迷盲,或提取错误信息而被引偏,从而达到干扰作用^[6-8]。

激光高重频干扰的关键是在激光导引头的有限波门宽度内进入的干扰信号数目及其相对于制导信号的时间关系^[7]。由于高重频激光器的工作重复频率通常在 1kHz 以上^[9],波门宽度的设置一般为几十微秒,故高重频激光干扰信号很容易进入波门,特别是在波门设置较宽的导引头搜索识别阶段。要形成有效干扰,进入波门的干扰激光还需要满足波长、脉宽、峰值功率、能量等条件^[8]。受激光器功率限制,高重频干扰激光的发射方式通常为直瞄式。

3 常用激光编码

激光编解码技术,是激光半主动制导武器对抗激光有源干扰的核心技术,国内外的研究都非常重视且高度保密。从公开发表的文献看,目前提出的激光编码方法主要有以下几种^[2-3,10-12]:精确频率码、脉冲调制码、二间隔码、等差型编码、伪随机码等。

3.1 精确频率码

精确频率码是指编码的激光脉冲间隔 ΔT_0 在整个照射周期内固定不变。其脉冲序列由下式给出:

$$t_i = t_1 + \Delta T_0 \times (i - 1) \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

则精确频率码的脉冲间隔序列:

$$\Delta T = \{\Delta T_n\} = \Delta T_0 \Delta T_0 \Delta T_0 \dots \quad (2)$$

3.2 脉冲间隔码(PCM)

又称脉冲调制码,是指对一定重复频率脉冲序列的激光信号进行调制的编码。通过调制,使某个应该产生激光的脉冲不发射,产生方式是在固定位数的循环移位寄存器内设置好码型,然后在固定的时钟下循环移位。该码原则上讲是伪随机码的特例。

3.3 二间隔码

二间隔码是指采用两个时间间隔 T_1 和 T_2 ($T_1 + T_2 = 2T_0$),使激光脉冲整个照射周期内按重复间隔 T_0

的规律周期变化的编码。若 T_1 为奇数激光脉冲的时间间隔, T_2 为偶数激光脉冲的时间间隔,则其脉冲序列由下式给出:

$$X_n = \frac{1 - (-1)^n}{2} \times \left[(T_1 + T_2) \times \frac{n+1}{2} - T_2 \right] + \frac{1 - (-1)^n}{2} \times (T_1 + T_2) \times \frac{n}{2} - a \times T \quad (3)$$

式中, $n = 1, 2, 3, \dots$, $a = 0, 1$, 且 $a = 0$ 表示首次脉冲相遇是小间隔脉冲, $a = 1$ 表示首次相遇是大间隔脉冲。

3.4 有限位随机周期码

其特点是在同一个周期内,各脉冲间隔是随机的。产生该编码采用的可能方法是在信源中随机选取 n 个脉冲间隔组成一组编码。该编码与 PCM 编码的不同之处在于脉冲间隔没有明显的依赖性,但具有较强的重复性。

比较有代表性的是美国采用的脉冲重复频率 (PRF) 编码,通常为 3~4 位,采用八进制表示,1~8 代表 8 个不同的时间间隔。

3.5 等差型编码

等差型编码是指各个脉冲间隔具有某种趋势,例如从大到小或从小到大,脉冲间隔具有一定规律但全程不循环的编码方式。例如,首脉冲间隔为 T_0 的等差型两种编码如下:

$$\text{等差递增: } T_0, T_0 + \Delta t, T_0 + 2\Delta t, \dots \quad (4)$$

$$\text{等差递减: } T_0, T_0 - \Delta t, T_0 - 2\Delta t, \dots \quad (5)$$

3.6 伪随机码

伪随机码实质上是在一固定的有限位移寄存器内设置好起始码型,并将输出经过反馈函数反馈到寄存器中,使编码的周期不循环,既具有随机码的性质,又具有一定的规律性。该方法产生的编码称为 LFSR 调制码,其与 PCM 码的不同之处在于移位寄存器具有反馈函数,周期得到极大扩展。对于伪随机码的干扰,通常识别出最小周期,而后进行准同步干扰或高重频干扰。

为了增强抗干扰性,目前还有一种编码,称为 LFSR 状态码,即采用线性反馈移位寄存器的每个时刻的状态 $a^{(i)} = (a_1 a_2 \dots a_8)^{(i)}$ 进行编码,形成脉冲间隔序列 $\Delta T = \{\Delta T_n \mid n \geq 1\}$,具体编码方法为:

$$\Delta T_n = \Delta T_c + \Delta t_u \times [a^{(n)}]_{2 \rightarrow 10} \quad (6)$$

式中, ΔT_c 为常值; Δt_u 为编码时间单元; $[\cdot]_{2 \rightarrow 10}$ 表示二进制转换为十进制运算。

4 干扰效果分析

激光解码分为两个过程:搜索识别过程和锁定

跟踪过程。下面对搜索识别过程中高重频激光干扰对不同编码体制的干扰效果进行定量分析。

4.1 干扰概率模型的建立

激光编码具有唯一可译性,即其脉冲间隔子序列的自相关函数等于1。根据激光编码的这一特性,文献[12]提出了滑动匹配相关的解码思想,即要实现激光编码的识别,制导脉冲间隔序列 $\Delta T^{(l)}$ 与激光编码的脉冲间隔序列 ΔT 的某一子序列 $\Delta T^{(l)}$ 的互相关函数满足解码方程:

$$C_{\Delta T^{(l)} \Delta T^{(l)}}(0) = \frac{1}{n+1} \sum_{j=i}^{i+n} \Delta T_j \oplus \Delta T_j' = 1 \quad (7)$$

故若高重频激光干扰在搜索识别过程中能够有效干扰激光编码,则高重频激光干扰信号与激光编码信息满足解码方程。设激光编码信息采样后为 $x(n)$, 激光高重频干扰信号采样后为 $y(n)$, 定义二者的归一化互相关函数:

$$r_{xy}^1 = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n) \quad (8)$$

式中, N 为数字相关器的长度; M 为数字相关器长度内包含的激光编码脉冲个数。

则式(8)可以用来描述高重频激光干扰与激光编码之间的对抗效果,即高重频激光干扰信号与激光编码信号的归一化互相关函数越接近于1,则干扰效果越好;反之则干扰效果越差。

4.2 干扰效果的定量分析

以第3节介绍的几种激光编码为例,利用式(8)所得归一化互相关函数,定量分析不同高重频激光干扰对各激光编码的干扰概率。在仿真中,假设高重频激光满足波长、脉宽、功率等条件,取解码方程参数为 $M=6$, 采样周期为 0.01 ms 。

4.2.1 对精确频率码的干扰效果

取频率为 97.38 ms 的精确频率码,则归一化互相关函数如图1所示。

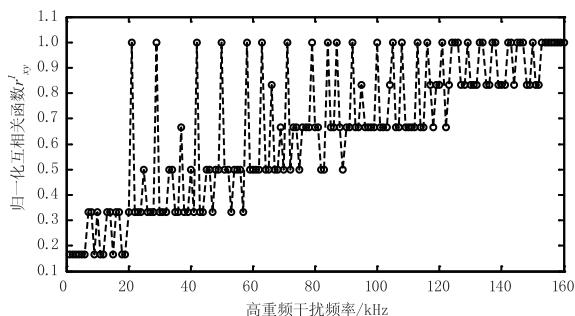


图1 对精确频率码的干扰效果

Fig. 1 Jamming effect to precise frequency code

由图1可知,高重频激光干扰的重复频率越高

干扰效果越好,且在较低重复频率下仍能达到较好的干扰效果。如在 21 kHz 时归一化互相关函数为1,即在搜索识别段高重频激光干扰以该重复频率可完全干扰此精确频率码。由此可知,高重频激光干扰对精确频率码的干扰效果较好。根据仿真结果,对精确频率码的干扰可采用较低频率,干扰效果较好且降低了对高重频激光器的要求。

4.2.2 对PCM码的干扰效果

取重复频率为 20.54 Hz 的 1001011 码型的7位脉冲间隔码,则归一化互相关函数如图2所示。

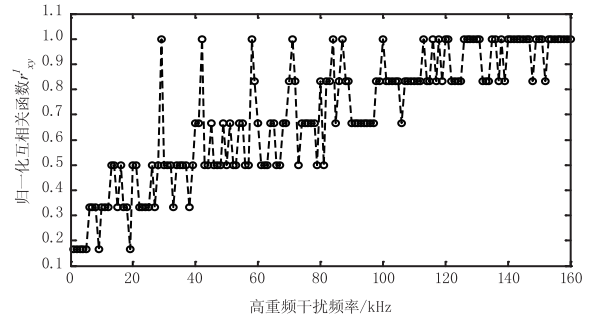


图2 对PCM码的干扰效果

Fig. 2 Jamming effect to PCM code

由图2可知,高重频激光干扰对PCM码的干扰效果与精确频率码有相同趋势,干扰效果较好,原因在于PCM码循环时采用的时钟基数是确定的,其脉冲间隔是时钟基数的整数倍。低于 80 kHz 的高重频干扰效果要差于对精确频率码的干扰,但仍可通过技术手段识别编码周期后,以较低重复频率达到较好的干扰效果,如图2中的 30 kHz 对该时钟基数下的PCM码可完全干扰。

PCM码在原则上讲属于LFSR调制码的特例,而在搜索识别段采样较短,高重频激光干扰对LFSR调制码的干扰概率与PCM码的干扰效果无明显差异。

4.2.3 对二间隔码的干扰效果

取两个时间间隔分别为 $T_1 = 97.38$, $T_2 = 99.57$, 则归一化互相关函数如图3所示。

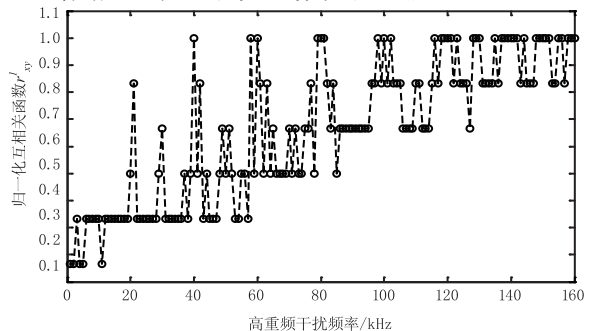


图3 对二间隔码的干扰效果

Fig. 3 Jamming effect to two interval code

由图3可知,高重频激光干扰对二间隔码的干

扰仍可以较低重复频率达到较好的干扰效果。由于采用了两个毫不相关的时间间隔,高重频激光干扰对其的干扰效果要差于精确频率码。

4.2.4 对有限位随机码的干扰效果

设有限位随机周期码共有 4 个脉冲间隔,分别为 97.38 ms, 99.57 ms, 90.53 ms 和 94.68 ms, 则归一化互相关函数如图 4 所示。

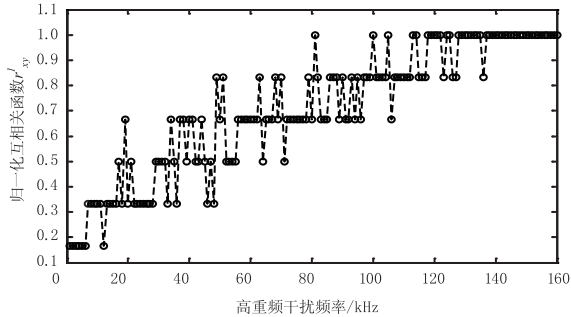


图4 对有限位随机码的干扰效果

Fig. 4 Jamming effect to limited random code

由图 4 可知,高重频激光干扰对四位有限位随机码的干扰效果较差,重复频率达到 110 kHz 以上才能达到较好的干扰效果。与图 1、图 3 对比可知,随着不相关间隔的增加,高重频激光干扰的效果会变差。

4.2.5 对等差型编码的干扰效果

等差型编码有等差递增型和等差递减型两种,仿真中采用等差递增型编码,取等差型编码的首脉冲间隔 ΔT 为 97.38 ms, Δt 为 0.1 ms, 则归一化互相关函数如图 5 所示。

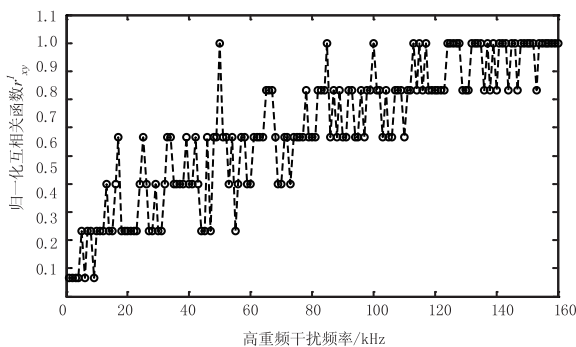


图5 对等差递增型编码的干扰效果

Fig. 5 Jamming effect to arithmetic increasing code

由图 5 可知,高重频激光干扰对等差递增型编码的干扰要得到较好的效果,所需重复频率较高。虽然等差递增型编码规律性较强,但其时间间隔一直在变化,其抗高重频激光干扰效果较好。等差递减型编码具有相同的规律。

4.2.6 对 LFSR 状态码的干扰效果

取重复频率为 20.5 4Hz、初始状态为 10100100、反馈函数为 $f(x_1, x_2, \dots, x_8) = x_1 + x_3 + x_4$

+ x_5 的移位寄存器产生 LFSR 状态码,则归一化互相关函数如图 6 所示。

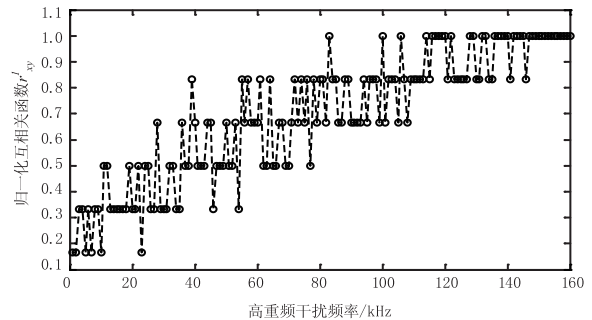


图6 对 LFSR 状态码的干扰效果

Fig. 6 Jamming effect to LFSR status code

由图 6 可知,高重频激光干扰对 LFSR 状态码的干扰与对有限位随机码的干扰效果相近。原因在于仿真中选取的解码方程参数 $M = 6$, LFSR 状态码有六个不同的间隔,有限位伪随机码随机间隔有四个,二者相差较小。当采样长度增加时, LFSR 状态码由于每个时间间隔都不同,其对抗高重频激光干扰的效果将优于有限位随机码。

5 结束语

本文以归一化互相关函数为评判指标,定量分析了高重频激光干扰在搜索识别段对不同编码体制的干扰效果。仿真结果表明,高重频激光干扰对不同编码体制的干扰效果不同,对精确频率码及二间隔码的干扰效果较好,采用较低的重复频率即可达到较好的干扰效果;高重频激光干扰的效果取决于脉冲间隔的随机性,随机性越强干扰效果越差。对于有限位随机码及等差型编码,虽然在仿真中抗干扰效果较好,但由于存在周期短和规律性强的特点,很容易被识别,高重频激光干扰对二者的干扰效果可进一步增强;PCM 码与 LFSR 调制码形成的脉冲间隔为时钟基数的整数倍,也容易被识别以增强高重频激光干扰效果;LFSR 状态码循环周期长、脉冲间隔具有随机性,高重频激光干扰效果较差,在今后研究中要加强对该编码干扰方法的研究。

研究还发现,高重频激光干扰的重复频率越高,干扰效果越好,对不同编码体制干扰概率大小的差异主要体现在 120 kHz 以下,当重复频率达到 120 kHz 以上时,对所有编码干扰概率均为 100% 且各编码体制之间无明显差别;不同重复频率对编码的干扰效果不同,采样频率越低、采样长度越长,高重频激光干扰效果越差。通过仿真结果,还可根据不同编码体制选择较低频率的高重频,在降低对激光器要求的同时达到较好的干扰效果。

参考文献:

- [1] GAN Yuanliu, WANG Xiaofei. Development and analysis of the laser guided weapon [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37 (Supplement): 280 - 283. (in Chinese)
 淦元柳, 王晓飞. 激光制导武器的发展动向与分析 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37 (增刊): 280 - 283.
- [2] 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)
 魏文俭, 秦石乔, 战德军, 等. 激光半主动寻的制导激光编码的研究 [J]. 激光与红外, 2008, 38 (12): 1199 - 1203.
- [3] ZHOU Zhongliang, HE Yongqiang, ZHOU Bing, et al. Study on identification 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.
- [4] HUANG Feng, WANG Yuefeng, WANG Jingyu, 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. 高重复频率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.
- [5] XUE Jianguo, CHEN Yong. Research on the jamming effect of the high repetition laser to the laser guidance [J]. Aero Weaponry, 2006, (3): 30 - 32. (in Chinese)
 薛建国, 陈勇. 高重复频率激光对激光导引头的干扰研究 [J]. 航空兵器, 2006, (3): 30 - 32.
- [6] 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)
 李慧, 李岩, 刘冰峰, 等. 激光干扰技术现状与发展及关键技术分析 [J]. 中国激光, 2011, 48: 081407.
- [7] ZHANG Hengwei, ZHAO Wei, JI Xiang, et al. Jamming effect of the high-repetition-frequency laser to the laser seeker [J]. Electro-Optic Technology Application, 2009, 24 (1): 26 - 28. (in Chinese)
 张恒伟, 赵威, 冀翔, 等. 高重复频率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.
- [8] 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)
 朱陈成, 聂劲松, 童忠诚. 高重复频率激光干扰模式的分析 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38 (6): 1060 - 1063.
- [9] LI Shimin, HUANG Weiling. Principles and design of laser apparatus [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
 李适民, 黄维玲. 激光器件原理与设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [10] JU Yangfeng, MA Baoqiang, YAO Mei, et al. Encoding and jamming technology for laser guidance signal [J]. Electronics & Optics Control, 2007, 14 (1): 85 - 87. (in Chinese)
 巨养锋, 马宝强, 姚梅, 等. 激光制导信号的编码和干扰技术 [J]. 光电与控制, 2007, 14 (1): 85 - 87.
- [11] YING Jiaju, HE Yongqiang, ZHOU Zhongliang, et al. A method for decoding laser-pulse series based on autocorrelation matrix statistic [J]. Electro-Optic Technology Application, 2009, 24 (4): 10 - 12. (in Chinese)
 应家驹, 何永强, 周中亮, 等. 基于差分自相关矩阵的激光脉冲编码识别 [J]. 光电技术应用, 2009, 24 (4): 10 - 12.
- [12] 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及系统研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.