doi: 10.11809/bqzbgcxb2022.07.034

# 激光角度欺骗和高重频复合干扰有效概率研究

## 卢 硕1,2,霍子民1,2,储海荣1

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033; 2. 中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**针对处于锁定跟踪阶段的导引头,采用激光角度欺骗和高重频复合干扰手段,对复合干扰下导引头波门录取 信号进行了研究。建立了半主动激光制导系统的能量传输模型,描述了角度欺骗干扰、高重频干扰以及两者复合的 基本原理;分析了无干扰时、角度欺骗干扰和高重频干扰下连续2个波门录取干扰信号的概率。以角度欺骗超前时 间为仿真变量,分析了角度欺骗和高重频复合干扰下波门录取高重频信号的概率。参数对照仿真结果表明,提高制 导信号和角度欺骗干扰信号的精度,增加波门宽度,提高高重频激光脉冲频率会增大复合干扰中高重频干扰成功的 概率。本研究成果将为复杂战场条件下激光制导干扰与抗干扰应用研究提供参考。

关键词:复合干扰;角度欺骗干扰;高重频干扰;波门;联合概率分布密度函数

**本文引用格式:**卢硕, 霍子民, 储海荣. 激光角度欺骗和高重频复合干扰有效概率研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(07): 223-233.

**Citation format**: LU Shuo, HUO Zimin, CHU Hairong. Research on effective probability of laser deception and high repetitive frequency compound jamming[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(07): 223 - 233.

中图分类号:TN972 文献标识码:A 文章编号:2096-2304(2022)07-0223-11

## Research on effective probability of laser deception and high repetitive frequency compound jamming

LU Shuo<sup>1,2</sup>, HUO Zimin<sup>1,2</sup>, CHU Hairong<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Laser seeker usually adopts anti-jamming technologies such as real-time wave gate and first/last pulse locking. Aiming at the seeker in the locked tracking stage, laser angle deception and high repetition frequency compound jamming were used to study the acquisition signal of seeker wave gate under compound jamming. The energy transmission model of semi-active laser guidance system was established, and the basic principles of angle deception jamming, high repetition rate jamming and their combination were described. Then, the probability of two consecutive wave gates taking jamming signals without interference, angle deception jamming and high repetition rate jamming was analyzed. Taking the lead time of angle deception as a simulation variable, the probability that the wave gate picks up the high repetition rate signal under the combined interference of angle deception and high repetition rate was analyzed. Parameter comparison simulation results show that improving the precision of guidance signal and angle deception jamming signal, increasing the width of wave gate and increasing the frequency of high repetition frequency laser pulse will increase the probability of success of high repetition frequency jamming in

收稿日期:2021-09-16;修回日期:2021-10-18

基金项目:中国科学院国防科技创新基金项目(CXJJ-19S014)

作者简介:卢硕(1997—),男,硕士研究生,E-mail:lushuo19@mails.ucas.ac.cn。

通信作者:储海荣(1983—),男,博士,博士生导师,E-mail:chuhr@ciomp.ac.cn。

compound jamming. The research results will lay a theoretical foundation for the application research of laser guided jamming and anti-jamming under complex battlefield conditions.

Key words: compound interference; angle deception interference; high repetition frequency interference; wave gate; joint probability distribution density function

## 1 引言

激光干扰技术在现代复杂战争中对抗激光制导导弹发 挥重要作用。因此,国内研制具备作战能力的激光武器系 统。比较典型的激光武器系统如 LW-30 车载激光防御武器 系统、SD-10A 激光净空系统、"保镖"激光制导导弹干扰系统 等。LW-30车载激光防御武器系统具备输出不同激光照射 功率的作战能力,既能用高能激光束从25 km 外摧毁目标, 也能以低功率工作模式照射敌方激光制导导弹。SD-10A 激 光净空系统可实现军民两用,既能用高能激光精准打击无人 机,又能用较低功率驱赶机场跑道附近的鸟类。"保镖"激光 制导导弹干扰系统可采用的手段包括采用激光假目标欺骗、 烟幕屏障等[1-2]。国外典型的激光武器系统包括美国自防 御激光演示系统(SHiELD)、俄罗斯"佩列斯韦特"激光武器 系统等。美国自防御激光演示系统(SHiELD)采用带有光束 控制系统的激光武器吊舱,在2019年4月完成地面演示样 机的对空导弹打靶实验。俄罗斯"佩列斯韦特"激光武器系 统中激光器采用大能量脉冲工作模式,对敌方低轨光学侦察 卫星的光学传感器造成短时致眩或永久致盲[3-4]。激光武 器系统中常用的有源干扰技术是激光角度欺骗干扰和激光 高重频干扰。激光导引头常用的抗干扰技术包括编码技术、 时间波门技术和首/末脉冲锁定技术<sup>[5]</sup>。虽然文献[6]中指 出高重频对激光导引头搜索识别的阶段要好于锁定跟踪阶 段,但是,对处于锁定跟踪阶段的导引头采用激光角度欺骗 和高重频复合干扰仍然具有重要意义。文献[7]中指出角度 欺骗干扰后若实时波门受到牵引,干扰信号和制导信号联合 概率密度函数会变化,继而影响对激光信号探测的概率。文 献[8]中分析激光角度欺骗干扰系统干扰全过程并给出角度 欺骗干扰作战效能的计算方法。文献[9]中以成功诱偏波门 数作为评价高重频干扰效能的指标。文献[10]中指出波门 内高重频脉冲数决定高重频激光第一个脉冲信号超前制导 信号概率。从以上可以看出,现有文献研究重点均放在单干 扰方式对激光导引头和激光制导导弹弹道的影响,缺乏复合 干扰效果分析。对处于锁定跟踪阶段的导引头采用激光角 度欺骗和高重频复合干扰,使这两类干扰信号同时进入激光 导引头波门,波门有可能将其中一类干扰信号当成制导信号 处理。但是,两类干扰信号的同时存在使得波门录取信号的 情况更加复杂。因此,有必要从研究激光角度欺骗、高重频 干扰单干扰方式对波门的影响出发,研究复合干扰方下对激 光制导导引头波门录取各类信号的概率,为研究复合干扰方 式对激光制导导弹弹道的影响打下基础。

## 2 激光能量传输建模及复合干扰原理

机载照射器发出的激光能量经过照射器到目标的传输、 目标表面发生漫反射、目标到导引头的传输后发生衰减,半 主动激光制导系统原理图如图1所示。



图1 半主动激光制导系统原理图

Fig. 1 Schematic of semi-active laser guidance system

可采用公式计算激光导引头入瞳处的能量[11]:

$$E_{rd} = \frac{1}{\pi R_2^2} E_t \tau_{aR_1} \tau_{aR_2} \rho \cos\varphi \cos\varepsilon \qquad (1)$$

式中: $E_t$ 为机载照射器的脉冲激光能量; $\tau_{aR_1}$ 为照射器与目标 之间的大气激光透过率; $\tau_{aR_2}$ 为目标与激光导引头之间的大 气激光透过率; $\rho$ 为目标表面反射率; $\varphi$ 为照射器目标视线与 目标表面法线的夹角; $\varepsilon$ 为导引头光轴与目标表面法线的夹 角; $E_{rd}$ 为导引头入瞳处的激光能量密度。

激光角度欺骗干扰是激光告警器探测到指示激光器照射目标形成的漫反射激光回波后,测量出该回波的方向、波 长、脉冲重复频率等参数,激光信号综合处理器根据这些参 数生成干扰信号,然后由干扰激光器照射假目标并使其回波 被导引头接收,最后导引头将被引偏向假目标<sup>[12]</sup>,原理如图 2 所示。



図2 級九用及共調 1 九原建図 Fig. 2 Schematic of laser angle deception jamming

激光高重频干扰包括高重频压制式干扰和高重频欺骗 式干扰。高重频压制式干扰是指大量干扰脉冲进入波门后 形成阻塞干扰,导致信噪比严重降低,导引头无法提取制导 信号。高重频欺骗式干扰类似于激光角度欺骗干扰,高重频 欺骗式干扰持续干扰且有效,就能较好地将导引头引偏向干 扰源。本文中复合干扰主要讨论高重频欺骗式干扰,同时考 虑到高重频信号的频率较高,单脉冲信号能量较大,不能形 成持续干扰,故分析带有间隔周期的高重频干扰信号。

如图 3 所示,在角度欺骗干扰和高重频干扰复合干扰条 件下,激光导引头波门对制导信号、角度欺骗干扰信号、高重 频干扰信号 3 种信号的录取更加复杂,从概率的角度分析影 响复合干扰效果的主要因素:角度欺骗干扰中干扰信号超前 制导信号的超前时间、高重频干扰中高重频激光的频率和波 门宽度。



图 3 激光角度欺骗干扰和高重频干扰复合干扰原理图 Fig. 3 Schematic of complex of laser angle deception jamming and high-frequency interference

## 3 单干扰概率模型及仿真

#### 3.1 无干扰时波门录取制导信号的概率

设波门宽度为 $\tau$ ,制导信号时间间隔为 $\Delta T$ ,制导激光时 序标准差 $\sigma_x$ ,记制导信号在第一个波门出现的位置为随机 变量 $X_1$ ,依次类推。一般认为,制导信号在波门位置服从以 波门中心为期望的正态分布,记为 $X_1 \sim N(\tau/2, \sigma_x^2)$ 。 $X_1$ 的 概率密度函数:

$$f_{x_{1}}(x) = \frac{\exp\left(-\frac{(x-\tau/2)^{2}}{2\sigma_{x}^{2}}\right)}{\sqrt{2\pi}\sigma_{x}}$$
(2)

 $X_1$ 落在波门里的概率:

$$P(0 < X_{1} < \tau) = \int_{0}^{t} f_{X_{1}}(x) dx$$
 (3)

若在第一个波门中检测到制导信号位置为 $x_1$ ,实时波 门将以 $x_1$ 作为时间同步点开启第二个波门,则 $X_{11} \sim N(x_1 + \Delta T, \sigma_x^2)$ 。

#### 3.2 角度欺骗干扰成功概率

角度欺骗干扰信号超前时间为 Δt,干扰激光时序标准差

 $\sigma_y$ ,干扰信号在开始干扰后的第一个波门出现的位置为变量  $Y_1$ ,依次类推。 $X_1 \sim N(\tau/2, \sigma_x^2), Y_1 \sim N(\tau/2 - \Delta t, \sigma_y^2)$ 。由 于 $X_1$ 和 $Y_1$ 是相互独立的随机变量,所以二元随机变量  $(X_1, Y_1)$ 的概率密度函数 $f_{(X_1, Y_1)}(x, y)$ :

$$f_{(x_{1},y_{1})}(x,y) = f_{x_{1}}(x)f_{y_{1}}(y) = \frac{\exp\left(-\frac{(x-\tau/2)^{2}}{2\sigma_{x}^{2}}\right)\exp\left(-\frac{(y-\tau/2+\Delta t)^{2}}{2\sigma_{y}^{2}}\right)}{2\pi\sigma_{x}\sigma_{y}}$$
(4)

角度欺骗干扰信号和制导信号同时进入波门且干扰信号超前于信号,记为 P<sub>i11</sub>:

$$P_{j11} = \iint_{D} f_{(X_{1},Y_{1})}(x,y) \, dx dy$$
(5)

 $D = \{ (x,y) \mid x \in (0,\tau), y \in (0,\tau), y < x \}$ 

角度欺骗干扰信号在波门内且制导信号处于波门之外, 记为 *P*<sub>i12</sub>:

$$P_{j12} = \int_0^\tau f_{Y_1}(y) \, \mathrm{d}y (1 - \int_0^\tau f_{X_1}(x) \, \mathrm{d}x) \tag{6}$$

在前一波门录取制导信号,角度欺骗干扰后第一个波门 录取角度欺骗干扰信号概率为 $P_{i1} = P_{i11} + P_{i12}$ 。

如图 4 所示, 波门宽度  $\tau$  选取典型值 20  $\mu$ s、25  $\mu$ s、 30  $\mu$ s,制导激光时序标准差  $\sigma_x$ 取 3  $\mu$ s,干扰激光时序标准 差  $\sigma_y$ 取 4  $\mu$ s。仿真结果表明, 在前一波门录取制导信号的 条件下,当超前时间  $\Delta t$  为 0 时, 波门录取干扰信号的概率为 50%。当超前时间  $\Delta t$  为定值时, 波门越宽, 录取角度欺骗干 扰信号的概率越大。当波门宽度  $\tau$  为定值时,存在最优超前 时间, 使得录取角度欺骗干扰信号概率最大, 所以, 超前时间  $\Delta t$  取在最优超前时间附近, 小于波门宽度的一半。



图 4 前一波门求取前寺信亏时,波门求取 角度欺骗信号概率曲线



若在第一个波门中检测到制导信号位置为 $x_1$ ,角度欺骗干扰信号位置为 $y_1$ ,若 $y_1 < x_1$ ,第一波门将录取角度欺骗干扰信号,则下一波门中心为 $y_1 + \Delta T, X_{II}$ 的期望将滞后 波门中心,滞后值为 $X_1$ 的期望减去 $Y_1$ 的期望即 $\Delta t, X_{II} ~ N(y_1 + \Delta T + \Delta t, \sigma_x^2), Y_{II} ~ N(y_1 + \Delta T, \sigma_y^2)$ 。由于 $X_{II} \pi Y_{II}$ 是相互独立的随机变量,所以二元随机变量 $(X_{II}, Y_{II})$ 的概率 密度函数 $f_{(X_{II}, Y_{II})}(x, y)$ :

$$f_{(x_{\parallel}, y_{\parallel})}(x, y) = f_{x_{\parallel}}(x) f_{y_{\parallel}}(y) = \frac{\exp\left(-\frac{(x - y_1 - \Delta T - \Delta t)^2}{2\sigma_x^2}\right) \exp\left(-\frac{(y - y_1 - \Delta T)^2}{2\sigma_y^2}\right)}{2\pi\sigma_x\sigma_y}$$
(7)

$$P_{j I I 1} = \iint_{D} f_{(X_{I I}, Y_{I I})}(x, y) \, dx dy,$$

$$D = \left\{ \begin{pmatrix} (x, y) \\ y \in (y_{1} + \Delta T - \tau/2, y_{1} + \Delta T + \tau/2), \\ y \in (y_{1} + \Delta T - \tau/2, y_{1} + \Delta T + \tau/2), \\ x < y \end{cases} \right\}$$
(8)

$$P_{j||_{2}} = \int_{y_{1}+\Delta T-\tau/2}^{y_{1}+\Delta T+\tau/2} f_{Y_{\parallel}}(y) \, \mathrm{d}y \left(1 - \int_{y_{1}+\Delta T-\tau/2}^{y_{1}+\Delta T+\tau/2} f_{X_{\parallel}}(x) \, \mathrm{d}y\right)$$
(9)

在第一个波门录取角度欺骗干扰信号的条件下,第二个 波门内角度欺骗干扰成功的概率  $P_{jII} = P_{jII1} + P_{jII2}$ 。

如图 5 所示, 波门宽度  $\tau$  选取典型值 20  $\mu$ s、25  $\mu$ s、 30  $\mu$ s,制导激光时序标准差  $\sigma_x$ 取 3  $\mu$ s,干扰激光时序标准 差  $\sigma_y$ 取 4  $\mu$ s。仿真结果表明,在前一波门录取干扰信号的 条件下,超前时间  $\Delta t$  越大,干扰成功的概率越大。例如,当 波门宽度  $\tau$ 取 20  $\mu$ s 时,当超前时间  $\Delta t$  为 2  $\mu$ s 时,波门录取 干扰信号的概率为 64.9%;当超前时间为 5  $\mu$ s 时,波门录取 干扰信号的概率为 83.5%。



图5 前一波门录取角度欺骗信号时,波门录取 角度欺骗信号概率曲线

Fig. 5 Probability that wave gate records angle deception signal when previous wave gate records angle deception signal

#### 3.3 高重频干扰成功概率

高重频干扰信号频率为f,一个波门内高重频干扰信号 的个数为k,干扰激光时序标准差 $\sigma_z$ ,干扰信号首脉冲在高 重频干扰开始后第一个波门出现的位置为变量 $Z_1$ ,依次类 推。 $X_1 \sim N(\tau/2, \sigma_x^2), Z_1 \sim U(0, 1/f)$ 。由于 $X_1$ 和 $Z_1$ 是相 互独立的随机变量,所以二元随机变量( $X_1, Z_1$ )的概率密 度函数 $f_{(x_1, Z_1)}(x, z)$ :

$$f_{(x_{1},z_{1})}(x,z) = f_{x_{1}}(x)f_{z_{1}}(z) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{(x-\tau/2)^{2}}{2\sigma_{x}^{2}}\right) \\ \sqrt{2\pi}\sigma_{x} & f \\ 0 & \sharp \& \end{cases}$$
(10)

高重频干扰首脉冲信号和制导信号同时进入波门且干扰信号超前于信号,记为 *P*<sub>e11</sub>:

$$P_{c11} = \iint_{D} f_{(X_1, Z_1)}(x, z) \, \mathrm{d}x \mathrm{d}z, \tag{11}$$

 $D = \{ (x,z) \mid x \in (0,\tau), z \in (0,1/f), z < x \}$ 

高重频干扰首脉冲信号落在波门内,制导信号落在波门外,记为 *P*<sub>e12</sub>:

$$P_{cI2} = 1 - \int_{0}^{\tau} f_{X_{I}}(x) \,\mathrm{d}x \tag{12}$$

在第一个波门中录取高重频干扰信号的概率  $P_{c1} = P_{c11} + P_{c12}$ 。

如图 6 所示, 波门宽度  $\tau$  选取典型值 20  $\mu$ s、25  $\mu$ s、 30  $\mu$ s,制导激光时序标准差  $\sigma_x$ 取 3  $\mu$ s。仿真结果表明,当 波门宽度  $\tau$  一定时,高频激光周期 1/f 越大,干扰成功的概率 越低。当高频激光周期 1/f 一定时,波门宽度  $\tau$  越小,干扰成 功的概率越低。可归结为:波门内高重频干扰信号的个数 k越少,干扰成功的概率越低。



图6 前一波门录取制导信号时,波门录取 高重频信号概率曲线



若在第一个波门中检测到制导信号位置为 $x_1$ ,高重频 干扰信号首脉冲位置为 $z_1$ ,若 $z_1 < x_1$ ,第一个波门将录取高 重频干扰信号,则下一波门中心为 $z_1 + \Delta T$ , $X_{II}$ 的期望将滞 后波门中心,滞后值为 $X_I$ 的期望减去 $Z_I$ 的期望即 $\tau/2 - 1/(2f)$ ,则, $Z_{II} \sim U(z_1 + \Delta T - \tau/2, z_1 + \Delta T - \tau/2 + 1/f)$ 。由 于 $X_{II}$ 和 $Z_{II}$ 是相互独立的随机变量,所以二元随机变量 ( $X_{II}$ , $Z_{II}$ )的概率密度函数 $f_{(x_{II},Z_{II})}(x,z)$ :  $f_{(x_{II},Z_{II})}(x,z) = f_{x_{II}}(x)f_{Z_{II}}(z) =$ 

在第一个波门录取高重频干扰信号的条件下,第二个波 门中高重频干扰首脉冲信号和制导信号同时进入波门且干

扰信号超前于信号,记为 
$$P_{cIII}$$
:  
 $P_{cIII} = \iint_{D} f_{(X_{II},Z_{II})}(x,z) dxdz,$   
 $D = \left\{ (x,z) \begin{vmatrix} x \in (z_{I} + \Delta T - \tau/2, z_{I} + \Delta T + \tau/2), \\ z \in (z_{I} + \Delta T - \tau/2, z_{I} + \Delta T - \tau/2 + 1/f), \\ z < x \end{vmatrix}$ 
(14)

高重频干扰首脉冲信号落在波门内,制导信号落在波门 外,记为 *P*<sub>cll2</sub>:

$$P_{c \parallel 2} = 1 - \int_{z \parallel + \Delta T - \tau/2}^{z \parallel + \Delta T - \tau/2} f_{X \parallel}(x) \, \mathrm{d}x \tag{15}$$

在第一个波门录取高重频干扰信号的条件下,第二个波门仍然录取高重频干扰信号的概率为 $P_{ell} = P_{ell1} + P_{ell2}$ 。

如图 7 所示, 波门宽度  $\tau$  选取典型值 20  $\mu$ s、25  $\mu$ s、 30  $\mu$ s,制导激光时序标准差  $\sigma_x$ 取 3  $\mu$ s。仿真结果表明, 在 首波门录取高重频干扰信号的条件下, 第二波门干扰成功的 概率  $P_{ell}$ 要高于首波门干扰成功的概率  $P_{el}$ 。从图 7 中可以 看出,若取波门宽度  $\tau$  为 20  $\mu$ s,高频激光周期 1/f 为 5  $\mu$ s 时,  $P_{ell}$ 大于 0.998。从工程应用角度,可以认为第二波门必定录 取高重频干扰信号。因此, 当连续 2 个波门录取干扰信号 时, 可判定高重频干扰成功。高重频干扰成功概率  $P_e = P_{ell} e_{ell}$ 。



图 7 前一波门录取高重频信号时,波门录取 高重频信号信号概率曲线

Fig. 7 Probability that wave gate records high frequency signal when previous wave gate records high frequency signal

高重频干扰持续时间为 $T_1$ ,间隔时间为 $T_2$ ,周期为 $T = T_1 + T_2$ 。取 $T_1 = 5\Delta T$ ,若第一个波门录取制导信号, $X_{II}$ 服从 以波门为中心的正态分布, $Z_{II}$ 服从波门起点到波门起点加 1/f的均匀分布。这种情况和 $X_1$ 、 $Z_1$ 在第一波门的分布相 同。因此,在第一个波门录取制导信号的条件下,第二、三波 门均录取干扰信号的概率和第一、二波门均录取干扰信号的 概率相同。在连续 5 个制导周期内,高重频干扰成功的概 率 $P_c$ :

$$P_{c} = P_{c1}P_{c\parallel} + (1 - P_{c1})P_{c\perp}P_{c\parallel} + (1 - P_{c\perp})^{2}P_{c\perp}P_{c\parallel}$$
(16)

## 4 复合干扰概率模型及仿真

#### 4.1 高重频干扰前一波门录取制导信号

在高重频干扰开始后波门录取高重频干扰信号有以下4 种情况:① 高重频干扰信号首脉冲、制导信号以及角度欺骗 干扰信号均落在波门内,高重频干扰信号首脉冲均超前于制 导信号和角度欺骗干扰信号,记为 *P*<sub>f1</sub>;② 高重频干扰信号 首脉冲、角度欺骗干扰信号落在波门内且制导信号落在波门 外,高重频干扰信号首脉冲超前于角度欺骗干扰信号,记为 *P*<sub>f2</sub>;③ 高重频干扰信号首脉冲、制导信号落在波门内且角度 欺骗干扰信号落在波门外,高重频干扰信号首脉冲超前于制 导信号,记为 *P*<sub>f3</sub>;④ 高重频干扰信号首脉冲落在波门内,制 导信号以及角度欺骗干扰信号均落在波门外,记为 *P*<sub>f4</sub>。其 中,下标*i*是指第*i*个波门。

复合干扰包括角度欺骗干扰和高重频干扰,假设高重频 干扰前存在角度欺骗干扰但上一波门录取的是制导信号。  $X_1 \sim N(\tau/2, \sigma_x^2), Y_1 \sim N(\tau/2 - \Delta t, \sigma_y^2), Z_1 \sim U(0, 1/f)$ 。 由于 $X_1, Y_1, Z_1$ 是相互独立的随机变量,所以:  $f_{(x_1, Y_1, Z_1)}(x, y, z) = f_{x_1}(x)f_{y_1}(y)f_{Z_1}(z) =$ 

$$\begin{cases} \frac{\exp\left(-\frac{(x-\tau/2)^2}{2\sigma_x^2}\right)\exp\left(-\frac{(y-\tau/2+\Delta t)^2}{2\sigma_y^2}\right)}{2\pi\sigma_x\sigma_y} f & (17)\\ x,y \in R, z \in (0,1/f)\\ 0 & \notin \mathbb{U} \end{cases}$$

 $f_{(X_{\rm I},Z_{\rm I})}(x,z) = f_{X_{\rm I}}(x)f_{Z_{\rm I}}(z) =$ 

$$\begin{cases} \frac{\exp\left(-\frac{(x-\tau/2)^2}{2\sigma_x^2}\right)}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} f \quad x \in R, z \in (0, 1/f) \\ 0 & \ddagger \psi \end{cases}$$
(19)

$$P_{f11} = \iint_{\Omega} f_{(x_1, y_1, z_1)}(x, y, z) \, \mathrm{d}V,$$

$$\Omega = \left\{ (x, y, z) \middle| \begin{array}{l} x \in (0, \tau), \ y \in (0, \tau), \\ z \in (0, 1/f), \ z < x, z < y \end{array} \right\}$$
(20)

$$P_{f12} = (1 - \int_{0}^{\tau} f_{X_{1}}(x) dx) \iint_{D} f_{(Y_{1}, Z_{1})}(y, z) dy dz,$$

$$D = \{(y, z) \mid y \in (0, \tau), z \in (0, 1/f), z < y\}$$
(21)

$$P_{f13} = (1 - \int_{0}^{\tau} f_{Y_{1}}(y) \, dy) \iint_{D} f_{(X_{1}, Z_{1})}(x, z) \, dx \, dz,$$

$$D = \{(x, z) \mid x \in (0, \tau) \mid z \in (0, 1/f), z \in x\}$$
(22)

$$P_{f14} = (1 - \int_{0}^{r} f_{X_{1}}(x) dx) (1 - \int_{0}^{r} f_{Y_{1}}(y) dy)$$
(23)  

$$a g c = T t$$

号,高重频干扰后第一个波门录取高重频信号概率  $P_{f1} = P_{f11} + P_{f12} + P_{f13} + P_{f14}$ 。

波门录取高频信号时概率仿真参数如表1所示。

表1 波门录取高频信号时概率仿真参数

Table 1 Parameters of probability simulation when wave gate records high frequency signal

	高重频 激光频 率/kHz	制导信 号标准 <i>差/</i> μs	角度欺骗 干扰信号 标准差/µs	波门宽度/μs
a	200	3	4	20,25,30
b	400	3	4	20,25,30
с	200	1	2	20,25,30
d	400	1	2	20,25,30

比较图 8(a)中波门宽度  $\tau$  为 20 µs、25 µs 和 30 µs 的仿 真结果发现,当角度欺骗干扰超前时间固定且小于波门宽度 的一半时,增大波门的宽度,使得波门内高重频首脉冲信号 的期望超前制导信号和角度欺骗干扰信号的期望更多,可提 高高重频干扰的干扰效果。比较图 8(a)和图 8(b)[或比较 图 8(c)和图 8(d)]的仿真结果,提高高重频信号的频率,波 门内高重频首脉冲信号的分布更加超前,可增加波门录取高 重频信号的概率。比较图 8(a)和图 8(c)[或比较图 8(b) 和图 8(d)]的仿真结果,提高制导信号和角度欺骗干扰信号 的精度,制导信号和角度欺骗干扰信号的分布更加集中,会 降低波门录取高重频信号的概率。



如图 8 所示, 取高频激光频率 f 为 200 kHz。由于角度欺

骗干扰超前时间  $\Delta t$  取值小于波门宽度  $\tau$  一半时,且高重频 激光频率 f 和波门宽度  $\tau$  一定,角度欺骗干扰信号超前时间  $\Delta t$  越大,波门录取高重频干扰信号的概率越低。当角度欺骗 干扰信号超前时间  $\Delta t$  一定时,波门宽度  $\tau$  越大,波门录取高 重频干扰信号的概率越高。

若在第一个波门中检测到制导信号位置为 $x_1$ ,角度欺骗干扰信号位置为 $y_1$ ,高重频干扰信号首脉冲位置为 $z_1$ ,若 $z_1 < x_1$ , $z_1 < y_1$ ,第一个波门将录取高重频干扰信号,则下一波门中心为 $z_1 + \Delta T$ , $X_{II}$ 的期望将滞后波门中心,滞后值为 $X_1$ 的期望减去 $Z_1$ 的期望即 $\tau/2 - 1/(2f)$ , $Y_{II}$ 的期望將滞后波门中心,滞后值为 $Y_1$ 的期望减去 $Z_1$ 的期望即 $\tau/2 - 1/(2f) - \Delta t$ ,则 $X_{II} ~ N(z_1 + \Delta T + \tau/2 - 1/(2f), \sigma_x^2)$ , $Y_{II} ~ N(z_1 + \Delta T + \tau/2 - 1/(2f), \sigma_x^2)$ , $Y_{II} ~ N(z_1 + \Delta T + \tau/2 - 1/(2f), \sigma_x^2)$ , $Y_{II} ~ N(z_1 + \Delta T - \tau/2 + 1/f)$ 。由于 $X_{II}$ 、 $Y_{II}$ 、 $Z_{II}$ 是相互独立的随机变量,所以:

(25)

$$\begin{split} P_{f\Pi } &= \iint_{\Omega} f_{(X_{\Pi},Y_{\Pi},Z_{\Pi})} \left( x,y,z \right) \mathrm{d}V, \\ \Omega &= \begin{cases} \left( x,y,z \right) & x \in \left( z_{1} + \Delta T - \tau/2, z_{1} + \Delta T + \tau/2 \right), \\ y \in \left( z_{1} + \Delta T - \tau/2, z_{1} + \Delta T + \tau/2 \right), \\ z \in \left( z_{1} + \Delta T - \tau/2, z_{1} + \Delta T - \tau/2 + 1/f \right) \\ , z < x, z < y \end{cases} \end{split}$$

$$\begin{split} P_{f | \mathbb{I}^{2}} &= (1 - \int_{z_{\|} + \Delta T - \tau/2}^{z_{\|} + \Delta T - \tau/2} f_{X_{\|}}(x) \, \mathrm{d}x) \iint_{D} f_{(Y_{\|}, Z_{\|})}(y, z) \, \mathrm{d}y \mathrm{d}z, \\ D &= \left\{ (y, z) \middle| \begin{array}{l} y \in (z_{1} + \Delta T - \tau/2, z_{1} + \Delta T + \tau/2), \\ z \in (z_{1} + \Delta T - \tau/2, z_{1} + \Delta T - \tau/2 + 1/f), \\ z < y \end{array} \right\} \end{split}$$

$$\end{split}$$

$$\end{split}$$

$$\end{split}$$

$$\begin{aligned} (28)$$

$$\begin{split} P_{f\mathbb{B}} &= (1 - \int_{z_{1}+\Delta T - \tau/2}^{z_{1}+\Delta T - \tau/2} f_{Y_{\mathbb{I}}}(y) \, \mathrm{d}y) \iint_{D} f_{(x_{\mathbb{I}}, Z_{\mathbb{I}})}(x, z) \, \mathrm{d}x \mathrm{d}z, \\ D &= \left\{ (x, z) \left| \begin{array}{l} x \in (z_{1} + \Delta T - \tau/2, z_{1} + \Delta T + \tau/2), \\ z \in (z_{1} + \Delta T - \tau/2, z_{1} + \Delta T - \tau/2 + 1/f), \\ z < x \end{array} \right. \right\} \end{split}$$

$$\end{split}$$

$$\end{split}$$

$$\end{split}$$

$$\begin{aligned} (29)$$

录取干扰信号的概率为  $P_{fII} = P_{fII1} + P_{fII2} + P_{fII3} + P_{fII40}$ 

第一波门录取高重频信号时,第二波门录取高频信号概 率仿真参数如表2所示。

> 表2 第一波门录取高重频信号时,第二波门 录取高频信号概率仿真参数

Table 2 Parameters of probability simulation that the second gate records high frequency signalwhen the first gate records high frequency signal

gate records high frequency signal					
	高重频 激光频 率/kHz	制导信 号标准 <i>差/</i> μs	角度欺骗 干扰信号 标准差/µs	波门宽度/μs	
a	200	3	4	20,25,30	
b	400	3	4	20,25,30	
с	200	1	2	20,25,30	
d	400	1	2	20,25,30	

如图 9(a) 所示,高频激光周期 f 为 200 kHz, 制导激光 时序标准差  $\sigma_x$ 为 3  $\mu$ s,干扰激光时序标准差  $\sigma_x$ 为 4  $\mu$ s,波门 宽度 τ 为 20 μs 时,角度欺骗干扰信号超前时间小于波门宽 度的一半时,第二波门录取高重频干扰信号的概率并非全部 大于0.998,即连续2个波门录取高重频信号后,仍不能判定 为激光高重频干扰成功。比较图9(b)和图9(d)中波门宽 度 τ 为 20 μs 时的仿真结果发现,提高制导激光和干扰激光 的信号精度,可提高高重频干扰的干扰效果,当角度欺骗干 扰信号超前时间小于波门宽度的一半时,第二波门录取高重 频干扰信号的概率大于 0.998。比较图 9(c) 和图 9(d) 中波 门宽度 τ 为 20 μs 时的仿真结果发现,提高高重频信号的频 率,可提高高重频干扰的干扰效果,当角度欺骗干扰信号超 前时间小于波门宽度的一半时,第二波门录取高重频干扰信 号的概率大于0.998。比较图9(c)中波门宽度 τ 为20 μs 和 25 μs 时的仿真结果发现,增大波门的宽度,可提高高重频干 扰的干扰效果,当角度欺骗干扰信号超前时间小于波门宽度



Fig. 9 Probability that the second gate records high frequency signal when the first gate records high frequency signal

若 $z_{1} < x_{1}, z_{1} < y_{1}, z_{1} < x_{1}, z_{1} < y_{1},$ ,则 $X_{11} \sim N(z_{1} + \Delta T + \tau - 1/f, \sigma_{x}^{2}), Y_{11} \sim N(z_{1} + \Delta T + \tau - 1/f - \Delta t, \sigma_{y}^{2}),$  $Z_{11} \sim U(z_{11} + \Delta T - \tau/2, z_{11} + \Delta T - \tau/2 + 1/f)$ 。由于 $X_{11}, Y_{11},$  $Z_{11}$ 是相互独立的随机变量,所以:

$$f_{(x_{\parallel},z_{\parallel})}(x,z) = f_{x_{\parallel}}(x)f_{z_{\parallel}}(z) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{(x-z_{\parallel}-\Delta T-\tau+1/f)^{2}}{2\sigma_{x}^{2}}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{x}}}f \\ x \in R, z \in (z_{\parallel}+\Delta T-\tau/2, z_{\parallel}+\Delta T-\tau/2+1/f) \\ 0 \qquad \not\equiv \psi \end{cases}$$
(33)

$$\begin{split} P_{f \, \Pi \, I} &= \iint_{\Omega} f_{(X_{\, \Pi}, Y_{\, \Pi}, Z_{\, \Pi})} \left( \, x, y, z \right) \mathrm{d} V, \\ \Omega &= \begin{cases} \left( \, x, y, z \right) & \left| \begin{array}{c} x \, \in \, \left( \, z_{\, \Pi} \, + \, \Delta T \, - \, \tau/2 \, , z_{\, \Pi} \, + \, \Delta T \, + \, \tau/2 \, \right) \, , \\ y \, \in \, \left( \, z_{\, \Pi} \, + \, \Delta T \, - \, \tau/2 \, , z_{\, \Pi} \, + \, \Delta T \, + \, \tau/2 \, \right) \, , \\ z \, \in \, \left( \, z_{\, \Pi} \, + \, \Delta T \, - \, \tau/2 \, , z_{\, \Pi} \, + \, \Delta T \, - \, \tau/2 \, + \, 1/f \right) \, , \\ z \, < \, x, z \, < \, y \end{split}$$
(34)

$$P_{f \parallel 2} = (1 - \int_{z_{\parallel} + \Delta T - \tau/2}^{z_{\parallel} + \Delta T + \tau/2} f_{X_{\parallel}}(x) dx) \iint_{D} f_{(Y_{\parallel}, Z_{\parallel})}(y, z) dy dz,$$
  
$$D = \left\{ (y, z) \middle| \begin{array}{l} y \in (z_{\parallel} + \Delta T - \tau/2, z_{\parallel} + \Delta T + \tau/2), \\ z \in (z_{\parallel} + \Delta T - \tau/2, z_{\parallel} + \Delta T - \tau/2 + 1/f), \\ z < y \end{array} \right\}$$
(35)

$$P_{f \parallel 3} = (1 - \int_{z_{\parallel} + \Delta T + \tau/2}^{z_{\parallel} + \Delta T + \tau/2} f_{Y_{\parallel}}(y) \, dy) \iint_{D} f_{(X_{\parallel}, Z_{\parallel})}(x, z) \, dx dz,$$
  
$$D = \left\{ (x, z) \middle| \begin{array}{l} x \in (z_{\parallel} + \Delta T - \tau/2, z_{\parallel} + \Delta T + \tau/2), \\ z \in (z_{\parallel} + \Delta T - \tau/2, z_{\parallel} + \Delta T - \tau/2 + 1/f), \\ z < x \end{array} \right\}$$
(36)

$$P_{f I I I 4} = (1 - \int_{z I I + \Delta T - \tau/2}^{z I I + \Delta T + \tau/2} f_{X I I I}(x) dx) (1 - \int_{z I I + \Delta T - \tau/2}^{z I I + \Delta T + \tau/2} f_{Y I I I}(y) dy)$$
(37)

在第一、二个波门录取干扰信号的条件下,第三个波门 仍然录取干扰信号的概率为 $P_{fIII} = P_{fIII} + P_{fIII2} +$  $P_{f \blacksquare 3} + P_{f \blacksquare 4 \circ}$ 

第一、二波门录取高重频信号时,第三波门录取高频信 号概率仿真参数如表3所示。

Table3 Parameters of probability simulation that the third gate records high frequency signalwhen the first and secondgate record high frequency signal

高重频 制导信 角度欺骗	
激光频 号标准 干扰信号 波门宽 率/kHz 差/µs 标准差/µs	度/µs
a 200 3 4 20 <sub>2</sub> 5	5,30
b 400 3 4 20 <sub>2</sub> 25	5,30
c 200 1 2 20,25	5,30

比较图 9(a)和图 10(a) 「或比较图 9(b)和图 10(b),或 比较图9(c)和图10(c)]的仿真结果,在第一、二波门录取高 重频干扰信号的条件下,第三波门录取高重频干扰信号的概 率 P<sub>f</sub> 要高于第二波门录取高重频干扰信号的概率 P<sub>f</sub> 且 Pfm大于0.998。从工程应用角度,可以认为第三波门必定录 取高重频干扰信号。



图 10 第一、二波门录取高重频信号时,第三波门录取高重频信号概率

Fig. 10 Probability that the third gate records high frequency signal when the firstand second gate record high frequency signal

#### 4.2 高重频干扰前一波门录取角度欺骗干扰信号

c

假设高重频干扰前存在角度欺骗干扰但上一波门录取 的是角度欺骗信号。 $X_1 \sim N(\tau/2 + \Delta t, \sigma_x^2), Y_1 \sim N(\tau/2, \tau/2)$  $\sigma_{y^2}$ ), $Z_{\perp} \sim U(0, 1/f)$ 。由于 $X_{\perp}, Y_{\perp}, Z_{\perp}$ 是相互独立的随机 变量,所以:

$$f_{(x_{1},y_{1},z_{1})}(x,y,z) = f_{x_{1}}(x)f_{y_{1}}(y)f_{z_{1}}(z) = \begin{cases} \frac{\exp\left(-\frac{(x-\tau/2-\Delta t)^{2}}{2\sigma_{x}^{2}}\right)\exp\left(-\frac{(y-\tau/2)^{2}}{2\sigma_{y}^{2}}\right)}{2\pi\sigma_{x}\sigma_{y}}f \\ x,y \in R, z \in (0,1/f) \\ 0 \qquad \text{ Kdu} \end{cases}$$
(38)

$$f_{(Y_{1}, z_{1})}(y, z) = f_{Y_{1}}(y) f_{z_{1}}(z) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{(y - \tau/2)^{2}}{2\sigma_{y}^{2}}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{y}}} f \quad y \in R, z \in (0, 1/f) \\ 0 & \ddagger \psi \end{cases}$$
(39)

$$f_{(x_{1},z_{1})}(x,z) = f_{x_{1}}(x)f_{z_{1}}(z) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{(x-\tau/2-\Delta t)^{2}}{2\sigma_{x}^{2}}\right) \\ \frac{\sqrt{2\pi}\sigma_{x}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{x}}f & x \in R, z \in (0,1/f) \\ 0 & \text{ He} \end{cases}$$
(40)

$$P_{f11} = \iint_{\Omega} f_{(x_1, y_1, z_1)}(x, y, z) \, \mathrm{d}V,$$
  

$$\Omega = \left\{ (x, y, z) \middle| \begin{array}{l} x \in (0, \tau), y \in (0, \tau), \\ z \in (0, 1/f), z < x, z < y \end{array} \right\}$$
(41)

$$P_{f12} = (1 - \int_{0}^{r} f_{X_{1}}(x) dx) \iint_{D} f_{(Y_{1},Z_{1})}(y,z) dydz,$$

$$D = \{(y,z) \mid y \in (0,\tau), z \in (0,1/f), z < y\}$$
(42)

$$P_{f13} = (1 - \int_{0}^{\tau} f_{Y_{1}}(y) \, dy) \iint_{D} f_{(X_{1}, Z_{1})}(x, z) \, dx dz,$$
  
$$D = \{ (x, z) \mid x \in (0, \tau), z \in (0, 1/f), z < x \}$$
(43)

$$P_{fI4} = (1 - \int_{0}^{\tau} f_{X_{I}}(x) dx) (1 - \int_{0}^{\tau} f_{Y_{I}}(y) dy)$$
(44)

在复合干扰条件下,第一个波门录取高重频信号概率  $P_{f1} = P_{f11} + P_{f12} + P_{f13} + P_{f14}$ 。

波门录取高频信号时概率仿真参数如表4所示。

表4 波门录取高频信号时概率仿真参数 Table 4 Parameters of probability simulation when wave gate records high frequency signals

	高重频 激光频 率/kHz	制导信 号标准 差/μs	角度欺骗 干扰信号 标准差/μs	波门宽度/μs
a	200	3	4	20 25 30
$\mathbf{b}$	400	3	4	20,25,30
с	200	1	2	20,25,30
d	400	1	2	20,25,30

如图 11(a) 所示,高频激光周期 f 为 200 kHz,制导激光 时序标准差  $\sigma_x$ 为 3  $\mu$ s,干扰激光时序标准差  $\sigma_y$ 为 4  $\mu$ s,波门 宽度  $\tau$  为 20  $\mu$ s 时,角度欺骗干扰信号超前时间小于波门宽 度的一半时,第一个波门录取高重频干扰信号的概率小 于 0.998。



Fig. 11 Probability of wave gate recording highfrequency signal

比较图 11(a)中波门宽度  $\tau$  为 25  $\mu$ s 和 30  $\mu$ s 时的仿真 结果发现,增大波门的宽度,可提高高重频干扰的干扰效果, 当角度欺骗干扰信号超前时间小于波门宽度的一半时,第一 个波门录取高重频干扰信号的概率大于 0.998。比较图 11 (b)和图 11(d)中波门宽度  $\tau$  为 20  $\mu$ s 时的仿真结果发现,提 高制导激光和干扰激光的信号精度后,第一个波门录取高重 频干扰信号的概率大于 0.998。比较图 11(a)和图 11(b)中 波门宽度  $\tau$  为 25  $\mu$ s 时的仿真结果发现,提高高重频信号的 频率后,第一个波门录取高重频干扰信号的概率大于 0.998。

若在第一个波门中检测到制导信号位置为  $x_1$ ,角度欺骗 干扰信号位置为  $y_1$ ,高重频干扰信号首脉冲位置为  $z_1$ ,若  $z_1 < x_1, z_1 < y_1, 则 X_{II} \sim N(z_1 + \Delta T + \tau/2 - 1/(2f) + \Delta t, \sigma_x^2),$  $Y_{II} \sim N(z_1 + \Delta T + \tau/2 - 1/(2f), \sigma_y^2), Z_{II} \sim U(z_1 + \Delta T - \tau/2, z_1 + \Delta T - \tau/2 + 1/f)$ 。由于  $X_{II}, Y_{II}, Z_{II}$ 是相互独立的随机变量,所以:

 $f_{(x_{II},y_{II},z_{II})}(x,y,z) = f_{x_{II}}(x)f_{y_{II}}(y)f_{z_{II}}(z) =$ 

$$\begin{cases} f_{(Y_{\parallel},Z_{\parallel})}(y,z) = f_{Y_{\parallel}}(y)f_{Z_{\parallel}}(z) = \\ \begin{cases} \exp\left(-\frac{(y-z_{\perp} - \Delta T - \tau/2 + 1/(2f))^{2}}{2\sigma_{y}^{2}}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{y}}}f \end{cases} (46) \\ y \in R, z \in (z_{\perp} + \Delta T - \tau/2, z_{\perp} + \Delta T - \tau/2 + 1/f) \\ 0 \qquad \text{ He} \end{cases}$$

$$f_{(x_{\parallel},z_{\parallel})}(x,z) = f_{x_{\parallel}}(x)f_{z_{\parallel}}(z) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{(x-z_{\perp}-\Delta T-\tau/2+1/(2f)-\Delta t)^{2}}{2\sigma_{x}^{2}}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{x}}}f \end{cases}$$
(47)

$$x \in R, z \in (z_1 + \Delta T - \tau/2, z_1 + \Delta T - \tau/2 + 1/f)$$
  

$$0 \qquad \text{Ith}$$

$$P_{f\Pi } = \iint_{\Omega} f_{(x_{\Pi}, y_{\Pi}, z_{\Pi})}(x, y, z) \, \mathrm{d}V,$$

$$\Omega = \begin{cases} \left(x, y, z\right) & x \in (z_{1} + \Delta T - \tau/2, z_{1} + \Delta T + \tau/2), \\ y \in (z_{1} + \Delta T - \tau/2, z_{1} + \Delta T + \tau/2), \\ z \in (z_{1} + \Delta T - \tau/2, z_{1} + \Delta T - \tau/2 + 1/f), \\ z < x, z < y \end{cases}$$

$$(48)$$

$$P_{f \parallel 3} = (1 - \int_{z_{\perp} + \Delta T - \tau/2}^{z_{\perp} + \Delta T + \tau/2} f_{Y_{\parallel}}(y) dy) \iint_{D} f_{(X_{\parallel}, z_{\parallel})}(x, z) dx dz,$$
  
$$D = \left\{ (x, z) \middle| \begin{array}{l} x \in (z_{\perp} + \Delta T - \tau/2, z_{\perp} + \Delta T + \tau/2), \\ z \in (z_{\perp} + \Delta T - \tau/2, z_{\perp} + \Delta T - \tau/2 + 1/f), \\ z < x \end{array} \right\}$$
(50)

$$P_{f \parallel 4} = (1 - \int_{z \parallel +\Delta T - \tau/2}^{z \parallel +\Delta T + \tau/2} f_{X \parallel}(x) dx) (1 - \int_{z \parallel +\Delta T - \tau/2}^{z \parallel +\Delta T + \tau/2} f_{Y \parallel}(y) dy)$$
(51)

在第一个波门录取干扰信号的条件下,第二个波门仍然 录取干扰信号的概率为 $P_{f||} = P_{f||_1} + P_{f||_2} + P_{f||_3} + P_{f||_4}$ 。

第一波门录取高重频信号时,第二波门录取高频信号概 率仿真参数如表5所示。

### 表5 第一波门录取高重频信号时,第二波门 录取高频信号概率仿真参数

Table 5 Parameters of probability simulation that the second gate records high frequency signalwhen the first gate records high frequency signal

the first gate records high frequency signal					
	高重频 激光频 ※小日2	制导信 号标准 美/110	角度欺骗 干扰信号 标准差/110	波门宽度/μs	
	T/ KIIZ	Æ/μs	亦准左/µs		
а	200	3	4	20,25,30	
b	400	3	4	20,25,30	

比较图 11(a)和图 12(a) [或比较图 11(b)和图 12(b)] 的仿真结果,在首波门录取高重频干扰信号的条件下,第二 波门录取高重频干扰信号的概率  $P_{f1}$ 要高于首波门录取高重 频干扰信号的概率  $P_{f1} \pm P_{f1}$ 大于 0.998。从工程应用角度, 可以认为第二波门必定录取高重频干扰信号。

综上所述,在激光角度欺骗干扰和激光高重频干扰复合 干扰下,给出高重频干扰成功的判定:

1) 在高重频激光脉冲频率为 200 kHz, 波门宽度为 20 μs,制导激光时序标准差为 3 μs,角度欺骗干扰激光时序 标准差为 4 μs 的条件下,高重频干扰前一波门录取制导信 号,连续 2 个波门录取高重频信号后,第三个波门录取高重 频信号的概率大于 0.998;高重频干扰前一波门录取角度欺 骗干扰信号,第一个波门录取高重频信号后,第二个波门录 取高重频信号的概率大于 0.998。

2) 在高重频激光脉冲频率为 200 kHz, 波门宽度为

20 μs,制导激光时序标准差为1 μs,角度欺骗干扰激光时序标准差为2 μs的条件下,高重频干扰前一波门录取制导信号,连续2个波门录取高重频信号后,第三个波门录取高重频信号的概率大于0.998;高重频干扰前一波门录取角度欺骗干扰信号,第一个波门录取高重频信号的概率大于0.998。







3)在高重频激光脉冲频率为200 kHz,波门宽度为 25 μs,制导激光时序标准差为1 μs,角度欺骗干扰激光时序标准差为2 μs的条件下,高重频干扰前一波门录取制导信号,第一个波门录取高重频信号后,第二个波门录取高重频 信号的概率大于0.998;高重频干扰前一波门录取角度欺骗 干扰信号,第一个波门录取高重频信号的概率大于0.998。

4) 在高重频激光脉冲频率为 400 kHz, 波门宽度为 20 μs,制导激光时序标准差为 1 μs, 角度欺骗干扰激光时序 标准差为 2 μs 的条件下,高重频干扰前一波门录取制导信 号,第一个波门录取高重频信号后,第二个波门录取高重频 信号的概率大于 0.998;高重频干扰前一波门录取角度欺骗 干扰信号,第一个波门录取高重频信号的概率大于 0.998。

比较判定1和判定2,提高制导信号和角度欺骗干扰信号的精度,会降低高重频干扰成功判定所需要的条件;比较 判定2和判定3,增加波门宽度,会降低高重频干扰成功判定 所需要的条件;比较判定2和判定4,提高高重频激光脉冲频 率,会降低高重频干扰成功判定所需要的条件。

#### 233

### 5 结论

针对激光角度欺骗干扰和高重频干扰复合干扰中高重 频干扰成功的判定问题,采用参数对照仿真方法,结果发现: 提高制导信号和角度欺骗干扰信号的精度,增加波门宽度, 提高高重频激光脉冲频率会增大复合干扰中高重频干扰成 功的概率。为下一步研究复合干扰方式对激光制导导弹弹 道的影响提供参考。

## 参考文献:

- [1] 窦超. 剑走偏锋显实力——珠海航展上的"冷门"武器 装备[J]. 坦克装甲车辆,2019(01):18-25.
  Dou C. Go with minority and show strength-"unpopular" weapons and equipment at Zhuhai Air Show[J]. Tank & Armoured Vehicle,2019(01):18-25.
- [2] 夏蕾.高精度激光合束及光轴指向控制技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究 所,2017.

Xia L. Research on technology in high precision laser beam combining and optical axis pointing control [D]. Changchun; Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.

[3] 何有,荣祥胜. 美军机载激光武器系统发展趋势研究
[J]. 飞航导弹,2021(04):38-42.
He Y, Rong X S. Research on the development trend of airborne laser weapon system of US army [J]. Aerodynamic

Missile Journal, 2021(04):38-42.

- [4] 丁字,杨军,郑荣山,等. 俄罗斯"佩列斯韦特"激光武器 系统深度解析[J]. 光电技术应用,2020,35(05):6-12.
  Ding Y,Yang J,Zheng R S, et al. Deep analysis of Russian "Peresvet" laser weapon system[J]. Electro-Optic Technology Application,2020,35(05):6-12.
- [5] 丁帅.激光导引头波门宽度设置方法研究[D]. 武汉:华 中科技大学,2019.
  Ding S. Research on the setting method of time-gate width for laser seeker[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2019.
- [6] 赵乾,刘志国,王仕成,等.高重频激光对激光导引头解

码干扰的研究[J]. 红外与激光工程,2015,44(05):1438-1443.

Zhao Q, Liu Z G, Wang S C, et al. Jamming effect of high repetition laser on laser guidance's decoding [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(05): 1438 – 1443.

- [7] 李双刚. 千扰条件下制导波门对激光信号录取的数学仿 真[J]. 红外与激光工程,2016,45(01):53-57.
  Li S G. Mathematics simulation of laser signal extraction in guidance range gate under jamming[J]. Infrared and Laser Engineering,2016,45(01):53-57.
- [8] 韩帅涛,李文生,何斌斌,等.激光角度欺骗干扰系统作 战效能研究[J].电光与控制,2019,26(12):84-87.
  Han S T, Li W S, He B B, et al. Operational effectiveness of a laser angle deception jamming system[J]. Electronics Optics & Control,2019,26(12):84-87.
- [9] 徐炜波,刘志国,王仕成,等.高重频激光对激光导引头 干扰过程的建模研究[J].激光与红外,2021,51(01):29
   -33.

Xu W B, Liu Z G, Wang S C, et al. Modeling the interference process of laser seeker with high-repetition laser[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(01):29 – 33.

[10] 邱雄,刘志国,王仕成.半主动激光制导武器系统的高重频干扰有效概率研究[J]. 红外与激光工程,2019,48
 (10):76-82.

Qiu X, Liu Z G, Wang S C. Research on effective probability of high-repetition interference insemi-active laser guided weapon system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(10):76-82.

- [11] 刘克俭, 苗锡奎, 徐晨阳, 等. 半主动激光制导能量传输 与模拟技术[J]. 中国光学, 2019, 12(02):256-264.
  Liu K J, Miao X K, Xu C Y, et al. Semi-active laser-guided energy transmissionand simulation technology [J]. Chinese Optics, 2019, 12(02):256-264.
- [12] 亓刚. 对激光角度欺骗干扰技术的研究[D]. 成都: 电子 科技大学, 2015.

Qi G. Research on laser angle deception jamming technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.

> 科学编辑 陈慧敏 博士(北京理工大学副教授) 责任编辑 何杰玲