

## 干扰条件下制导波门对激光信号录取的数学仿真

李双刚

(电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

**摘要:** 波门是激光制导中广泛采用的一种抗干扰措施, 其对干扰信号录取概率的大小对干扰成功与否非常关键。依据制导信号与干扰信号在波门内既相互联系又相互独立的特点, 提出可用干扰信号与制导信号的联合概率密度函数描述干扰条件下波门对激光信号的录取, 同时需要考虑干扰信号对实时波门的牵引作用。运用 Matlab 软件仿真了不同宽度的实时波门录取干扰信号的概率与超前同步时间的关系, 表明对宽度一定的实时波门存在一个最佳的超前同步时间; 超前同步时间为零时, 波门录取干扰信号的概率接近于 0.5, 而不是接近于 1; 波门越宽、干扰设备的时间精度越高, 干扰信号就越容易被波门录取; 波门受到牵引后其对干扰信号的录取概率增加, 而波门宽度的影响不大。在此基础上, 用 Monte-Carlo 法对一次制导过程中波门对制导信号与干扰信号的录取以及多次制导中导引头跟踪真假目标的结果作了模拟, 这可为建立对激光半主动制导武器干扰效能评估系统打下基础。

**关键词:** 联合概率密度分布函数; 角度欺骗干扰; 波门; 录取概率; Monte-Carlo 模拟

**中图分类号:** TN977 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0106003

## Mathematics simulation of laser signal extraction in guidance range gate under jamming

Li Shuanggang

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** Range gate is an usual anti-jamming technology for laser guidance. Extraction probability of laser jamming signal in range gate is very important to successful jamming. According to the connection and independence between jamming signal and guidance signal in range gate, it was put forward that the joint probability density function was compatible with laser signal extraction in range gate under jamming. The effect of jamming signal in range gate pull off was thought about. The quantitative relation between extraction probability of jamming signal and advance-synchronizing time was simulated in different width range gate by calculational software Matlab. The results show that there is an optimal advance-synchronizing time for a real-time range gate of which width is fixed. Extraction probability of jamming signal is 0.5, not 1.0, when advance-synchronizing time is zero. The jamming signal is easy to be extracted by range gate when the timing of jamming devices is good or the range gate is wide. Jamming signal extraction probability increases and the width of range gate is insignificant after the range gate is pulled off. The results of laser signal extraction in range gate during once guidance process and tracking target or false target during repetitious guidance process were simulated by Monte-Carlo. It is beneficial

收稿日期: 2015-05-11; 修订日期: 2015-06-12

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金(KY13C1611)

作者简介: 李双刚(1975-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光电技术方面的研究。Email: lsgang\_20@163.com

to the construction of assessment system of effectiveness about angle deception jamming.

**Key words:** joint probability density function; angle deception jamming; range gate; extraction probability; Monte-Carlo simulation

## 0 引言

激光角度欺骗干扰是一种对抗激光半主动制导武器的有效手段,其干扰的实质相当于在激光半主动制导武器系统中引入系统误差,从而导致其对目标命中率的下降<sup>[1]</sup>。激光角度欺骗干扰成功与否的关键在于导引头的波门能否将干扰信号当成制导信号进行处理,因此,研究干扰条件下导引头波门对激光信号的录取具有重要的意义。一般认为干扰信号(或制导信号)在波门内出现的概率服从高斯分布<sup>[2-3]</sup>,计算波门录取干扰信号(或制导信号)的概率用独立的高斯分布概率密度函数计算<sup>[4]</sup>。参考文献[5]对干扰信号超前制导信号进入波门的概率进行了数学仿真,但文献中计算波门录取干扰信号概率的公式(15)未将干扰信号与制导信号区分开,而是将干扰信号与制导信号叠加后,看成干扰信号;另外其时间积分区间不等于波门宽度,也没有给出解释,令人费解;仿真中也没有考虑实时波门受到牵引时对其录取激光信号的影响。进一步的研究表明,干扰信号与制导信号在时域上重叠的可能性几乎为零,在一个波门内必须将它们分开看成两个信号,由于干扰信号与制导信号间需要满足超前同步的要求,它们之间有着密切的联系,但它们又分别来自不同的设备,彼此间相互独立,因此在计算波门录取干扰信号(或制导信号)的概率时用干扰信号与制导信号的联合概率密度分布函数进行计算更为合适。

## 1 无干扰时波门对激光制导信号的录取

无干扰时,激光导引头波门对制导信号的接收可看作是一随机事件,可设其为标准正态分布<sup>[5]</sup>。

$$f(t_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_b} \exp\left(-\frac{t_1^2}{2\sigma_b^2}\right) \quad (1)$$

式中: $\sigma_b$ 为激光制导信号相对于波门的时间精度,取决于目标指示器和波门等设备的硬件性能。设波门宽度为 $\Delta T$ ,为保证制导信号具有不低于99%的概率进入波门,则 $\Delta T \geq 6\sigma_b + T_s$ , $T_s$ 为采用固定波门时的累

积误差,采用实时性波门时, $T_s$ 可忽略不计。实时波门抗干扰能力强,是激光制导中广泛采用的抗干扰技术,文中均以实时波门为例。

## 2 干扰时波门对激光信号的录取

实施角度欺骗干扰时,也可认为干扰信号在波门内出现是一随机事件,设干扰信号的复制精度为 $\sigma_g$ ,则干扰信号在波门内出现的概率密度函数为:

$$f(t_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_g} \exp\left(-\frac{(t_2 + \Delta t_s)^2}{2\sigma_g^2}\right) \quad (2)$$

式中: $\Delta t_s$ 为超前同步时间; $\sigma_g$ 为干扰信号相对于波门的时间精度。一般来说, $\sigma_g > \sigma_b$ ,因为激光干扰设备自身存在误差,同时又引入了制导信号的误差。

由于干扰信号与制导信号彼此独立,则描述干扰信号与制导信号在波门内出现的概率密度函数为:

$$f(t_1, t_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_b\sigma_g} \exp\left(-\frac{t_1^2}{2\sigma_b^2}\right) \cdot \exp\left[-\frac{(t_2 + \Delta t_s)^2}{2\sigma_g^2}\right] \quad (3)$$

### 2.1 上一波门录取制导信号

由于首脉冲锁定技术是激光制导中常用的抗干扰技术之一<sup>[6-7]</sup>,这里以首脉冲抓取型波门为例,采用超前同步式干扰<sup>[8]</sup>。假设在激光导引头飞行过程中,其第 $n$ 个波门录取的是制导信号,则在下一波门,即 $(n+1)$ 波门处,干扰信号能够超前制导信号并进入波门的概率 $P_g$ 为:

$$P_g = \frac{1}{2\pi\sigma_b\sigma_g} \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} \int_{t_2}^{\Delta T/2} \exp\left(-\frac{t_1^2}{2\sigma_b^2}\right) \exp\left[-\frac{(t_2 + \Delta t_s)^2}{2\sigma_g^2}\right] \cdot dt_1 dt_2 + \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_g} \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} \exp\left[-\frac{(t_2 + \Delta t_s)^2}{2\sigma_g^2}\right] dt_2 \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_b} \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} \exp\left(-\frac{t_1^2}{2\sigma_b^2}\right) dt_1\right] \quad (4)$$

公式(4)由两项积分构成,第一项是干扰信号与制导信号均在波门内且干扰信号超前制导信号的概率,第二项是干扰信号在波门内且制导信号处于波门之外的概率,这两种情形对首脉冲抓取型波门来说干扰都能奏效。

运用数学计算软件 Matlab,采用符号运算与数

值积分相结合的办法,根据公式(4),绘出了干扰信号被波门录取的概率与超前同步时间  $\Delta t_s$  的关系,如图 1 所示。计算中取参考文献[5]中的相关参数,实时波门宽度  $\Delta T$  分别取为  $30 \mu\text{s}$ 、 $40 \mu\text{s}$  和  $50 \mu\text{s}$ ,制导信号时间精度  $\sigma_b$  和干扰信号时间精度  $\sigma_g$  分别见图 1 中的标题。

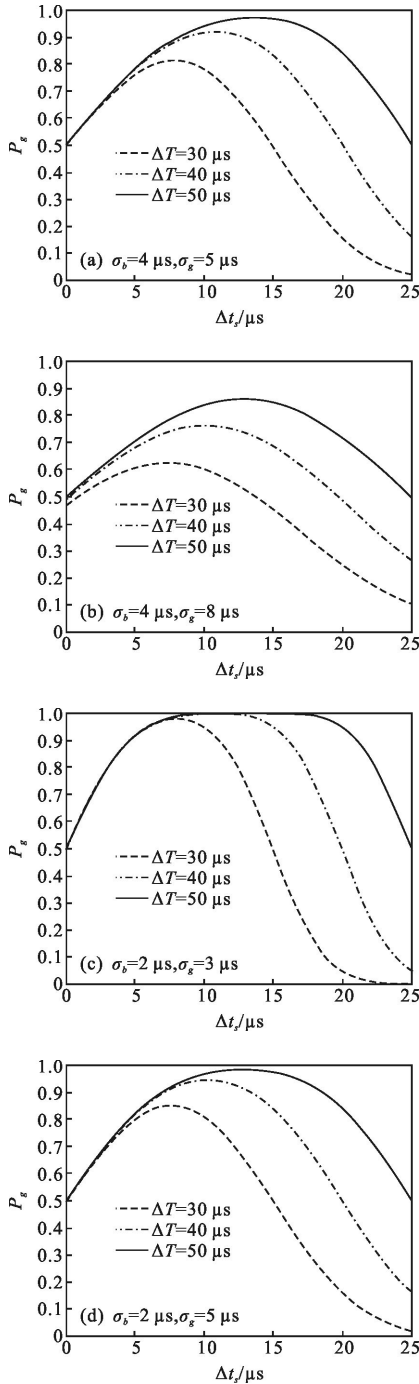


图 1 干扰信号超前进入波门的概率  $P_g$  与超前同步时间  $\Delta t_s$  的关系  
Fig.1 Extraction probability of jamming signal in range gate vs advance-synchronizing time

由图 1 可以看出,波门越宽,干扰信号被录取的概率越大;在超前同步时间  $\Delta t_s$  为 0 时,波门录取干扰信号和制导信号的概率均接近于 0.5,这与实际情况相符合,也与以前文献的研究接近于 1 的情况不同。在制导信号时间精度高于干扰信号时间精度较多的情况下(如图 1(b)),则在超前同步时间为 0 时,波门录取干扰信号的概率略低于 0.5;随着超前同步时间的增加,干扰信号被波门录取的概率也逐渐增加,但存在一个最佳超前同步时间  $\Delta t_{s0}$ ,且波门越宽, $\Delta t_{s0}$  值越大;当  $\Delta t_s > \Delta t_{s0}$  后,波门录取干扰信号的概率逐步下降,原因是随着超前同步时间的增加,尽管干扰信号超前制导信号的概率在增加,但由于受波门宽度的限制,干扰信号被波门录取的概率在下降;干扰信号时间精度越高(即  $\sigma_g$  越小),其被波门录取的概率越大(从图 1(a)与(b)比较或者从图 1(c)与(d)的比较中可看出)。

尽管受到干扰,但  $(n+1)$  波门也有可能录取制导信号,其录取制导信号的概率为:

$$P_z = \frac{1}{2\pi\sigma_b\sigma_g} \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} \int_{t_1}^{\Delta T/2} \exp\left[-\frac{(t_2+\Delta t_s)^2}{2\sigma_g^2}\right] \exp\left(-\frac{t_1^2}{2\sigma_b^2}\right) dt_1 dt_2 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_b} \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} \exp\left(-\frac{t_1^2}{2\sigma_b^2}\right) dt_1 \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_g} \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} \exp\left[-\frac{(t_2+\Delta t_s)^2}{2\sigma_g^2}\right] dt_2 \right\} \quad (5)$$

与公式(4)类似,公式(5)也由两项积分构成,第一项是干扰信号与制导信号均在波门内、制导信号超前干扰信号的概率,第二项是制导信号在波门内且干扰信号处于波门之外的概率。利用公式(5)仿真的结果如图 2 所示。因其与图 1“互补”,为节约篇幅,只绘出了一幅。可见波门对制导信号的录取随着超前同步时间的增加先下降后上升,波门越窄抗干扰能力越强。

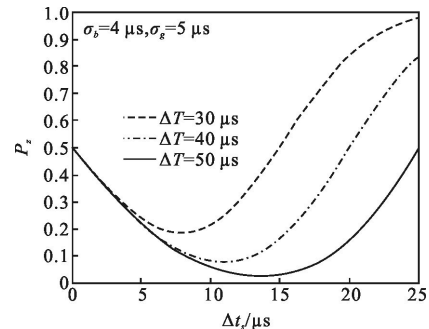


图 2 制导信号超前进入波门的概率  $P_z$  与超前同步时间  $\Delta t_s$  的关系  
Fig.2 Extraction probability of guidance signal in range gate vs advance-synchronizing time

如果(n+1)波门录取的仍然是制导信号,表明干扰脉冲对该个波门的干扰无效,对下一波门录取信号的分析与上面相同,不再重复。

2.2 上一波门录取干扰信号

如果(n+1)波门录取的是干扰信号,则对下一个波门来说,制导信号不仅在时间上落后于干扰信号 $\Delta t_s$ ,而且该处波门的开启时间是以上一个干扰信号为同步点设置的,即波门受到了“牵引”,则公式(3)变为:

$$f(t_1, t_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_b\sigma_g} \exp\left(-\frac{t_2^2}{2\sigma_g^2}\right) \cdot \exp\left[-\frac{(t_1-\Delta t_s)^2}{2\sigma_b^2}\right] \quad (6)$$

(n+2)波门录取干扰信号的概率为:

$$P_g = \frac{1}{2\pi\sigma_b\sigma_g} \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} \int_{t_2}^{\Delta T/2} \exp\left(-\frac{t_2^2}{2\sigma_g^2}\right) \cdot \exp\left[-\frac{(t_1-\Delta t_s)^2}{2\sigma_b^2}\right] \cdot dt_1 dt_2 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_g} \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} \exp\left(-\frac{t_2^2}{2\sigma_g^2}\right) dt_2 \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_b} \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} \exp\left[-\frac{(t_1-\Delta t_s)^2}{2\sigma_b^2}\right] dt_1 \right\} \quad (7)$$

对公式(7)运用 Matlab 仿真的结果如图 3 所示。从图中可以看出,如果上一波门录取的是干扰信号,即波门受到牵引的情况下,则下一波门录取干扰信号的概率增加(与图 1 进行比较);波门录取干扰信号的概率随超前同步时间的增加而增加,主要是因为波门受到干扰信号的牵引,制导信号落后干扰信号的时间越长,被波门录取的概率就越低;波门宽度的影响不大,只是在干扰信号时间精度较低(如图 3(b))时显示出有些影响;干扰信号时间精度越高(即 $\sigma_g$ 越小),干扰信号被波门录取的概率越大。

需要说明的是,图 3 似乎表明超前同步时间越大越好,其实不然。理由是这是建立在波门受到牵引的基础之上的(由图 1 可看出要使波门受到牵引,则 $\Delta t_s$ 不能太大)。在同等条件下,如果波门受到牵引,则超前同步时间越大,波门对制导信号录取概率越低。

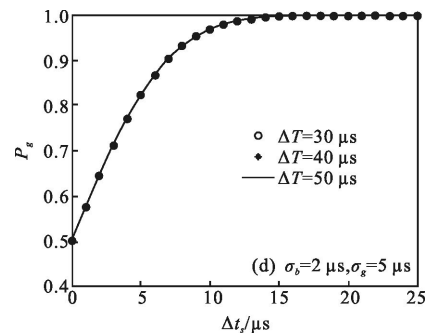
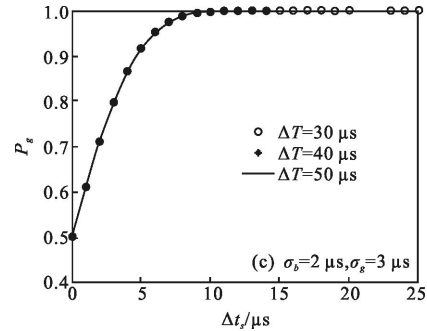
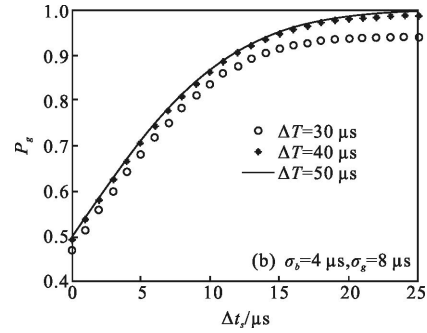
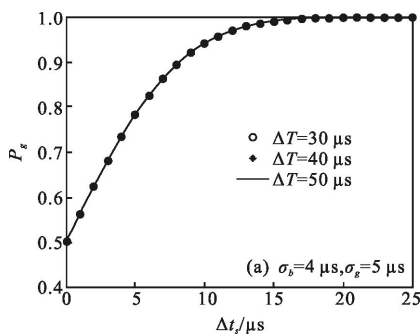


图 3 干扰信号超前进入受牵引波门的概率  $P_g$  与超前同步时间  $\Delta t_s$  的关系

Fig.3 Extraction probability of jamming signal in range gate pull off vs advance-synchronizing time

(n+2)波门录取制导信号的概率为:

$$P_z = \frac{1}{2\pi\sigma_b\sigma_g} \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} \int_{t_1}^{\Delta T/2} \exp\left(-\frac{t_2^2}{2\sigma_g^2}\right) \cdot \exp\left[-\frac{(t_1-\Delta t_s)^2}{2\sigma_b^2}\right] \cdot dt_1 dt_2 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_b} \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} \exp\left[-\frac{(t_1-\Delta t_s)^2}{2\sigma_b^2}\right] dt_1 \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_g} \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} \exp\left(-\frac{t_2^2}{2\sigma_g^2}\right) dt_2 \right\} \quad (8)$$

由于公式(8)与公式(7)呈“互补”关系,这里略去对公式(8)的仿真图形。

3 干扰条件下波门录取激光信号的 Monte-Carlo 法模拟

制导信号与干扰信号在波门内的“竞争”从发射

干扰脉冲起,一直要持续到导引头离目标(或假目标)足够近以致有一个信号无法进入导引头的视场内为止,对这种“竞争”可以采用 Monte-Carlo 法进行模拟。假设在一次干扰中,可发射 100 个有效的激光干扰脉冲,超前同步时间取  $10\ \mu\text{s}$ ,  $\sigma_b$  取  $4\ \mu\text{s}$ ,  $\sigma_g$  取  $5\ \mu\text{s}$ , 模拟刚开始时用公式(4)判断波门是否录取干扰信号,如果录取的是干扰信号,则需要考虑波门受到牵引的影响,每个波门逐一分析,直至干扰结束。在一次制导过程中波门录取制导信号与干扰信号的次数用 Monte-Carlo 法模拟的结果见表 1。

表 1 波门录取激光信号的 Monte-Carlo 法模拟结果

Tab.1 Simulating results of range gate extraction laser signal by Monte-Carlo

Width of range gate / $\mu\text{s}$	Extraction of jamming signal	Extraction of guidance signal
30	87	13
40	93	7
50	94	6

上述模拟是针对一次制导过程波门对激光信号的录取进行的,如果模拟多次制导过程(例如 200 次)且认为激光制导武器过载能力足够强,“竞争”刚结束时,波门录取的信号为最终跟踪对象,则激光半主动制导武器跟踪目标和假目标的次数见表 2。

表 2 导引头跟踪真假目标的 Monte-Carlo 法模拟

Tab.2 Simulation of tracking target or false target by Monte-Carlo

Width of range gate / $\mu\text{s}$	Extraction of jamming signal	Extraction of guidance signal
30	182	18
40	183	17
50	183	17

#### 4 结束语

利用联合概率密度分布函数描述干扰条件下波门对处于其内的多个激光信号的录取,不仅可以仿真出超前同步时间对干扰的影响,还可以分析波门受到牵引后,其对激光信号探测的影响,进而利用 Monte-Carlo 法模拟一次制导中波门对干扰信号的录取过程以及多次制导中导引头跟踪目标和假目标的次数。

对首脉冲抓取的实时波门,运用联合概率密度仿真模型可以得出一些新的有意义的结论:

(1) 采用超前同步干扰时,随着超前同步时间的增加,激光导引头波门录取干扰信号的概率先增加后下降,即存在一个最佳的超前同步时间,波门越宽,最佳超前同步时间值越大;

(2) 超前同步时间为零时,波门录取干扰信号的概率接近或略低于 0.5,而不是接近于 1.0;

(3) 波门受到牵引时,其录取干扰信号的概率增加,且超前同步时间越大增加越明显,而波门宽度的影响不大。

波门对激光信号的录取还与波门的类型、导引头的视场角、光电探测器的灵敏度、激光制导武器的横向过载能力、大气的影响等因素有关,实际建模中需要考虑这些因素的影响。

#### 参考文献:

- [1] Li Shuanggang, Nie Jinsong, Li Hua, et al. Assessment of effectiveness about angle deceptive jamming to semi-active laser-guided weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 41-43. (in Chinese)
- [2] Tong Zhongcheng. Effectiveness analysis on laser angle-cheating jamming [J]. *Aerospace Electronic Countermeasure*, 2003(5): 43-45. (in Chinese)
- [3] Zang Yongqiang, Liu Zhiguo, Wang Shicheng, et al. Digital simulation on laser-angle-cheating Jamming [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3234-3240. (in Chinese)
- [4] Tong Zhongcheng. Simulation research on ahead-time of laser-angle-cheating jamming [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(5): 633-636. (in Chinese)
- [5] Liu Yanyan, Yan Xiusheng, Gao Wenqing. et al. Mathematics simulation analysis of the laser deception jamming [J]. *Journal of CAEIT*, 2011, 6(3): 271-274. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] Chen Yudan, Ying Jiaju, Li Li, et al. Study on key factors of laser-cheating-jamming [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, 35(4): 729-737. (in Chinese)
- [8] Xing Hui, Lei Ping, Liu Ling, et al. Analysis of numerical model of the laser active jamming effectiveness [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2006, 21(3): 20-23. (in Chinese)