

## 激光角度欺骗干扰效果评估实验研究

王伟柱, 刘志国, 王仕成, 刘 硕

(火箭军工程大学 控制工程系, 陕西 西安 710025)

**摘 要:** 为实现对激光角度欺骗干扰效果的有效评估, 构建了激光角度欺骗干扰效果评估系统, 详细介绍了目标运动模拟分系统、激光制导导弹模拟分系统和干扰效果评估分系统的结构组成和功能, 并结合干扰效果评估方法, 设计了相关实验, 通过对实验测试数据的详细分析, 对干扰效果进行了评估。实验中, 当激光脉冲周期为 50 000  $\mu\text{s}$  时, 设置干扰激光超前制导激光 2、3、4、-3  $\mu\text{s}$ , 解算出落点偏差分别为 154.14、167.03、174.93、0.52 m; 当激光脉冲周期为 51 200  $\mu\text{s}$  时, 设置干扰激光超前制导激光 2、-2、3  $\mu\text{s}$ , 解算出落点偏差分别为 396.86、0.53、396.86 m。结果表明: 当干扰脉冲超前制导脉冲进入导引头波门模拟器时, 可成功实现对导引头模拟器的干扰, 受干扰后的导引头模拟器只跟踪干扰激光光斑, 而不是干扰激光和指示激光的能量中心。以落点偏差为评估指标, 对干扰效果进行了评估分析, 研究结果可为激光制导对抗评估提供技术支持。

**关键词:** 角度欺骗; 实验分析; 干扰效果; 评估准则

中图分类号: TN977 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1106007

## Evaluation of laser angle deception interference effect based on experiment

Wang Weizhu, Liu Zhiguo, Wang Shicheng, Liu Shuo

(Department of Control Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** In order to realize the effective evaluation of the effect of laser angle deception, the laser angle deception interference effect evaluation system was constructed, and the structure and function of the target motion simulation subsystem, the laser guided missile simulation sub-system and the interference effect evaluation subsystem were introduced in detail. Combined with the interference effect evaluation method, the relevant experiment was designed. Through the detailed analysis of the experimental data, the interference effect was evaluated. In the experiment, when the laser pulse period was 50 000 microseconds, the interference laser was set up 2, 3, 4, and -3 microseconds ahead of guidance laser, and the solutions of point deviations were 154.14, 167.03, 174.93, and 0.52 meters respectively; When the laser pulse period was 51 200 microseconds, the interference laser was set up 2, -2, and 3 microseconds ahead of guidance laser, and the solutions of point deviations were 396.86, 0.53, and 396.86 meters respectively. The results show that the interference of the pilot emitter can be achieved when the interference pulse leading pulse enters the seeker gate simulator. Through this experiment, it was found that the seeker simulator tracks the interference of laser spot itself in laser angle deception interference, rather than the interference laser and

收稿日期: 2018-06-05; 修订日期: 2018-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(61403398, 61673017)

作者简介: 王伟柱(1992-), 男, 硕士生, 主要从事激光制导仿真、激光对抗方面的研究。Email: 562986027@qq.com

导师简介: 王仕成(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事导航、制导控制、控制理论与工程方面的研究。Email: wshcheng@vip.163.com

indicating the laser energy center. The deviation of the placement point for the assessment of indicators, the interference effect were evaluated and analyzed, and the results can provide technical support for laser guidance and confrontation evaluation.

**Key words:** angle deception; experiment analysis; interference effect; assessment criteria

## 0 引言

随着激光制导技术的不断发展, 激光干扰技术的研究和运用也得到了长足发展, 其中激光角度欺骗干扰技术是目前国内外研究比较广泛且较为成熟的一门技术<sup>[1]</sup>。对激光角度欺骗干扰效果的评估正成为需要迫切解决的问题, 国内同行对此开展了相关工作, 获得了一些有价值的研究结论<sup>[2-6]</sup>。实际应用中, 发现干扰效果与很多因素有关<sup>[7-8]</sup>, 同样的装备性能参数在不同的应用场景下, 会有不同的干扰效果, 因此, 基于实验数据开展角度欺骗干扰效果评估分析和研究还很有必要。

## 1 干扰效果评估系统的设计

### 1.1 系统组成

系统主要由目标运动模拟分系统、激光制导导弹模拟系统、干扰效果评估分系统组成, 其结构框图如图1所示。

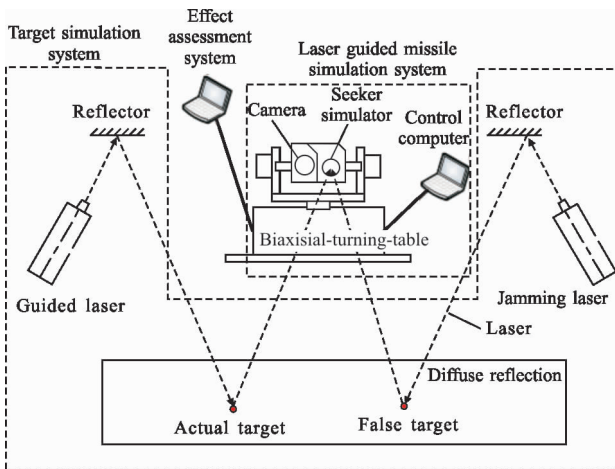


图 1 激光角度欺骗干扰效果评估系统

Fig.1 Evaluation system of laser angle deception interference

#### 1.1.1 目标运动模拟分系统

激光指示器、两轴转台及反射镜、转台控制计算机和漫反射屏组成了目标运动模拟系统, 它是由激

光指示器发出激光信号经反射镜反射在漫反射屏上形成激光光斑, 以此光斑来模拟激光打击目标。反射镜安装在两轴转台上, 通过控制两轴转台的俯仰和偏航方向的运动, 使投射在漫反射屏上的光斑也按一定规律运动, 实现对激光打击目标运动的模拟。

制导激光模拟产生部分由固体激光器和两轴转台组成, 角度欺骗干扰中干扰激光模拟产生部分和制导激光模拟产生部分相同。

#### 1.1.2 激光制导导弹模拟系统

激光制导导弹模拟系统由两轴转台及其控制计算机、激光接收设备组成。激光接收设备是由导引头模拟器、摄像头和两轴转台组成。导引头模拟器是整个系统的核心组成部件, 能够对接收的激光进行解码计算, 模拟真实导引头完成对激光武器的锁定、跟踪和识别过程; 摄像头用来记录导引头模拟器的跟踪轨迹和激光光斑的位置信息, 而且该系统具有视频显示功能, 可以对记录的搜索轨迹进行回放; 两轴转台用来控制导引头模拟器和摄像头在俯仰和方位两个方向上的运动。

将导引头模拟器固联在转台内框上, 用来模拟导弹的姿态角运动, 激光制导导弹仿真系统实现导弹搜索识别、锁定跟踪和失去目标再跟踪全过程, 能对导弹进行弹道实时解算, 导弹与目标之间的视线角关系和导弹与假目标(干扰激光器或漫反射屏)之间的视线角关系的计算等。

#### 1.1.3 干扰效果评估分系统

干扰效果评估分系统是系统的重要组成部分, 由两大部分七大模块组成, 分别为显示部分的视频显示模块、编码信息模块、态势显示模块、信息显示模块和操作部分的视频操作模块、转台控制模块、操作控制模块。干扰效果评估系统功能较为全面、性能稳定, 具有良好的可操作性, 可视化效果良好, 能很直观地体现干扰效果, 提高了评估的可靠性。

## 1.2 干扰效果评估方法

激光武器受到干扰作用后都是导致脱靶量增大, 最终体现在脱靶量上, 所以无论哪种干扰方式,

以脱靶量为评估指标都是可行的,也是最直接和最方便的。传统的以脱靶量为评估指标的激光制导武器的干扰效果可以分为三个等级,即 0 级干扰、1 级干扰和 2 级干扰<sup>[9]</sup>。评定准则详细为:

$$\begin{cases} L \leq A & 0 \text{ 级, 干扰无效} \\ A < L < R+A & 1 \text{ 级, 干扰有效} \\ L \geq A+R & 2 \text{ 级, 干扰成功} \end{cases}$$

式中: $L$ 为脱靶量; $A$ 为制导武器本身的制导误差; $R$ 为制导武器的杀伤半径。上述参数的单位均为 m。0 级干扰表示无法实现干扰;1 级干扰表示制导武器脱靶量增大,无法直接命中、但仍可杀伤目标;2 级干扰表示干扰很彻底,制导武器无法杀伤目标。在实际运用中可以根据需要对评估准则进行更加详细、更加细化的分析。

为求得脱靶量,需要测量出导引头模拟器俯仰角和方位角的初始值和受到干扰后偏转的大小,如图 2 所示, $\theta$ 、 $\gamma$ 为方位角和俯仰角的初始值, $\Delta\theta$ 、 $\Delta\gamma$ 分别表示方位角和俯仰角偏转的大小, $h$ 表示导引头模拟器与漫反射屏的垂直距离, $\delta$ 表示漫反射屏上引偏的距离, $L$ 表示脱靶量。

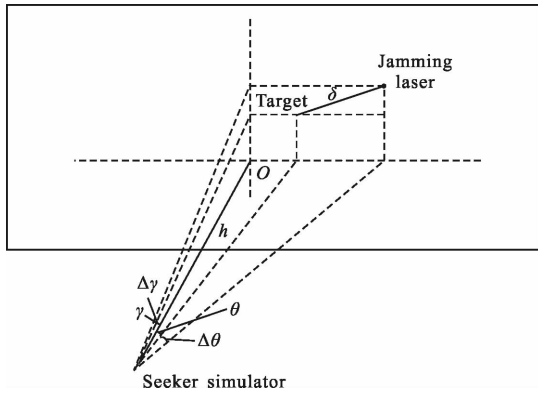


图 2 角度欺骗干扰分解示意图

Fig.2 Decomposition diagram of angle deception interference

根据几何关系可以求得在受到干扰后在漫反射屏上引偏的距离为:

$$\delta = \sqrt{[h \tan(\theta + \Delta\theta) - h \tan\theta]^2 + [h \tan(\gamma + \Delta\gamma) - h \tan\gamma]^2}$$

则实际脱靶量为:

$$L = \delta \cdot \eta = \delta \cdot \frac{S}{h}$$

式中: $S$ 为激光制导武器的打击距离。

## 2 角度欺骗干扰实验设计

角度欺骗干扰实验需要指示激光器和干扰激光

器一起工作,具体的实验步骤如下所示:

(1) 给指示激光器和干扰激光器通电,通过双通道信号发生器控制指示激光和干扰激光的延时发生,信号发生器通道 1 发出干扰信号,能量为 184  $\mu\text{J}$ ,通道 2 发出指示信号,能量为 90  $\mu\text{J}$ 。设置激光脉冲周期为 50 000  $\mu\text{s}$ ,给导引头模拟器上电,通道 2 控制产生指示激光信号。

(2) 待导引头模拟器搜索到指示激光信号后通过信号发生器通道 1 发出干扰激光信号,设置干扰激光脉冲周期为 50 000  $\mu\text{s}$ ,然后使干扰激光照射在导引头模拟器的视场范围内的位置①(如图 3 所示),通过信号发生器使通道 1 发出的干扰激光超前目标激光 2  $\mu\text{s}$ ,测量并记录导引头模拟器姿态角信号和 AGC 信号的变化。

(3) 设置激光指示信号能量为 184  $\mu\text{J}$ ,干扰激光信号能量为 90  $\mu\text{J}$ ,调节指示激光照射位置于②,通过信号发生器使通道 1 发出的干扰激光超前目标激光 3  $\mu\text{s}$ ,并照射在位置③;然后设置干扰激光超前 4  $\mu\text{s}$ ,再调节干扰激光照射位置于④,再次测量并记录导引头模拟器姿态角信号和 AGC 信号的变化;将干扰激光设置为滞后制导激光 3  $\mu\text{s}$ ,再次记录测试数据。

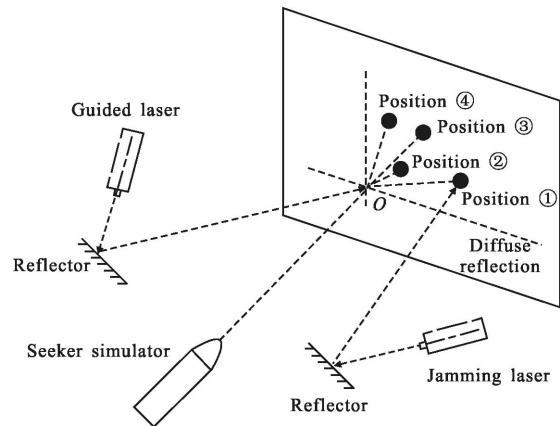


图 3 角度欺骗干扰实验原理示意图

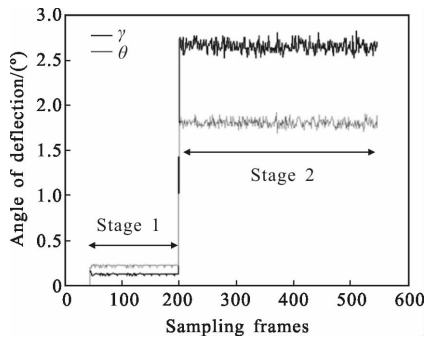
Fig.3 Principle of angle deception interference

(4) 调节指示激光信号周期为 51 200  $\mu\text{s}$ ,给导引头模拟器上电后重新设置干扰激光脉冲信号周期为 51 200  $\mu\text{s}$ ,指示激光能量为 90  $\mu\text{J}$ ,干扰激光能量为 184  $\mu\text{J}$ ,首先设置干扰激光超前 2  $\mu\text{s}$ ,然后设置干扰激光滞后 2  $\mu\text{s}$ ,最后设置干扰激光超前 3  $\mu\text{s}$ ,在这三种情况下分别测量并记录导引头模拟器姿态角信号和 AGC 信号的变化。

### 3 角度欺骗干扰效果评估

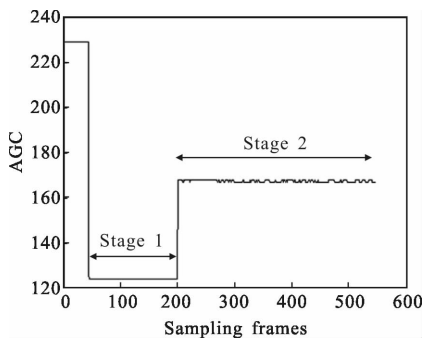
根据实验步骤(1)、(2)中采集的数据,可以得到激光角度欺骗干扰在干扰信号超前指示信号  $2\ \mu\text{s}$  时导引头模拟器的俯仰角和方位角的变化情况,具体如图 4 所示。

根据图 4 可知,在阶段 1 导引头模拟器接收到目标指示信号后能够迅速搜索到目标,并求得导引头模拟器的俯仰角平均值为  $0.13^\circ$ ,方位角平均值为  $0.23^\circ$ 。由于目标激光能量、地面反射等因素的影响,导引头模拟器测出的角度和 AGC 信号有点抖动,但对实验的准确性影响不大。



(a) 导引头模拟器姿态角变化曲线( $t=50\ 000\ \mu\text{s}$ )

(a) Change curves of attitude angle of seeker simulator( $t=50\ 000\ \mu\text{s}$ )



(b) 导引头模拟器 AGC 信号曲线( $t=50\ 000\ \mu\text{s}$ )

(b) AGC signal curves of seeker simulator( $t=50\ 000\ \mu\text{s}$ )

图 4  $t=50\ 000\ \mu\text{s}$  时测试数据

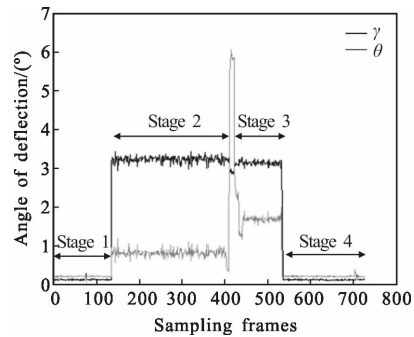
Fig.4 Test data when  $t=50\ 000\ \mu\text{s}$

当加入超前于指示激光  $2\ \mu\text{s}$  的干扰激光信号后进入阶段 2,导引头模拟器被引偏得比较明显,俯仰角和方位角都有较大程度的偏转,AGC 信号有所增大,根据所测得的数据可以求出引偏后的俯仰角平均值为  $2.63^\circ$ ,方位角为  $1.79^\circ$ ,俯仰角和方位角的变

化幅度较小,AGC 信号大小为 167,而且保持得比较稳定。激光干扰信号超前于指示信号  $2\ \mu\text{s}$  可以实现成功干扰,表明导引头模拟器采用的是首脉冲锁定制导方式。

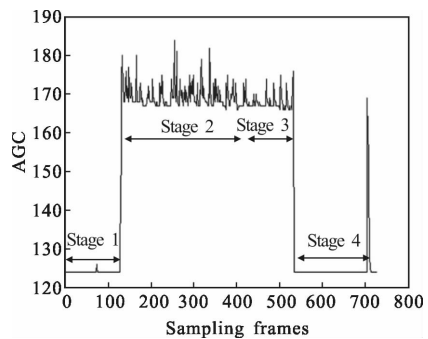
步骤(4)位置③到位置④的变化只是方位角偏转了  $0.9^\circ$ ,俯仰角无偏转,实验测得的数据如图 5 所示。

步骤(4)中改变了激光照射位置和干扰激光和指示激光能量的大小,图 5(a)显示由位置②到位置③导引头模拟器的俯仰角和方位角都变化明显,由位置③到位置④导引头模拟器的俯仰角变化不明显,只有方位角发生明显变化,这与实验设计也是相符的。根据所测得的数据计算出导引头模拟器在位置②处的俯仰角为  $0.11^\circ$ ,方位角为  $0.20^\circ$ ,AGC 信号为 125;在位置③处俯仰角为  $3.23^\circ$ ,方位角为  $0.81^\circ$ ,AGC 信号为 169;在位置④俯仰角为  $3.14^\circ$ ,方位角为  $1.65^\circ$ ,AGC 信号为 168;最后干扰激光滞后时测得俯仰角为  $0.11^\circ$ ,方位角为  $0.21^\circ$ ,AGC 信号为 125。



(a) 导引头模拟器姿态角变化曲线

(a) Change curves of attitude of seeker simulator



(b) 导引头模拟器 AGC 信号曲线

(b) AGC signal curves of seeker simulator

图 5 变化位置后测试数据

Fig.5 Test data after position changing

现有的理论研究中导引头在被干扰成功后跟踪

的是干扰激光和指示激光两者的能量中心,但文中实验表明激光角度欺骗干扰成功后导引头模拟器跟踪的是干扰激光的能量中心,导引头模拟器完全跟踪干扰激光,而不是干扰激光和指示激光两者的能量中心。另外,由于步骤(4)中干扰激光能量小于指示激光能量,但仍能实现成功干扰,表明角度欺骗干扰的决定性因素不是激光能量大小,而是干扰激光能否超前指示激光和干扰激光能否进入波门<sup>[10-12]</sup>这两个因素。在发出干扰信号后导引头模拟器偏转的角度明显发生变化,能够被干扰激光成功引偏,实现干扰。

步骤(5)中将激光周期设置为 51 200 μs,如图 6 所示,导引头模拟器在阶段 1 锁定指示激光信号,阶

显,阶段 3 干扰失效,阶段 1 和阶段 3 由于激光能量较小,偏转信号和 AGC 信号抖动较大,在阶段 2 的干扰信号能量较大,抖动较小,但能量的大小对激光角度欺骗干扰的效果影响不大,均能实现成功干扰。

根据 1.2 节有:

$$\delta = h \sqrt{[\tan(\theta + \Delta\theta) - \tan\theta]^2 + [\tan(\gamma + \Delta\gamma) - \tan\gamma]^2}$$

$$L = S \sqrt{[\tan(\theta + \Delta\theta) - \tan\theta]^2 + [\tan(\gamma + \Delta\gamma) - \tan\gamma]^2}$$

假设激光制导武器的攻击机距离为  $S=3\ 000\text{ m}$ ,制导误差为  $10\text{ m}$ ,杀伤半径为  $50\text{ m}$ ,根据上述两式可以求得干扰后激光制导武器的落点偏差,根据落点偏差可以判断出干扰等级,如表 1 所示。

表 1 落点偏差及干扰效果等级评估

Tab.1 Drop point deviation and interference effect rating

| Pulse period /μs | Leading time of interference/μs | Drop point deviation/m | Interference effect |
|------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------|
| 50 000           | 2                               | 154.14                 | Success             |
|                  | 3                               | 167.03                 | Success             |
|                  | 4                               | 174.93                 | Success             |
|                  | -3                              | 0.52                   | Failure             |
| 51 200           | 2                               | 396.86                 | Success             |
|                  | -2                              | 0.53                   | Failure             |
|                  | 3                               | 396.86                 | Success             |

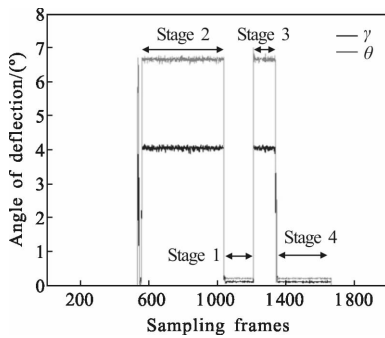
Note: negative sign indicates interference laser lags guided laser

上表中脉冲周期为 50 000 μs 时,利用超前 2、3、4 μs 的干扰激光照射在不同位置来模拟不同的假目标布设位置,脉冲周期为 51 200 μs 时,干扰激光照射的位置相同,实验表明,只要干扰激光以合适的超前时间进入波门,就能成功实现干扰,干扰成功的落点偏差与假目标布设位置有关,与干扰超前时间无关。

文中只考虑了假目标布设位置和干扰超前时间对落点偏差的影响,而且落点偏差大小是在理想实验条件下得出的,实际上激光角度欺骗干扰效果还与多种因素有关,比如干扰加入时机、受到干扰时导引头到目标的距离、导弹的过载能力等。

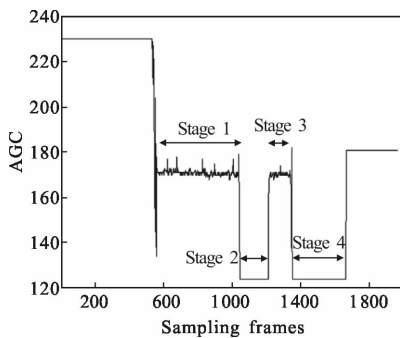
### 4 结束语

基于设计的激光有源干扰效果评估系统,开展了激光有源干扰实验。研究表明:当干扰脉冲超前制



(a) 导引头模拟器姿态角变化曲线( $t=51\ 200\ \mu\text{s}$ )

(a) Change curves of attitude angle of seeker simulator( $t=51\ 200\ \mu\text{s}$ )



(b) 导引头模拟器 AGC 信号变化曲线( $t=51\ 200\ \mu\text{s}$ )

(b) Change curves of AGC signal of seeker simulator( $t=51\ 200\ \mu\text{s}$ )

图 6  $t=51\ 200\ \mu\text{s}$  时测试数据

Fig.6 Test data when  $t=51\ 200\ \mu\text{s}$

段 1 俯仰角为  $4.04^\circ$ ,方位角为  $6.66^\circ$ ,AGC 信号为 171;阶段 2 俯仰角为  $0.11^\circ$ ,方位角为  $0.20^\circ$ ,AGC 信号为 124;阶段 3 俯仰角为  $4.04^\circ$ ,方位角为  $6.65^\circ$ ,AGC 信号为 170;阶段 4 俯仰角为  $0.11^\circ$ ,方位角为  $0.20^\circ$ ,AGC 信号为 124。加入干扰后分别在阶段 2、阶段 4 被干扰激光引偏到不同位置,而且干扰效果明

导脉冲进入导引头波门时,可成功实现对导引头的干扰,以落点偏差为评估指标,对干扰效果进行了评估分析,研究结果可为激光制导武器装备对抗评估提供支持。目前在实验室环境下完成了相关验证工作,下一步可到野外环境下进行进一步验证。

#### 参考文献:

- [1] Tong Zhongcheng, Sun Xiaoquan, Yang Xiwei, et al. Effective simulation on passive jam of laser-guiding-bomb [J]. *Journal of Ballistics*, 2008, 37(1): 106-110. (in Chinese)  
童忠诚,孙晓泉,杨希伟,等.激光制导武器高重频干扰技术仿真研究[J].弹道学报,2008,37(1):106-110.
- [2] Li Shuanggang, Nie Jinsong, Li Hua. Effectiveness evaluation of angle spoofing interference for laser semi-active guided weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 41-45. (in Chinese)  
李双双,聂劲松,李化.对激光半主动制导武器的角度欺骗干扰的效能评估[J].红外与激光工程,2011,40(1):41-45.
- [3] Wang Jiang, Lin Wei, Wang Peng. Study on energy link of semi-active simulation system of laser semi-active guided weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1230-1233. (in Chinese)  
王江,林蔚,王鹏.激光半主动制导武器半实物仿真系统能量链接研究[J].红外与激光工程,2011,40(7):1230-1233.
- [4] Liu Mancang. Design and modeling of hardware-in-the-loop simulation system for laser guided weapon [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010. (in Chinese)  
刘满仓.激光制导武器半实物仿真系统设计与建模[D].北京:北京理工大学,2010.
- [5] Wang Yunping, Zhao Changming, Li Yan. High-phase simulation test system for laser angle deception jamming [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1217-1222. (in Chinese)  
王云萍,赵长明,李岩.激光角度欺骗干扰半实物仿真试验系统[J].红外与激光工程,2012,41(5):1217-1222.
- [6] Yu Guoquan, Guo Jin, Li Yan, et al. Precision analysis of indoor simulation system for laser angle deception jam [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(10): 2610-2616. (in Chinese)  
于国权,郭劲,李岩,等.激光角度欺骗干扰内场仿真系统精度分析[J].光学精密工程,2013,21(10):2610-2616.
- [7] Yang Baoqing, Chen Yong. Study on evaluation method of laser angle spoofing jamming effect [J]. *Application of Optoelectronic Technology*, 2005, 20(4): 63-66. (in Chinese)  
杨宝庆,陈勇.激光角度欺骗干扰效果评估方法研究[J].光电技术应用,2005,20(4):63-66.
- [8] Liu Yanyan, Yan Xiusheng, Gao Wenqing. Research on mathematical simulation of laser angle deception jamming [J]. *Journal of China Institute of Electronic Science and Technology*, 2011, 6(3): 271-274. (in Chinese)  
刘严严,闫秀生,高文清.激光角度欺骗干扰效果的数学仿真分析[J].中国电子科学研究院学报,2011,6(3):271-274.
- [9] GJB4972.1-2003. National Military Standard of the People's Republic of China[S], 2013. (in Chinese)  
GJB4972.1-2003.中华人民共和国国家军用标准[S],2013.
- [10] Xing Hui, Lei Ping, Ma Na. Study and experiment on anti-jamming technique of 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.
- [11] Tong Zhongcheng. Simulation research on ahead-time of laser-angle-cheating jamming signal [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(5): 633-636. (in Chinese)  
童忠诚.激光角度欺骗干扰信号超前时间的仿真研究[J].兵工学报,2008,29(5):633-636.
- [12] Li Shuanggang. Modeling simulation of laser signal admission under doppler condition[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0106003. (in Chinese)  
李双双.干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(1):0106003.