文章编号 1004-924X(2013)10-2610-07

激光角度欺骗干扰内场仿真系统精度分析

于国权[1,2],郭 劲[1*],李 岩[1],王建军[1],崔 爽[1,2]
(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;2.中国科学院大学,北京 100039)

摘要:针对激光角度欺骗干扰设备的外场试验条件要求高,费用耗费大等问题,讨论了激光角度欺骗干扰内场仿真试验的实现技术。通过对外场试验环境进行等效模拟,在内场构造了一个对激光角度欺骗干扰装备进行检测的仿真试验系统。介绍了系统的组成原理,推导了弹目角与摆镜转角、设备距离以及设备基线与漫反射屏距离关系,并在此基础之上对弹目角的精度进行了分析。最后,用莱卡经纬仪实际测量得到弹目角,从而得到弹目角误差。测量结果与理论分析显示,方位最大误差为 17″,俯仰最大误差为 13″。得到的结果证明了激光角度欺骗内场试验方法的正确性和可行性。

关 键 词:激光对抗;激光角度欺骗干扰;内场仿真;精度分析
中图分类号:TJ95 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20132110.2610

Precision analysis of indoor simulation system for laser angle deception jam

YU Guo-quan[1,2], GUO Jin[1*], LI Yan[1], WANG Jian-jun[1], CUI Shuang[1,2]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: guojin@coimp.ac.cn*

Abstract: In consideration of the high experimental demands and higher costs of outdoor experiments for laser-angle-deception jam equipment, the simulation methods and technologies of indoor experiments for laser-angle-deception jam were discussed. A indoor simulation system was constructed in indoor field for detecting the laser-angle-deception jam. By equivalent simulation to the actual environment, the indoor simulation system was established for laser-angle-deception jam weapon detection. The composition and principle of the indoor simulation system were introduced. Then, the relation of the angle between guided missile and object was specially studied, and the influencing factors were analyzed, including the angle of mirror, the distance of device, the distance between baseline and diffuse reflecting screen. On the basis of this, its precision was analysed. Finally, the angle between guided missile and object was measured by using Leica, and its error was computed to be 17″ in azimuth and 13″ in elevation as compared to that from a theory. Obtained results prove the feasibility and validity of the indoor simulation system.

Key words: laser jamming; laser-angle-deception jam; indoor simulation; precision analysis

收稿日期:2013-03-19;**修订日期**:2013-04-22.
基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室研究基金资助项目(No. SKLLIM0902-01)

1　引　言

激光角度欺骗干扰是通过发射、转发反射激光辐射信号，形成具有欺骗功能的激光干扰信号，扰乱或欺骗敌方激光制导系统，使其得出错误的方位或距离信息，诱骗激光导引头，使其偏离被攻击目标来达到干扰，从而降低敌方光电系统的作战效能。激光角度欺骗干扰是一种有效的对抗激光制导武器的措施，军事上有重要意义[1-3]。

由于外场试验条件与高额费用限制，对激光角度欺骗干扰设备进行外场试验和评估是困难的。与外场试验相比，内场仿真试验具有灵活性高、可控性好、效费比高、重复性好等优势，为解决外场试验不能鉴定和评估的问题提供了有效的方法，并且可以克服外场试验的一些制约条件，生成外场试验难以获得的可修改的信号条件[4-6]。西方国家非常重视内场仿真试验技术在武器系统研制与试验鉴定中的作用，美国、俄罗斯等军事强国都建立了仿真试验系统，在光电对抗仿真领域美国发展得较快也较全面，代表了光电仿真技术的潮流[7-8]。

本文针对激光角度欺骗干扰设备进行了内场仿真试验系统的研究。通过对外场试验环境进行等效模拟，在内场构造了一个对激光角度欺骗装备进行检测的仿真试验系统。分析了激光角度欺骗干扰内场仿真试验系统的精度，最后通过莱卡经纬仪进行实测，证明了仿真试验系统的正确性。

2　系统组成与工作原理

激光角度欺骗干扰内场仿真实验系统主要由指示激光器与光束控制系统、指示摆镜，欺骗激光器与光束控制系统、欺骗摆镜，导引头、三轴转台、漫反射屏和仿真计算机等组成[9]，摆镜、激光器、导引头位于同一轴线，且与漫反射屏平行，如图 1 所示。

指示激光器和欺骗激光器的模式相同，具有相同的频率、波长、编码、脉宽，分别通过指示摆镜和欺骗摆镜反射到漫反射屏上，导引头接收漫反射屏上的激光信号，光束控制系统可以控制激光信号的能量衰减和出口光斑的大小，从而模拟外场环境下制导系统接收激光的能量和光斑的变化

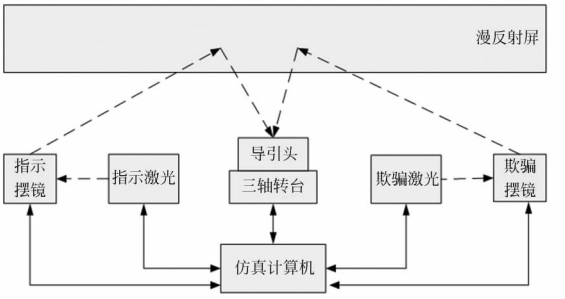


图 1　系统组成原理图

Fig. 1　Chart of system members

情况，对外场环境下导引头和目标位置关系（弹目角）以及导引头和干扰目标位置关系（弹干角）分别通过指示摆镜和欺骗摆镜的转角来模拟，激光模拟信号通过摆镜反射到漫反射屏，摆镜转动时光斑在漫反射屏上移动，位于三轴转台上导引头相对光斑角度即弹目和弹干角随之变化，三轴转台模拟导引头自身的姿态变化，仿真计算机解算弹道模型，把导引头姿态实时传递给三轴转台，弹目角和弹干角转化为摆镜的转角后传递给摆镜，导引头接收到模拟激光信号后输出导引四象限信号，反馈到仿真计算机，进行下一次的弹道解算，如此循环形成了激光角度欺骗干扰的内场仿真闭环过程。对于能量和光斑大小的模拟已有相关文献论述，本文论述了等效模拟外场的弹目和弹干位置变化，讨论了弹目和弹干位置关系模拟精度。

3　内外场等效关系推导

3.1　弹目角与反射激光及设备位置关系

弹干与弹目位置变化关系推导方式相同，因此以弹目位置关系为例进行推导，摆镜回转中心

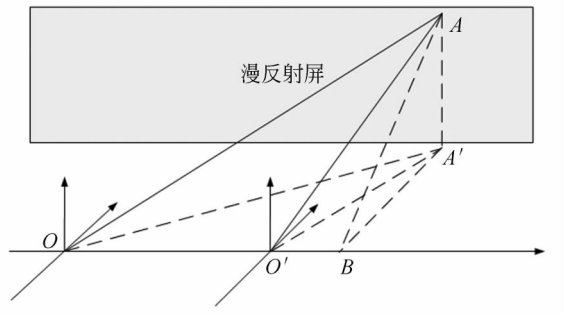


图 2　弹目角与反射角关系

Fig. 2　Relation of reflection angle and the angle between missile and object

O 与导引头中心 O' 水平面高度相同，并且 OO' 与漫反射屏平行，漫反射屏与设备轴线 OO' 间距为 L，间距 OO' 距离为 D；导引头相对漫反射屏上光斑方位角为 A_1、俯仰角 E_1，经摆镜反射后激光方位角 A'、俯仰角 E'，其中方位角以 OO' 为坐标轴，逆时针方向为正，如图 2 所示。

由设备间位置关系可得到 A_1、E_1 和 A'、E' 关系式(1)、(2)：

$$\begin{cases}\cot A_1=\cot A'-D/L\\ \tan E_1=\dfrac{\tan E'}{\sqrt{(\sin A')^2+(D/L\cdot\sin A'-\cos A')^2}}\end{cases},\tag{1}$$

$$\begin{cases}A_1=\operatorname{arccot}(\cot A'-D/L)\\ E_1=\arctan\left(\dfrac{\tan E'}{\sqrt{(\sin A')^2+(D/L\cdot\sin A'-\cos A')^2}}\right)\end{cases}.\tag{2}$$

3.2 反射光与摆镜转角关系

以摆镜回转中心 O 为坐标原点，设 KO 为入射光线，OS 为反射光线，OM 为摆镜法线，由反射定理可知 $\alpha=\angle MOS=\angle KOM$，$OKMS$ 位于同一个平面内，MP、SC 垂直水平面，PQ、CD 垂直于 KO 轴，则平面 $OKMS$ 与水平面交角为 $\beta=\angle MQP=\angle SDC$，设以 O 为中心的球为单位球体，如图 3 所示。

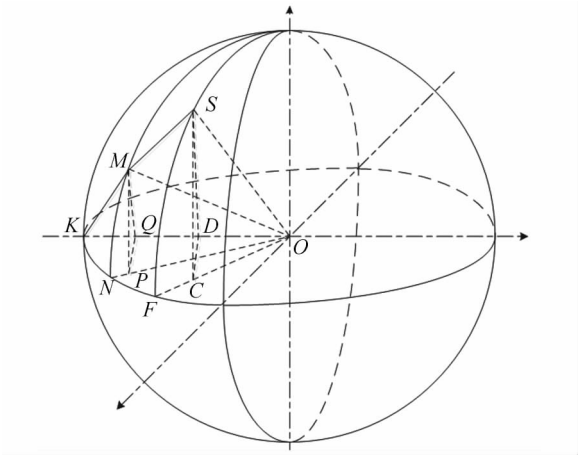


图 3　反射角与摆镜转角关系

Fig. 3　Relation of reflection angle and mirror angle

若摆镜转角(即法线 OM 的方位和俯仰角)分别为 $\angle KON=A$、$\angle NOM=E$，可知：

$$\begin{cases}\cos\alpha=\dfrac{QO}{MO}=\cos E\cos A\\ \tan\beta=\dfrac{MP}{PQ}=\dfrac{\tan E}{\sin A}\end{cases},\tag{3}$$

$$\begin{cases}\alpha=\arccos(\cos E\cos A)\\ \beta=\arctan\left(\dfrac{\tan E}{\sin A}\right)\end{cases},\tag{4}$$

其中：$\begin{cases}QO=\cos E\cos A\\ PQ=\cos E\sin A\\ MP=\sin E\end{cases}$.

进而可以推得反射光线方位和俯仰角 $\angle KOF=A'$、$\angle SOF=E'$。

$$\begin{cases}\tan A'=CD/DO=\tan 2\alpha\cos\beta\\ \sin E'=SC/SO=\sin 2\alpha\sin\beta\end{cases},\tag{5}$$

$$\begin{cases}A'=\arctan(\tan 2\alpha\cos\beta)\\ E'=\arcsin(\sin 2\alpha\sin\beta)\end{cases},\tag{6}$$

其中：

$$\begin{cases}DO=\cos 2\alpha\\ SD=\sin 2\alpha\\ SC=SD\cdot\sin\beta\\ CD=SD\cdot\cos\beta\end{cases}.$$

4 内场仿真系统精度分析

误差传递定律的一般形式为[10]

$$\sigma_y=\pm\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial F}{\partial x_i}\right)^2\sigma_{x_i}^2},\tag{7}$$

由于摆镜转角 A、E 为独立的变量，则对(4)式和(6)式求偏导得到：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\alpha}{\partial A}=\dfrac{\cos E\sin A}{\sqrt{1-(\cos\alpha)^2}}\\ \dfrac{\partial\alpha}{\partial E}=\dfrac{\cos A\sin E}{\sqrt{1-(\cos\alpha)^2}}\\ \dfrac{\partial\beta}{\partial A}=\dfrac{1}{1+(\tan\beta)^2}\cdot\dfrac{-\tan E\cos A}{\sqrt{(\sin A)^2}}\\ \dfrac{\partial\beta}{\partial E}=\dfrac{1}{1+(\tan\beta)^2}\cdot\dfrac{(\sec E)^2}{\sqrt{\sin A}}\end{cases},\tag{8}$$

$$\begin{cases}\dfrac{\partial A'}{\partial\alpha}=\dfrac{2(\sec 2\alpha)^2\cos\beta}{1+(\tan 2\alpha\cos\beta)^2}\\ \dfrac{\partial A'}{\partial\beta}=\dfrac{-\tan 2\alpha\sin\beta}{1+(\tan 2\alpha\cos\beta)^2}\\ \dfrac{\partial E'}{\partial\alpha}=\dfrac{2\cos 2\alpha\sin\beta}{\sqrt{1-(\sin 2\alpha\sin\beta)^2}}\\ \dfrac{\partial E'}{\partial\beta}=\dfrac{\sin 2\alpha\cos\beta}{\sqrt{1-(\sin 2\alpha\sin\beta)^2}}\end{cases}.\tag{9}$$

根据误差传递定律的一般形式，反射光角度误差为：

$$\begin{cases}\sigma_{A'}=\pm\sqrt{(\dfrac{\partial A'}{\partial\alpha}\sigma_\alpha)^2+(\dfrac{\partial A'}{\partial\beta}\sigma_\beta)^2}\\ \sigma_{E'}=\pm\sqrt{(\dfrac{\partial E'}{\partial\alpha}\sigma_\alpha)^2+(\dfrac{\partial E'}{\partial\beta}\sigma_\beta)^2}\end{cases},\tag{10}$$

其中：$\begin{cases}\sigma_\alpha=\pm\sqrt{(\dfrac{\partial\alpha}{\partial A}\sigma_A)^2+(\dfrac{\partial\alpha}{\partial E}\sigma_E)^2}\\ \sigma_\beta=\pm\sqrt{(\dfrac{\partial\beta}{\partial A}\sigma_A)^2+(\dfrac{\partial\beta}{\partial E}\sigma_E)^2}\end{cases}$.

最后对(2)式求偏导得到

$$\begin{cases}\dfrac{\partial A_1}{\partial A'}=\dfrac{-(\csc A')^2}{1+(\dfrac{D}{L}-\cot A')^2}\\ \dfrac{\partial A_1}{\partial D}=\dfrac{1}{1+(\dfrac{D}{L}-\cot A')^2}\cdot\dfrac{1}{L}\\ \dfrac{\partial A_1}{\partial L}=\dfrac{1}{1+(\dfrac{D}{L}-\cot A')^2}\cdot\dfrac{D}{L}\cdot\dfrac{-1}{L}\end{cases},\tag{11}$$

$$\begin{cases}\dfrac{\partial E_1}{\partial A'}=\dfrac{-\tan E'(\sin A'\cos A'+2(\dfrac{D}{L}\sin A'-\cos A')(\dfrac{D}{L}\cos A'+\sin A'))}{\sqrt{((\sin A')^2+(\dfrac{D}{L}\sin A'-\cos A')^2)^3}}\\ \dfrac{\partial E_1}{\partial E'}=\dfrac{(\sec E')^2}{\sqrt{(\sin A')^2+(\dfrac{D}{L}\sin A'-\cos A')^2}}\\ \dfrac{\partial E_1}{\partial D}=\dfrac{-\tan E'(\dfrac{D}{L}\sin A'-\cos A')\dfrac{1}{L}\sin A'}{\sqrt{((\sin A')^2+(\dfrac{D}{L}\sin A'-\cos A')^2)^3}}\\ \dfrac{\partial E_1}{\partial L}=\dfrac{\tan E'(\dfrac{D}{L}\sin A'-\cos A')\dfrac{D}{L}\dfrac{1}{L}\sin A'}{\sqrt{((\sin A')^2+(\dfrac{D}{L}\sin A'-\cos A')^2)^3}}\end{cases}.\tag{12}$$

根据误差传递定律的一般形式，弹目方位角和俯仰角误差为：

$$\sigma_{A_1}=\pm\sqrt{(\frac{\partial A_1}{\partial A'}\sigma_{A'})^2+(\frac{\partial A_1}{\partial L}\sigma_L)^2+(\frac{\partial A_1}{\partial D}\sigma_D)^2},\tag{13}$$

$$\sigma_{E_1}=\pm\sqrt{(\frac{\partial E_1}{\partial A'}\sigma_{A'})^2+(\frac{\partial E_1}{\partial E'}\sigma_{E'})^2+(\frac{\partial E_1}{\partial D}\sigma_D)^2+(\frac{\partial E_1}{\partial L}\sigma_L)^2}.\tag{14}$$

由公式(13)、(14)可知弹目角精度与摆镜转角及其精度、距离 D 及其标定精度、设备基线到漫反射屏距离 L 及其标定精度有关系，已知 D 为 5 m，L 为 10 m，距离的标定精度为 $\sigma_D=\sigma_L=0.05$ m，摆镜的方位俯仰角精度为 $\sigma_{A'}=\sigma_{E'}=30''$[11]，漫反射屏宽度为 10 m、高度为 5 m，且其底边与设备中心高度相同，底边中心与导引头连线垂直设备轴线，计算可得摆镜方位角 20°～50°、俯仰角 0°～30°内反射光线可覆盖整个漫反射屏，那么由以上公式可得在 L、D 及其精度和摆镜精度确定情况下，弹目方位角误差随摆镜转角变化曲线如图 4 所示，弹目俯仰角误差变化曲线如图 5 所示。从图中可以看出误差在小方位角高仰角时值大，方位误差为 133″，俯仰误差为 181″。

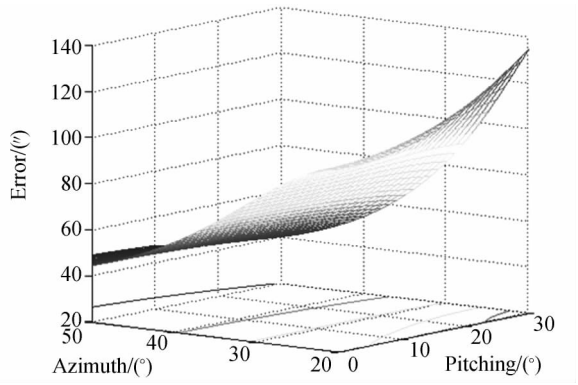


图 4　方位角误差曲线

Fig. 4　Curve of error in azimuth

在实际的检测中，可以把高精度的莱卡经纬仪放置在导引头的位置，调节经纬仪中心与摆镜

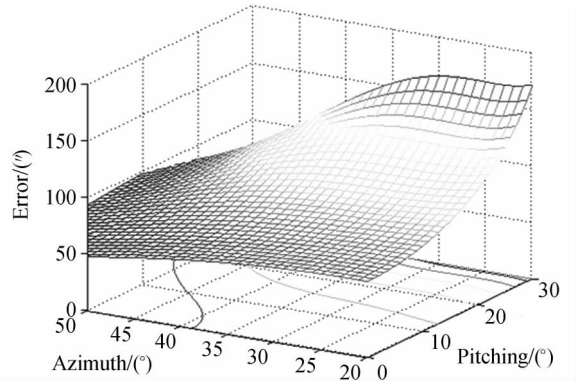


图 5　俯仰角误差曲线

Fig. 5　Curve of error in elevation

中心在同一高度，莱卡的方位零度与 OO' 重合，这样莱卡的方位角和俯仰角的值即为上述所求的弹目角 A_1、E_1 的实测值，从而可以得出实际的方位和俯仰误差值。在摆镜方位角为 30°，不同的仰角下，方位角和俯仰角理论误差值和实测误差值如图 6、图 7 所示。在摆镜方位角为 50°，不同的仰角下，方位角和俯仰角理论误差值和实测误差值如图 8、图 9 所示。

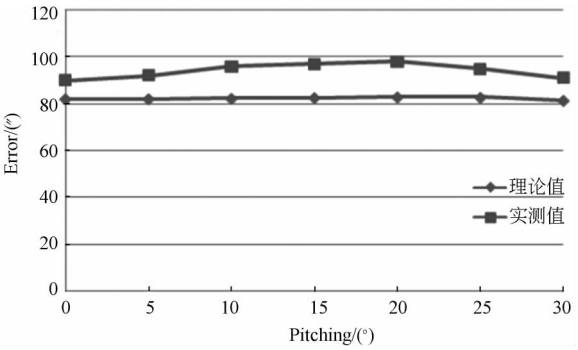


图 6　30°摆镜转角下弹目方位误差曲线

Fig. 6　Curves of error in azimuth of 30°mirror angle

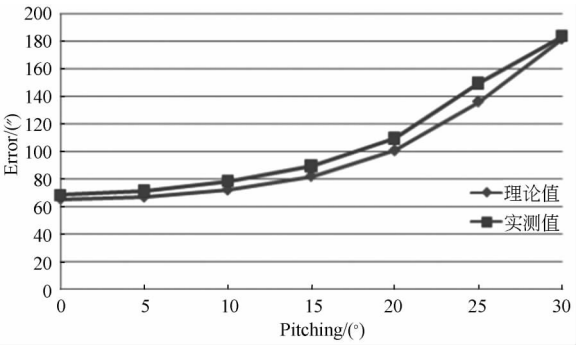


图 7　30°摆镜转角下弹目俯仰误差曲线

Fig. 7　Curves of error in elevation of 30°mirror angle

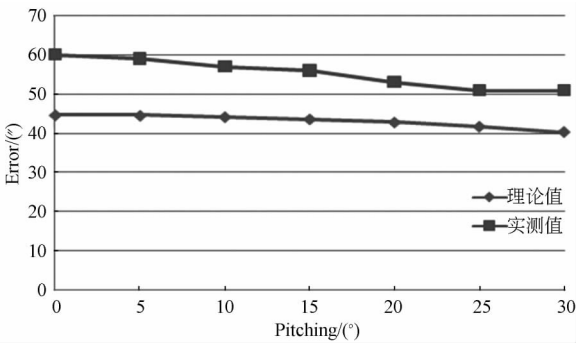


图 8　50°摆镜转角下弹目方位误差曲线

Fig. 8　Curve of error in azimuth of 50°mirror angle

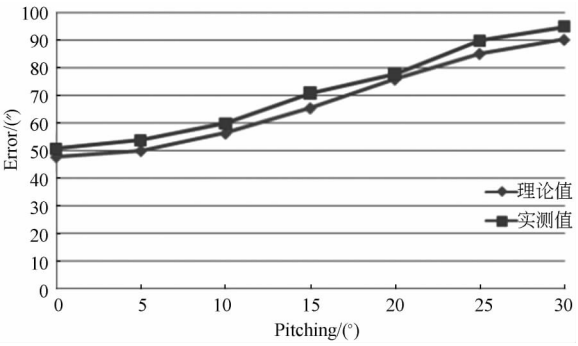


图 9　50°摆镜转角下弹目方位误差曲线

Fig. 9　Curve of error in elevation of 30°mirror angle

实际中测量得到的误差值与理论误差值有一定偏差，方位最大为 17″，俯仰最大为 13″，这是因为没有考虑激光的光束质量以及激光束投射到漫反射屏后，光斑的变形会对测量造成影响，同时实际的操作中摆镜和测量莱卡经纬仪中心高度也很难严格调试到同一高度，加上人的主观测量因素，这些都会对实际结果有影响。

5　结　论

本文讨论了激光角度欺骗干扰内场仿真试验的实现方法及技术，通过对外场试验环境进行等效模拟在内场构造了一个对激光角度欺骗系统进行检测的仿真试验系统。重点研究了如何通过摆镜、激光器和漫反射屏来模拟外场弹目、弹干角度变化，并对其精度进行了分析。最后通过实测数据与理论误差比较得到方位最大误差 17"，俯仰最大误差 13"，表明激光角度欺骗干扰内场，仿真

试验系统正确性、合理性，说明该系统的应用为激光角度欺骗系统验证工作提供了有效手段，节约了成本，提高了工作效率，对激光角度欺骗系统具有重要意义。

参考文献：

[1] 王建军. 激光告警内场仿真试验系统的设计 [J]. 光学 精密工程，2010，18(9)：1936-1942.
WANG J J. Design of indoor simulation test system for laser warning [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 1936-1942. (in Chinese)

[2] 刘严严. 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)：271-273.
LIU Y Y. Mathematics simulation analysis of the laser deception jamming [J]. *Journal of CAEIT*, 2011, 6(3): 271-273. (in Chinese)

[3] 李慧. 激光制导武器角度欺骗干扰半实物仿真系统设计的探讨[J]. 光电子技术，2011，31(1)：38-41.
LI H. Exploratory development of the HWIL simulation system for laser angle deception jamming against laser guidance weapons [J]. *Opt Oelectronic Technology*, 2011, 31(1): 38-41. (in Chinese)

[4] 厉明. 基于快速仿真原型的飞行器半物理仿真系统 [J]. 光学 精密工程，2008，16(10)：1949-1955.
LI M. Hardware-in-closed-loop simulation system for aircraft based on rapid simulation prototype[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10): 1949-1955. (in Chinese)

[5] 刘京郊. 光电对抗技术与系统[M]. 北京：中国科学技术出版社，2004.
LIU J J. *Photoelectronic Countermeasure Technology and System* [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1982. (in Chinese)

[6] 李慧，李岩. 激光干扰技术现状与发展及关键技术分析[J]. 激光与光电子学进展，2011，48(8)：2-5.
LI H, LI Y, *et al.*. Development and key technique analysis of laser jamming technology [J]. *Laser &Optoelectronics Progress*, 2011, 48(8): 2-5. (in Chinese)

[7] 叶顺流. 大气散射对激光角度欺骗干扰影响的研究 [J]. 激光与红外，2009，39(12)：1305-1308.
YE S L. Research on atmosphere-scattering influence on laser-angle-cheating jam [J]. *Laser& Infrared*, 2009, 39(12): 1305-1308. (in Chinese)

[8] 李双刚. 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.
LI S G. Assessment of effectiveness on angle deceptive jamming to semi-active laser-guided weapon [J]. *Laser &Infrared*, 2011, 40(1): 41-45. (in Chinese)

[9] 张金生，王仕成. 激光制导武器仿真系统设计与研制[J]. 电光与控制，2005，12(2)：56-59.
ZHANG J S, WANG S C. Design of a simulation system for laser guided weapons [J]. *Electronics Optics&Control*, 2005, 12(2): 56-59. (in Chinese)

[10] 毛英泰. 误差理论与精度分析 [M]. 北京：国防工业出版社，1982.
ZHANG G X. *Coordinate Measuring Machine* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982. (in Chinese)

[11] 金光，王家骐. 利用坐标变换推导经纬仪三轴误差 [J]. 光学 精密工程，1999，7(5)：89-94.
JIN G, WANG J Q. The three-error axis of theodolite with the utilization of the coordinate to the variation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(5): 89-94. (in Chinese)

作者简介：



于国权(1980－)，男，黑龙江大庆人，博士研究生，助理研究员，2006 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位，主要从事光电对抗仿真方面的研究。E-mail：yu__guoquan@163.com



李　岩(1970－)，男，吉林舒兰人，研究员，主要从事光电对抗 C3I 系统的建模、仿真与算法研究。E-mail：Liyan@ciomp.ac.cn



王建军(1977－)，**男**，**河北唐山人**，**硕士**，**助理研究员**，2005 **年于西安电子科技大学获得硕士学位**，**主要从事光电对抗内场仿真方面的研究**。E-mail：xdwjj@163.com



崔　爽(1982－)，**男**，**吉林辉南人**，**硕士**，**助理研究员**，2005 **年**、2008 **年分别于吉林大学获得学士**、**硕士学位**，**主要从事** C3I **指挥控制与光电对抗仿真方面的研究**。E-mail：csh0908@gmail.com

导师简介：



郭　劲(1964－)，**男**，**吉林长春人**，**研究员**，**博士生导师**，**主要从事光电对抗与光电跟踪方面的研究**。E-mail：guojin@ciomp.ac.cn

(版权所有　未经许可　不得转载)