激光干扰技术现状与发展及关键技术分析

李　慧　李　岩　刘冰锋　戴　维

(解放军 63880 部队，河南 洛阳 471003)

摘要　阐述了现代战争中广泛使用的激光干扰技术的分类和发展现状，分析了各种干扰技术的发展趋势，介绍了各种激光干扰技术的性能与技术特点，重点分析了激光角度欺骗干扰的功能、干扰机理及在试验实施中的若干关键技术问题。提出了一种激光角度欺骗干扰装备对激光半主动制导武器的干扰效果半实物仿真评估方法，分析了半实物仿真试验系统的功能组成及存在的主要技术问题，据此指出了激光欺骗干扰装备靶场试验的发展方向。

关键词　激光技术；激光干扰技术；角度欺骗干扰；半实物仿真；干扰效果评估

中图分类号　TN977　　**文献标识码**　A　　**doi**：10.3788/LOP48.081407

Status, Development and Key Technique Analysis of Laser Jamming Technology

Li Hui　Li Yan　Liu Bingfeng　Dai Wei

(63880 *The People's Liberation Army*, *Luoyang*, *Henan* 471003, *China*)

Abstract　Several sorts of laser jamming technology, most commonly used in the current war, and its current situation and the development trend are summarized firstly, then the performance and characteristics of laser jamming technology are introduced, and the function, jamming theory and key techniques of laser jamming of angle deception are discussed purposefully. Based on the above analysis, a kind of hardware-in-the-loop (HWIL) simulation evaluation method, which is the foundation to jamming effectiveness for laser jamming of angle deception equipment against laser guidance weapon, is proposed and the function, form and main problems existing in this system are analyzed. Finally, the development of test theory of laser jamming with angle deception equipment in shooting range is pointed out.

Key words　laser technique; laser jamming; angle deception jamming; hardware-in-the-loop simulation; jamming effectiveness evaluation

OCIS codes　140.3460;140.3330;350.4600

1　引　　言

在海湾战争、阿富汗战争及伊拉克战争中，激光制导武器所发挥的神奇作用令世人瞩目，其命中概率高达 90%，命中精度优于 1 m，显示出强大的作战威力。为了遏制激光制导武器强大的杀伤力，各国都在竞相发展激光干扰技术，研制激光干扰装备以保护重点目标和设施[1,2]。通过分析国内外能有效对抗激光制导武器的几种激光干扰技术与激光干扰装备的发展趋势，针对激光角度欺骗干扰实现中的一些关键问题、干扰效果如何评估与干扰是否有效，提出了一种利用仿真建模技术构建激光角度欺骗干扰半实物仿真试验系统来评估对激光制导武器的干扰效果的方法，为开展对激光制导武器的干扰试验提供支持。

2　激光干扰技术

激光干扰技术是指用于扰乱、欺骗、压制、削弱或破坏敌方有效使用激光系统而采取的对抗措施，分为有源干扰和无源干扰两类，包括无源遮蔽干扰、角度欺骗干扰、高重复频率干扰和大功率激光压制干扰等。

收稿日期：2011-03-01；**收到修改稿日期**：2011-03-26；**网络出版日期**：2011-07-07

基金项目：博士后科学基金(20100471804)资助课题。

作者简介：李　慧(1980—)，男，博士，助理研究员，主要从事激光对抗技术方面的研究。E-mail：limingj12@163.com

2.1 无源遮蔽干扰

无源干扰是指通过采用无源干扰材料或器材(烟幕、气球、伪装物等),改变激光传播特性或改变目标光学特性,降低被保护目标和背景的激光反射和辐射的差异来实现对激光威胁的干扰。其中,烟幕干扰是目前激光无源干扰装备的重要干扰手段之一,具有“隐真”和“示假”双重功能,能遮蔽目标、降低激光制导武器的命中概率。烟幕干扰材料、烟幕形成时间、透过率是烟幕干扰效果的重要指标[3]。有针对性地发展高效能的烟幕干扰材料,加快烟幕形成速度,延长烟幕持续时间是促进烟幕干扰技术进步的重要研究方向。

2.2 角度欺骗干扰

随着激光制导技术的出现,欺骗式干扰技术也就相应出现和发展。角度欺骗干扰针对的主要干扰对象是激光制导武器,通过在被保护目标以外的方向上发射激光欺骗干扰信号,引诱激光制导武器跟踪攻击假目标[4],因此,该型装备必须具有信号相关识别能力和同步转发能力。国外研制欺骗式激光干扰机是从 20 世纪 90 年代初开始的,如美国的 AN/GLQ-13 车载激光诱骗系统即属于该类设备;德国和英国联合研制的 GLDOS 激光对抗系统具有对来袭威胁目标的方位分辨能力和威胁光谱的识别能力,可测定激光威胁信号的重复频率和脉冲编码,并可自动实施干扰[5];英国研制的 405 型激光诱饵系统,最大作用距离 10 km,激光脉冲频率 10～20 Hz。

随着双色制导、复合制导等光电制导武器的出现和激光指示信号的频谱的拓宽,只具有单一激光波长对抗能力的激光欺骗干扰系统将难以适应战场的需要,多光谱综合干扰技术、探测告警干扰多功能综合一体化将是激光欺骗干扰技术的发展趋势。依靠光学技术、高性能探测器件、数据融合技术等的发展,将来袭激光信息识别处理、激光欺骗干扰光发射、漫反射假目标设置构成有机整体,从设备级对抗发展为系统和体系的对抗,以提高综合干扰效果。

2.3 高重复频率干扰

随着激光技术的进一步发展,固体 YAG 激光器能够达到每秒几百千赫兹乃至兆赫兹的重复频率,可以将激光制导信号淹没在高频激光干扰信号中[6],从而使激光导引头因提取不出信息而使武器迷盲,或因提取错误信息而被诱骗,达到保护被攻击目标的目的。利用高重复频率激光作为激光导引头的干扰手段,其优点一是设备结构简单、体积小,二是无需激光侦察告警设备提供精确的激光制导信号,三是可以与红外告警设备配合使用,因而不失为一种好的干扰手段。高重复频率激光对激光导引头有诱骗和扰乱两种干扰效果。干扰实验表明:激光的重复频率越高,干扰成功率越大;脉冲激光的峰值功率越大,干扰效果越明显;导引头编码体制不同则干扰效果也有差异[7]。而且高重复频率激光的频率必须与能量搭配,仅提高频率而单脉冲能量在导引头灵敏阈值以下的,起不到良好的干扰作用。

2.4 压制干扰

压制性干扰技术指利用有源光电干扰设备发射高能激光或较高能量的非相干红外光束,去压制、致盲以至摧毁敌方光电设备、人员和精确制导武器传感器如瞄准镜、夜视仪、红外热像仪、激光测距机及光电导引头等,使之无法正常工作甚至完全失去攻击能力。如美国已经装备的 AN/VLQ-7 车载激光致盲武器,“美洲虎”车载激光致盲武器与激光炫目器,俄罗斯的 FST-1 激光致盲武器系统等。其中,AN/VLQ-7 激光致盲武器采用 Nd:YAG 激光器,单脉冲能量大于 0.1 J,作用距离 8 km,可干扰、致盲光电火控系统和人眼[8]。

激光致盲武器系统要真正达到实战要求,必须解决以下几个技术问题:1)研制出高性能的高能激光器;2)优良的激光光束控制发射系统;3)精密的瞄准跟踪;4)适合的大气传输效应;5)高能激光束对目标靶材的破坏机理[9]。为适应反制导技术的发展,应向干扰波段更宽的发向发展,同时为了增大作用距离和加大软杀伤力度,不断提高干扰源的干扰效率和输出功率是其发展趋势。

3 激光角度欺骗干扰技术原理及其关键技术

3.1 功能组成与工作原理

如图 1 所示,激光角度欺骗干扰系统主要由激光告警器、信号识别与控制器、激光有源干扰装备和漫反射假目标组成。为实现有效干扰,干扰信号和指示信号在波长、脉宽、码型、重复频率和能量等级等方面应基本保持一致,并在时序上保持同步[10]。同时应调整激光欺骗干扰装备的输出功率和漫反射目标的反射率,

使到达敌方导引头的激光欺骗干扰信号高于导引头的阈值功率，这样敌方导引头会认同该信号为制导信号，并据此设定波门选通时间和波门宽度，从而只对欺骗干扰信号进行处理，从而将激光制导武器引向假目标。具体干扰原理如图 2 所示。

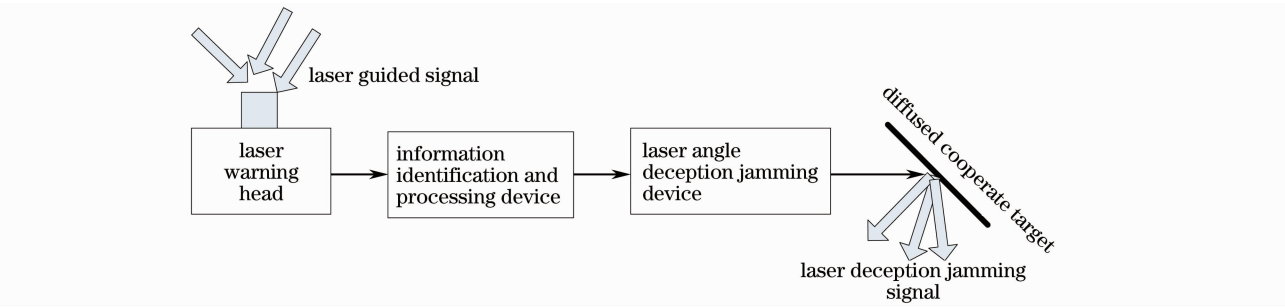

图 1 激光角度欺骗干扰系统组成框图

Fig. 1 Frame chart of laser angle deception jamming system

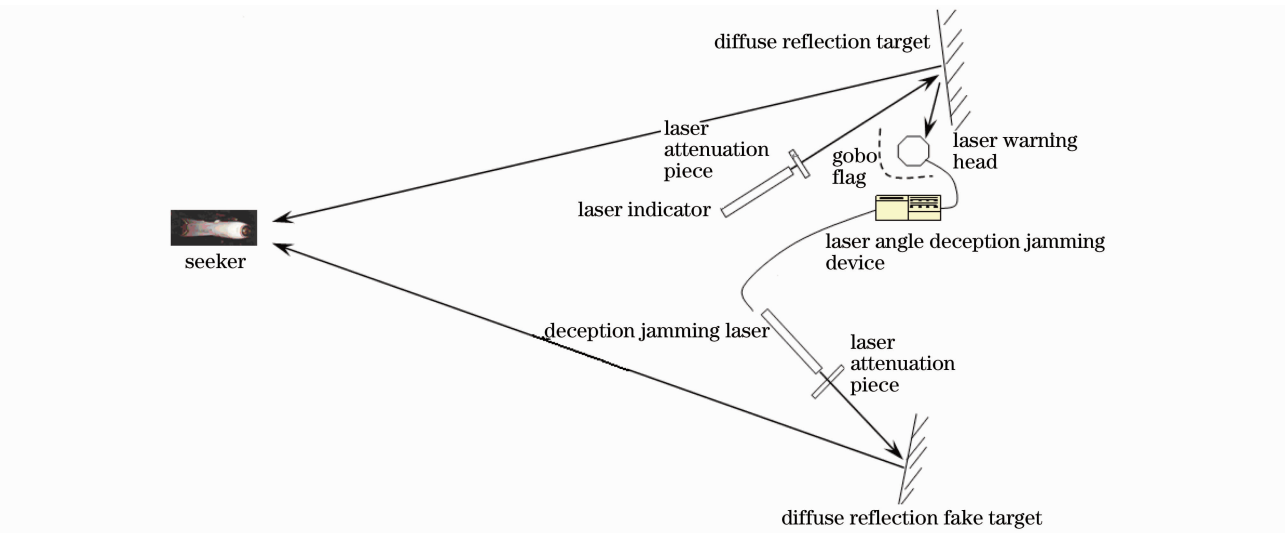

图 2 激光角度欺骗干扰原理示意图

Fig. 2 Principle sketch map of laser angle deception jamming

3.2 关键技术

激光角度欺骗干扰是对抗激光半主动制导武器的一种有效手段，但在执行过程中干扰是否有效、如何全面合理地评价激光干扰装备的战术技术指标和评估干扰效果，对于干扰装备对抗激光制导武器的能力具有重要影响。对于欺骗干扰装备的最大工作距离的分析，可采用激光有源欺骗最大干扰距离的地面消光试验法[11]，通过在两个不同距离的试验结果推导出激光有源干扰装备在特定大气条件下的最大干扰距离理论计算公式；干扰效果应根据战术技术准则规定的干扰距离、干扰等级等指标进行评定，如外场实装试验时，对激光制导武器干扰等级的评定由下式确定：

$$L \geqslant r + A, \tag{1}$$

$$A < L < r + A, \tag{2}$$

$$L \leqslant A, \tag{3}$$

式中 L 为激光制导武器的落点与目标之间的距离，r 为制导武器的毁伤半径，A 为制导误差，干扰效果满足(1)式，干扰成功，满足(2)式则干扰有效，满足(3)式的干扰无效。依据试验条件不同分别以实施干扰后导引头脱靶量是否超出无干扰时导引头跟踪精度的 3 倍，或导引头在靶平面上的跟踪脱靶距离是否超出应用该种导引头的制导武器的杀伤半径来判定干扰是否有效，但由于不能模拟弹的真实运动过程和规律，干扰效果的评估缺乏可信性[12,13]。

激光角度欺骗干扰装备的试验还涉及到激光信号的传输、识别，激光大气环境影响，设备布局与设备特

性和仿真试验评估技术等各个方面,需要解决的关键问题主要包括 4 点。

1) 激光威胁信息处理技术

为实现有效的激光角度欺骗干扰,要求干扰装备的反应时间足够短并且首先需要探测到威胁源,作为激光威胁的探测设备,激光告警头应向多波长探测发展,不仅要有较强的编码识别能力,还要能同时处理多个激光威胁目标;另一方面,导弹的制导已向复合制导技术发展,因此需要研制包括激光告警、紫外告警和雷达告警在内的综合告警系统,并采用多种探测信息的融合处理技术进行信息处理。

2) 激光漫反射目标/假目标技术

漫反射目标/假目标用以模拟实战环境下目标/假目标的漫反射特性,形成激光漫反射信号,其中漫反射板表面涂层喷涂后需经过反复研磨,平面度、垂直度、漫反射特性与目标激光散射也需要精确测定[14]。涂层可采用具有良好的 Lambert 体特性的涂料及整体喷涂技术,对 1.064 μm 激光的漫反射率可达 97%。漫反射率可按照试验中导引头处能量模拟范围和能量模拟精度需求来确定。对于漫反射率测试,可利用积分球和光谱仪等设备,采用标准的 8 度半球反射率测量法测定,测定公式为

$$R(\lambda)=R_{\mathrm{Std}}(\lambda)\left[\frac{S_{\mathrm{S}}(\lambda)-S_{\mathrm{dark}}}{S_{\mathrm{Std}}(\lambda)-S_{\mathrm{dark}}}\right],\tag{4}$$

式中 $R_{\mathrm{Std}}(\lambda)$ 为标准板的反射率,$S_{\mathrm{S}}(\lambda)$ 为待测样板的探测器信号值,$S_{\mathrm{Std}}(\lambda)$ 为标准板的探测器信号值,S_{dark} 为暗背景的探测器信号值。同时,假目标在形体与辐射特征方面尽量与被保护的目标相一致,以干扰敌方的侦察设备,可起到一定的以假乱真作用。

3) 高性能激光指示/干扰信号模拟器技术

激光有源欺骗干扰试验中,需要在导引头入瞳处形成近似实战的指示/干扰信号环境,激光目标指示/欺骗干扰激光器的出光时间延迟、波长、重复频率、脉宽等指标应与被模拟的敌方激光器一致,输出脉冲能量应稳定在要求的值上。

设激光出射单脉冲能量为 E_0,ρ 为漫反射目标反射率,l 为模拟目标到导引头的距离,θ 为导引头与模拟光斑连线与模拟目标处的法线之间的夹角,导引头接收激光的有效面积为 A_{eff},τ 为模拟目标至导引头处的大气透过率,则进入导引头的脉冲能量为

$$E=\frac{A_{\mathrm{eff}}\rho\tau\cos\theta E_0}{\pi l^2}.\tag{5}$$

由(5)式可知,为使进入导引头的能量与真实情况一致,并有效实施欺骗干扰,漫反射率的精确测定和激光输出能量稳定性、能量衰减的控制及光学特性模拟方面都需要精确设计。目前正式使用的大多为 1.064 μm 波长的 Nd:YAG 激光器,输出激光根据试验战情不同经过相应的光束变换和能量衰减后达到能量和发散角变换要求。为了有效地实施欺骗式干扰,应提高干扰激光器的输出功率和假目标的反射率,使到达敌方导引头的干扰信号功率高于导引头的阈值功率,如诺·格公司已设计和研制了中红外Ⅱ型激光器,这种激光器在中红外波长产生了创记录的 20 W 输出功率,大约是以前在此波长产生的功率的 4 倍,激光器有非常好的光束质量和 20 kHz 的脉冲重复频率[15]。

4) 仿真试验评估技术

需要科学、全面、合理地考核激光角度欺骗干扰装备的各项性能指标并进一步提高其设计定型试验水平。由于外场实装试验是一种开环试验,不能模拟弹的真实运动过程和规律,只能得到干扰装备对激光导引头的干扰效果,需要在有限的外场实装干扰试验的基础上,建立内场半实物(HWIL)仿真试验系统[16~18],以评价激光角度欺骗干扰装备对激光制导武器的干扰效果,弥补外场试验的不足,以较小的代价为试验和装备研制积累数据,并在靶场用少量的实弹干扰试验进行干扰效果演示验证。

根据制导武器运动控制模型是否加入仿真回路分为开环和闭环半实物仿真两种形式。激光角度欺骗干扰装备对抗闭环半实物仿真系统如图 3 所示,它由激光目标/背景信号模拟器、仿真转台、激光导引头、实时仿真计算机、实时通讯网络、被试装备组成。由试验任务需求建立各部分仿真模型,并连接仿真设备和导引头实物,在一定的战情条件下开始仿真,采用一定的干扰效果评估准则,能够通过仿真得到有无角度欺骗干扰两种情况下激光制导武器运动弹道及落点分布数据,以此为依据评估激光干扰效果,能够全面评估激光干

扰装备对激光制导武器的干扰效果。

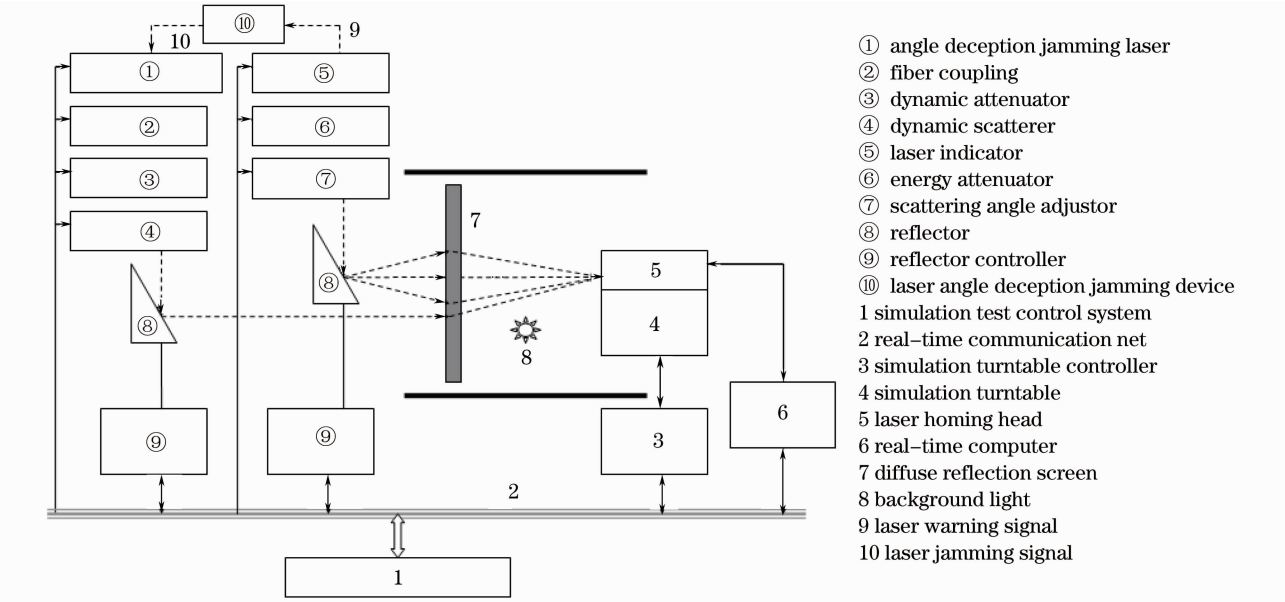

图 3 激光角度欺骗干扰装备对抗闭环半实物仿真系统框图

Fig. 3 HWIL simulation system of laser angle deception jamming equipment

其中存在的关键技术问题有:1)激光目标/干扰仿真运动的物理实现,即由导引头跟踪目标的运动学理论,设计目标/干扰模拟方案,根据模拟、实战环境下导引头处时域、空域和能量域相一致的原则,模拟实战环境中导引头接受激光能量随弹目相对距离的变化。导引头感受到的激光光斑大小变化和弹目视线角随弹目相对运动的变化,以完成符合精度指标的模拟运动;2)高仿真精度是半实物仿真置信度的保障,需要进行仿真模型的验证和仿真精度分析,建立合理的误差模型是精度分析和分配的根本;3)干扰装备与各仿真设备的半实物仿真整体布局和精确标定。另外,在实验室内由仿真计算机程序解算各种模型时,坐标系的选取和坐标变换也很重要,实验室坐标系和导弹实际制导飞行情况下的坐标系应建立怎样的对应关系等都是需要考虑的因素。

4 结 论

激光制导武器在实战中表现出的出色性能,使各国对激光干扰技术的研究非常重视。介绍了激光干扰技术的类型和发展现状,对激光角度欺骗干扰的特点、干扰机理进行了深入分析。针对欺骗干扰效果评估方法,提出利用仿真建模技术构建激光角度欺骗干扰装备对抗闭环半实物仿真试验系统,探讨了系统的工作原理和存在的关键技术问题。这对于通过仿真充分摸清装备的性能指标、在各种试验条件下的试验结果、选择外场试验条件等具有重要价值。结合少量的外场模拟干扰试验和实弹干扰试验结果,实现激光角度欺骗干扰装备干扰效果的综合评估,将是今后激光欺骗干扰装备靶场试验重要的发展方向。

参 考 文 献

1 Yi Ming, Wang Xiao, Wang Long. Status quo and trend of American army of electro-optic countermeasure technology and equipment[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(5): 601～607

易 明, 王 晓, 王 龙. 美军光电对抗技术装备现状与发展趋势初探[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(5): 601～607

2 Li Hui, Wu Junhui, Zhangwenpan *et al*.. Exploratory development of the HWIL simulation system for laser angle deception jamming against laser guidance weapons [J]. *Optoelectronic Technology*, 2011, **31**(1): 37～41

李 慧, 吴家辉, 张文攀 等. 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): 37～41

3 Shen Tao, Song Jianshe. Study on the simulation of smoke screen counterworks laser guided weapon[J]. *J. System Simulation*, 2008, **20**(1): 210～214

沈 涛，宋建社. 烟幕对抗激光制导武器的仿真研究[J]. 系统仿真学报，2008，**20**(1)：210～214

4 Hou Zhenning. Laser active jamming principle and technique[J]. *OME Information*，2002，(3)：22～26
侯振宁. 激光有源干扰原理及技术[J]. 光机电信息，2002，(3)：22～26

5 Bai Feng，Wei Wenjian，Man Guangzhi. The status quo and developing trend of laser deceiving jamming techniques[J]. *National Defence Science*，2009，**30**(6)：5～9
白 峰，魏文俭，满广志. 激光有源欺骗式干扰技术现状与发展[J]. 国防科技，2009，**30**(6)：5～9

6 Xie Xiaochuan. Performance of high-repetition-rate laser jamming laser seeker[J]. *Space Electron Countermeasure*，2005，**21**(5)：23～25
谢小川. 高重频干扰对激光导引头干扰性能的研究[J]. 航天电子对抗，2005，**21**(5)：23～25

7 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
薛建国，陈 勇. 高重频激光对激光导引头的干扰研究[J]. 航空兵器，2006，(3)：30～32

8 Weapon Industry 209 Institute. Optoelectronic Countermeasure System Manual[M]. Beijing：National Defense Industry Press，1999
兵器工业 209 研究所编译. 光电对抗系统手册[M]. 北京：国防工业出版社，1999

9 Xu Daisheng. Discuss of jamming effection test and evaluation of laser damage weapon using hardware-in-the-loop test[J]. *Space Electron Countermeasure*，1999，**15**(2)：52～55
徐代升. 激光致盲武器干扰效果评估的半实物仿真试验方法探讨[J]. 航天电子对抗，1999，**15**(2)：52～55

10 Tong Zhongcheng. A new technology of laser angle-cheating jam[J]. *Applied Laser*，2007，**27**(1)：25～28
童忠诚. 激光角度欺骗干扰技术的改进研究[J]. 应用激光，2007，**27**(1)：25～28

11 Xue Jianguo，Kang Dayong，Zhang Le. Analysis of maximum jamming range test method of laser active deception jamming [J]. *Electro-Optic Technology Application*，2008，**23**(2)：9～10
薛建国，康大勇，张 乐. 激光有源欺骗最大干扰距离试验方法探讨[J]. 光电技术应用，2008，**23**(2)：9～10

12 Ministry of Army of PLA. Evaluation Principle of Optoelectronic Active Jamming Effectiveness Part I，laser Jamming Technology[S]. G 4972.1-2003
中国人民解放军总装备部. 光电有源干扰效果评定准则 第 1 部分：激光干扰技术[S]. G 4972.1-2003

13 Gao Wei. Study on evaluation and test of electro-optical jamming effectiveness on electro-optical guided weapon[J]. *J. Ballistic*，2005，**17**(3)：53～59
高 卫. 对光电制导系统干扰效果的评估方法[J]. 弹道学报，2005，**17**(3)：53～59

14 Zhang Jinsheng，Wang Shicheng，Wang Zhixian. Research on diffuse reflectivity of the reflective screen for a laser guided weapon simulation system[J]. *Electronics Optics & Control*，2005，**12**(3)：28～31
张金生，王仕成，王志贤. 某激光制导武器仿真系统反射屏漫反射特性研究[J]. 电光与控制，2005，**12**(3)：28～31

15 Mid-IR Ⅱ Laser. Northrop Grumman′s Program & Products[EB/OL]. http：// www. st. Northrop grumman. com/capabilities/pagecategory

16 Wu Junhui，Zhang Wenpan，Li Bo *et al*.. Discuss of semi-physical simulation test system for laser jamming of angle deception[J]. *Electron Countermeasure Test*，2006，**16**(4)：23～27
吴军辉，张文攀，李 波 等. 激光角度欺骗干扰半实物仿真有关问题探讨[J]. 电子对抗试验，2006，**16**(4)：23～27

17 Buford J A，Paone T Jr.. Using hardware-in-the-loop simulation to provide low cost testing of TMD IR missile systems [C]. *SPIE*，**3368**：432～440

18 H. Hong，S. Han，J. Choi. Simulation of the spinning concentric annular ring reticle seeker and an efficient counter-countermeasure[C]. *SPIE*，1997，**3061**：3206～3211