

激光目标模拟器逼真度量化的评估方案

龚勇¹, 王茜茜¹, 单斌², 李晓阳², 彭中¹

(1. 北京理工大学光电学院, 北京 100081; 2. 中国华阴兵器试验中心, 陕西 华阴 714200)

摘要: 激光目标模拟器逼真度主要用来评估目标模拟器出射激光对实际场景中激光照射器出射激光在传输及被目标发射时的近似程度。逼真度评估的有效程度取决于评估方案的适用性及实际可操作性。因此, 提出了一种激光目标模拟器模拟逼真度的有效评估方案, 并给出了具体指标的量化逼真度定义。首先给出了实战中的激光能量传输模型和半实物仿真系统中的光斑控制模型, 接着以此为依据重点研究了激光目标模拟器激光脉冲和激光光斑特性的逼真度评估内容, 最后通过计算各分项指标权重, 得出了激光目标模拟器的整体逼真度。逼真度量化的评估方案可应用于激光目标模拟器的设计及性能评估, 从而达到在室内完成半实物仿真测试以减少总体测试费用和时间的目的, 对于现代化武器系统设计具有十分重要的意义。

关键词: 逼真度; 激光目标模拟器; 量化逼真度; 脉冲特性逼真; 光斑特性逼真

中图分类号: TN955 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1206012

Quantized fidelity evaluation scheme of laser target simulator

Gong Yong¹, Wang Qianqian¹, Shan Bin², Li Xiaoyang², Peng Zhong¹

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. China Huayin Ordnance Test Center, Huayin 714200, China)

Abstract: The fidelity of laser target simulator is mainly used to evaluate the degree of approximation between the target simulator's output laser and the laser irradiator's output laser during its transmission and being reflected by the target surface in actual battlefield. The effectiveness of fidelity depends on the applicability and actual operability of the evaluation scheme. An effective evaluation scheme for studying the fidelity of the laser target simulator was proposed, and the quantized fidelity of every specific indicator was also defined. Firstly, the laser energy transport model of target laser in real battlefield and the control model of light spot in the hardware-in-the-loop simulator were calculated. Then, according to the two models, the fidelity evaluation content of the characteristic of laser pulse and laser spot in the laser target simulator was studied with emphasis. And finally, by calculating the weight of the specific index, the whole fidelity of laser target simulator was obtained. The fidelity evaluation scheme can be applied to the design and performance evaluation of the laser target simulator, so it can reduce the cost and time by doing the test of the laser target simulation in the hardware-in-the-loop simulation system, which means a lot in designing modern weapon system.

Key words: fidelity; laser target simulator; quantized fidelity; laser pulse fidelity; laser spot fidelity

收稿日期: 2016-04-07; 修订日期: 2016-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(60978035); 北京市自然科学基金(4132063)

作者简介: 龚勇(1991-), 男, 硕士生, 主要从事目标散射特性建模及实验方面的研究。Email: 245563213@qq.com

导师简介: 王茜茜(1970-), 女, 副教授, 博士生导师, 主要从事激光与红外制导方面的研究。Email: qqwang@bit.edu.cn

0 引言

激光半主动制导仿真试验是随着激光制导技术而发展出来的一种半实物仿真技术。在实际的研究过程中,必须在导弹投入实战应用之前对其性能进行有效的检验和评估,以判断其是否能达到设计的要求。常用的试验方法包括外场条件下的实弹打靶试验和半实物仿真试验。由于导弹的研制以及发射的成本过于巨大,因而不可能总是通过实弹打靶来测试所研制的导弹及其制导系统的各项性能。而相比于实弹打靶试验,激光半主动制导仿真试验通过模拟外场测试条件以及目标光学特性,在室内仿真条件下即可完成对制导系统的性能测试。激光目标模拟器作为激光半主动制导半实物仿真系统中的重要组成部分,为整个仿真系统提供近似于外场环境中的模拟目标激光信号,是整个半实物仿真试验能否有效进行的关键所在。激光目标模拟器对实际目标反射的信号激光的模拟有效程度通常由模拟逼真度反映,因而目标模拟逼真度是进行半实物仿真试验时必须讨论的重要问题。经过近几十年来的飞速发展,针对激光目标模拟器已经建立起了许多覆盖可见光以及近红外波段的模型及系统^[1-3],但对于目标模拟器逼真度的研究却主要集中在红外目标模拟器^[4-5],对于激光目标模拟器逼真度的研究则比较少,也缺少具有实用性的逼真度评估方案。因此,设计合理有效的激光目标模拟器逼真度评估体系,并以此为依据得出量化的逼真度评估方案,对于激光目标模拟器逼真度的研究具有很大的现实意义。

在实际战场环境中,目标本身的光学特性及其所处的背景环境都过于复杂,无法通过直接测量获取激光导引头在实战中的各项数据来评价目标模拟器的逼真度,因此,必须根据激光目标模拟器本身的功能和结构建立合适的逼真度评价指标体系,针对体系中的各项指标设置相对应的能进行有效测试的外场环境作为目标模拟器的模拟对象,最后通过测试获取逼真度评价的数据。文中通过对激光目标模拟器功能结构以及实际外场环境的分析,从激光脉冲特性和激光光斑特性两方面建立了评估指标体系,对激光目标模拟器逼真度进行了评估。

1 激光目标模拟器

1.1 系统组成

激光目标模拟器通常由目标激光模拟系统、二维运动转台和计算机控制系统三大部分组成,系统的具体功能原理框图如图 1 所示。

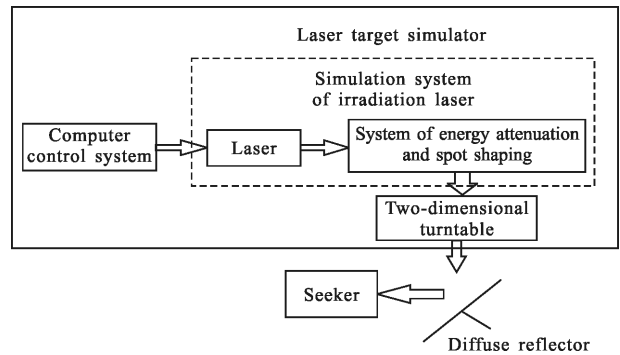


图 1 激光目标模拟器原理图

Fig.1 Principle diagram of laser target simulator

1.2 工作原理

1.2.1 功率传输模型

在实际战场中,脉冲激光的传输光路可简化为图 2 所示的光路。

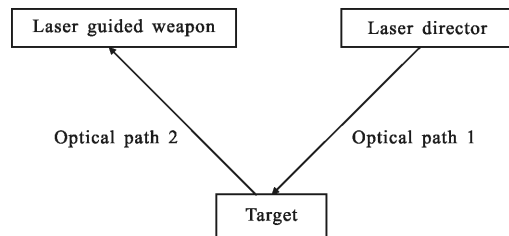


图 2 实际战场中激光传输光路简图

Fig.2 Simplified diagram of laser transmission path in actual battlefield

假设目标表面足够大,照射器发射的激光脉冲能够被目标全部反射,结合光路图可以得到脉冲峰值功率传输模型^[6]:

$$P = \frac{P_0 \tau_1 \tau_2 \sigma_s A \cos \theta \cos \varepsilon}{\pi R^2} \quad (1)$$

式中: P 为导引头探测到的目标激光回波信号的峰值功率; P_0 为激光目标照射器发射脉冲的峰值功率; τ_1 为光路 1 中大气对激光的透射率; τ_2 为光路 2 中大气对激光的透射率; σ_s 为地面目标的反射系数; A

为导引头接收孔径的面积; θ 为激光回波信号与目标表面法线间的夹角; ε 为弹目视线与导引头光轴之间的夹角; l 为导引头与目标之间的距离。

1.2.2 光斑运动模型

考虑仿真系统弹目视线模型, 首先定义屏幕坐标系: 以初始位置时导引头在漫反射屏上的投影点为原点 O ; 面向漫反射屏方向, 沿屏向右为 X 轴正向; 沿屏向上为 Y 轴正向; Z 轴与 X 、 Y 轴成右手系, 并且垂直于漫反射屏。假定激光器的出射光线始终平行于屏幕坐标系的 XOZ 平面, 也即反射镜的入射光线平行于 XOZ 平面。取入射光线上与反射镜中心 O_1 距离为一个单位长度的点 $M(X_M, Y_M, Z_M)$, 点 $M'(X_{M'}, Y_{M'}, Z_{M'})$ 为点 M 关于反射镜面的像点在屏幕坐标系中的坐标, 则镜面法向量为 $(X_{nJM}, Y_{nJM}, Z_{nJM})$, 如图 3 所示。

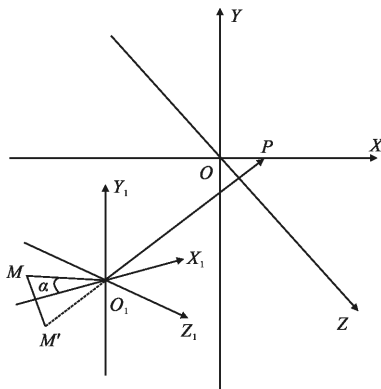


图 3 仿真系统坐标系

Fig.3 Coordinate system of simulation system

根据空间解析几何原理, 可以建立由漫反射屏上任意一点 $P(X_p, Y_p, Z_p)$ 推导出所需的两轴转台的俯仰角转角 φ 和偏航角转角 ψ 的模型^[7]:

$$\begin{cases} \varphi = \arccos \frac{-Y_{nJM}}{\sqrt{X_{nJM}^2 + Y_{nJM}^2 + Z_{nJM}^2}} - \frac{\pi}{2} - \phi_0 \\ \psi = \arccos \frac{X_{nJM}}{\sqrt{X_{nJM}^2 + Z_{nJM}^2}} - \theta \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$(X_{nJM}, Y_{nJM}, Z_{nJM}) = (X_M - X_{M'}, Y_M - Y_{M'}, Z_M - Z_{M'})$$

$$\begin{cases} X_{M'} = d + K_M(X_p - d) \\ Y_{M'} = h + K_M(Y_p - h) \\ Z_{M'} = r + K_M(Z_p - r) \end{cases}$$

$$K_M = -\frac{1}{\sqrt{(X_p - d)^2 + (Y_p - h)^2 + (Z_p - r)^2}} \begin{cases} X_M = d - \sin(\theta - \alpha) \\ Y_M = h \\ Z_M = r - \cos(\theta - \alpha) \end{cases}$$

公式(2)为光斑在漫反射屏上的运动控制模型。

2 逼真度评估分析

激光目标模拟器对实际目标的模拟是通过屏上光斑模拟目标反射激光的特性来进行的。这种模拟是一种“相对等效”的模拟, 即采用仿真系统中导引头的激光信号响应来模拟实际战场上激光导引头的响应。因此, 逼真度的评估主要针对激光器发射的激光脉冲以及漫反射屏上的激光光斑的特性开展。

文中主要从半实物仿真系统中的激光传输过程对目标模拟器进行逼真度分析。根据激光目标模拟器的结构及其工作原理, 主要从两个方面对激光目标模拟器的逼真度进行评估:

(1) 激光脉冲特性逼真

激光脉冲在穿过大气或者烟幕时, 其特性都会发生一定变化。同时, 弹目距离的改变和背景辐射的存在也会影响目标激光在激光导引头中的响应。因此, 激光目标模拟器需要实现对以上内容的等效逼真, 即激光脉冲特性逼真。主要评估内容有脉冲峰值功率逼真、脉冲与背景辐射对比度逼真、脉冲展宽逼真以及脉冲峰值功率与弹目距离变化逼真。

(2) 激光光斑特性逼真

目标模拟器发射激光在漫反射屏上形成的激光光斑应当逼真地模拟出实际战场中当目标、导引头及照射器之间发生相对位移时, 目标表面光斑的变化。考虑到弹-目距离及照射器-目标距离变化时光斑可能发生的变化, 针对激光光斑特性逼真的主要评估内容主要包括光斑抖动逼真、光斑位移逼真以及光斑形状逼真。

3 激光脉冲特性逼真度评估

3.1 脉冲峰值功率逼真

实际中导引头最终接收到的脉冲峰值功率可由公式(1)给出。在仿真试验中, 通过测量获得的导引头接收功率值为 P' , 根据等效原理有:

$$P=P' \quad (3)$$

计算逼真度时,设置多个不同的输出功率值,可以得到多组输出功率值 (P_i, P_i') , $i=1, 2, \dots, n$ 。定义脉冲功率的量化逼真度为:

$$R_{11} = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P_i')^2}{\sum_{i=1}^n P_i^2} \right] \times 100\% \quad (4)$$

3.2 脉冲与背景辐射对比度逼真

无论是正常的天空背景还是太阳光直射的强背景下,辐射对比度都是决定导引头能否识别出信号激光的关键。因此,激光目标模拟器需要逼真地反映出各种背景下的辐射对比度。对于实战场景,天空背景辐射功率 $P_{\text{实际背景}}$ 可以通过外场测量获取,从而可以得到实际场景中的辐射对比度:

$$C_{\text{实际场景}} = \frac{P}{P_{\text{实际背景}}} \quad (5)$$

在仿真试验中,背景模拟器产生的背景激光对漫反射屏进行了全覆盖,其功率值 $P_{\text{模拟背景}}$ 可以通过单独开启背景激光器时由导引头测量获得,从而仿真试验中的辐射对比度:

$$C_{\text{模拟场景}} = \frac{P'}{P_{\text{模拟背景}}} \quad (6)$$

根据等效原理有:

$$C_{\text{实际场景}} = C_{\text{模拟场景}} \quad (7)$$

定义量化逼真度为:

$$R_{12} = \left(1 - \frac{|C_{\text{实际场景}} - C_{\text{模拟场景}}|}{C_{\text{实际场景}}} \right) \times 100\% \quad (8)$$

3.3 脉冲展宽逼真

激光脉冲在穿透大气的过程中脉宽会发生变化。同时,由于激光器发射的激光束都存在一定的束散角,使得激光在入射到目标表面时,不同束散角处的光线会存在一定光程差,从而在反射的过程中产生脉冲展宽。理想条件下,假设反射激光全部都被目标表面反射,根据激光传输过程可以将产生的脉冲展宽分成大气传输展宽 $\Delta\tau_1$ 与目标反射展宽 $\Delta\tau_2$ 两部分,分别为^[8]:

$$\Delta\tau_1 = \frac{R-z}{c} \quad (9)$$

$$\Delta\tau_2 = \frac{z+z\tan\alpha\sin\beta}{c} - \frac{z}{c(\cos\alpha+\sin\alpha\tan\beta)} \quad (10)$$

式中: R 为受大气湍流影响下光线的最大传输路径长度; z 为激光器到目标表面光斑中心的距离; 2α 为

束散角; β 为发射光轴与入射点处目标表面法线的夹角。考虑整个光路可知激光脉冲展宽值为:

$$\Delta\tau = 2\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 \quad (11)$$

在半实物仿真试验的条件下,假设目标模拟器发射的激光脉冲的初始脉宽为 τ_0 ,单个脉冲回波信号在导引头中的响应持续时间为 τ 。通过测量记录 n 个脉冲响应时间 τ_i , $i=1, 2, \dots, n$,计算脉冲展宽平均值作为模拟的激光脉冲展宽:

$$\Delta\tau' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\tau_i - \tau) \quad (12)$$

根据等效原理:

$$\Delta\tau = \Delta\tau' \quad (13)$$

则可定义激光脉冲展宽的量化逼真度为:

$$R_{13} = \left(1 - \frac{|\Delta\tau - \Delta\tau'|}{\Delta\tau} \right) \times 100\% \quad (14)$$

3.4 脉冲峰值功率与弹目距离变化逼真

弹目距离变化会引起目标反射激光信号峰值功率发生变化,激光目标模拟器需要对这种变化进行模拟。实战场景中激光脉冲峰值功率与弹目距离之间的关系由公式(1)给出,实战中弹目距离变化 Δl 时,导引头接收的峰值功率变化为:

$$\Delta P = k \frac{\Delta l(\Delta l + 2l)}{[l(l + \Delta l)]^2} \quad (15)$$

式中: $k = \frac{P_0 \tau_1 \tau_2 \sigma_v A \cos\theta \cos\epsilon}{\pi}$ 。

仿真试验中,弹目距离的变化引起的激光功率变化值 $\Delta P'$ 同样可以通过测量导引头接收功率值获得。根据等效原理:

$$\Delta P = \Delta P' \quad (16)$$

计算逼真度时,同样设置 n 个距离变化值,并通过导引头测量出相应的接收功率变化量。定义量化逼真度为:

$$R_{14} = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P_i')^2}{\sum_{i=1}^n P_i^2} \right] \times 100\% \quad (17)$$

4 激光光斑特性逼真度评估

4.1 激光光斑抖动逼真

激光照射器在实际使用时会由于所处位置的不稳定导致照射在目标表面上的激光光斑发生一定程度上的抖动。为了测试激光导引头的抗干扰性能,通

常需要激光目标模拟器模拟光斑抖动现象。假定单次制导照射时间内的光斑抖动符合正态分布,对于实战场景,由激光目标照射器照射方向抖动引起的光斑抖动误差方差为^[9]:

$$\sigma_i^2 = \frac{\sqrt{2} Af_i \pi}{4} \quad (18)$$

式中: A 为增益系数; f_i 为振动的固有频率,一般小于1 Hz。仿真系统中,假定光斑在屏上的瞄准中心为屏坐标系原点,同样采用为光斑添加正态模式抖动,并计算出单次制导照射时间内漫反射屏上光斑抖动误差方差:

$$\sigma_{i0}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2) \quad (19)$$

式中: n 为计算的光斑点数; (x_i, y_i) 为漫反射屏上光斑的位置。依据等效原理:

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i0}^2 \quad (20)$$

定义光斑抖动的量化逼真度为:

$$R_{21} = \left(1 - \frac{|\sigma_i^2 - \sigma_{i0}^2|}{\sigma_i^2} \right) \times 100\% \quad (21)$$

4.2 激光光斑位移逼真

为了模拟导引头的寻的与追踪过程,激光目标模拟器需要模拟出实际场景中由于目标照射器和目标相对位置变化引起的光斑移动。实战中光斑的移动主要分为连续移动(目标持续移动引起)和跳动(照射器对目标瞄准时引起)两种,前者可以通过位移轨迹表征,后者则只能使用位置坐标描述。

首先考虑光斑的连续移动。假定在实战场景中,光斑连续移动的轨迹为 $y=f(x)$,其中 x, y 已经转换成漫反射屏坐标系中的坐标值,将该轨迹代入公式(2)中,计算出对应坐标位置 (x, y) 的转角 φ, Ψ 。利用计算所得的俯仰角转角 φ 和偏航角转角 Ψ 控制目标模拟器在漫反射屏上产生相应的光斑轨迹 $y'=f(x)$ 。依据等效原理:

$$y = y' \quad (22)$$

对两条轨迹分别取点,定义光斑连续移动的量化逼真度为:

$$R_{22} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i')^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2} \right) \times 100\% \quad (23)$$

然后考虑光斑跳动的逼真。实战中,目标照射器

在瞄准目标时,通常希望在少数几次对点瞄准之后使光斑落在目标表面的指定位置,每一次瞄准对于光斑来说都是一次小范围内的位置跳动。假设实战中以目标几何中心(对应于漫反射屏的坐标原点)作为瞄准中心,单次瞄准坐标为 (x, y) ,其中 x, y 已经转换中漫反射屏坐标系中的坐标值,代入公式(2)中同样可以得出俯仰角转角 φ 和偏航角转角 Ψ 。控制激光目标模拟器产生相对应的光斑坐标 (x', y') ,依据等效原理有:

$$(x, y) = (x', y') \quad (24)$$

在实际和仿真条件下分别进行 n 次瞄准测试,定义光斑跳动的量化逼真度为:

$$R_{23} = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_i')^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2} + \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i')^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2} \right) \right] \times 100\% \quad (25)$$

4.3 激光光斑形状逼真

实战中目标和照射器相对位置的持续变化会使目标光斑形状也发生改变,因此激光目标模拟器需要模拟运动过程中的光斑形状变化。激光发射的光斑形状一般为圆形或者椭圆形,经过大气传输后照射在目标表面时形状一般为椭圆形,因此可以通过椭圆光斑的长短轴来对光斑形状进行描述。假设照射器发射的激光束散角为 2α ,指示器到目标表面光斑中心距离为 R_1 ,指示器距离地面高度为 H_1 ,导引头离目标距离为 R_2 ,仿真系统中导引头和屏上光斑中心距离为 r_2 ,理论上漫反射屏上光斑的长轴 A 和短轴 B 分别为^[10]:

$$A = \frac{\alpha r_2 R_1^2}{H_1 R_2} \quad (26)$$

$$B = \frac{\alpha r_2 R_1}{R_2} \quad (27)$$

在仿真条件下通过测量可以得到漫反射屏上仿真出来的光斑的长轴 A' 和长轴 B' 。依据等效原理:

$$\begin{cases} A = A' \\ B = B' \end{cases} \quad (28)$$

分别定义长短轴的量化逼真度:

$$\begin{cases} R_{24} = \left(1 - \frac{|A - A'|}{A} \right) \times 100\% \\ R_{25} = \left(1 - \frac{|B - B'|}{B} \right) \times 100\% \end{cases} \quad (29)$$

5 综合逼真度评估

激光目标模拟器的综合逼真度评估需要结合目标模拟激光器发射的激光脉冲特性以及漫反射屏上激光光斑特性的逼真度。通过各分项指标来对整体进行逼真度评估,通常需要借助权重计算,以确定各分项逼真度在整体逼真度中的权重值。参考文献[6]中介绍的 Fuzzy AHP 方法对激光目标模拟器进行分层权重值计算和逼真度评估:

第一层主要是对激光脉冲特性的逼真,主要评估指标有脉冲峰值功率、辐射对比度、脉冲展宽以及弹目距离变化导致的峰值功率变化;

第二层主要是对激光光斑特性的逼真,主要评估指标包括光斑的抖动、光斑的位移以及光斑形状;

最后,对激光脉冲和激光光斑在整个目标模拟器的逼真度评估中的权重进行评价与计算,得出激光目标模拟器的逼真度。

限于篇幅,具体的权重计算过程以及各分项逼真度的评价不再赘述。

根据各层次 Fuzzy AHP 方法计算各层平均权重值为:激光脉冲逼真的各个评估指标权重为 $[\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4]$,激光光斑逼真的各个评估指标权重为 $[\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5]$,激光脉冲逼真以及激光光斑逼真在整个激光目标模拟器逼真度评估中的权重为 $[\delta_1, \delta_2]$ 。从而激光目标模拟器整体逼真度可表示为:

$$R = \delta_1 \sum_{i=1}^4 \alpha_i R_{1i} + \delta_2 \sum_{i=1}^5 \beta_i R_{2i} \quad (30)$$

6 结束语

激光目标模拟器逼真度是整个激光半主动制导半实物仿真系统逼真度评估的重要组成部分,其模拟结果的可信度关系到整个仿真系统的仿真结果是否有效。文中结合实战场景条件和激光目标模拟器本身的结构以及工作原理,对激光目标模拟器逼真度进行了评估。通过对激光目标模拟器从功能结构上进行层次分解,从激光脉冲传输和光斑运动两方面建立了一个合理有效的目标模拟器逼真度评估指标体系。在此基础上提出了量化逼真度值的概念,并

通过逐一比较理论和仿真条件下激光脉冲以及激光光斑的各项指标逼真度给出了相应的量化评估计算公式。最后结合不同层次中各指标的权重计算给出了激光目标模拟器逼真度量化评估的最终方案。逼真度量化评估方案可应用于激光目标模拟器的设计及性能评估。

参考文献:

- [1] Su Jiangang, Fu Mengyin. Design of hardware-in-the-loop simulation system for laser end-guided shell [J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18 (9): 2469-2472, 2496. (in Chinese)
- [2] Sun Yongxue, Long Funian, Meng Qingyu. Infrared target simulator's polarizing beamsplitter system based on digital-micromirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 749-753. (in Chinese)
- [3] Zhang Qiuchen, Shi Rui, Li Zhuo. Modeling method of laser imaging target simulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 112-117. (in Chinese)
- [4] Qu Yuan, Tian Xiaofei, Ma Lihua. Application of VV&A in infrared target simulator and its fidelity evaluation [J]. *Infrared*, 2011, 32(7): 28-33. (in Chinese)
- [5] Tian Xiaofei, Ma Lihua, Zhao Shanghong. Fidelity evaluation scheme for IR target simulation [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(1): 135-140. (in Chinese)
- [6] Guo Huimin, Ding Yan. Model and analysis of laser target simulator [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(6): 643-645. (in Chinese)
- [7] Zang Yongqiang, Liu Yuan, Wang Shicheng. Precise simulation for line of sight of laser-guided weapons [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(10): 6-14. (in Chinese)
- [8] Ye Jiansen, Shi Re, Tian Yi. Time domain characteristics study in laser target echo simulator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 471-476. (in Chinese)
- [9] Li Hua, Qin Shiqiao, Wei Wenjian. Research on simulation of dynamic laser guided signals based on two-order response system's models [J]. *Optical Technique*, 2012, 38(2): 227-230. (in Chinese)
- [10] Su Jiangang, Huang Yanjun. Research on hardware-in-the-loop simulation technology for facular shape of laser guided weapons [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2008, 27(6): 83-86. (in Chinese)