

定向干扰激光的红外成像建模与仿真

王炜强¹, 贾晓洪^{1,2}, 韩宇萌¹, 张晓阳¹, 付奎生^{1,2}

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009;

2. 航空制导武器航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘要: 为有效应对红外成像制导武器, 激光定向干扰技术在近年得到重点发展, 并有望成为未来红外对抗的主要方式。着眼于对激光干扰条件下红外系统成像特性的研究需求, 对机载激光定向干扰从发射、大气传输、光学系统传输以及探测器响应的全链路过程进行了分析建模, 构建了激光干扰条件下红外系统成像特性的仿真模型, 最后通过试验验证了文中方法和模型在对激光的红外成像灰度等级、成像光斑及灰度分布特性、成像饱和与致盲毁伤效果方面能够有效反映红外成像系统对激光的实际响应特性, 并取得与实测试验相近的仿真结果, 从而为后续深入研究激光定向干扰效能奠定基础。

关键词: 红外成像; 激光; 定向干扰; 仿真; 建模

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0606005

Infrared imaging modeling and simulation of DIRCM laser

Wang Weiqiang¹, Jia Xiaohong^{1,2}, Han Yumeng¹, Zhang Xiaoyang¹, Fu Kuisheng^{1,2}

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, Luoyang 471009, China)

Abstract: For the purpose of effectively coping with the danger from infrared imaging guided weapons, Directional Infrared Countermeasure (DIRCM) technology is greatly developed in recent years, which has got promising to be the main trend of future Infrared Countermeasure (IRCM) technology. Focused on the research requirement for infrared image-forming system's performance on the condition of DIRCM laser's irradiation, the whole process of DIRCM laser's interaction with atmospheric environment and infrared image-forming system, including laser's emitting, lasing atmospheric transmission, optic transmission and detector's response of the input laser into infrared image-forming system, was well investigated and modeled, upon which the simulation model of infrared image-forming system's performance under DIRCM laser's irradiation was built. Finally, the proposed calculation method and simulation model in this paper were demonstrated valid for simulating infrared image-forming system's real reaction performance to DIRCM laser's irradiation, which are able to obtain efficient simulation results not only on the DIRCM laser's infrared imaging grey level, facula appearance and grey texture, but also on the infrared image-forming system's saturation and damage effects caused by the DIRCM laser's irradiation at different situations, such as different distances, illuminations, etc. Meanwhile, above results were

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-08

基金项目: 航空科学基金(20130153001)

作者简介: 王炜强(1985-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事红外制导、计算机视觉、计算机仿真等方面的研究。Email: alecwong@zju.edu.cn

verified by real experiment which employed laser to irradiate real infrared thermal imaging system, the simulation data were testified close to real experiment datas, the validation of proposed method and model also gets proved. The proposed work provides foundation for further research into DIRCM's jamming performance against infrared imaging guided weapons.

Key words: infrared imaging; laser; DIRCM; simulation; modeling

0 引言

新一代红外成像型导弹具有分辨率高、探测距离远、抗干扰能力强等突出优势,已逐渐取代红外单元、多元探测体制成为红外空空导弹等精确制导武器发展的主要趋势。与此同时,激光定向干扰技术也取得长足进展,激光定向干扰能够快速、高效地对任意体制的红外制导武器实施干扰甚至直接致盲,必将成为未来红外干扰对抗的主要方式。因此,有必要研究机载激光定向干扰对红外探测系统的作用机理,并对激光红外探测响应特性开展建模仿真,为后续评估激光定向干扰的战术效能奠定基础,考虑红外精确制导技术的发展现状及趋势,文中将主要针对红外成像探测系统展开研究。

现有相关研究多集中于红外激光成像的主要机理:如参考文献[1]分析了红外成像系统中激光耀斑的成因机理,参考文献[2]研究了激光干扰行间转移 CCD 串扰现象,参考文献[3]仿真分析了激光干扰对红外成像探测器 MTF 的影响情况;目前对激光干扰红外成像特性的建模与仿真也主要针对上述主要机理进行:如参考文献[4]建立了红外成像系统对激光干扰饱和和串音效应的仿真模型,参考文献[5]对激光干扰建立了亮斑加亮带的简易成像效果模型,但未对激光发射、传输与光电成像的全链路机理进行研究建模,也无法有效模拟激光的复杂成像特性,参考文献[6]提出了一种基于图像特征点、纹理、梯度和对比复杂度的激光干扰图像评估算法,其评价方法符合主观视觉感受,能够一定程度上指导激光干扰与防护技术的应用,但其未涉及对激光红外探测成像机理的研究。因此,目前尚缺乏对激光红外成像特性进行系统仿真建模的相关研究。

文中将对机载激光定向干扰从发射、大气传输、光学系统传输以及探测器响应的全链路开展研究建模,力求形成较为系统、逼真的激光红外成像特性模

型,并通过试验对仿真模型的有效性进行验证。

1 定向干扰激光红外成像链路分析建模

1.1 激光干扰对红外成像制导的影响机理概述

一般就机载激光定向干扰而言,近距发射的干扰激光通常具有较高的入瞳照度,在光学系统传输及探测器响应环节会呈现复杂的成像特性,对目标识别、跟踪与制导构成干扰;随着距离接近与入瞳激光照度的持续增加,干扰激光还会导致探测器成像系统的大面积饱和、致眩直至致盲毁伤,从而使红外系统部分或完全丧失探测制导能力。文中将主要针对定向干扰激光的红外成像链路进行分析建模,对红外制导所受影响及抗干扰策略暂不涉及。

1.2 激光器特性分析建模

现有机载激光定向干扰能够覆盖红外制导的主要波段,以美国定向红外对抗系统为例:其激光器在波段 I、II 和 IV 的输出功率分别是 5 W、0.5 W 和 5 W,总的干扰时间为 3~4 s,方位角测量精度小于 1° ^[7],激光束散角应小于 1 mrad,出射激光的方向应以光源与来袭导弹红外探测器连线为轴线,并受载机及光电跟瞄机构影响存在随机抖动。激光器仿真可设定出射激光的波段在 3~5 μm 范围内,功率为 5 W,束散角为 0.5 mrad,并可根据应用情况设置重频、脉宽、口径、系统光电跟瞄角误差等参数。

1.3 激光大气传输特性分析建模

红外定向干扰系统发射激光后,其在大气传输过程中存在能量衰减和光束散布。通过对激光大气传输特性进行分析,建立定向干扰激光的大气传输特性模型。

当激光在中低空大气水平传播时,大气密度近似均匀,激光大气透过率可按公式(1)计算^[8];当激光在大气中斜程传输时,大气对激光的散射随高度增加呈指数衰减,大气斜程透过率可用公式(2)计算:

$$\tau_r = \exp(-\kappa R) \quad (1)$$

$$\tau_a = \exp \left\{ \frac{K}{V \cdot \sin \theta} [\exp(-0.835h) - 1] \right\} \quad (2)$$

式中： κ 为消光系数， km^{-1} ； R 为弹目距离， km ； h 为弹目相对高度， km ； θ 为光路与水平面的夹角； V 为大气能见度； K 取决于气溶胶类型。

激光大气传输过程中会由于大气湍流扰动、激光光源抖动等因素造成光束散布，散布后的束散角可由公式(3)表示^[9]：

$$\theta = [\theta_y^2 + \theta_r^2 + \theta_g^2]^{1/2} \quad (3)$$

式中： θ 为激光光束经大气传输后的发散角； θ_y 为激光出射光束的衍射发散角，可基于激光波长 λ 、激光束腰直径 D 、光束质量因子 β 计算得到，具体如公式(4)； θ_r 为大气湍流所引起的光束扩展，可由系数 b 、大气湍流相干长度 r_0 、路径长度 R 、天顶角 θ_z 、大气湍流结构常数 C_n 计算，具体如公式(5)； θ_g 为出射激光束散角。

$$\theta_y = 1.22 \frac{\lambda}{D} \beta \quad (4)$$

$$\theta_r = \frac{b\lambda}{r_0} = \frac{b\lambda}{[0.423k^2 \sec \theta_z \int_0^R C_n^2(h) dh]^{-3/5}} \quad (5)$$

将大气传输后的激光束简化为高斯光束，光束整体辐射强度按大气透过率衰减，束散角受大气传输散布增大，得到入射导弹光学系统的激光束光强分布 $I_{\text{optic-in}}$ ，如公式(6)：

$$I_{\text{optic-in}}(r) = I_0 \cdot \tau_a \cdot \exp \left[-2 \left(\frac{2r}{D_0} \right)^2 \right], r \leq L\theta \quad (6)$$

式中： I_0 为出射激光光轴上的光强； r 为距导弹光轴的径向距离； $D_0/2$ 是光强为轴上光强 $1/e^2$ 的径向位置。通常设定实施干扰前红外成像系统的光轴指向目标主要辐射部位，激光器相对目标主要辐射部位的视线夹角以及光电跟瞄系统误差角主要决定入射激光光轴的成像位置，由于该角度通常较小，对激光成像特性的影响基本可予以忽略。

1.4 红外光学系统激光传输特性分析建模

红外光学系统激光传输特性主要体现在由光学衰减、会聚、渐晕造成的能量幅值变化，以及由衍射、像差等光学效应造成的传递特性变化。

光学衰减、渐晕造成的能量变化如公式(7)所示：

$$I_{\text{optic}}(r) = I_{\text{optic-in}}(r) \cdot \tau_{\text{optic}} \cdot H \cdot \cos^N \phi \cdot M \quad (7)$$

式中： τ_{optic} 为光学系统透过率； H 为面渐晕系数，可由轴外点光束的入瞳截面积与入瞳面积比值表示； $\cos^N \phi$ 表示光学系统轴外像点照度随像方孔径角 ϕ 增

大而按 $\cos^N \phi$ 规律减小的现象； M 表示光学系统对光束的会聚作用所产生的光学增益。具体如公式(8)：

$$M = \frac{D^2}{d^2} \quad (8)$$

式中： d 为探测器光敏面直径； D 为光学系统有效通光口径。

光学系统衍射、像差效应引起的激光束传递特性变化可通过传递函数表示，具体如公式(9)、(10)所示^[10]：

$$\text{MTF}_1 = \frac{2}{\pi} \left[\arccos \left(\frac{f}{f_c} \right) - \frac{f}{f_c} \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2} \right] \quad (9)$$

$$\text{MTF}_2 = 1 - \left(\frac{W}{A} \right)^2 \left[1 - 4 \left(\frac{f}{f_c} - \frac{1}{2} \right)^2 \right] \quad (10)$$

式中： f_c 为光学系统空间截止频率； W 为均方波像差。

入射激光束经过光学系统传输后的输出光束可近似表示为公式(11)：

$$I_{\text{optic-out}}(r) = F^{-1}(F(I_{\text{optic}}) \cdot \text{MTF}_1 \cdot \text{MTF}_2) \quad (11)$$

1.5 探测器激光成像特性分析建模

探测器通过光电敏感器件对出瞳激光束积分成像，探测器的时空传递特性将主要影响激光的成像图案，探测器的光谱响应特性将主要影响激光成像的响应电压或灰度等级。

探测器的时空传递特性主要包括时间滤波和空间采样特性，时间滤波特性主要指探测器对入射辐射的低通响应特性，具体如公式(12)所示^[11]：

$$\text{MTF}_3 = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_0)^2}} \quad (12)$$

式中： f_0 为空间频域的 3dB 频率。空间采样特性则是由于探测器单元不完全填充和离散分布造成，探测器单元的响应函数为矩形函数，其傅里叶变换具体如公式(13)所示^[11]：

$$\text{MTF}_4 = \left(\frac{\sin(\pi \alpha f)}{\pi \alpha f} \right)^2 \quad (13)$$

式中： α 为探测器单元的空间张角。

成像探测器各单元接收的出瞳激光束能量如公式(14)所示：

$$I_{\text{detect}}(x, y) = F^{-1}(F(I_{\text{optic-out}}(r)) \cdot \text{MTF}_3 \cdot \text{MTF}_4) \quad (14)$$

式中： x, y 为探测器单元的坐标； r 为探测器平面上 (x, y) 单元与出瞳光束轴线的距离，出瞳光束轴线角位置可根据空间位置关系计算。

红外光电探测器在受到一定量级的激光照射后，各单元的输出会产生饱和，造成局部成像饱和；若激光辐照度和照射时间继续上升，探测器内部温

升还会导致材料熔化、汽化或组分析出,并可能由场效应产生大量载流子击穿光电器件,最终致使被照射单元失效,造成局部毁伤。激光对特定类型探测器的毁伤阈值通常与激光照度和照射时间相关^[12],对光伏型探测器,毁伤单元的电学特性表现为开路电压下降,即响应度降低。这里设定激光辐照度及照射时间超过探测器毁伤阈值后,对应探测器单元的响应度下降系数 α 符合 F 分布,且 $\alpha \in (0, 1)$,具体如公式(15)所示:

$$R(x, y) = R_0(x, y) \cdot \alpha, \alpha \sim F(n_1, n_2) \quad (15)$$

根据各探测器单元接收的激光能量、响应度及噪声可计算探测器各单元输出的电压及对应灰度,具体如公式(16)所示:

$$U_{out}(x, y) = \begin{cases} R_0(x, y) \cdot Idetect(x, y) + \delta, & \text{if } U_{out} < Th_{Sat} \\ Th_{Sat}, & \text{if } U_{out} \geq Th_{Sat} \end{cases} \quad (16)$$

式中:输出饱和阈值 Th_{Sat} 可根据模拟的红外成像系统进行设定。

1.6 全链路仿真模型综合集成

对上述定向干扰激光从发射、大气传输、光学系统传输以及探测器响应的全过程模型进行综合集成,其中大气传输过程对激光束的影响主要参照公式(1)~(5)通过计算出射光束的能量衰减和束散角变化得到,光学系统传输及探测器响应则主要参照公式(7)~(14)通过相关传递函数的叠加进行量化表征,从而形成激光干扰条件下红外系统成像特性的全链路在线仿真系统,仿真系统的综合集成架构如图 1 所示。

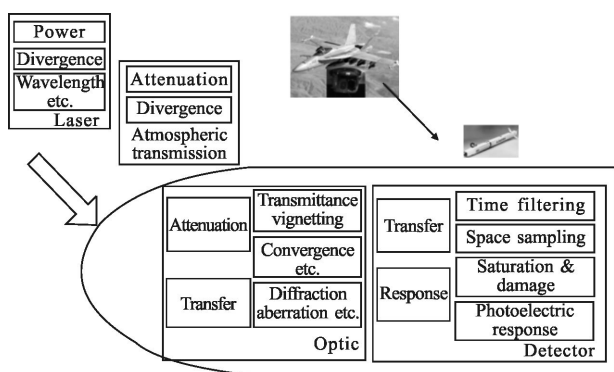


图 1 定向干扰激光的红外成像特性仿真系统架构图

Fig.1 Architecture of DIRCM infrared imaging simulation system

2 模型仿真与试验分析

采用红外热像仪开展激光照射试验,具体在距

离激光器 50 m 处设置红外热像仪,使激光束斑中心尽可能位于热像仪视场中心附近,试验中通过调节激光出射窗口的衰减片设置红外热像仪的入瞳激光照度,试验实施条件如图 2 所示。模型的验证仿真具体按照试验中的出射激光功率等参数设置激光器模型,按照红外热像仪参数设置红外成像系统模型的工作波段为 3~5 μm 、光学透过率为 0.8、分辨率为 640×480、焦距 100 mm、通光口径为 50 mm、探测器单元尺寸为 30 μm ,探测器响应率根据试验状态下红外热像仪的测试标定数值设置。仿真过程中,首先基于出射激光参数及大气衰减模型(详见公式(1)~(5))计算入瞳激光束的光强及其分布特性(详见公式(6)),接着基于光学系统传递函数(详见公式(7)~(11))计算入瞳激光束经光学系统传输后的特性变化,最后基于探测器传递响应函数(详见公式(12)~(16))计算出瞳激光束在探测器上的响应成像、饱和以及毁伤结果,并与试验情况进行对比。

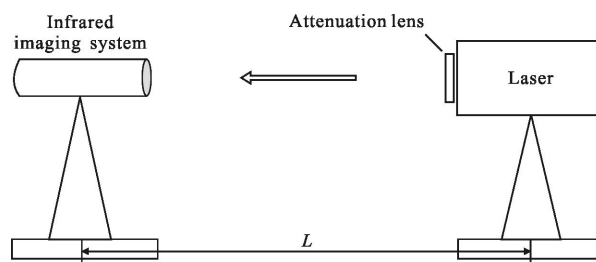


图 2 红外成像系统激光照射试验示意图

Fig.2 Laser infrared imaging experiment

定向干扰激光的红外成像全链路模型验证主要通过仿真计算较低入瞳照度激光的成像灰度等级、成像光斑与灰度分布特性,以及高入瞳照度激光导致的探测器单元饱和与致盲毁伤情况,并与实际激光照射结果进行对比分析。同等入瞳激光照度下实测激光成像最高灰度与仿真值对比如表 1 所示,可对文中公式(1)~(14)与公式(16)所计算的激光成像整体灰度量级的准确性进行验证;激光红外成像的实测图像与仿真图像对比如图 3 所示,可对文中公式(3)~(14)所对应的激光复杂成像特性仿真的有效性进行验证;高入瞳照度激光照射产生的饱和、毁伤实测效果与仿真情况对比如图 4 所示,可对公式(15)与(16)对应的高入瞳照度激光照射下红外成像系统饱和与毁伤情况仿真的有效性进行验证。

表 1 激光成像灰度实测值与仿真值对比
Tab.1 Comparison of laser imaging grey level between measurements and simulations

Input illumination /mW·cm ⁻²	Imaging grey measurement	Imaging grey simulation
77.9	1 639	1 690
893.0	6 664	6 700

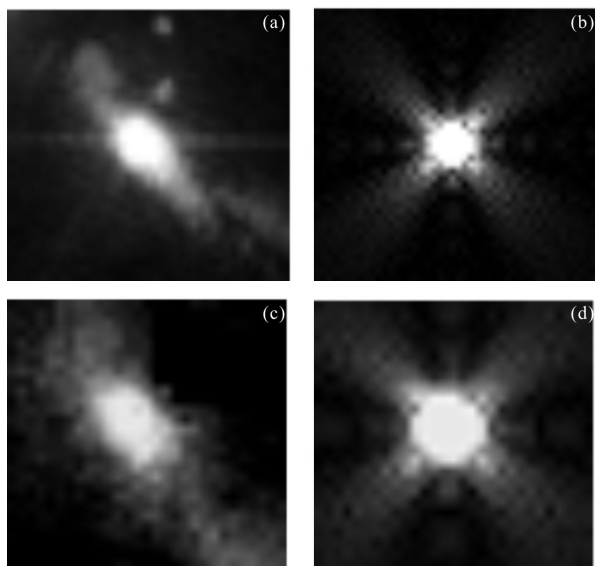


图 3 红外成像系统激光照射试验与仿真结果对比

Fig.3 Comparison between laser infrared imaging measurement and simulation results

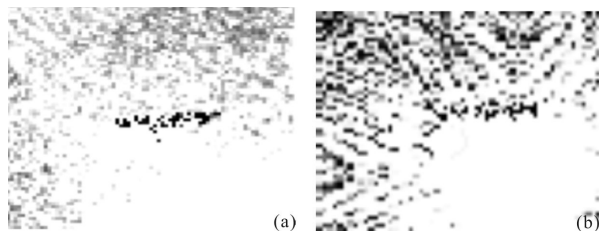


图 4 红外成像系统激光照射饱和和致盲情况与仿真结果对比

Fig.4 Comparison of laser induced saturation and damage result between experiment and simulation

通过仿真与实测对比，验证了文中的激光定向干扰红外成像模型能够较准确地反映激光成像的最高灰度量级，并能基本反映激光在光学及探测成像系统各种效应下的成像效果与灰度分布情况，由于实际红外热像仪产品的光学系统同轴度等参数必然存在误差，且其光学系统的细微瑕疵也会影响激光成像效果，因此实测图像较仿真图像呈现出一定的非对称性和不规则情况。在高入瞳照度的激光照射下，由于实际热像仪产品各成像单元的激光毁伤阈

值存在一定随机散布，仿真未能取得与实测完全一致的毁伤效果，但仿真结果显示在与实测激光辐照条件相当的探测器区域，仿真得到了与实测相近的成像饱和和致盲毁伤效果，如图 4 图像中部及右下部高亮度区域为成像饱和区域，中部黑色的成像单元为被毁伤像元。通过上述试验使文中仿真模型的有效性得到整体验证。

3 结论

针对国内外尚缺乏对激光干扰条件下红外探测成像特性开展系统仿真建模研究的现状，文中对机载定向干扰激光从发射、大气传输、光学系统传输以及探测器响应的全链路过程进行了分析建模与系统集成，构建了激光红外成像特性的在线仿真系统，率先开展了激光对红外成像系统的照射试验，验证了文中方法和模型在激光红外成像灰度等级、成像光斑及灰度分布特性、成像饱和与致盲毁伤效果方面能够有效反映红外成像系统对激光的实际响应特性，并取得了与实测数据相近的仿真结果，为后续深入研究激光定向干扰的战术效能奠定了基础。

参考文献：

[1] Che Jinxi, Xu Xiaojun, Zhang Hengwei, et al. Mechanism of laser flare in the infrared imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1537-1541. (in Chinese)
车进喜, 许晓军, 张恒伟, 等. 红外成像系统中激光耀斑成因机理[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1537-1541.

[2] Qi Fengjie. Study on cross-talk of laser jamming on interline transfer CCD [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, 35(1): 23-25. (in Chinese)
元凤杰. 激光干扰行间转移 CCD 串扰现象研究 [J]. 半导体光电, 2014, 35(1): 23-25.

[3] Shi Lei, Zhang Jianqi. Simulation of the effect of laser irradiation on infrared imaging detectors' MTF[J]. *Electronic Technology*, 2009, 22(9): 53-55. (in Chinese)
石磊, 张建奇. 激光干扰对红外成像探测器 MTF 影响的仿真研究[J]. 电子科技, 2009, 22(9): 53-55.

[4] Gao Weiwei. Simulation of the cross talk effect of lasers on the infrared imaging system [J]. *Electronic Technology*, 2010, 23(6): 35-37. (in Chinese)
高巍巍. 红外成像系统激光干扰饱和和串音效应的仿真[J]. 电子科技, 2010, 23(6): 35-37.

- [5] Yang Xiwei, Tong Zhongcheng, Wang Yafu, et al. Modeling and simulation of laser jamming for electro-optical imaging guided seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1243–1248. (in Chinese)
杨希伟, 童忠诚, 汪亚夫, 等. 激光干扰光电成像导引头的建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1243–1248.
- [6] Qian Fang, Sun Tao, Guo Jin, et al. No-reference laser-dazzling image quality assessment [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 1179–1186. (in Chinese)
钱方, 孙涛, 郭劲, 等. 无参考的特征点复杂度激光干扰图像评估[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 1179–1186.
- [7] Fan Jinxiang, Li Liang, Li Wenjun. Development of direct infrared countermeasure system and technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 789–794. (in Chinese)
范晋祥, 李亮, 李文军. 定向红外对抗系统与技术的发展[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 789–794.
- [8] Wang Jiang, Lin Wei, Wang Peng, et al. Analysis of laser energy chain in the hardware-in-the-loop simulation system of semi-active laser guidance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1230–1233. (in Chinese)
王江, 林蔚, 王鹏, 等. 激光半主动制导武器半实物仿真系统能量链研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1230–1233.
- [9] Wang Shiyong, Fu Youyu, Guo Jin. Evaluation of high energy laser effecting on remote distance photoelectron sensor system [J]. *Optical Technique*, 2002, 28 (1): 20–30. (in Chinese)
王世勇, 付有余, 郭劲. 远场光电探测器系统受激光干扰与损伤效果估计[J]. 光学技术, 2002, 28(1): 20–30.
- [10] Zhao Jing. Modeling and digital simulation of hypersonic infrared seeker imaging [D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
赵静. 高超声速红外导引头成像建模与数字化仿真[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [11] Wang Yiqun. Research on the engineering technology of staring infrared imaging system modeling [D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)
王逸群. 凝视型红外成像系统虚拟样机工程化技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [12] Tang Wei, Ji Tongbo, Guo Jin, et al. Numerical analysis of HgCdTe crystal damaged by high repetition frequency CO₂ laser[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 736–742. (in Chinese)
汤伟, 吉桐伯, 郭劲, 等. 高重频 CO₂ 激光损伤 HgCdTe 晶体的数值分析[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 736–742.