

推扫相机激光干扰等效缩比模型研究及实验验证

康文运, 宋小全, 张颖新, 韦震

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 随着激光技术的快速发展, 推扫相机的激光干扰问题倍受关注。推扫相机一般具有较高的角分辨率, 口径大焦距长造价高, 若按照对等要求进行干扰实验研究, 其技术难度大实验费用高。针对激光对推扫相机干扰效果评价的难题, 从推扫相机成像原理和激光对推扫相机干扰机理入手, 提出了一个推扫相机激光干扰等效缩比模型, 并通过实验对该模型进行了验证。实验表明: 在推扫相机 F 数不变的前提下, 保持相同的入瞳激光功率和积分时间, 激光对缩比相机与原相机具有相同的干扰效应, 即在两相机像面上的激光干扰面积基本相同。该研究成果可应用于激光对推扫相机干扰效果评价和相机激光防护研究等方面。

关键词: 激光干扰; 推扫相机; 等效缩比模型; TDI-CCD 探测器

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2649-06

Study and experiment validation of laser jamming equivalent scaling model of push-broom camera

Kang Wenyun, Song Xiaoquan, Zhang Yingxin, Wei Zhen

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Along with the speediness development of laser technology, jamming problem of laser to push-broom camera is widely noticed at all times. Push-broom camera has commonly high angular resolution, big optical caliber and long focus, and its price is costly. If research on the laser jamming experiment for push-broom camera is carried through by equity request, the technology difficulty will be very big, and the experiment fare will be high too. In allusion to jamming effects evaluation difficulty problem of laser to push-broom camera, a laser jamming equivalent scaling model of push-broom camera was put forward on basis of jamming mechanism and camera imaging principle, the model was validated by experiment. The experiment shows if F number, pupil laser power and CCD integral time of push-broom cameras are same, jamming effects of laser to original camera and scaling camera are basic same, namely laser jamming area on the two cameras's imaging is basic same. This result can be used for evaluating laser jamming effects to Push-broom camera and researching camera laser protection method.

Key words: laser jamming; push-broom camera; equivalent scaling model; TDI-CCD detector

收稿日期: 2015-01-05; 修订日期: 2015-02-03

基金项目: 国家 863 计划(2010A8020504)

作者简介: 康文运(1965-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事光电技术方面的研究。Email: cts_kangwenyun@sina.com

0 引言

推扫相机一般搭载于航天和航空飞行平台上,通过平台运动对地推扫成像,目前在航天航空遥感、对地成像侦察等方面已得到广泛应用。激光光束质量好,峰值功率密度高,适合远距离传输,是干扰推扫相机的重要手段,因此,随着激光技术的快速发展,激光对推扫相机干扰问题受到了世界各国的高度关注^[1-3]。

开展激光对推扫相机干扰实验研究是发展高效激光应用系统、评价激光对相机的干扰效果以及相机激光防护设计的重要一环,但由于推扫相机的作用距离较远,一般具有较高的角分辨率,其口径大焦距长造价高^[4-7],若按照对等要求进行干扰实验研究,其技术难度大实验费用高。因此,为了提高推扫相机激光干扰实验研究效费比,有必要先进行推扫相机激光干扰等效缩比模型研究,为开展激光对推扫相机干扰等效实验及干扰效果评价提供参考。

文中从影响推扫相机成像的几个关键要素及激光对推扫相机干扰机理入手,建立了推扫相机激光干扰等效缩比模型,构建了激光干扰实验验证系统,通过实验对该模型进行了验证。

1 等效缩比理论模型

推扫相机对地推扫成像时其像面上的辐照度由下式计算^[8]:

$$H = \frac{\pi}{4} L \tau_1 \tau_2 \left(\frac{1}{F} \right)^2 \quad (1)$$

式中: H 为相机对地推扫成像时其像面上的辐照度,单位 W/cm^2 ; L 为地物背景的亮度,单位 $\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$; τ_1 为整层大气的透过率; τ_2 为相机光学系统的透过率; F 为相机焦距(f)与入瞳直径(D)之比,及光学相机 F 数。

由公式(1)可知,相机 F 数、地物背景的亮度、大气透过率及相机光学系统透过率是影响相机像面上辐照度的主要因素。

在保持相机 F 数和光学系统透过率不变的情况下,将一个庞大高分辨率推扫相机适当缩小后,对地推扫成像时,在相同大气条件下,同一亮度地物背景在相机像面上产生的辐照度(H)相同,即单位时间内照射到相机探测器单位面积上的光子数就相同。若

采用相同型号的探测器,并设置相机增益和积分时间(ΔT)相同,这种情况下缩比相机和原相机的输出图像具有相近的亮度,即输出的地物背景图像其灰度级基本相同。

当推扫相机对地推扫成像时,若遇激光干扰,激光干扰信号经推扫相机光学系统会聚后在 CCD 探测器焦平面上形成一个微小光斑,在相机推扫的过程中光斑扫过线阵 CCD 或 TDI-CCD 探测器。

激光干扰信号经远距离传输到达推扫相机入瞳处为平行光,那么影响 CCD 探测器上激光光斑大小的因素有两类:一是衍射;二是像差。推扫相机的像质一般接近光学系统衍射极限。因此,激光干扰信号经推扫相机光学系统会聚后在 CCD 探测器上形成的光斑大小主要取决于衍射,其直径由下式决定^[9]:

$$D = 2.44 \lambda (F \text{ 数}) \quad (2)$$

式中: D 为探测器上激光光斑直径,单位 μm ; λ 为激光波长,单位 μm ; F 数相机焦距(f)与入瞳直径(D)之比,即光学相机 F 数。

由公式(2)可知,在保持相机 F 数不变的情况下,同一激光照射信号在原相机和缩比相机探测器上形成的光斑大小相同。

通过上述分析可知:在保持 F 数不变的情况下对推扫相机进行缩比,对相同亮度地物背景,相机像面上背景光辐照度和激光光斑大小可保持不变。在这种条件下,影响激光干扰面积的主要因素就取决于照射到 CCD 探测器的激光能量。

激光信号经 CCD 探测器形成光生电荷,随着激光照射信号增强,光生电荷将直接照射像元处的电荷储存势阱充满后就溢出至其它像元的电荷储存势阱中,其它像元的电荷储存势阱储存的是背景光生电荷,溢出电荷将周围电荷储存势阱充满,在输出图像中就形成了局部饱和亮斑。随着激光照射信号的进一步增强,在 CCD 探测器中形成的大量光生电荷一方面向周围其它像元储存势阱溢出,同时将通过电荷转移通道溢出到其它像元的移出信号中,最后形成白色亮线,输出图像中出现了串扰现象^[10-11]。当照射激光特别强时,由于电荷积累多,造成 CCD 复位电平紊乱^[12-13],致使其输出电平增大(正常光强下基本不变),信号电平减去紊乱的复位电平反而变小,CCD 输出信号还将出现黑色反转线,出现这种现象时接近损伤。激光干扰形成原理如图 1 所示。

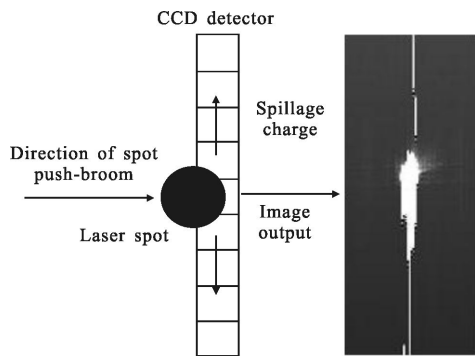


图 1 激光干扰形成原理示意图

Fig.1 Diagram of laser jamming's forming principle

由上述激光对推扫相机干扰机理可知：激光在相机像面上形成的干扰大小与背景光和激光在探测器中产生的光生电荷数量有关，在背景光生电荷相同的情况下，激光产生的光电荷越多激光干扰面积就越大。

由于不同型号的 CCD 探测器光电转换效率、储存势阱容量及抗溢出能力存在着一定差异,因此,其激光干扰面积大小还与 CCD 探测器型号和工作状态有关。

通过上述分析,推扫相机激光干扰等效缩比模型可归纳如下:

在保持相机数和光学系统的透过率不变的情况下,将高分辨率推扫相机缩小为低分辨率相机,保持两相机像质基本一致,并采用同一型号 CCD 探测器。对同一亮度的地物背景,设置相机增益和积分时间(ΔT)相同,当进入两相机的激光功率相同时,在两相机像面上将产生相同的干扰面积。

若采用相机入瞳处的激光功率密度衡量,那么当照射到两相机入瞳处的激光功率密度满足下式时,在两相机像面上产生的干扰面积相同。

$$\frac{\pi}{4} D_0^2 P_0 = \frac{\pi}{4} D_n^2 P_n \quad (3)$$

式中: P_0 为照射到高分辨率推扫相机入瞳处的激光功率密度,单位 W/cm^2 ; D_0 为高分辨率推扫相机光学入瞳直径,单位 cm ; P_n 为照射到分辨率降低 n 倍的推扫相机入瞳处的激光功率密度,单位 W/cm^2 ; D_n 为分辨率降低 n 倍的推扫相机光学入瞳直径,单位 cm 。

2 验证实验及分析

为了验证上述等效缩比理论模型的正确性,构

建了一套实验系统,开展了验证实验,实验情况如下。

2.1 实验系统构成

为了确保实验期间背景亮度恒定,验证实验在室内进行。

实验系统组成及光路如图 2 所示。

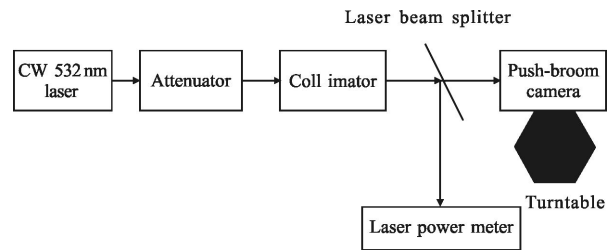


图 2 推扫相机激光干扰实验系统组成图

Fig.2 Diagram of laser jamming experiment system of push-broom camera

实验系统包括:激光器、衰减器(光学衰减片、可调衰减器)、扩束镜、分光镜、激光功率计、转台、推扫相机、光具支架和光学平台等。

(1) 激光器采用波长 $0.532 \mu m$ 连续激光,为实验提供光源。

(2) 衰减器在实验时用于调节相机入瞳处激光功率密度。

(3) 扩束镜用于扩展光束直径,压缩激光发散角,使光束覆盖相机入瞳口径,在相机入瞳处形成平行激光,模拟远场激光照射相机入瞳的情况。

(4) 分光镜用于按一定比例分一部分光给激光功率计监测相机入瞳功率。

(5) 转台带动相机实现推扫成像过程,模拟推扫相机与激光束的相对运动关系。

(6) 推扫相机采用 DALSA 8192×32TDI CCD 探测器。光学系统 F 数 10,焦距 100 mm、200 mm 两档,对应光学口径分别为 10 mm、20 mm;其像质接近衍射极限,光学透过率约 93%。

2.2 实验方法和步骤

实验按照下列方法和步骤开展:

(1) 按图 2 所示布设实验系统光路,使激光束中心与推扫相机光轴对准,设置背景光亮度,并保持整个试验过程中背景亮度不变;

(2) 设置推扫相机焦距为 200 mm,调节转台转速 ω 、相机探测器 TDI 级数 M ,使推扫相机对远处景

物正常成像,记录相关设备状态数据;

(3) 调整激光器、衰减器有关参数,分低、中、高三档激光功率干扰推扫相机成像,记录相机的输出图像,测量相机入瞳激光功率大小;

(4) 设置推扫相机焦距为 100 mm, 缩小相机光学系统,使相机分辨率降低一倍,调节转台转速 ω 、相机探测器 TDI 级数 M , 并保持相机增益和探测器积分时间与焦距 200 mm 推扫相机设置一致,记录相关设备状态数据

(5) 调整激光器、衰减器有关参数,按照针对焦距 200 mm 推扫相机设置的低、中、高三档激光功率干扰焦距 100 mm 推扫相机成像,记录相机的输出图像;

(6) 对两相机输出的激光干扰图像进行比对分析,估算输出图像上激光干扰面积的偏差。

2.3 实验现象

实验现象表现为:

(1) 相机入瞳激光功率 0.25 mW, 这时照射激光功率较低,像面上出现局部饱和亮斑。焦距 100 mm 推扫相机的干扰图像如图 3(a)所示,焦距 200 mm 推扫相机的干扰图像如图 3(b)所示。

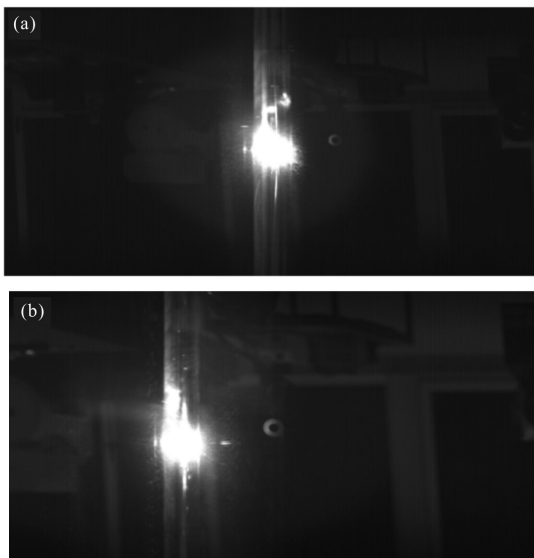


图 3 0.25 mW 激光对推扫相机干扰图

Fig.3 Jamming picture of 0.25 mW laser to push-broom camera

(2) 相机入瞳激光功率 0.85 mW, 随着照射激光功率增大,饱和亮斑扩大。焦距 100 mm 推扫相机的干扰图像如图 4(a)所示,焦距 200 mm 推扫相机的干扰图像如图 4(b)所示。

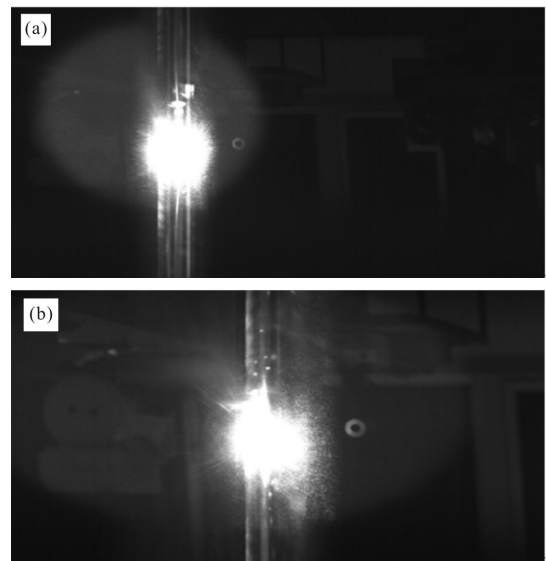


图 4 0.85 mW 激光对推扫相机干扰图

Fig.4 Jamming picture of 0.85 mW laser to push-broom camera

(3) 相机入瞳激光功率 2.2 mW, 随着照射激光功率进一步增大,饱和亮斑扩大并出现白色串扰线。焦距 100 mm 推扫相机的干扰图像如图 5(a)所示,焦距 200 mm 推扫相机的干扰图像如图 5(b)所示。

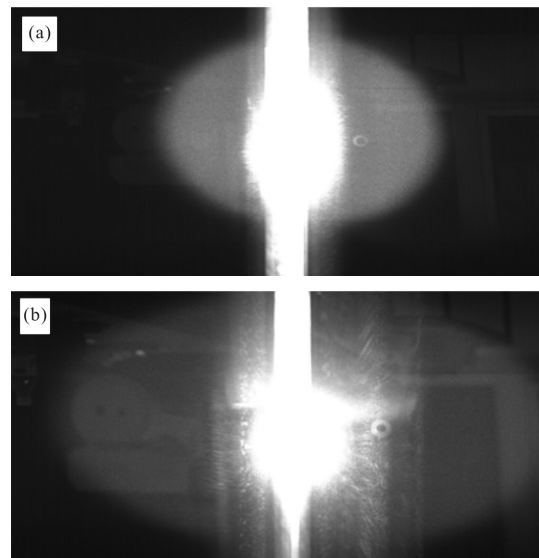


图 5 2.2 mW 激光对推扫相机干扰图

Fig.5 Jamming picture of 2.2 mW laser to push-broom camera

2.4 实验结果分析

图 3~5 为激光对推扫相机干扰图,是原始图像等比例缩小后的图像,图像中靠右侧的小亮环是放置在激光器一侧的圆环灯,用于说明相机输出图像的分辨率,为评估激光干扰面积大小提供参考。从上述图

片可以看出:高分辨率相机(焦距 200 mm、口径 20 mm)比缩比相机(焦距 100 mm、口径 10 mm)输出图像中的小亮环大约一倍,这说明上述图片中显示的激光干扰大小是等比例缩放的。不规则亮斑和亮线是激光干扰图,通过对比可知:在相同背景亮度、相同入瞳激光功率、相同 F 数、相同相机增益和积分时间条件下,原相机(焦距 200 mm、口径 20 mm)和缩比相机(焦距 100 mm、口径 10 mm)输出的激光干扰图形貌相似,干扰尺寸基本一致。从图中还可以看出:随着激光照射强度增大,在像面上出现了椭圆形大块浅色亮斑,这是由激光照射相机被二次反射照亮背景后成像造成的。

为了定量评估两相机像面上激光干扰面积的偏差,采用 MATLAB 编程来统计相机输出图像中激光干扰面积大小,激光干扰面积采用有效干扰像元数来表示, MATLAB 程序如下:

$$a = \text{imread}(\text{图像路径及名称})$$

$$S = \text{sum}(\text{sum}(a > T))$$

式中: S 为图像上的激光干扰面积(即有效干扰像元数); T 是为了统计干扰像元数而设置的像元灰度阈值,即形成有效干扰时的像元灰度,一般取高于背景灰度 30 个灰度级。

采用该程序对每幅图像进行运算,可计算出在不同入瞳激光功率情况下两相机的激光干扰面积,以及相同入瞳激光功率情况下两相机的激光干扰面积偏差值。在不同入瞳激光功率情况下两相机的激光干扰面积(有效干扰像元数)及偏差值详见表 1。

表 1 不同入瞳激光功率情况下两相机的激光干扰面积及偏差值

Tab.1 Laser jamming areas and errors of the two cameras irradiated by different pupil laser power

	0.25 mW	0.85 mW	2.2 mW
Push-broom camera (100 mm focal length)	587 361	1 749 767	3 479 420
Push-broom camera (200 mm focal length)	682 978	1 548 492	3 311 113
Error of jamming area	14%	13%	5%

通过上述计算可知,在入瞳激光功率相同的情况下,激光对两相机的干扰面积偏差最大为 14%,最

小为 5%,可以看出随着相机入瞳激光功率增大其干扰面积偏差变少,其原因可能是在低功率时杂散光影响成份占比较大的结果。

二者存在偏差的主要原因:一是由于图像上干扰像元统计误差,由图 3~5 可以看出,干扰像元数不好精准判别;二是入瞳激光功率测量也存在误差,一般约有 5%的测量误差;三是实验过程中激光器输出功率存在约 5%的波动。

3 结论

由于推扫相机一般角分辨率较高,其焦距长结构庞大造价也较高,这已成为了开展激光对推扫相机干扰实验研究的一大障碍。因此,开展推扫相机激光干扰等效缩比模型研究,探索一种等效实验方法十分迫切而必要。

文中从影响推扫相机成像的几个关键要素入手,依据激光对推扫相机干扰机理,建立了推扫相机激光干扰等效缩比理论模型,构建了激光干扰实验验证系统,并通过实验对该模型进行了验证。

通过理论分析和实验验证可得出以下结论:

在保持相机 F 数和光学系统透过率不变的情况下,将高分辨率推扫相机(可见光波段)缩小为低分辨率相机,采用同一型号 CCD 探测器,在相同的地物背景亮度条件下对地推扫成像,设置相机增益和探测器积分时间(ΔT)相同,当照射进入两相机的激光功率相同时,在两相机输出图像上产生的干扰图像面积基本相同。实验表明:两相机的激光干扰图像面积偏差小于 15%,产生偏差的主要原因是实验过程中干扰激光功率的波动、干扰面积测量误差以及相机入瞳激光功率测量误差等。

参考文献:

- [1] Anne Dur6cu, Olivier Vasseur, Pierre Bourdon. Quantitative assessment of dazzling effects on a CCD camera through Pattern-recognition-algorithms Performance measurements [C]//SPIE, 2009, 7483: 74830N-1-74830N-11.
- [2] Jiang Jijun, Luo Fu, Chen Jianguo. Research on femtosecond laser induced damage to CCD [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(4): 515-517. (in Chinese)
江继军, 罗福, 陈建国. CCD 在 fs 激光辐照下的损伤研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(4): 515-517.

- [3] Huang Shaoyan, Zhang Yongsheng, Tang Benqi, et al. Damage effect on CCD detector irradiated by 500 fs laser pulse [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(10): 1445–1448. (in Chinese)
黄绍艳, 张永生, 唐本奇, 等. 500 fs 超短脉冲激光对 CCD 探测器的破坏效应 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(10): 1445–1448.
- [4] Yang Bingxin. Characteristics and Main specifications of IKONOS and quickBird2 satellite camera-some points for developing such like satellite camera [J]. *Space Craft Recovery & Remot Sensing*, 2002, 23(4): 14–16. (in Chinese)
杨秉新. 美国 IKONOS 和 QuickBird2 卫星相机的主要性能和特点分析及看法 [J]. *航天返回与遥感*, 2002, 23(4): 14–16.
- [5] Xue Mingqiu. On optical system with high spatial resolution and wide angle of view in remote sensing [J]. *Journal of Suzhou Institute of Silk Textile Technology*, 2000, 20(1): 1–6. (in Chinese)
薛鸣球. 高分辨宽覆盖遥感相机光学系统研究 [J]. *苏州丝绸工学院学报*, 2000, 20(1): 1–6.
- [6] Chen Xiaoli, Fu Danying. Solutions for space optical remote sensor with large aperture and ultrahigh resolution [J]. *Space Craft Recovery & Remot Sensing*, 2003, 24(4): 19–24. (in Chinese)
陈晓丽, 傅丹鹰. 大口径甚高分辨率空间光学遥感器技术途径探讨 [J]. *航天返回与遥感*, 2003, 24(4): 19–24.
- [7] Han Changyuan. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(11): 2164–2172. (in Chinese)
韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2164–2172.
- [8] Xu Nanrong, Bian Nanhua. Infrared radiation and Homing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997: 238–239. (in Chinese)
徐南荣, 卞南华. 红外辐射与制导 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 238–239.
- [9] Hudson R D. Infrared System Engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997: 109–110. (in Chinese)
R.D. 小哈得逊. 红外系统原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 109–110.
- [10] Lin Junyang, Shu Rong, Huang Genhua, et al. Study on threshold of laser damage CCD and COMS M AGE sensors [J]. *J Infrared Millin Waves*, 2008, 27(6): 475–478. (in Chinese)
林均仰, 舒嵘, 黄庚华, 等. 激光对 CCD 及 CMOS 图像传感器的损伤阈值研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(6): 475–478.
- [11] Liao Hai, Sun Nianchun, Feng Guoying, et al. Experimental study on 532 nm laser-induced failure of array and linear CCD [J]. *Laser Technology*, 2005, 17(10): 1457–1459. (in Chinese)
廖海, 孙年春, 冯国英, 等. 532 nm 激光对面阵和线阵 CCD 损伤效应实验研究 [J]. *激光技术*, 2005, 17(10): 1457–1459.
- [12] Zhang Zhen. Laser-induced Dazzling Phenomena in Visible Light CCD and Their Mechanism [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
张震. 可见光 CCD 的激光致眩现象与机理研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [13] Zhu Zhiwu, Zhang Zhen, Cheng Xiang'ai, et al. Damage phenomenon and probability of CCD detectors under single-laser-pulse irradiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 113–118. (in Chinese)
朱志武, 张震, 程湘爱, 等. 单脉冲激光对 CCD 探测器的硬损伤及损伤概率 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 113–118.