

基于红外照射仿真的快速搜索相关跟踪干扰点研究

唐 聪^{1,2,3}, 殷松峰^{1,2,3}, 凌永顺^{1,2,3}, 王一程^{1,2,3}, 杨 星^{1,2,3}, 徐 凯^{1,2,3}

- (1. 电子工程学院, 安徽 合肥 230037;
2. 红外与低温等离子体安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037;
3. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘 要: 通过人工红外照射改变目标与背景的红外辐射特性能够对相关跟踪形成有效干扰, 其中, 红外照射的位置对干扰效果具有重要影响。为提升红外照射干扰相关跟踪的效率, 文中建立了红外照射仿真搜索相关跟踪干扰点模型, 对干扰相关跟踪的有效照射位置进行快速搜索。首先, 运用 TracePro 光线追迹软件建立了真实实验条件下的红外照射系统模型, 并利用高斯模型对照射光斑的照度分布进行了拟合。然后, 在一定空间范围内, 采用二维扫描的方式进行真实照射干扰和仿真照射干扰对比实验, 结果表明: 仿真照射与真实照射的干扰结果一致性达到了 98%, 且仿真照射找出了真实照射条件下干扰相关跟踪的全部干扰点, 从而很好地验证了文中方法的有效性。

关键词: 干扰点搜索; 红外照射仿真; 相关跟踪; 干扰效率

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0104003

Research on searching interference points against correlation tracking by using infrared irradiation simulation

Tang Cong^{1,2,3}, Yin Songfeng^{1,2,3}, Ling Yongshun^{1,2,3}, Wang Yicheng^{1,2,3}, Yang Xing^{1,2,3}, Xu Kai^{1,2,3}

- (1. Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;
2. Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Hefei 230037, China;
3. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: Artificial infrared irradiation has an effective interference on correlation tracking by changing the infrared characteristics of target and background, where the location of infrared irradiation has an important impact on the interference performance. In order to improve the interference efficiency, the model of searching interference points by using infrared irradiation simulation was established. First, the infrared irradiation model in the true experimental environment was built in TracePro and the illuminance distribution of irradiation spot was fitted by Gaussian model. Then, the experiments with true irradiation condition and simulation irradiation condition were carried out. The comparison experiments show that the interference results of different irradiation locations under the two conditions are uniform in 98% and all

收稿日期: 2015-05-12; 修订日期: 2015-06-14

基金项目: 安徽省自然科学基金(1408085QF131, 1508085QF121)

作者简介: 唐聪(1989-), 男, 硕士生, 主要从事红外定向照射技术等方面的研究。Email: tangcong_eei@163.com

导师简介: 凌永顺(1937-), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 主要从事光电工程等方面的研究。Email: lys@126.com

interference points are found by irradiation simulation, illustrating the effectiveness of the proposed method in the paper.

Key words: interference points search; infrared irradiation simulation; correlation tracking; interference efficiency

0 引言

在成像跟踪的多种算法中, 相关跟踪是一种应用较广的跟踪算法^[1-2], 可在低信噪比条件下正常工作, 能适应较复杂结构的目标和背景的组合, 具有较强的抗干扰能力^[3-4]。在对抗相关跟踪的研究中, 参考文献[5]提出通过一些措施或手段改变自身图像特征可以实现对相关跟踪的干扰, 参考文献[6-7]则分别就图像变异、灰度畸变对相关跟踪的干扰进行了较深入的理论分析研究, 而参考文献[8]采用人工红外光源照射作为干扰手段, 分析了不同光照参数条件下的红外照射对地面目标红外特性影响, 结果表明通过人工红外照射可有效改变目标的红外辐射特性, 参考文献[9]则在此基础上进行了人工红外光源照射对红外成像跟踪的影响, 但主要就红外照射对形心跟踪的影响展开了研究。文中从红外照射干扰相关跟踪的角度, 研究红外照射对相关跟踪的影响, 并通过一定的方法来提高红外照射条件干扰相关跟踪的干扰效率。

对于红外照射干扰相关跟踪, 同样的照射条件下, 红外照射目标和背景的不同位置对相关跟踪的干扰能力不同。在这些照射位置中, 仅有一部分位置能对相关跟踪产生有效干扰, 这里称之为干扰点。红外照射干扰过程中, 若能充分利用这些干扰点进行照射干扰, 将有效提升干扰相关跟踪的效率。文中采用红外照射仿真的方式, 模拟真实照射环境下的照射, 并按照一定的搜索策略, 快速搜索某一空间范围内相关跟踪的干扰点, 为红外照射干扰相关跟踪提供了指导, 具有重要的理论和应用价值。

1 红外照射位置对相关跟踪的影响

1.1 红外照射模型

采用红外光源照射目标和背景区域, 照射示意图如图 1 所示。

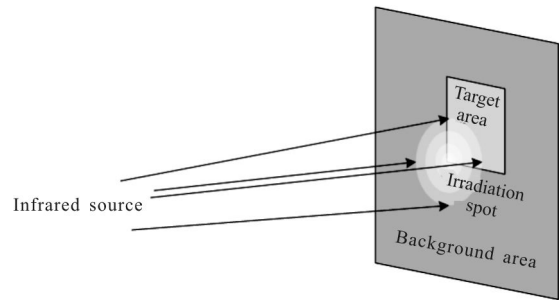


图 1 红外照射模型

Fig.1 Infrared irradiation model

红外照射后, 目标和背景的有效红外辐射出射度^[10]分别为:

$$M_{t(\lambda_1 \sim \lambda_2)}^*(x, y) = M_{t(\lambda_1 \sim \lambda_2)}(x, y) + (1 - \varepsilon_t) E_{\lambda_1 \sim \lambda_2}(x, y) \quad (1)$$

$$M_{b(\lambda_1 \sim \lambda_2)}^*(x, y) = M_{b(\lambda_1 \sim \lambda_2)}(x, y) + (1 - \varepsilon_b) E_{\lambda_1 \sim \lambda_2}(x, y) \quad (2)$$

式中: $M_{t(\lambda_1 \sim \lambda_2)}(x, y)$ 和 $M_{b(\lambda_1 \sim \lambda_2)}(x, y)$ 分别为目标和背景上位置点 (x, y) 在照射波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 上的辐射出射度; ε_t 和 ε_b 分别为目标和背景的发射率; $E_{\lambda_1 \sim \lambda_2}(x, y)$ 为红外光源在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段上照射到目标和背景上 (x, y) 处的照度。

1.2 红外照射位置对相关跟踪的影响

不同照射位置, 目标和背景上各点的 $E_{\lambda_1 \sim \lambda_2}(x, y)$ 不同, 由公式(1)和(2)可知, 在红外照射条件下, 目标和背景上的有效红外辐射出射度 $M_{t(\lambda_1 \sim \lambda_2)}^*(x, y)$ 和 $M_{b(\lambda_1 \sim \lambda_2)}^*(x, y)$ 将随照度的不同而不同, 从而使目标和背景的红外辐射特征发生改变。对相关跟踪而言, 目标和背景红外辐射特征改变的直接影响就是跟踪视场内目标相关峰的变化, 这将对跟踪系统的跟踪位置和稳定性产生影响, 从而影响相关跟踪系统的跟踪能力。

若通过真实照射目标和背景中的各个位置点, 逐点分析照射位置对相关跟踪的影响, 过程比较繁琐, 且耗费时间长。为此, 文中提出一种基于红外照射仿真的方法来模拟真实环境下的红外照射, 对某

一空间范围内干扰相关跟踪的干扰点进行快速搜索。

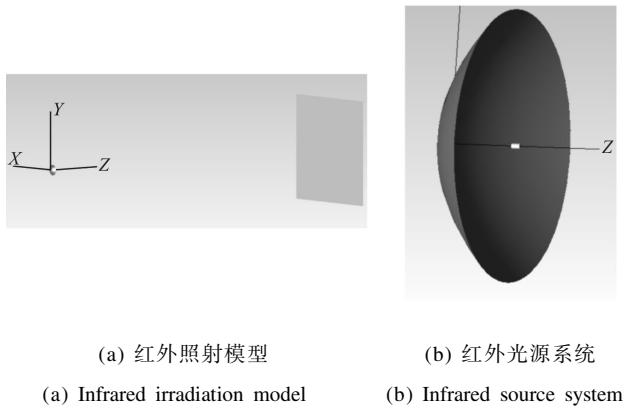
图 4 所示。

2 红外照射仿真搜索相关跟踪干扰点模型

2.1 红外照射光斑的仿真

2.1.1 光斑照度分布曲线

运用 TracePro 光线追迹软件搭建一个真实实验条件下照射距离为 10 m 的红外照射系统模型,如图 2(a)所示。其中,红外光源系统采用抛物面柱状光源设计,如图 2(b)所示,抛物面的口径为 300 mm,焦距为 75 mm,柱状光源为底面半径为 3 mm,长度为 10 mm 的圆柱状热辐射源,工作温度为 1 600 K,发射率为 0.85。



(a) 红外照射模型

(b) 红外光源系统

(a) Infrared irradiation model

(b) Infrared source system

图 2 红外照射系统模型

Fig.2 Model of infrared irradiation system

进行 120 万条光线追迹,结果见图 3(为距离光源系统 10 m 处的接收板上接收到的照度分布)。

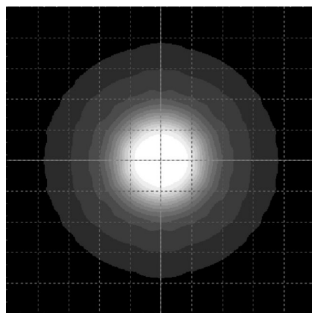


图 3 接收板上的照度分布

Fig.3 Illuminance distribution on receiving board

由于文中红外光源系统的光源和反射器均是旋转对称结构,因此,接收板上的照度分布理想状态下也应呈现为旋转对称状,取过光斑中心的一组照度数据绘制照度分布曲线,以观察照度分布的线型,如

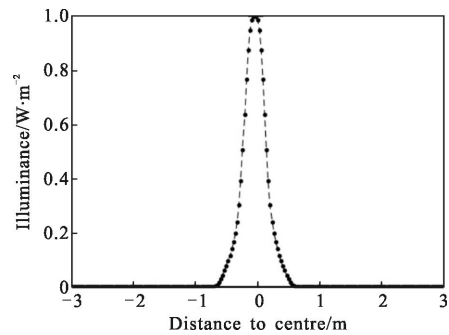


图 4 照度分布曲线

Fig.4 Illuminance distribution curve

据观察,该曲线呈现高斯分布线型的特点,因此,采用高斯拟合对照射数据进行拟合,结果如图 5 所示。

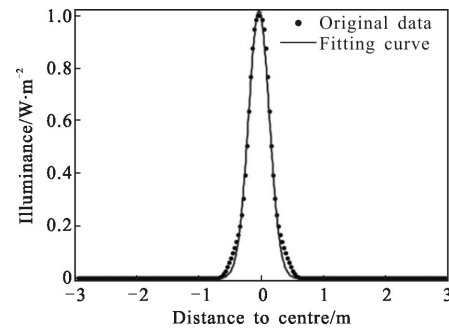


图 5 高斯拟合结果

Fig.5 Gaussian fitting result

拟合过程中采用的拟合函数为

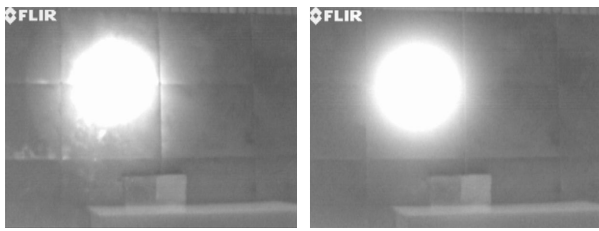
$$f(x)=a \cdot \exp(-((x-b)/c)^2) \quad (3)$$

式中: $a=1.0160$, $b=-0.0441$, $c=0.2403$ 。

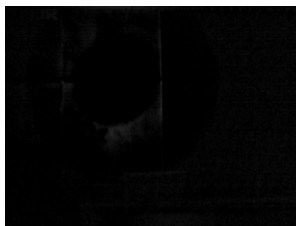
计算图 5 中拟合数据与原始数据的均方差 RMSE=0.0146,同时,计算拟合曲线对原始数据拟合优度的决定系数 $R^2=0.9954$,说明采用高斯函数进行拟合的照度分布曲线与真实实验环境仿真照射条件下照射光斑的照度分布曲线拟合度非常高。因此,该红外照射系统的照射光斑的照度分布曲线可以用一个高斯函数进行拟合,旋转对称之后得到整个照射光斑的照度分布。

2.1.2 仿真照射与真实照射对比

对一幅在实验环境下拍摄的真实照射图(见图 6(a)),与一幅运用文中方法仿真得到的仿真照射图(见图 6(b))进行差值运算,结果如图 6(c)所示。



(a) 真实照射 (b) 仿真照射
(a) True irradiation (b) Simulation irradiation



(c) 仿真照射与真实照射差值
(c) Difference between true irradiation and simulation irradiation

图 6 仿真照射与真实照射对比

Fig.6 Contrast between true irradiation and simulation irradiation

计算仿真照射图与真实照射图对应点照度值的均方根 $RMSE=4.3358$, 对照度值归一化之后, $RMSE=0.017$, 表明仿真照射图与真实实验照射图保持了很高的一致性, 从而保证了文中所述方法的有效性。

2.2 干扰点搜索策略

文中针对一个包含目标和背景的场景, 搜索照射条件下该场景中对目标进行有效干扰的照射位置, 主要执行以下步骤:

(1) 在实验条件下拍摄一幅含有真实照射光斑的目标和背景场景图和一幅无照射光斑的目标和背景场景图。

(2) 在无照射光斑的目标和背景场景图上叠加高斯仿真光斑, 与真实照射条件下的目标和背景场景图对比, 并进行参数反馈优化, 得到该场景中最佳仿真光斑的参数。

(3) 利用步骤(2)中生成的仿真照射光斑, 按照一定搜索方式生成照射序列图。文中搜索方式采用二维扫描的形式, 例如: $6 \times 8, 9 \times 12$ 的形式。

(4) 对上述生成的照射序列图进行干扰偏移量的计算, 设置一个有效干扰偏移量阈值, 找出当前目标和背景场景中有效干扰的照射位置, 这些位置即作为当前照射条件下干扰相关跟踪的干扰点。

3 实验验证

在实验条件下, 对某一空间范围内的目标和背景进行二维扫描照射, 并拍摄一组 6×8 的照射序列图。实验中, 目标为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的铝制红外辐射板, 工作温度为 308 K , 背景为 $1.5 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ 铝制漫反射板, 常温环境下。图 7 所示为真实照射条件下拍摄的 48 张照射序列图中某 9 个照射位置处的红外照射图。

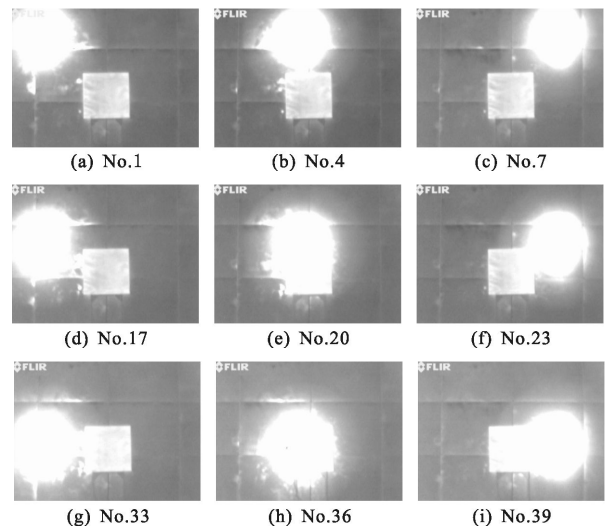


图 7 真实照射效果

Fig.7 Effect of true irradiation

同时, 在当前目标和背景的场景下仿真生成一组按照同样照射位置的照射序列图。图 8 所示为仿真照射条件下仿真所得 48 张照射序列图中与图 7 中 9 个照射位置处所对应的红外照射图。

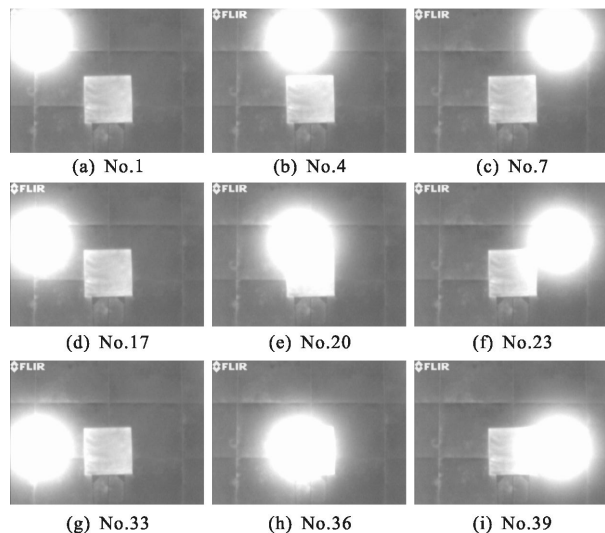
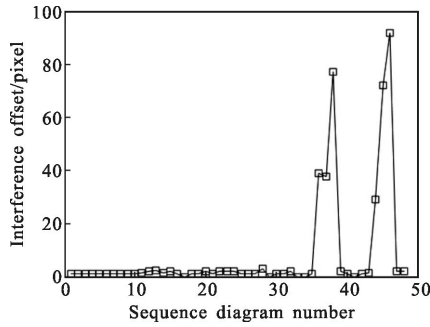


图 8 仿真照射效果

Fig.8 Effect of simulation irradiation

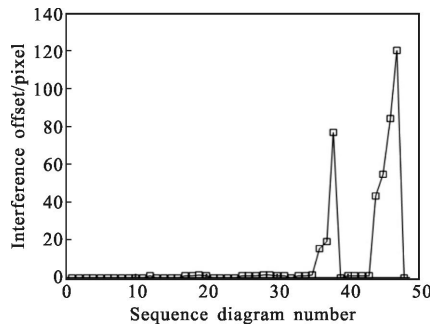
3.1 干扰偏移量计算

根据上述得到的照射序列图，计算实验照射条件下和仿真照射条件下红外照射不同位置时，干扰相关跟踪所产生的目标偏移量，见图 9。



(a) 真实照射条件下

(a) Under the condition of true irradiation



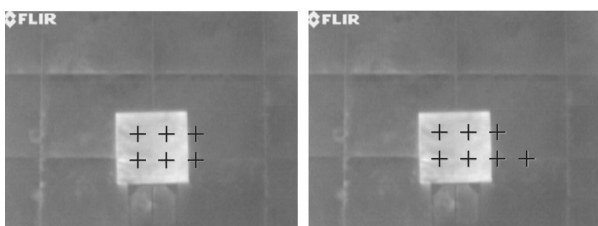
(b) 仿真照射条件下

(b) Under the condition of simulation irradiation

图 9 干扰偏移量曲线

Fig.9 Curve of interference offset

干扰偏移量是衡量红外照射干扰相关跟踪最重要的指标，表征不同照射位置对相关跟踪的干扰能力。干扰过程中，当干扰偏移量达到一定值时认为该干扰有效，这里设定干扰偏移量阈值为 10 pixels，则可以从图 9 中找出两种照射条件下偏移量大于偏移量阈值的干扰点。图 10 为上述场景中分别在真实照



(a) 真实照射

(b) 仿真照射

(a) True irradiation (b) Simulation irradiation

图 10 当前场景中有效照射干扰位置

Fig.10 Effective irradiation locations in the scene

射和仿真照射条件下找出的有效照射干扰位置，照射中心用交叉叉进行了标定。在这些位置处进行红外照射将使跟踪点发生大于所设定偏移量阈值的大偏移量漂移，产生有效干扰。

3.2 照射干扰结果对比

根据图 9 所示，将仿真照射与真实照射的干扰结果按照照射位置进行对比，见表 1。文中的照射位置根据二维扫描时的照射序号来标定。

表 1 照射干扰结果对比

Tab.1 Contrast of interference results

Irradiation location (drawing number)	Judgment on interference point (offset threshold:10 pixels)		Consistency
	True irradiation	Simulation irradiation	
1-35	-	-	Yes
36-38	+	+	Yes
39-43	-	-	Yes
44-46	+	+	Yes
47	-	+	No
48	-	-	Yes

Remarks: "+" represents the location is the interference point; "-" represents the location is not the interference point

从表 1 中可以看出，仿真照射与真实照射对相关跟踪的干扰结果基本一致，结果一致性达到了 98%，且仿真照射找出了真实照射条件下干扰相关跟踪的全部干扰点，但同时也出现了 1 个误判断点，干扰点搜索正确率为 87.5%。

4 结论

文中基于红外照射条件下不同照射位置对相关跟踪影响不同的研究，采用红外照射仿真的方法模拟真实环境下的红外照射，以二维扫描的方式对某一空间范围内干扰相关跟踪的干扰点进行了快速搜索，并通过仿真实验与真实实验的对比，发现两者的干扰结果基本一致，从而验证了文中所述方法的有效性。文中所述利用红外照射仿真的方式来搜索相关跟踪干扰点的方法，有利于提升红外照射系统的干扰效率，对红外照射干扰相关跟踪具有重要的指导意义。

针对仿真照射条件下出现的误干扰点现象,可以通过照射仿真模型的改善和搜索策略的改进来消除,这为下一步进行红外照射仿真搜索相关跟踪干扰点的研究指明了方向。

参考文献:

- [1] Chen Daqing, Han Jiuqiang, Yu Zhijian. Infrared adaptive correlation tracking of fusion distance information [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1862–1867. (in Chinese)
陈大庆, 韩九强, 于志坚. 融合距离信息的红外自适应相关跟踪[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1862–1867.
- [2] Zhu Yongsong, Guo Chengming. Research of correlation tracking algorithm based on correlation coefficient[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(8): 963–967. (in Chinese)
朱永松, 国澄明. 基于相关系数的相关跟踪算法研究[J]. 中国图像图形学报, 2004, 9(8): 963–967.
- [3] Ji Shupeng, Zhang Guilin, Ding Xiaoqing. Study on image correlation tracking algorithm in the condition of complicated ground background [J]. *Laser & Infrared*, 2002, 32(6): 428–430. (in Chinese)
吉书鹏, 张贵林, 丁晓青. 地面复杂场景图像相关跟踪算法研究[J]. 激光与红外, 2002, 32(6): 428–430.
- [4] Wang Yan, Wang Xiangjun. Fast correlation tracking algorithm in low contrast conditions [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 89–92. (in Chinese)
王研, 王向军. 低对比度条件下的快速相关匹配算法[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 89–92.
- [5] Cui Baosheng, Xie Wei, Ma Yuzhong. Study on dynamic distortion camouflage technology antagonizing imaging infrared guided weapons [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(3): 181–183. (in Chinese)
崔宝生, 谢卫, 马玉中. 动态变形伪装技术对抗红外成像制导武器打击可行性研究 [J]. 红外与激光工程, 2001, 30(3): 181–183.
- [6] Yi Ming, Wang Yongzhong. Simulation of image distortion antagonizing photoelectric imaging-guided weapons [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 32–35. (in Chinese)
易明, 王永仲. 图像变异对抗光电成像制导武器的仿真研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 32–35.
- [7] Zeng Kai, Yang Hua, Cheng Shanqing, et al. Effect of grayscale distortion on correlation tracking algorithm [J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, 18(2): 85–88. (in Chinese)
曾凯, 杨华, 陈善静. 灰度畸变对相关跟踪算法的影响研究[J]. 电光与控制, 2011, 18(2): 85–88.
- [8] Du Shiming, Lv Xiangyin, Yang Hua, et al. Characteristic analysis of ground target based on artificial infrared illuminator [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(9): 110–114. (in Chinese)
杜石明, 吕相银, 杨华, 等. 基于人工红外光照时地面目标红外特性的分析[J]. 光电工程, 2010, 37(9): 110–114.
- [9] Du Shiming, Lv Xiangyin, Zhang Wei, et al. Artificial illuminator effect on gate centroid tracking [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(10): 615–618. (in Chinese)
杜世明, 吕相银, 张伟, 等. 人工光源对波门形心跟踪影响的分析[J]. 红外技术, 2010, 32(10): 615–618.
- [10] Lou Heli, Lv Xiangyin, Zhou Yuanpu, et al. Infrared radiation contrast between ground target and background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2002–2007. (in Chinese)
娄和利, 吕相银, 周园璞, 等. 地面目标与背景的红外辐射对比度特性[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2002–2007.
- [11] Xie Lan, Gao Donghong. The application and comparison of different nonlinear fitmethods [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2009, 39(10): 117–121. (in Chinese)
谢兰, 高东红. 非线性回归方法的应用与比较[J]. 数学的实践与认识, 2009, 39(10): 117–121.