

数字注入式仿真的红外侦察告警系统作用距离等效推算

杨森森^{1,2}, 刘连伟^{1,2}, 许振领^{1,2}, 樊宏杰^{1,2}, 王敏^{1,2}, 刘艳芳^{1,2}

- (1. 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003;
2. 中国人民解放军 63892 部队, 河南 洛阳 471003)

摘要: 作用距离是红外侦察告警系统一项重要的性能指标, 一般采用外场动态飞行试验方法进行考核。飞行试验只能获得特定气象条件下的作用距离, 为评估系统在不同气象条件下的作用距离, 提出基于数字图像注入式仿真实验的红外侦察告警系统作用距离等效推算方法。介绍了“电影回放式”的数字图像注入式仿真实验模式, 以及用于作用距离等效推算的数字图像的生成方法, 给出了仿真实验应用实例, 验证了该方法的有效性和精度。

关键词: 作用距离; 等效推算; 红外侦察告警系统; 注入式仿真实验

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)07-1674-06

Distance equivalent calculation based on injection test for IR warning-reconnaissance system

Yang Miaomiao^{1,2}, Liu Lianwei^{1,2}, Xu Zhenling^{1,2}, Fan Hongjie^{1,2}, Wang Min^{1,2}, Liu Yanfang^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang 471003, China; 2. Unit 63892 of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: As an important performance index of infrared warning-reconnaissance system, operating range was usually assessed by the dynamic flight test in open air range. However, the dynamic flight test merely evaluated operating range under the typical weather conditions. Because of this, an equivalent calculation method based on the digital image injection simulation test was proposed, which could evaluate the operating range of IR warning-reconnaissance system under different weather conditions. Then, the test mode of the digital image injection simulation named as "film-replay" was presented, the generation method of digital image using for the equivalent calculation of operating range was described in detail, and a simulation test instance was realized to prove the validity and precision of the digital image injection simulation method.

Key words: operating distance; equivalent calculation; IR warning-reconnaissance system; injection test

收稿日期: 2012-11-15; 修订日期: 2012-12-17

基金项目: 总装预研基金

作者简介: 杨森森(1981-), 男, 硕士, 主要从事光电对抗及光电对抗仿真技术方面的研究。Email: ymm730@126.com

0 引言

作用距离是红外侦察告警系统的关键战技指标之一,其评估目前主要依赖外场动态飞行试验来完成。飞行试验只能获得特定气象条件下的作用距离,而红外侦察告警系统在实际作战时所面临的战场气象条件是复杂多样的,因此有必要通过等效推算,将特定气象条件下的飞行试验结果外推到各种实战气象条件下,以评估红外侦察告警系统的作战性能。

对红外侦察告警系统作用距离的等效推算方法目前国内研究较少,大部分研究工作集中在对系统作用距离的估计,一般采用基于信噪比(V_s/V_n)判据的红外系统作用距离公式^[1-4]进行理论计算,得到的是理想条件下的作用距离,难以保证系统作用距离评估精度,且以信噪比为判据,无法充分描述复杂背景和几何、运动特性、噪声等信息的影响,也不能考核红外侦察告警系统所采用的各种复杂的图像信息处理算法。文中提出数字图像注入式仿真实验方法来进行红外侦察告警系统作用距离等效推算。所采用的数字图像来源于大量外场动态飞行实测红外图像,经过目标和背景红外特性预处理、等效推算、传感器响应转换后,注入到红外侦察告警系统信息处理机中,评估其在不同气象条件下的作用距离。

1 作用距离等效推算数字图像注入式仿真实验模式

数字图像注入式仿真实验方法因其经济性、灵活性、高效率,被广泛应用于红外成像系统的开发、测试与评估,特别适用于侦察空域范围较大,目标和背景复杂,对图像信号处理能力要求较高的红外侦察告警系统^[5-8]。其一般模式为利用高性能图形工作站实时生成场景红外数字图像,越过红外成像传感器直接把图像注入到系统图像处理机。

采用数字图像注入式仿真实验方法进行红外侦察告警系统作用距离指标考核,要求有逼真的目标特性(几何、运动和辐射特性)、背景辐射特性、大气辐射传输特性和传感器效应模型支持。作用距离等效推算数字图像注入式仿真实验方法则从实测数据出发,不需要建立精确的理论模型,而是将外场动态飞行实测红外图像经过等效推算后,注入到被测红外侦察告警系统图像处理机。相对于纯理论的图像

仿真方法,从实测数据出发的作用距离等效推算数字图像注入式仿真实验方法可行性和可信度更高。

由于作用距离等效推算注入式仿真实验是对已有的外场动态飞行实测红外图像序列进行等效推算后获得新气象条件下的图像序列,即图像可在注入实验前生成。因此,可采用“电影回放式”的注入式仿真实验模式,即将预先推算生成的图像存储于本地硬盘,注入时再从硬盘逐帧读取,按照红外侦察告警系统图像处理机时序要求逐帧注入,如图 1 所示。

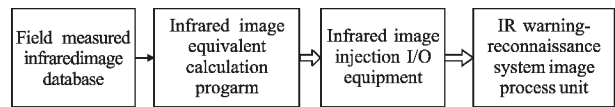


图 1 作用距离等效推算数字图像注入式仿真实验模式

Fig.1 Test mode called film-replay of digital image injection test

2 作用距离等效推算数字图像生成方法

采用数字图像注入式仿真实验方法进行红外侦察告警系统作用距离等效推算,其核心在于注入数字图像序列的推算生成。如何从外场动态飞行实测红外图像序列中处理获得目标、背景辐射特性,如何将目标、背景红外辐射特性从外场动态飞行试验时的气象条件(1)以及等效推算到想定气象条件(2),还有如何反映系统传感器响应变化的影响,是需要逐一研究解决的问题。为此,提出了“预处理-等效推算-传感器响应转换”的数字图像等效推算生成思路,如图 2 所示。

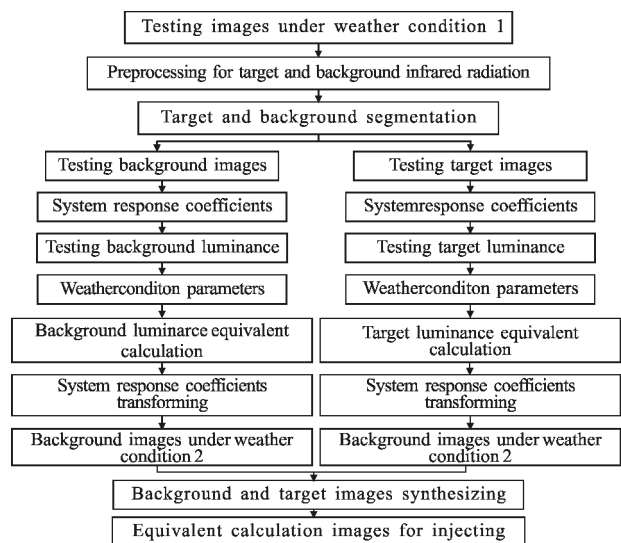


图 2 作用距离等效推算数字图像生成流程

Fig.2 Process of digital image generation for injection

2.1 目标、背景红外辐射特性预处理

首先需要从气象条件 1 下的实测图像中处理获得目标与背景的原始红外特性分布。由于红外侦察告警系统探测器噪声效应以及光学系统效应(衍射、像差、离焦)的影响,实测红外图像为探测器自身非均匀性等噪声和目标及背景弥散辐射的叠加,若不预先抑制或消除这些效应,将影响后期红外辐射特性等效推算精度。

2.1.1 去探测器噪声效应

采用三维噪声模型^[9]的分析方法,通过噪声测量,提取实际红外侦察告警系统噪声数据,用于去除传感器噪声,保证红外辐射特性计算的准确性。图 3(a)-(f)给出了某一帧实测原始红外图像及其灰度分布曲线还有提取得到的空间噪声图像及其灰度分布曲线、和去除空间噪声后的红外图像及其灰度分布曲线。

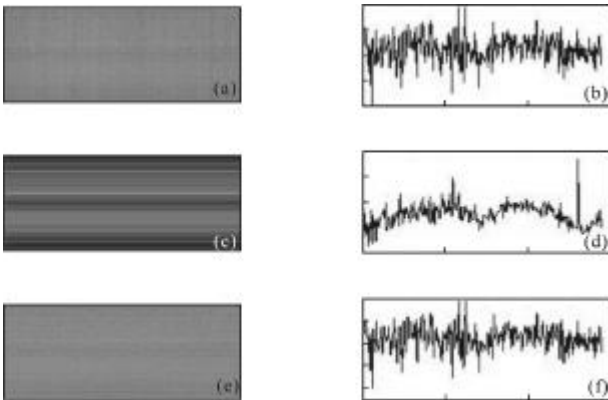


图 3 空间噪声去除前后图像
Fig.3 Images before and after spatial noise filtering

2.1.2 去光学系统效应

采用维纳滤波去卷积算法^[10],并利用光学设计软件计算获取光学系统点扩散函数,通过去卷积操作恢复真实场景的红外和几何特征,保证后续目标提取和红外辐射特性计算的准确性。图 4 给出了利

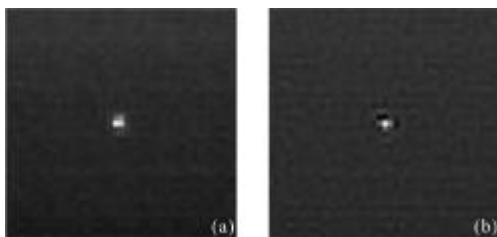


图 4 光学系统效应去除前后图像
Fig.4 Images before and after deconvolution

用维纳滤波去卷积算法,去除实测红外图像数据中光学系统效应的效果示意图,图(a)为去除光学系统效应前图像,图(b)为去除光学系统效应后图像。

2.1.3 目标背景分离提取

经过去除探测器噪声和光学系统效应后的实测红外图像还原了真实场景的红外辐射特性分布,但由于针对目标、背景的红外辐射特性等效推算方法不同,因此还需要将目标从图像中提取出来,同时分离出背景。针对红外侦察告警系统实测图像弱小目标特点,将九模板滤波算法的判别准则加以改进,用于目标背景提取分离,九模板如图 5 所示。

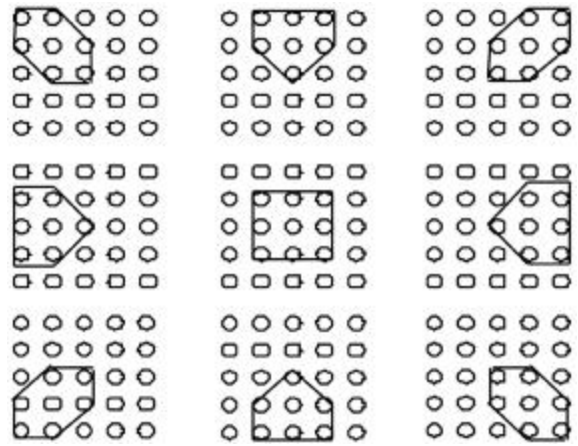


图 5 九模板法示意图
Fig.5 Nine-templates illustration

逐一与目标像素周围九个方向上与模板相同大小邻域像素矩阵点乘,求取点乘矩阵后的非零元素的灰度平均值和方差,取其中灰度平均值的最小值 EMin,方差最大值 SMax。当 EMin 和 SMax 大于设定阈值时,判定该像素为目标像素,阈值可根据目标大小和背景噪声统计特性设定。九模板法目标提取分割结果如图 6 所示。

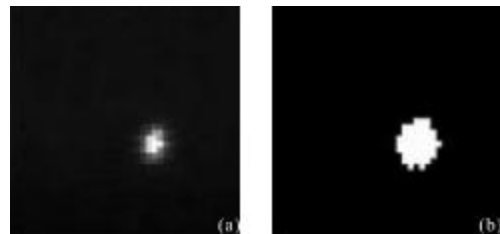


图 6 九模板法目标提取分割
Fig.6 Images before and after target segmentation

2.2 目标、背景红外辐射特性的等效推算

经过实测图像预处理获得了目标和背景的原始

红外辐射特性分布后,还必须根据不同气象条件对其进行等效推算。不同气象条件实际上是对大气环境变化的描述,由于大气层结构、大气组成、气溶胶模式等的复杂性和随机性,决定了大气辐射传输效应及受其影响的目标、背景红外辐射特性变化的复杂性和随机性。文中将推导并给出不同气象条件下目标和背景的红外辐射特性等效推算公式。

2.2.1 目标和背景红外辐射特性计算

红外侦察告警系统将目标和背景的红外辐射能量转化为可以观测、便于处理的电流、电压信号,经放大电路、A/D 转换电路转换为灰度并以红外图像的形式显示出来。对目标和背景红外辐射特性进行计算,即根据红外侦察告警系统对被测目标、背景辐射能量的响应特性,对红外灰度图像进行处理计算获得目标和背景的真实红外辐射特性参量,如辐射亮度、辐射强度等。

红外侦察告警系统响应特性一般可表示为:

$$g(i, j) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [A(i, j, \lambda)L(i, j, \lambda) + B(i, j, \lambda)]d\lambda \quad (1)$$

式中: $g(i, j)$ 为像元 (i, j) 灰度值; $A(i, j, \lambda)$ 和 $B(i, j, \lambda)$ 像元光谱响应系数; $L(i, j, \lambda)$ 为目标或背景像元的表观光谱辐射亮度。在实际应用中,一般可采用波段平均处理方法,即认为光谱响应系数 $A(i, j, \lambda)$ 和 $B(i, j, \lambda)$ 为与波长无关的常数,可简化为:

$$g(i, j) = A(i, j)L(i, j) + B(i, j) \quad (2)$$

可见,已知像元灰度值 $g(i, j)$,再通过定标获得像元波段响应系数 $A(i, j)$ 和 $B(i, j)$,即可计算出目标或背景像元表观波段辐射亮度 $L(i, j)$ 。

2.2.2 目标红外辐射特性的等效推算

通过公式(2)可计算出目标像元表观波段辐射亮度,设为 $L_a(i, j)$,其组成可表示为:

$$L_a = a_t \tau_a L_t + a_l L_{\text{path}} + (1 - a_t) L_b \quad (3)$$

式中: a_t 为像元占空比系数; τ_a 为大气波段透过率; L_t 为目标真实波段辐射亮度; L_{path} 为大气波段路径辐射亮度; L_b 为背景波段辐射亮度。右边第 1 项代表传感器像元内目标真实波段辐射亮度,第 2 项代表像元内大气波段路径辐射亮度,第 3 项代表像元内未被目标遮挡的背景波段辐射亮度。

考虑两种气象条件下相同航线相同目标的像元表观波段辐射亮度推算,即已知气象条件(1)下目标的表观波段辐射亮度,求在气象条件(2)下处于相同

航点处(目标位置、姿态相同)同一目标的表观波段辐射亮度值,则有:

$$\begin{aligned} L_{a1} &= a_t \tau_{a1} L_{t1} + a_l L_{\text{path1}} + (1 - a_t) L_{b1} \\ L_{a2} &= a_t \tau_{a2} L_{t2} + a_l L_{\text{path2}} + (1 - a_t) L_{b2} \end{aligned} \quad (4)$$

推导可得:

$$\begin{aligned} L_{a2} &= [L_{a1} - (1 - a_t) L_{b1} - a_l L_{\text{path1}}] \frac{\tau_{a2}}{\tau_{a1}} + \\ & a_l L_{\text{path2}} + (1 - a_t) L_{b2} + a_t \tau_{a2} \Delta L_t \end{aligned} \quad (5)$$

公式(5)即为目标红外辐射特性(表观波段辐射亮度)的等效推算公式,各物理量含义同公式(3), L_{a1} 、 L_{b1} 通过公式(6)对实测红外图像数据处理获得; τ_{a1} 、 τ_{a2} 、 L_{path1} 、 L_{path2} 以及 L_{b2} 可利用大气辐射传输计算模型软件(如 Lowtran 或 Modtran)计算;对于相同航线下的相同目标,由于目标位置、姿态相同,因而 a_t 不变; ΔL_t 为环境温度变化引起的目标真实波段辐射亮度的变化量,可根据环境温度变化量代入普朗克公式计算获得。图 7 给出了两种气象条件下相同航线相同目标表观波段辐射亮度等效推算实例。两种气象条件见表 1。

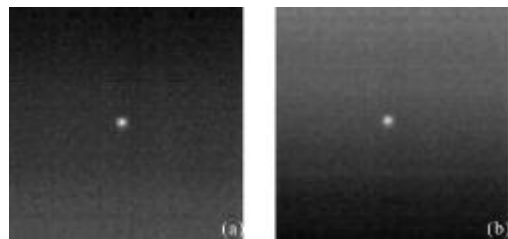


图 7 目标表观波段辐射亮度等效推算实例

Fig.7 Instance of target luminance equivalent calculation

表 1 不同气象条件参数

Tab.1 Parameters of different weather condition

Parameters	Weather condition 1	Weather condition 2
Tem/°C	4.9	14.8
Hum/%	56	28
Vis/km	25	30
Pre/hPa	1 000	1 000

2.2.3 背景红外辐射特性的等效推算

同样,考虑两种气象条件下天空背景像元波段辐射亮度 $L_b(i, j)$ 推算。将两种不同气象条件下的气象参数信息代入大气辐射传输计算模型软件(如 Lowtran 或 Modtran 等),理论计算两种气象条件下的天空背景波段辐射亮度 $L_{b1理}(i, j)$ 、 $L_{b2理}(i, j)$ 。假定两

种气象条件下天空背景理论波段辐射亮度的比值与实际波段辐射亮度的比值相等,即有:

$$\frac{L_{b2\text{实}}(i,j)}{L_{b1\text{实}}(i,j)} = \frac{L_{b2\text{理}}(i,j)}{L_{b1\text{理}}(i,j)} \quad (6)$$

$$L_{b2\text{实}}(i,j) = \frac{L_{b2\text{理}}(i,j)}{L_{b1\text{理}}(i,j)} \times L_{b1\text{实}}(i,j) \quad (7)$$

公式(7)即为不同气象条件下天空背景波段辐射亮度等效推算公式。采用实际测量的方法对该公式进行了验证,令:

$$\frac{L_{b2\text{实}}(i,j)}{L_{b1\text{实}}(i,j)} = K_1, \frac{L_{b2\text{理}}(i,j)}{L_{b1\text{理}}(i,j)} = K_2 \quad (8)$$

实际测量了两种典型气象条件下不同仰角下天空背景波段辐射亮度,计算 K_1 与 K_2 之间的误差,见表 2。

表 2 不同俯仰角下实际辐射亮度比值和理论辐射亮度比值误差

Tab.2 Errors between theoretical and practical K in different elevation

E	10°	20°	30°	40°	50°	60°
$\Delta K/K$	2.59%	3.37%	1.07%	3.70%	4.86%	4.29%

实际测量证明,在典型气象条件下(天气条件较好的晴朗天空背景),天空背景波段辐射亮度等效推算的误差小于 5%。图 8 给出了两种气象条件下天空背景波段辐射亮度等效推算实例。

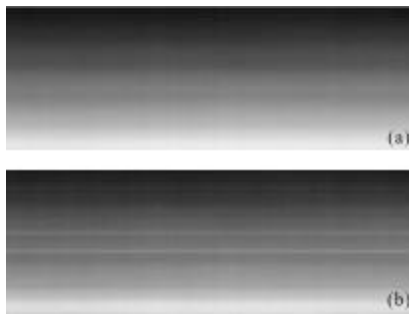


图 8 天空背景波段辐射亮度等效推算实例

Fig.8 Instance of sky background luminance equivalent calculation

2.3 传感器响应转换

采用公式(5)和(7)将气象条件(1)下的目标、背景观测波段辐射亮度值等效推算到气象条件(2)下之后,由于注入到红外侦察告警系统的是灰度图像,需要将波段辐射亮度值转换为图像灰度值,转换公式见公式(2)。

公式(2)需要通过定标获得像元波段响应系数 $A(i,j)$ 和 $B(i,j)$,由于响应系数同样会随着不同气象条件(如不同时间、不同地理环境、不同环境温度等)的改变发生漂移,因此在应用公式(2)前,必须对响应系数进行转换修正。

理论分析和实验发现^[9],当红外侦察告警系统传感器积分时间、偏置电压、焦距、增益等工作参数不变时,响应系数 $A(i,j)$ 恒定,不同气象条件将只影响 $B(i,j)$,主要是由于工作环境变化引起的光学系统辐射的变化,导致 $B(i,j)$ 发生缓慢且随机的漂移。因此,可以根据环境温度计算光学系统辐射并对 $B(i,j)$ 值进行修正。但这种修正往往会带来不定量误差,所以一种较为可行的办法是在气象条件(2)下对红外侦察告警系统传感器进行定标,以获得该条件下的响应系数,代入公式(6)中将目标、背景波段辐射亮度值转换为图像灰度值。

3 应用实例

采用“电影回放式”的数字图像注入式仿真实验方法进行红外侦察告警系统作用距离指标考核,分别将同一天不同时间段的测试数据:气象条件 1-1、气象条件 1-2、气象条件 1-3 下的实测图像序列等效推算到气象条件(2)下,再分别注入到红外侦察告警系统,对实验数据进行处理,给出了推算作用距离,并与气象条件(2)下的实测作用距离比对,给出了作用距离等效推算误差,如表 3 所示。

表 3 作用距离等效推算数字图像注入式仿真实验结果
Tab.3 Results of digital image injection test

Weather condition num	Time	Tem /°C	Hum /%	Vis /km	Absolute error/m	Relative error/%
(1-1)	17:34	10.6	28.5	25	578	2.36
(1-2)	15:40	12.8	18.7	30	942	3.85
(1-3)	19:29	4.9	56	25	361	1.48
(2)	21:02	4.6	57	20	-	-

从表中可以看出,等效推算误差稍偏大。分析误差产生的原因可能为:(一)气象条件(2)下的目标与气象条件(1)下的目标在飞行航线等方面存在差别;(二)红外侦察告警系统改变了工作参数如积分时间、目标提取阈值等。布型与 Tracepro 仿真结果一致。

4 结 论

作用距离是红外侦察告警系统的重要战技指标,其表现与气象条件密切相关,对红外侦察告警系统在不同气象条件下的作用距离进行评估有非常迫切的应用需求。红外侦察告警系统作用距离评估方法包括飞行试验和数学公式理论计算两种方法。飞行试验只能获得在特定气象条件下的作用距离,数学公式理论计算方法难以考核红外侦察告警系统所采用的复杂图像处理算法。采用数字图像注入式仿真实验方法,直接对实测的图像进行推算处理后,注入到系统进行作用距离的考核评估,可以解决以上问题。

文中所提出的作用距离等效推算数字图像注入式仿真实验方法以及数字图像等效推算生成方法,对红外侦察告警系统试验评估具有参考价值,对红外成像制导武器、红外捕获跟踪设备等其他红外设备试验评估同样具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] Hudson R D. Infrared System Engineering [M]. Beijing: National Defence Industry Press,1975:244-250. (in Chinese)
R D 小哈德森. 红外系统原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1975:244-250.
- [2] Ekstrand B. Approach to estimation of infrared point target range[J]. Appl Opt, 2000, 39: 3495-3503.
- [3] Li Runshun, Yuan Xiangyan, Fan Zhigang, et al. Operating range prediction of infrared imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30(1): 1-4. (in Chinese)
李润顺, 袁祥岩, 范志刚, 等. 红外成像系统作用距离的估算[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(1): 1-4.
- [4] Xing Qianglin, Huang Huiming, Xiong Rensheng, et al. Detect-ability analyzing of IRFPA tracking system [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(7): 893-896. (in Chinese)
邢强林, 黄惠明, 熊仁生, 等. 红外成像探测系统作用距离分析方法研究[J]. 光子学报, 2004, 33(7): 893-896.
- [5] Wu Junhui, Zhu Zhen, Xue Fangxia, et al. Study on loop-locked IR capturing and tracking simulation based on digital image injection [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(9): 2067-2070. (in Chinese)
吴军辉, 朱震, 薛芳侠, 等. 数字图像注入式红外捕获跟踪闭环仿真试验探讨[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 2067-2070.
- [6] Wang Xuewei, Shen Tongjian, Zhou Xiaodong. Infrared image generation system based on signal injection [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(6): 568-571. (in Chinese)
王学伟, 沈同坚, 周晓东. 基于信号注入的红外热像生成系统[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(6): 568-571.
- [7] Curry David M, Combs Graig A. Low cost target scene generation system for a hardware-in-the-loop simulation of a passive infrared guided missile [C]//HLS2001 Simultalting With Vision, 2002.
- [8] Tu Suping, Cui Jun, Huang Ling, et al. Design and application of a injection simaltion system for infrared image guided weapon [C]//Simultation Testing and Evaluating for Infrared System, 2011: 183-185.
- [9] Holst G C. Testing and Evaluating for Infrared System [M]. Tianjin: Infrared and Laser Engineering, 2006:128-136. (in Chinese)
G C Holst. 红外成像系统测试与评价 [M]. 天津: 《红外与激光工程》, 2006:128-136.
- [10] Zhu Zimin. Electro-Optical Image Processing [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2000: 80-82. (in Chinese)
竺子民. 光电图像处理 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000: 80-82.