

## 基于非线性映射模型的红外弱小目标图像仿真

高陈强, 阎兵早, 李 强

(重庆邮电大学 信号与信息处理重庆市重点实验室, 重庆 400065)

**摘 要:** 针对远距离红外弱小目标检测算法的研究和性能评估需要大量测试图像的现状, 提出了一种基于非线性映射模型的红外弱小目标图像仿真方法。首先, 通过理论计算和实际拍摄得到实验目标的辐照度与成像灰度值映射数据, 并利用该数据对多种备选映射模型进行评估, 得到最佳的基于拟合的非线性映射模型; 然后, 将该映射模型应用到实际目标图像的仿真过程中, 得到能反映实际亮度变化的目标仿真图像; 最后, 考虑大气传输效应等因素的影响, 将目标仿真图像与真实背景图像进行合成, 得到最终的红外弱小目标仿真图像。通过与传统仿真方法对比, 该仿真方法产生的仿真图像具有较强的真实感。

**关键词:** 红外图像仿真; 非线性映射模型; 目标几何模型

**中图分类号:** TP391.9    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)11-2919-06

## Infrared dim-small target image simulation based on nonlinear mapping model

Gao Chenqiang, Yan Bingzao, Li Qiang

(Chongqing Key Laboratory of Signal and Information Processing,  
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** As the study and evaluation of the long distance infrared dim-small target detection algorithm requires a large amount of test images, a method of the IR dim-small target image simulation was proposed based on nonlinear mapping model. First, the irradiance and imaging gray value were got by theoretical calculation and actual shooting. By taking advantages of the data the various alternative mapping models so as to get the best mapping model were evaluated. Then, the mapping model was applied to the simulation process of actual target image and the target simulation image was got which reflected the real brightness variations. Finally, considering the effect of atmospheric transmission and so on, the target simulation image was combined with real background image to get final infrared dim-small simulation image. By comparison with the traditional simulation method, this proposed simulation method has more sense of reality.

**Key words:** infrared image simulation; nonlinear mapping model; target geometry modeling

收稿日期: 2013-03-10; 修订日期: 2013-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(61102131); 重庆市科委自然科学基金计划资助项目(2010BB2411); 重庆市高等学校青年骨干教师资助计划(渝教人[2011]65号)

作者简介: 高陈强(1981-), 男, 副教授, 博士, 主要从事图像处理、红外图像仿真、红外弱小目标检测等方面的研究。

Email: gaocq@cqupt.edu.cn

### 0 引言

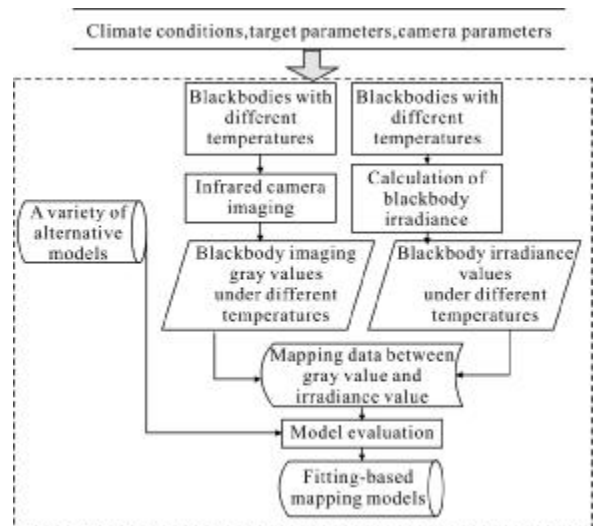
近些年来，各种红外系统更新换代的速度不断加快，系统升级需要大量红外图像进行测试。现场拍摄红外图像的成本昂贵、拍摄周期长、某些情况的红外图像难以获取，这使得红外图像资源变得异常紧张。为解决这一问题，红外图像仿真技术提供了一个有效的途径，它可以短时间内以较低的成本提供大量所需的红外图像，以满足各种实际需求。传统的红外图像仿真方法是在考虑背景辐射、大气传输效应、太阳辐射等因素的基础上，计算出目标的辐照度，然后通过简单量化得到目标的红外图像<sup>[1]</sup>。这种方法采用较简单的模型，得到的红外图像真实感不强，比如成像距离相差较大的目标可能得到相同的灰度值。此外，法国的 Balfour 等人提出一种基于实物的仿真方法<sup>[2]</sup>。该方法将实物图像作为输入，再把图像中物体进行分类，综合考虑目标背景的材质、太阳辐射强度、大气衰减效应、气候和风速等因素，利用已建立的红外基元系数数据库来确定图像中物体的温度，从而输出红外图像。这种方法产生的红外仿真图像真实感较强，但是国内尚无完整的不同材质的红外基元数据库。笮邦友等利用 Vega 仿真软件对目标进行红外仿真的方法<sup>[3]</sup>。该方法通过 Vega 仿真软件得到目标辐亮度和仿真结果，再利用线性映射关系得到仿真图。这种方法所用的数据都是基于 Vega 仿真软件库，对于数据库中没有的材质，则该方法无效。

针对远距离红外弱小目标检测算法的研究<sup>[4-5]</sup>和算法的性能评估<sup>[6]</sup>需要大量测试图像的现状，文中提出了一种简单有效的基于非线性映射模型的红外弱小目标图像仿真方法。该方法通过真实红外相机采集的数据，建立红外辐照度与红外图像灰度值的映射关系模型，然后把该模型应用到红外图像仿真算法中，从而尽量保证仿真图像的目标亮度较大程度上逼近真实亮度变化。仿真实验表明：该方法具有较好的合理性和有效性。

### 1 红外仿真方案

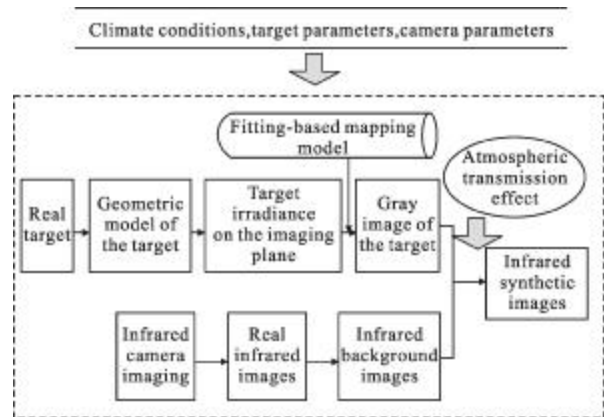
通过现场拍摄方式拍摄背景相对比较容易，但要拍摄不同情况下的目标往往比较困难，例如拍摄

迎头飞行的飞机等目标图像往往非常艰难。为此，文中采用真实背景图像与仿真目标图像合成的仿真方式。真实的红外仿真方案如图 1 所示，该方案分成两大部分，即映射模型的建立(见图 1(a))和基于映射模型的红外仿真流程(见图 1(b))。在映射模型的建立部分，首先，通过红外相机采集不同温度下实验黑体的成像灰度值，并且根据实验黑体提供的参数及当时的气候条件等因素，计算出该黑体对应不同温度下的辐照度，得到黑体辐照度与成像灰度值的映射数据；然后，经过模型评估对多种备选非线性映射模型进行评估，选取最佳映射模型；最后，将最佳映射模型应用到映射数据上，产生基于非线性拟合的映射关系模型。



(a) 映射模型的建立

(a) Establishment of mapping model



(b) 基于映射模型的红外仿真流程图

(b) Infrared simulation flow chart based on mapping model

图 1 红外仿真方案

Fig.1 Infrared simulation scheme

在基于映射模型的红外图像仿真流程部分,首先,分析实物目标的尺寸,建立目标几何模型,根据目标表面温度并综合各种气候因素,计算出目标表面的辐照度,利用基于映射模型的量化方法对辐照度进行量化,产生目标仿真灰度图像,同时,用同一台红外相机拍摄所需要的背景红外图像,并与目标仿真图像进行合成,再考虑大气传输效应等因素,最终产生红外仿真图像。

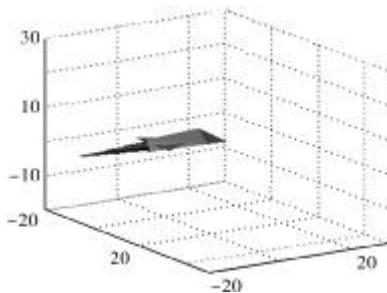
## 2 目标几何模型

文中主要对天空飞机目标进行仿真研究,研究目的是为远距离红外弱小目标检测算法的研究和性能评估提供丰富的测试图像。由于目标成像距离较远,成像目标所占像素较少,所以文中在建模时用三角形、四边形及圆锥体来近似替代飞机的机头、机身、侧翼、尾翼及尾焰等部分。图 2 为战机真实图及其目标几何模型。



(a) 苏 27 战机真实图

(a) Real image of S-27 fighter



(b) 对应的几何模型

(b) Geometric model

图 2 目标几何模型

Fig.2 Target geometric model

## 3 目标辐照度的计算

在红外成像仿真中,需要根据红外相机的视场角、分辨率、距离等成像参数,计算成像面元的辐照

度。其计算过程从以下几方面考虑<sup>[7-8]</sup>。2937

### (1) 目标自身的热辐射

设  $L(\lambda)$  为物体表面某个面元等效的黑体辐射量,  $\rho_\lambda$  表示物体的漫反射系数,  $\tau_r(\lambda)$  表示物体表面到传感器之间的大气传输系数,该目标面元的热辐射为:

$$L_1(\lambda) = L(\lambda)(1 - \rho_\lambda)\tau_r(\lambda) \quad (1)$$

### (2) 目标对太阳或月亮辐射的镜面反射和漫反射

设  $L_d(\lambda)$  为太阳或月亮入射到物体表面的辐射量,  $\theta_i$  表示入射到物体表面的辐射角,  $f_s$  表示物体的镜面反射系数,  $f_{s1}$  表示目标表面镜面反射的角度依赖关系,  $(\theta_r, \phi_r)$  表示物体对辐射的反射角,  $N_s$  表示镜面反射的归一化系数,则镜面反射和漫反射反射的能量和可表示为:

$$L_2(\lambda) = L_d(\lambda)\cos\theta_i\rho_\lambda(1 - f_s)\tau_r + L_d(\lambda)f_{s1}(\theta_r, \phi_r)\rho_\lambda f_s N_s \tau_r(\lambda) \quad (2)$$

### (3) 目标对天空辐射的反射

设  $L_a(\lambda)$  表示天空背景入射到物体表面的辐射量,物体对这部分辐射的反射可表示为:

$$L_3(\lambda) = L_a(\lambda)\rho \tau_r(\lambda) \quad (3)$$

### (4) 目标与传感器之间的路径辐射和大气对物体辐射的散射

在辐射达到传感器之前,大气环境会直接对传感器进行辐射,此外,它还对物体的辐射进行散射,从而对其有一定的衰减作用。这部分的辐射量用  $L_4(\lambda)$  表示。

物体表面每个面元的辐射值都是上述所有辐射的总和,即感知的辐照度为:

$$L(\lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda)L_1(\lambda) + L_2(\lambda) + L_3(\lambda) + L_4(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

式中:  $R(\lambda)$  为探测器的光谱响应,  $(\lambda_1, \lambda_2)$  为成像波段。

## 4 映射模型的选取

在红外图像的计算机仿真中,计算出目标辐照度并不是最终结果,最终需要得到的是红外灰度图像。因此,量化模型的选取至关重要。传统的量化方法得到的目标仿真图像真实感不强,不能反映出真实目标成像的亮度变化,比如成像距离相差较大的目标可能得到相同的灰度值。文中采用基于非线性拟合的映射模型在很大程度上可以避免这一缺点。

### 4.1 传统量化模型

传统的量化模型是采用线性均匀量化方法将目

标辐照度转换成灰度等级,在成像平面上呈现出目标的灰度图像,具体步骤如下<sup>[9]</sup>。

(1) 确定上下限。对于具有 256 个灰度等级的成像面而言,  $G_{\min}=0, G_{\max}=0$ 。

(2) 找出一帧图像中的最大、最小辐射照度值,分别用  $R_{\min}$  和  $R_{\max}$  表示。

(3) 计算每级灰度对应的辐射间隔  $r$ :

$$r = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{G_{\text{range}}} \quad (5)$$

(4) 计算各辐射值对应的量化灰度值:

$$G = \frac{R - R_{\min}}{r} + G_{\min} \quad (6)$$

### 4.2 非线性映射模型

非线性映射模型的建立主要分三个部分进行:辐照度与成像灰度数据准备、模型评估、映射模型表达式的确定。

#### 4.2.1 辐照度与成像灰度数据准备

在本地气候数据已知的情况下,采用成像波段为 8~12  $\mu\text{m}$  的红外相机对发射率为 94% 的实验黑体每隔 5 K 的温度取一个成像灰度值,由于每次取值都是在黑体受热稳定后,所以每次取的成像灰度值可视在该温度下的平均灰度,并采用参考文献[7]的理论方法计算该温度下目标辐照度值,其结果如表 1 所示。对实验黑体在不同温度下的辐照度与成像灰度值的数据采集越充分,那么得到的映射关系模型就越准确。由于篇幅限制,文中只列出了不同温度下辐照度及成像灰度的 14 组映射数据。

表 1 不同温度下辐照度及对应成像灰度

Tab.1 Irradiance and corresponding imaging gray

under different temperatures					
T/K	Irradiance/ $\mu\text{m} \cdot \text{cm}^{-2}$	Gray	T/K	Irradiance/ $\mu\text{m} \cdot \text{cm}^{-2}$	Gray
303	2.596 2e-04	46	338	4.150 6 e-04	71
308	2.792 4e-04	50	343	4.407 6 e-04	75
313	2.997 5 e-04	55	348	4.672 4 e-04	80
318	3.210 9 e-04	58	353	4.945 9 e-04	86
323	3.432 9 e-04	61	358	5.227 4 e-04	89
328	3.663 6 e-04	63	363	5.517 8 e-04	93
333	3.902 8 e-04	69	368	5.816 7 e-04	98

#### 4.2.2 模型评估

模型评估在曲线拟合中具有不可取代的地位。评估的可信度在很大程度上依赖于采取的评估手段。在文中中,采用文献[7]中的评估手段来对映射模型进行评估,它们分别是误差平方和 (SSE)、R-square、均方根误差(RMSE)。

文中采用多种备选非线性映射模型,包括 S 型曲线模型、指数函数模型、对数函数模型等,来对采集的映射数据进行拟合,然后对其映射模型进行评估。对于模型中包含多种拟合曲线的映射模型,需要确定该映射模型下的最优拟合曲线来代表该映射模型,由于篇幅有限,这里仅给出多项式映射模型下拟合曲线的比较,如表 2 所示。从表 2 中可以得出:随着多项式次数的增加,SSE 参数逐渐减少;R-square 参数缓慢增加,最后趋于稳定;RMSE 参数先变小,然后又变大。通过对表 2 中数据的综合分析,最终确定五次多项式作为多项式映射模型的表达式,对于其他非线性映射模型亦是如此处理。

表 2 多项式模型的评估

Model	SSE	R-square	RMSE
Quadratic polynomial	11.45	0.996 7	1.020 0
Cubic polynomial	11.10	0.996	1.054 0
Four times polynomial	7.671	0.997 8	0.923 2
Five times polynomial	6.494	0.998 2	0.901 0
Six times polynomial	5.729	0.998 4	0.904 7
Seven times polynomial	5.602	0.998 4	0.966 3

在表 3 中,对不同类型的非线性映射模型进行了评估,多项式模型在 SSE 评估参数上是所有模型

表 3 不同类型的映射模型评估

Tab.3 Evaluation of different types of mapping model

Quantitative model	SSE	R-square	RMSE
polynomial model	6.494	0.998 2	0.901 0
S type curve model	141.1	0.959 9	3.582
Exponential function model	49.38	0.986	2.028
Gaussian function model	12.92	0.996 3	1.084
Power function model	11.39	0.996 8	1.017
Sine function model	11.49	0.996 7	1.022

中最小的,这表明多项式模型有较强的预测能力;在 R-square 参数上多项式模型数据最大,这说明该模型对数据的解释能力最强;在 RMSE 参数上多项式量化模型是所有模型中最小的,说明多项式模型对测量中的特大或特小误差反映非常敏感,能够很好地反映出测量的精密度。综合几种评估参数来看,多项式的非线性拟合模型总体评价是所有模型中最理想的,因此,最终选择多项式非线性拟合映射模型。

#### 4.2.3 映射模型表达式的确定

通过模型的评估,确定了多项式非线性拟合模型作为图像仿真的映射模型,下面将给出映射模型的表达式。将试验中得到的辐照度与成像灰度值的映射数据输入 Matlab,并运行 Matlab 中的曲线拟合工具箱 cftool 对五次多项式进行拟合,得到基于非线性拟合的映射模型表达式为:

$$y = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + f \quad (7)$$

式中:  $a = 5.629e + 19$ ,  $b = -1.26e + 17$ ,  $c = 1.107e + 14$ ,  $d = -4.772e + 10$ ,  $e = 1.022e + 07$ ,  $f = -824.1$ 。

这种基于非线性拟合的映射模型应用到红外目标图像仿真中,大大简化了实验步骤,节约了实验时间,同时,由于采用较准确的映射数据,能够确保仿真图像有较强的真实感。

### 5 仿真结果及其分析

为了在仿真图像效果上进行对比,分别给出了文中提出的基于映射模型的图像仿真结果和传统量化的图像仿真结果。

#### 5.1 目标图像对比

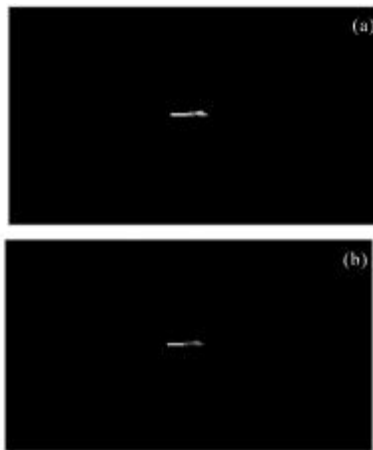


图 3 传统方法的目标仿真图  
Fig.3 Target simulation diagram with traditional method

图 3 为传统量化生成的目标仿真图,图 4 为采用文中方法生成的目标仿真图。图 3 (a)和图 4(a)为同一低温下的目标仿真图,图 3 (b)和图 4(b)为同一高温下的目标仿真图。在图 3 中,传统量化方法产生的目标仿真图虽然目标温度变化,但是最高目标辐照度总是被量化成最大亮度,即不同温度下成像的目标最大亮度相同。通过图 3(a)、(b)对比,发现图 3(a)低温下机身亮度反而比图 3(b)亮一些,这是因为传统方法将最大辐照度值量化成成像平面的最高亮度值,当最大辐照度值减小,其低温部分量化成的亮度反而变的比高温时亮些。图 4(a)、(b)所示目标的图像亮度变化范围大,在成像平面上呈现的目标亮度较真实。通过图 3 和图 4 两组图像的对比,发现文中方法产生的目标仿真图像仿真效果比传统量化方法要好。

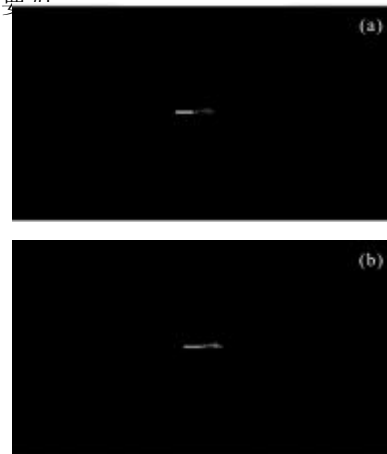


图 4 文中方法的目标仿真图  
Fig.4 Target simulation diagram with proposed method

#### 5.2 合成图像对比

对于远距离成像来说,大气传输效应产生的影响不可忽略,它造成目标在成像平面上的形状和成像亮暗度的改变。通过 LOWTRAN 7 软件计算在 1976 年美国标准大气条件下的目标成像的大气透过率,并将大气传输效应考虑到图像仿真中,能够使仿真图像更具有真实感。最终要得到的是融合真实复杂背景的红外合成图像。图 5(a)、(b)分别为传统量化方法生成的红外仿真图,图 6(a)、(b)分别为文中方法生成的红外仿真图。从图 5 和图 6 合成图像的对比发现,随着距离的加大,传统量化产生的目标只在成像目标大小上有所变化而在成像亮度上变化不明显,这不符合远距离目标

成像的规律;文中方法产生的目标图像中目标随距离增大,不仅在成像大小变化明显,而且目标亮度变化也明显;由于图 5 和图 6 这两组图像均考虑大气传输效应,所以传统方法产生的目标图像在 13km 距离的亮度要比 8km 距离要暗有些,但文中方法产生的目标在仿真图像中成像效果更清晰。

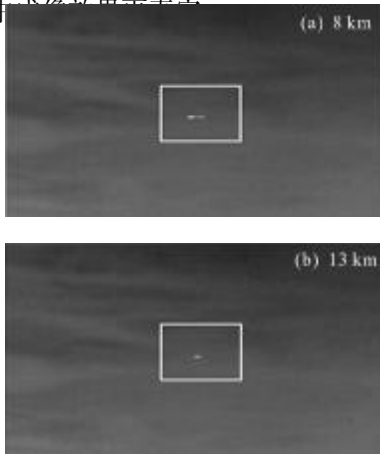


图 5 传统方法的红外合成图

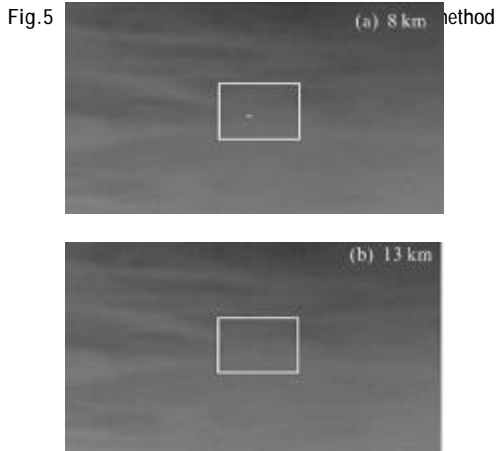


图 6 文中方法的红外合成图

Fig.6 Infrared synthesis figure with proposed method

## 6 结 论

文中提出了一种基于非线性映射模型的红外图像仿真方法,该方法由非线性映射模型的建立和基于映射模型的红外仿真流程两部分构成。非线性映射模型保证了目标仿真图的有效性,使得仿真目标很大程度接近真实的亮度水平。在红外图像仿真中,采用红外相机拍摄真实天空红外图像作为背景图像,保证了红外背景的真实性,同时,针对红外弱小目标成像的特性,

采用简单近似的方式简化几何模型,大大简化了建模步骤。仿真结果表明这种基于非线性映射模型的红外弱小目标仿真方法是一种有效的红外图像仿真手段。

## 参 考 文 献:

- [1] Zhou Xiaodong, Guo Ming. Generation of space target's dynamic IR images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 5-9. (in Chinese)  
周晓东, 郭明. 空间目标动态红外图像的计算机生成[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 5-9.
- [2] Balfour L S, Bushlin Y. Semi-empirical model-based approach for IR scene simulation [C]//SPIE, 1997, 3061: 616-623.
- [3] Da Bangyou, Sang Nong, Zhang Tianxu. LWIR image simulation method using Vega software [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 333-337. (in Chinese)  
笄邦友, 桑农, 张天序. 一种利用 Vega 软件的长波红外图像仿真方法[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(3): 333-337.
- [4] Gao Chenqiang, Zhang Tianqi, Li Qiang. Small infrared target detection using sparse ring representation[J]. *IEEE Aerospace & Electronics Systems Magazine*, 2012, 27(3): 21-30.
- [5] Kim S. Min-local-LoG filter for detecting small targets in cluttered background[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(2): 105-106.
- [6] Gao Chenqiang, Zhang Tianqi, Li Qiang, et al. Performance evaluation of several typical infrared weak and small target detection algorithms [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2009, 22(3): 386-391. (in Chinese)  
高陈强, 张天骐, 李强, 等. 几种典型红外弱小目标检测算法的性能评估 [J]. *重庆邮电大学学报: 自然科学版*, 2009, 22(3): 386-391.
- [7] Chen Qinghua, Xie Xiaofang, Li Zongsheng, et al. Research on infrared scene simulation of ship targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(9): 413-416.  
陈青华, 谢晓方, 李宗升, 等. 舰船目标红外视景仿真研究 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(9): 413-416. (in Chinese)
- [8] Wu Yaping, Zhang Tianxu. Simulation of infrared image and the simulation software [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, 29(4): 1-3. (in Chinese)  
吴亚平, 张天序. 红外图像的计算机仿真及仿真软件[J]. *红外与激光工程*, 2000, 29(4): 1-3.
- [9] Shen Tongsheng, Yan Heping, Zhou Xiaodong. The simulation of dynamic IR imagery in the sea fighting environment[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1998, 27(4): 9-3. (in Chinese)  
沈同圣, 严和平, 周晓东. 海洋作战环境动态红外图像的计