

## 地物环境对红外诱饵弹散射特性建模及仿真

郭冰涛, 王晓蕊, 黄 曦, 刘德连, 柴国贝

(西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

**摘 要:** 针对红外诱饵弹的工作特点, 依据其空时域分布特性, 建立了诱饵弹的红外辐射模型; 根据红外诱饵弹辐射与环境目标的作用机理, 利用双向反射率函数(BRDF)建立目标表面面元的散射特性模型, 实现了目标表面面元接收诱饵弹的辐射在观测方向产生的辐射亮度计算; 并基于 OGRE 的红外场景仿真平台, 对诱饵弹发射前后地物环境的变化进行实时仿真。仿真结果显示了发射诱饵弹后不同时刻诱饵弹辐射对地物环境的影响效果, 这对红外诱饵弹研发具有极为重要的意义。

**关键词:** 红外诱饵弹; BRDF; 地物环境; 实时仿真; OGRE

**中图分类号:** TN972 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)02-0300-05

## Modeling and simulation of the scattering of targets surface by infrared decoys radiation

Guo Bingtao, Wang Xiaorui, Huang Xi, Liu Delian, Chai Guobei

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** An infrared radiation model of decoys was built to indicate the characteristics of infrared decoys based on its spatial and temporal distribution characteristics. Then the interaction between infrared decoys and environmental targets was analyzed, and the mathematical model on the reflection characteristics of environmental objectives was established based on bidirectional reflectance distribution function (BRDF), which was used to calculate the radiance reflected by the surface of environmental targets from the infrared decoys irradiance in the observe direction. Finally, a 3D real-time simulation of the ground environment was performed before and after decoys launch. The simulation result showed the effect of decoys radiation on ground environment at different time after decoys launch, which was of great significance for infrared decoys research.

**Key words:** infrared decoy; BRDF; ground environment; real-time simulation; OGRE

---

收稿日期: 2012-06-02; 修订日期: 2012-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(61007014)

作者简介: 郭冰涛(1988-), 男, 博士生, 主要从事光电成像建模与仿真方面的研究。Email: gbtedu@sina.com

导师简介: 王晓蕊(1976-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事军用光电成像系统建模与仿真、新型光电成像与探测技术等方面的研究。Email: xrwang@mail.xidian.edu.cn

## 0 引言

随着现代军事技术的发展,红外诱饵弹已成为对抗红外成像制导最常用的干扰方式,各国对新型红外诱饵弹的研发越来越重视<sup>[1]</sup>。目前对诱饵弹的研究主要有两种途径:外场实验和计算机仿真。利用外场实验研究红外诱饵弹,不仅受到气象因素的制约,而且实验周期长,重复次数多,人力物力资源浪费严重。因此,如何利用计算仿真红外诱饵弹成为了越来越受关注的研究课题。

从国内外公开的文献来看,目前对红外诱饵弹的仿真,主要是基于诱饵弹自身的特性,如运动轨迹、辐射强度、辐射面积、燃烧速度等,研究诱饵弹爆炸燃烧后的辐射特性<sup>[2-4]</sup>,忽略了地物环境对诱饵弹辐射的反射。而在实际地物环境中,诱饵弹作为红外辐射源必然会影响到地物环境的红外辐射特征,因此要实现红外诱饵弹的精确仿真,必须考虑地物环境对诱饵弹辐射的反射。

针对上述问题,文中主要分析了地物环境对诱饵弹辐射的反射。首先,针对红外诱饵弹的工作特点,依据其空时域分布特性,建立了诱饵弹的红外辐射模型;然后,根据红外诱饵弹辐射与环境目标的作用机理,利用双向反射率函数(BRDF)建立目标表面面元的散射特性模型,实现目标表面面元接收诱饵弹的辐射在观测方向产生的辐射亮度计算;最后,在基于 OGRE 的红外场景仿真平台上,对诱饵弹发射前后地物环境的变化进行实时仿真,并对不同时刻仿真结果进行了对比分析。

## 1 红外诱饵弹与地物环境的作用分析

### 1.1 红外诱饵弹的辐射特性

要实现地物环境对诱饵弹辐射反射的仿真,首先需要分析诱饵弹自身的辐射。红外诱饵弹燃烧时的红外辐射可近似为灰体辐射<sup>[5-6]</sup>,则在一定范围内诱饵弹的红外辐射强度可以表示为:

$$I_{\lambda_1-\lambda_2} = \frac{\varepsilon_{\lambda_1-\lambda_2} \sigma T^4}{\pi} A F_{\lambda_1-\lambda_2} \quad (1)$$

式中: $I_{\lambda_1-\lambda_2}$ 为火焰在 $\lambda_1-\lambda_2$ 波段内的辐射强度; $\varepsilon_{\lambda_1-\lambda_2}$ 为火焰在 $\lambda_1-\lambda_2$ 波段范围内的发射率; $\sigma$ 表示史蒂

芬-波尔兹曼常数; $F_{\lambda_1-\lambda_2}$ 表示辐射效率,即火焰在 $\lambda_1-\lambda_2$ 波段范围内辐射能占总辐射能的百分比; $A$ 表示火焰的辐射面积; $T$ 表示火焰的平均温度。

其次,实现地物环境对诱饵弹辐射反射的仿真,还需要计算诱饵弹辐射在地物表面面元处产生的辐射照度。此时分为两种情况:

(1) 当诱饵弹火焰与目标表面面元之间距离超过诱饵弹火焰最大尺寸(约为0.073~0.1m)的10倍时,诱饵弹火焰可看作小面源<sup>[7]</sup>。由立体角投影定理可计算出诱饵弹火焰在地物表面面元 $\Delta A$ 上产生的辐射照度为:

$$E = L \Delta \Omega_s \cos \theta \quad (2)$$

式中: $L$ 为诱饵弹火焰辐射亮度,可以根据实验室测量的诱饵弹辐射数据(见图1)进行计算,过程如公式(3)~(5)所示。 $\Delta \Omega_s$ 为诱饵弹火焰对目标表面面元的张角; $\theta$ 为目标表面面元法线方向与诱饵弹辐射亮度之间的夹角。其中, $\Delta \Omega_s = \frac{\Delta A_s}{l^2}$ , $l$ 为诱饵弹火焰与目标表面面元之间的距离, $\Delta A_s$ 表示诱饵弹火焰在目标表面面元入射光方向投影面积。

根据实验室实测的诱饵弹辐射强度(见图1),可以计算出诱饵弹火焰的平均温度为:

$$T = \sqrt[4]{\frac{\pi I_{\lambda_1-\lambda_2}}{\varepsilon_{\lambda_1-\lambda_2} \sigma A F_{\lambda_1-\lambda_2}}} \quad (3)$$

根据普朗克公式,可以计算出 $\lambda_1-\lambda_2$ 波段范围内,诱饵弹火焰的辐射出射度为:

$$M = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda} \frac{\varepsilon_{\lambda_1-\lambda_2}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda \quad (4)$$

式中: $c_1$ 为第一辐射常数; $c_2$ 为第二辐射常数; $T$ 为诱饵弹火焰平均温度。

为了简化计算,假设诱饵弹火焰为朗伯体,则诱饵弹在任意方向辐射亮度为:

$$L = \frac{M}{\pi} = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda} \frac{\varepsilon_{\lambda_1-\lambda_2}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda \quad (5)$$

由公式(2)和(5)可计算出诱饵弹火焰在目标表面面元处产生的辐射照度为:

$$E = \frac{\Delta A_s \cos \theta}{\pi l^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda} \frac{\varepsilon_{\lambda_1-\lambda_2}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda \quad (6)$$

(2) 当诱饵弹火焰与目标表面面元之间距离小于诱饵弹火焰最大尺寸的10倍时,诱饵弹火焰不能

看作小面源。此时,诱饵弹火焰在目标表面面元处产生的辐射照度与诱饵弹火焰表面的形状、温度分布等因素有关,超出了文中研究的范围。

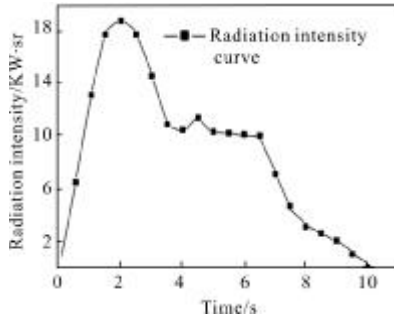


图 1 实测诱饵弹辐射强度变化曲线  
Fig.1 Result of radiation intensity measured

### 1.2 地物环境的反射特性

严格的描述地物环境对诱饵弹辐射的反射特性,必须引入双向反射分布函数(BRDF)的概念<sup>[8]</sup>,其数学表达式为:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (7)$$

单位为  $sr^{-1}$ 。式中:  $\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r$  分别表示入射方向的天顶角、方位角和反射方向的天顶角、方位角。

由 Schlick 提出的 BRDF 模型<sup>[9]</sup>,与实验数据相符<sup>[10]</sup>,并且模型公式简单,这样既能提高仿真的真实性,又不影响仿真的实时性,因此文中选用该模型描述地物表面面元的散射特性。其表达式为:

$$R_\lambda = (t, u, v, v', w) = S_\lambda(u) D(t, u, v, v', w) \quad (8)$$

式中:  $S_\lambda(u)$  表示 BRDF 的光谱特征,它是入射角的函数且必须遵守菲涅耳定律。可近似为:

$$S_\lambda(u) = C_\lambda + (1 - C_\lambda)(1 - u)^5 \quad (9)$$

式中:  $C_\lambda \in [0, 1]$ , 表示波长  $\lambda$  下的反射因子,可用正入射下的反射率代替。

$D(t, u, v, v', w)$  表示 BRDF 的方向特征,由漫反射分量和镜面反射分量组成,可表示为:

$$D(t, u, v, v', w) = \frac{r}{\pi} A(w) + \frac{1-r}{4\pi v v'} \cdot Z(t) A(w) \quad (10)$$

考虑自遮挡和遮挡光的再发射,最终公式变为:

$$D(t, u, v, v', w) = \frac{1 - G(v)G(v')}{\pi} A(w) + \frac{G(v)G(v')}{4\pi v v'} \cdot Z(t) A(w) \quad (11)$$

其中

$$G(v) = \frac{v}{r - rv + v} \quad G(v') = \frac{v'}{r - rv' + v'}$$

$$Z(t) = \frac{r}{(1 + rt^2 - t^2)^2} \quad A(w) = \sqrt{\frac{p}{p - p' w^2 + w^2}}$$

$r \in [0, 1]$ : 粗糙度因子,  $r=0$  表示纯镜面反射,  $r=1$  表示纯漫反射;  $p \in [0, 1]$ : 各向同性因子,  $p=0$  表示纯各向异性,  $p=1$  表示纯各向同性。式中各角度和向量的定义如图 2 所示。

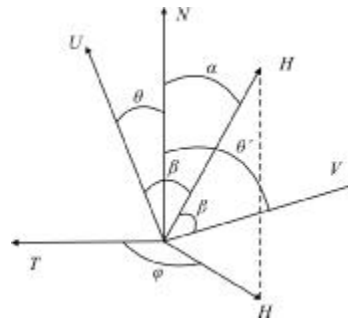


图 2 Schlick BRDF 模型各角度和向量的定义  
Fig.2 Angles and vectors for Schlick BRDF

图中,  $N$  为表面法线,  $U$  为入射光线反方向,  $V$  为反射光线方向,  $H$  为  $U$  和  $V$  的角平分线。  $u = \cos(\beta), v = \cos(\theta), v' = \cos(\theta'), t = \cos(\alpha), w = \cos(\varphi)$ 。

根据诱饵弹的辐射模型公式(6)和双向反射函数的定义公式(7),可以计算出地物表面面元反射和散射诱饵弹火焰的辐射,在观测产生的辐射亮度为:

$$L = R_\lambda(t, u, v, v', w) E \quad (12)$$

## 2 三维实时仿真过程

以上述理论模型为基础,文中在实验室开发的基于 OGRE 的红外仿真平台模拟了地物环境对诱饵弹辐射的反射。仿真过程如下:

### (1) 初始化参数。

仿真时间为 2011 年 7 月 1 日 12:00:00; 天气状况为晴天,无云;地面能见度为 23 Km;地理位置为北纬 39.9°,东经 116.3°;海拔高度为 0 km;

发射诱饵弹数量为 10 个;诱饵弹起燃位置分别为 5m, 30m, 5m;初始速度为 10m/s;

地面粗糙度因子为  $r=0.9$ ;各向同性因子为  $p=1.0$ ;坦克表面粗糙度因子:  $r=0.5$ ;各项同性因子为  $p=1.0$ ;

观测位置分别为 50 m, 10 m, -10 m;

(2) 诱饵弹火焰在地物表面面元产生的辐射照度的实时计算。

在图像渲染的每一帧,根据实测诱饵弹辐射强度实时计算诱饵弹火焰的平均温度。根据诱饵弹初始位置、诱饵弹初始速度、重力加速度和风速实时计算诱饵弹的位置。地物表面每一块面元的位置和法线方向是在利用三维图形制作软件 3DMax 建立地物模型时就已确定。结合诱饵弹的位置、观测位置以及地物表面面元的位置和法线方向向量  $\mathbf{N}$ ,可以实时计算每一块地物表面面元处的入射光反方向向量  $\mathbf{U}$ 、反射光方向向量  $\mathbf{V}$  以及诱饵弹与地物表面面元之间的距离  $l$ 。根据公式(6)可以实时计算出诱饵弹火焰在每一个地物表面面元处产生的辐射照度。

(3) 地物表面面元双向反射率函数(BRDF)值的实时计算。

根据每一块地物表面面元的法线方向向量  $\mathbf{N}$ 、入射光反方向向量  $\mathbf{U}$ 、反射光方向向量  $\mathbf{V}$  以及图 2 中各个向量的定义和公式(9)可以实时计算每一块地物表面面元的双向反射率函数(BRDF)的值  $R_\lambda$ 。

(4) 地物表面纹理的生成。

结合  $R_\lambda$  和  $\mathbf{E}$ ,根据公式(13)可以计算出每一块地物表面面元在观测方向反射诱饵弹辐射产生的辐射亮度  $L_{Di}$ 。结合地物本征辐射、地物对太阳和天空背景辐射的反射以及大气透过率,将每一块地物表面面元产生的辐射亮度量化为纹理灰度值。具体量化过程如下:

$$\text{Gray}_i = (L_{Ni} + L_{Ei} + L_{Di}) * \tau_{Am} / L_{range} \quad (13)$$

式中: $\text{Gray}_i$  表示第块地物表面面元显示到屏幕时的灰度值; $L_{Ni}$ 、 $L_{Ei}$ 、 $L_{Di}$  分别表示第  $i$  块地物表面面元的本征辐射、对太阳直射和天空背景辐射的散射、对诱饵弹辐射的散射在观测方向产生的辐射亮度; $\tau_{Am}$  表示地物表面面元与观测点间大气的透过率; $L_{range}$  表示量化范围。其中,关于  $L_{Ni}$ 、 $L_{Ei}$ 、 $\tau_{Am}$  的计算,前人已经提出了精确的计算模型<sup>[11]</sup>。最后通过纹理映射技术将计算出的红外纹理渲染到地物表面,显示到屏幕。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 仿真结果

首先对发射诱饵弹前的地物环境进行仿真,仿真结果如图 3(a)所示。其次,对发射诱饵弹后地物环境的变化进行实时仿真,每隔 0.5 秒截取一帧图像,

仿真结果如图 3(b)-(d)所示。

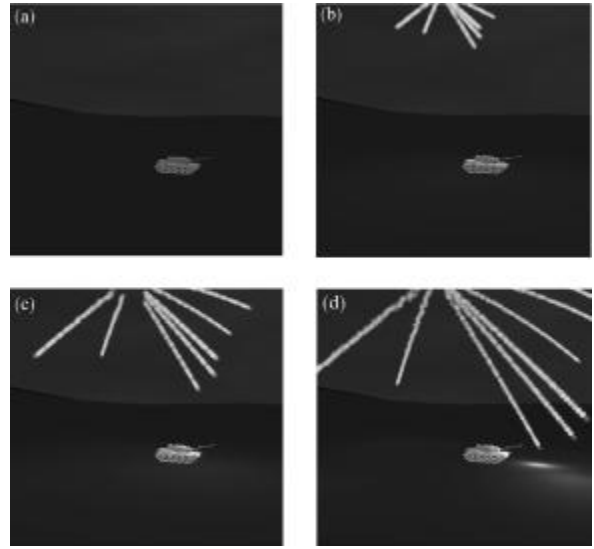


图3 发射诱饵弹 0-1.5 秒仿真结果

Fig.3 Simulation results in 0-1.5 seconds after decoys launched

#### 3.2 计算结果及分析

以坦克为例,计算了不同观测时间、观测方位角和观测天顶角下,坦克表面在观测方向的平均辐射亮度。设置观测距离 50 m,计算结果如图 4(a)-(d)所示。

文中图 3(a)-(d)为诱饵弹辐射前和诱饵弹发射后 0.5 秒、1.0 秒、1.5 秒地物环境的仿真结果,图 4(a)-(d)分别计算了发射诱饵弹后不同时刻、不同观测方位角和天顶角下,坦克表面平均辐射亮度。

由仿真结果可以看出,在发射诱饵弹后不同时刻,诱饵弹的辐射对地物环境的辐射影响效果不同。原因是:(1)由公式(6)可知,诱饵弹火焰在目标表面面元处产生的辐照度与诱饵弹火焰的温度、诱饵弹与目标表面面元之间的距离以及诱饵弹的辐射亮度与目标表面面元法线之间的夹角有关,在目标位置不变的情况下,诱饵弹与目标表面面元之间的距离以及诱饵弹辐射亮度与目标表面面元法线之间的夹角均由诱饵弹的位置决定,因此不同时刻诱饵弹位置及温度的变化引起诱饵弹火焰在目标表面面元处产生的辐照度发生变化;(2)由公式(8)可知,Schlick BRDF 模型与目标表面面元处的入射光方向、反射光方向以及目标表面材质有关,在目标位置、观测位置以及目标表面材质不变的情况下,BRDF 由诱饵弹的位置决定,因此不同时刻诱饵

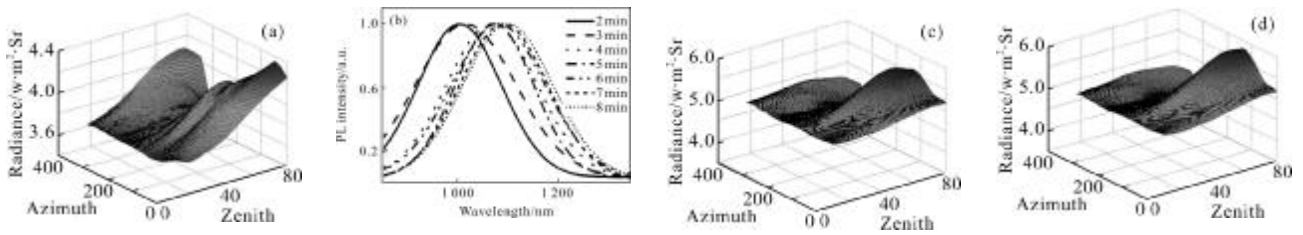


图 4 发射诱饵弹 0~1.5 秒不同方向坦克表面平均辐射亮度变化

Fig.4 Variation of average radiance on the surface of tank in different direction in 0-1.5 seconds after decoys launched

弹位置的变化引起目标表面面元 BRDF 值的变化；(3) 由公式(13)可知，目标表面面元在反射方向产生的辐射亮度由诱饵弹火焰在目标表面面元处产生的辐照度发生变化和 BRDF 值决定，因此不同时刻诱饵弹位置及温度的变化导致了目标表面面元在观测方向的辐射亮度的变化。

由计算结果可以看出，发射诱饵弹后与发射诱饵弹前相比，坦克在各个方向产生的平均辐射亮度增大了约 10~50%，并且在不同观测位置，增大程度差异很大。诱饵弹辐射对坦克周围地面背景辐射的影响与诱饵弹辐射对坦克辐射的影响的机理一致，但由于坦克与其周围地面背景的材质的光谱反射特性不同，导致坦克与其周围地面背景成像对比度不同，最终影响到坦克的探测，因此在对红外诱饵弹的研发中，必须考虑到地物环境对诱饵弹辐射的反射。

## 4 结论

文中针对红外诱饵弹的工作特点，依据其空时域分布特性，建立了诱饵弹的红外辐射模型；然后根据红外诱饵弹辐射与环境目标的作用机理，利用双向反射率函数(BRDF)建立目标表面面元的散射特性模型，实现目标表面面元接收诱饵弹的辐射在观测方向产生的辐射亮度计算；在基于 OGRE 的红外场景仿真平台上，对诱饵弹发射前后地物环境的变化进行实时仿真。从计算结果可以看出，发射诱饵弹后与发射诱饵弹前相比，坦克在各个方向产生的平均辐射亮度增大了约 10~50%，并且在不同观测位置，增大程度差异很大。因此在研发新型诱饵弹过程中，必须考虑地物环境对诱饵弹辐射的反射。

## 参考文献：

- [1] Chen Xiaotian, Shen Zhenkang. Flare recognition for long wave infrared imaging seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 622-625. (in Chinese)
- [2] Wang Chaohe, Tong Zhongiang, Li Lin, et al. Simulation of towed infrared decoy interfering and its operational method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 2(41): 446-451. (in Chinese)
- [3] Qiu Jijin, Zhao Xiaozhe. Simulation research on the smoke bomb carried on the warship confronting the infrared imaging anti-ship missile[J]. *Infrared and Engineering*, 2005, 34(6): 651-659. (in Chinese)
- [4] Alekseev O A. Model of the radiation of the flares of pyrotechnic thermal decoys [J]. *The Optical Society of America*, 2003, 71(2): 94-96.
- [5] Pu Weihua, Du Zhiming. A new method of testing for the radiation spectrum performance of infrared bait medicaments [J]. *Acta Armamentarii*, 2003, 24(3): 399-402. (in Chinese)
- [6] Li Shixiang. *Optoelectronic Countermeasures Technology*[M]. Hunan: National University of Defense Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [7] Zhang Jianqi, Fang Xiaoping. *Infrared Physics* [M]. ShaanXi: Xidian University Press, 2004. (in Chinese)
- [8] Wu Zhensen, Dou Yuhong. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(10): 1250-1254.(in Chinese)
- [9] Christophe Schlick. A customizable reflectance model for everyday rendering [C]//Fourth Eurographics Workshop on Rendering. 1993, 78-83.
- [10] Addy Ngan, Fredo durand wojciech matusik. Experimental analysis of BRDF models [C]//Eurographics Symposium on Rending, 2005, 117-226.
- [11] Jason T. Ward. *Realistic texture in simulated thermal infrared imagery* [D]. New York:Rochester Institute of Technology, 2008.