

空间双波段红外成像仿真及目标特性分析

黄 浩，陶华敏，陈尚锋

(国防科学技术大学 自动目标识别重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要: 从普朗克辐射定律出发, 充分考虑了点目标的弥散现象、噪声以及探测器的盲元, 获得了包含小目标的双波段红外仿真图像。结合红外辐射基本原理, 讨论分析了基于双波段红外识别小目标的有效特征, 得出目标在中波段和长波段的红外辐照度比值以及目标红外辐照度与探测距离间的关系, 可以为小目标识别提供可靠的性能参数。

关键词: 双波段; 红外成像仿真; 目标特征

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2013)08-0482-05

Space Dual-band Infrared Imaging Simulation and Target Analysis

HUANG Hao, TAO Hua-min, CHEN Shang-feng

(National Key Laboratory of ATR, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The dual-band IR detectors can receive the radiant energy of the target in the two bands. Based on Plank's radiation law, and taking into full consideration to the point target dispersion phenomenon, noise and bad pixel, we get the dual-band infrared simulation image which contains small targets. Finally, combining with the basic principles of infrared radiation, we discuss the effective features to identify small targets based on the infrared dual-band. At last, we get the conclusion about the ratio of the radiation between the medium-wave and long-wave, and the relationship between radiation illumination and detection range, which can provide effective parameters of small target recognition.

Key words: dual-band, infrared image simulation, target feature

0 引言

红外弱小目标的检测和识别是红外成像系统的核心技术之一, 但随着光电技术、隐身技术的发展, 现代作战环境越来越复杂, 尤其是诱饵在探测器中的成像特征越来越接近真实目标, 单一的红外探测器所获取的信息难以区分目标与诱饵; 因此, 为了提高对小目标的检测识别能力, 各国开始双波段红外成像制导技术的研究。

空间目标的双波段红外辐射特征的研究一般有2种方法: 一是综合考虑各种因素后对空间目标建立相应的红外辐射模型, 然后采用数值计算及计算机仿真的方法, 得到目标的红外辐射强度数据, 再提取相应的目标特征参数; 二是采用外场模拟试验的方法获得空间目标的红外辐射强度数据, 再提取目标特征参数。由于实验条件的限制, 目前尚不能进行外层空间的模拟试验获取用于双波段红外图像识别算法的实

测数据, 因此采用计算机仿真的方法成为研究空间目标的双波段红外辐射特征唯一可行方法。

本文从红外辐射的基本原理出发, 结合双波段红外目标识别的需求, 对空间小目标进行了建模仿真, 得到空间目标在中波段红外($3\sim5\text{ }\mu\text{m}$)和长波段红外($8\sim12\text{ }\mu\text{m}$)上的仿真图像, 进而结合红外辐射基本原理, 讨论分析了基于双波段红外识别小目标的有效特征, 得出目标在中波段和长波段的红外辐照度比值以及目标红外辐照度与探测距离间的关系, 可以为小目标识别提供可靠的性能参数。

1 双波段红外成像原理与计算

1.1 红外辐射基本原理

在自然界, 物体的温度都大于绝对零度, 因此物体总是不断地向外发射辐射能。黑体是一种理想模型, 它对外来的辐射全部吸收。由普朗克定律可得, 在单位波长间隔内黑体向周围空间发射的辐射功率

与波长和温度的关系如下:

$$M_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5 [e^{(c_2/\lambda T)} - 1]} \quad (1)$$

式中: c_1 为第一辐射常数, 其值为 $3.742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$; c_2 为第二辐射常数, 其值为 $1.439 \times 10^4 \mu\text{m}^4 \cdot \text{K}$; λ 为辐射波长; T 为单元表面温度。图 1 给出了温度为 400~900 K 的黑体的红外辐射出射度随波长的变化曲线图。

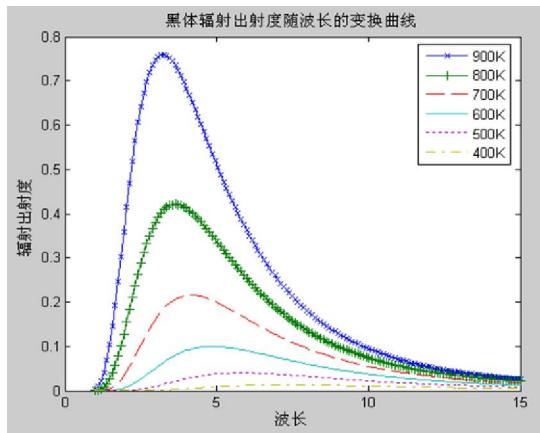


图 1 不同温度的黑体辐射随波长的变化曲线

Fig.1 Radiant exitance curves of target with different temperature

由图 1 可知, 黑体辐射具有以下特征^[1]: ①黑体的辐射只与黑体的绝对温度有关; ②温度越高, 在所有波长上的辐射出射度也越大, 且不同温度的各曲线彼此不相交; ③随着温度的升高, 黑体辐射峰值向短波方向移动; ④在 3~5 μm 波段上不同温度黑体的辐射出射度相差较大, 而在 8~12 μm 波段上不同温度黑体的辐射出射度相差很小。

1.2 空间目标红外成像分析

由普朗克定律可以得到表面发射率为 ε , 温度为 T 的空间目标的红外辐射出射度为:

$$M_T(\lambda) = \varepsilon \frac{c_1}{\lambda^5 [e^{(c_2/\lambda T)} - 1]} \quad (2)$$

对空间红外辐射特性进行测量时, 若空间目标表面的平均温度为 T , 表面材料或涂层的发射率为 $\varepsilon(\lambda)$, 则辐射体的光谱辐射强度为^[2-3]:

$$I_T(\lambda) = A_0 \frac{\varepsilon(\lambda) M_T(\lambda)}{\pi} \quad (3)$$

式中: A_0 为目标对探测方向的投影面积。

红外探测器在入射孔径处接收到的空间目标光谱幅照度为:

$$E_T(\lambda) = \frac{I_T(\lambda) \tau_i(\lambda)}{S^2} \quad (4)$$

式中: S 为目标准至红外探测系统的距离; $\tau_i(\lambda)$ 为大气光谱透过率 (宇宙空间中其值为 1); 则探测器在红外

波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 中接收到的辐射照度为:

$$E_T(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{I_T(\lambda) \tau_i(\lambda)}{S^2} d\lambda \quad (5)$$

由于空间目标反射的太阳辐射的峰值在可见光波段, 反射的地球辐射又相对比较小, 所以在空间目标红外辐射特征中占主要因素的不是这两部分^[4], 而是空间目标自身的温度辐射。因此, 本文在仿真目标红外成像时不考虑目标反射辐射, 只考虑目标本身的红外辐射。

1.3 目标成像尺寸

目标在焦平面上的成像大小与目标与探测器之间的距离以及目标的实际大小有关, 探测器的成像模型如图 2 所示。

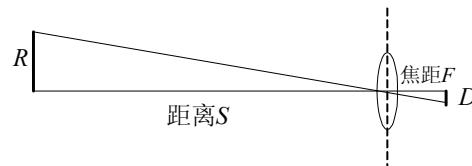


图 2 目标成像模型

Fig.2 Target imaging model

目标在焦平面上的成像大小 D 可以由目标距探测器的距离 S 、目标的实际直径大小 R 、探测器焦距 F 来确定, 公式如下:

$$D = \frac{R}{S} \cdot F \quad (6)$$

当 D 为单个像素的大小 D_0 时, 可得到探测距离与目标的大小关系如下:

$$S_0 = \frac{R}{D_0} \cdot F \quad (7)$$

由上式可知, 当目标大小 R 一定时, 若目标与探测器的距离大于 S_0 , 则目标所成的像始终为一个像素。假设目标直径 $R=2 \text{ m}$; 取 $F=0.176 \text{ m}$, $D_0=3.0 \times 10^{-5} \text{ m}$, 可得 $S_0=23.467 \text{ km}$, 因此选择临界距离 S 为 25 km 比较合理。

1.4 弥散现象

研究光学元件的景物关系时, 通常认为近轴平行光经过透镜或者球面反射镜后汇聚于一点, 即一个点源的像也是一个点。实际上并非如此, 一个物点成像并非一个几何点, 而是一个亮点或扩散圆斑, 通常称为弥散圆。

光学仪器一般采用圆形光阑, 此时由圆孔衍射产生的弥散圆一般也称为艾利圆, 集中了衍射能量的 83.8%。对圆孔衍射的弥散能量计算公式^[4]是:

$$I(\omega) = |U(\omega)| = I_0 \left[\frac{2J_1(k\alpha\omega)}{k\alpha\omega} \right]^2 \quad (8)$$

式中: I_0 为弥散圆中心强度; $k=2\pi/\lambda$, 称之为波长常数; α 为入射光阑半径; ω 是角度单位; $J_1(\cdot)$ 代表一阶贝塞尔函数。从式中可以看出, 弥散能量会受到波长的影响, 对于不同波段其弥散能量将会不同。

像点的弥散会导致目标进入成像系统的能量分散^[5], 即探测器接收到的入射能量会分散在多个像元上, 这种分散我们通过在弥散能量分布函数中添加分散系数 μ ($0 < \mu < 1$) 来实现, 即:

$$I(\omega) = \mu \cdot I_0 \left[\frac{2J_1(k\alpha\omega)}{k\alpha\omega} \right]^2 \quad (9)$$

1.5 噪声

红外探测器是由电子线路组成, 只要放大倍数足够大, 既是在探测器视场没有任何目标的情况下, 也可以观察到一些毫无规律和无法预测的输出, 这就是探测器的噪声^[6]。从噪声的产生机理上讲, 红外探测器的噪声主要包括: 散粒噪声、热噪声、温度噪声、 $1/f$ 噪声等, 而我们关心的是各项噪声源组合起来的总的噪声源的特性, 根据概率论的中心极限定理我们可以认为红外系统总的噪声源服从高斯分布^[6]。对噪声的仿真有 2 种方法, 一是根据信噪比和噪声特性直接约束噪声的灰度值和范围, 然后叠加到理想图像上, 该方法能够较好的仿真实际图像, 但计算复杂且意义不大。另一种方法是根据噪声源的特点, 按照一定的信噪比产生满足各种分布的噪声信号, 然后叠加到理想图像上。首先在 0~255 范围内产生噪声图像, 然后与理想图像按照信噪比进行归一化, 如一幅 $m \times n$ 大小的理想图像各像素的灰度值为 A_i , 噪声图像的各像素灰度为 B_i , 则仿真出的实际图像灰度 C_i 为:

$$C_i = \sqrt{A_i^2 \cdot \frac{r}{r+1} + B_i^2 \cdot \frac{1}{r+1}} \quad (i=1,2,\dots, m \times n) \quad (10)$$

1.6 固定盲元和随机盲元

由于制造材料、工艺的影响, 红外焦平面整列器件不可避免的存在盲元, 盲元的分布对红外图像有着很大的影响, 是红外探测器性能参数中一个很重要的指标。盲元分为固定盲元和随机盲元, 固定盲元的亮度值固定不变, 随机盲元的位置和亮度随机变化。根据文献[4], 在仿真过程中做如下假设: 固定盲元占总数的 1.5%, 在像平面上服从均匀分布, 随机盲元总数在 7~12 个^[4], 其亮度值随机变化, 在像平面上也服从均匀分布。探测器所在环境温度对盲元分布也有一定影响, 以上参数选取均较大, 充分考虑了盲元的不良影响。

2 仿真结果

按照以上的仿真方法, 对温度分别为 500 K 和 700

K、距离探测器 100 km 和 30 km 的黑体, 在波段范围为 3~5 μm 及 8~12 μm 分别进行仿真, 结果如图 3 所示。图中可以看出, 由于弥散的原因, 目标在图像上不只是占一个像元, 而是其周围像素也有一定的灰度值。

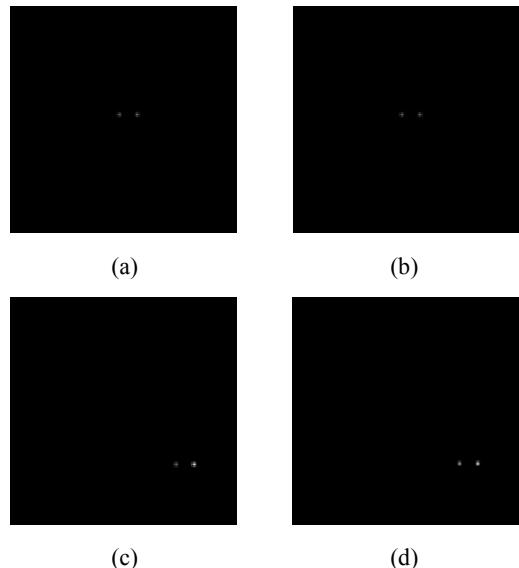
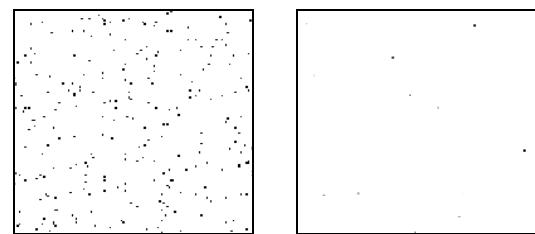


图 3 无噪声干扰时的仿真图像

Fig.3 The simulation image without noise

图 3(a) 波段为 3~5 μm 、距离 100 km 温度分别为 500 K、700 K 时的理想图像; (b) 波段为 8~12 μm 、距离 100 km 温度分别为 500 K、700 K 时的理想图像; (c) 波段为 3~5 μm 、距离 30 km 温度分别为 500 K、700 K 时的理想图像; (d) 波段为 8~12 μm 、距离 30 km 温度分别为 500 K、700 K 时的理想图像。

假设固定盲元占像素总数的 1.5%, 随机盲元总数在 7~12 个, 其亮度值随机变化, 在像平面上均服从均匀分布。如图 4 所示, 其中图像的像素分辨率为 128 \times 128。



(a) 固定盲元 (b) 随机盲元

图 4 盲元在像平面上的分布图

Fig.4 The distribution of bad pixel

图 5 显示的增加噪声和盲元的仿真图像, 从图中可以看出, 在距离 100 km 处目标在两个波段内的灰度都很低(目标由红色标出), 且由于探测器噪声的存在, 目标几乎淹没在噪声中, 人眼很难识别; 在距离为 30 km 处目标的灰度值增大, 同时可以看出目标

在中波段的灰度亮于长波段, 温度高的目标其灰度更亮。图中还出现了随机的亮点, 这是由随机盲元引起的, 由于随机盲元出现的位置和灰度是随机的, 因而在图像上表现出位置和灰度随机变化的亮点。

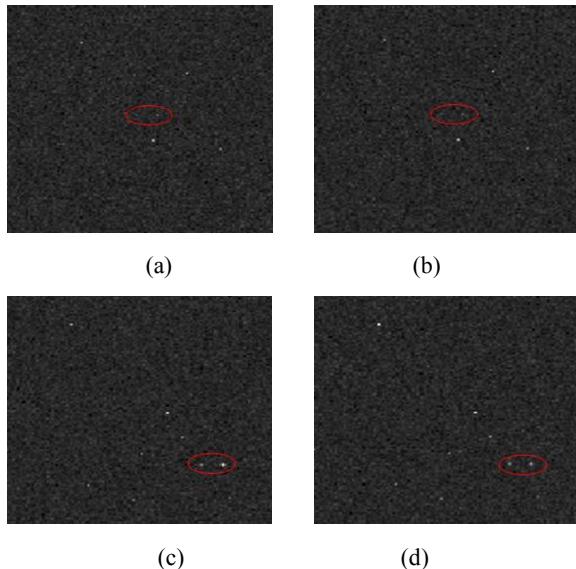


图 5 增加噪声和盲元后的仿真图像

Fig.5 Image with noise and bad pixel

图 5(a) 波段为 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 、距离 100 km 温度分别为 500 K 、 700 K 增加噪声和盲元的图像; (b) 波段为 $8\sim 12 \mu\text{m}$ 、距离 100 km 温度分别为 500 K 、 700 K 增加噪声和盲元的图像; (c) 波段为 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 、距离 30 km 温度分别为 500 K 、 700 K 增加噪声和盲元的图像; (d) 波段为 $8\sim 12 \mu\text{m}$ 、距离 30 km 温度分别为 500 K 、 700 K 增加噪声和盲元的图像。

3 双波红外目标成像结果分析

结合双波段探测器的空间应用背景, 以及诱饵的温度变化范围(温度在 $600\sim 900 \text{ K}$ 内的诱饵的峰值辐射在 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 波段内), 我们选择双波段红外探测的波段范围为 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12 \mu\text{m}$, 对同一辐射体、同一探测系统, 考虑与两个波段相对应的探测系统接收到的辐射照度的比值 γ 为^[7]:

$$\gamma = \frac{E_r(3\sim 5)}{E_r(8\sim 12)} = \frac{\int_3^5 \frac{I_r(\lambda)\tau_1(\lambda)}{S^2} d\lambda}{\int_8^{12} \frac{I_r(\lambda)\tau_1(\lambda)}{S^2} d\lambda} \quad (11)$$

当探测距离为 30 km 时, 不同温度的黑体在中波段和长波段的辐射照度比值如图 6。从图中可以看出, 温度在 $400\sim 590 \text{ K}$ 之间的黑体, 辐射比值小于 1, 即在中波段的辐射能量小于长波段, 目标在长波段的成像灰度大于中波段; 温度在 590 K 以上的黑体, 辐射比值大于 1, 即在中波段的辐射能量大于长波段, 目

标在中波段的成像亮度大于长波段。且黑体在中波段和长波段的红外辐射比值随着温度的升高而增大, 这一特性可以作为小目标识别的有效特征参数。

图 7 显示了温度分别为 500 K 和 700 K 的黑体, 随着距离的减小其辐照度的变化曲线。图中可以看出温度为 500 K 的黑体, 在长波段的辐射照度高于中波段的辐射照度, 而温度为 700 K 的黑体, 在中波段的辐射照度高于长波段的辐射照度。随着目标与探测器间的距离减小, 其辐射照度逐渐增大; 根据式(5)可得到对于恒定温度的目标, 其辐射照度与探测距离 S 的平方成反比; 一般情况下, 目标的温度变化不大, 可以近似认为是恒定的, 而诱饵可能在短时间内温度发生很多的波动, 因此, 辐射照度与探测距离之间的关系也可以作为目标识别的重要特征。

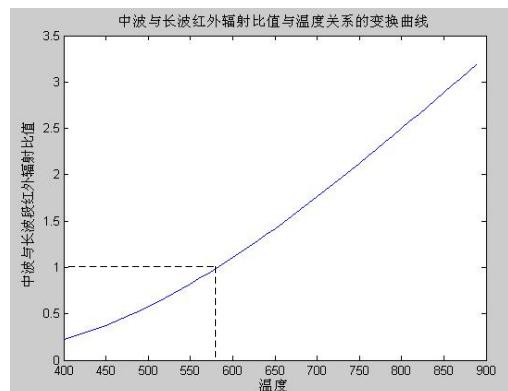


图 6 红外辐射比值随温度的变化曲线

Fig.6 Radiant ratio curve of target with different temperature

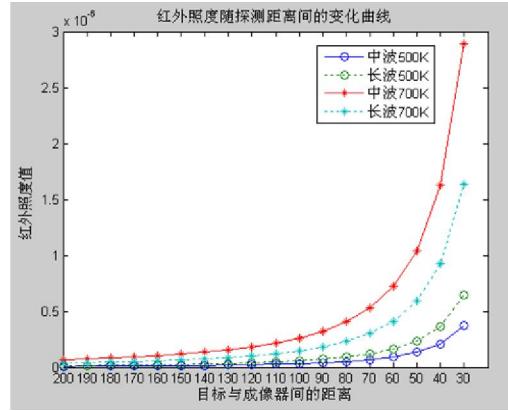


图 7 红外照度随探测距离的变化

Fig.7 The affect by the distance of transmission

4 结论

双波段红外成像器能够获取目标更多的特征信息, 因而成为目前的研究热点; 由于采用外场模拟实验获取空间目标红外特性存在很大的难度, 本文通过仿真的方法获得模拟红外图像。为了使仿真图像更加接近实际图像, 仿真过程中考虑了点目标的弥散现

象、噪声以及探测器的盲元，最终获得了包含小目标的仿真红外图像。最后结合红外辐射基本原理，讨论分析了可用于红外小目标识别的有效特征，最终得出目标在中波段和长波段的红外辐照度比值以及目标红外辐照度与探测距离间的关系，可以为小目标识别及抗干扰方面提供可靠的性能参数。空间双波段红外图像的仿真以及目标的特征分析，为下一步的双波段目标检测和识别奠定了基础，也为新一代制导武器系统的研究提供了新思路。

参考文献：

- [1] 张雷. 双波段红外图像目标特性分析及其融合方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2007.
- [2] 张磊, 孙维国, 陈洪许, 等. 基于 MATLAB 红外双波段成像探测器性能仿真[J]. 红外技术, 2010, 32(1): 11-15.
- [3] 杜少军, 路启生. 红外双色探测研究[J]. 红外技术, 2000, 22(2): 36-38.
- [4] 李阳. 深空红外目标场景的建模与仿真技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [5] 张璐. 捷联平台成像末制导关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [6] 张志勇. 红外传感器自身效应仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(3): 601-604.
- [7] Shin K C, Kim J S. Matched field processing with contrast maximization[J]. *J.Acoust.Soc.*, 2005, 118(3): 1526-1533.

(上接第 481 页)

参考文献：

- [1] Vickers, V E. Plateau equalization algorithm for real-time display of high-quality infrared imagery[J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(7): 1921-1927.
- [2] Farbman Zeev, Fattal Raanan, Lischinski Dani, Szeliski Richard. Edge-Preserving Decompositions for Multi-Scale Tone and Detail Manipulation[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 67.
- [3] Branchitta Francesco, Diani Marco, Corsini Giovanni, et al. New technique for the visualization of high dynamic range infrared images[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(9): 096401.
- [4] Chao Zuo, Qian Chen, Ning Liu, et al. Display and detail enhancement for high-dynamic-range infrared images[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(12): 127401(9).
- [5] Branchitta Francesco, Diani Marco, Corsini Giovanni, et al. Dynamic-range compression and contrast enhancement in infrared imaging systems[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(7): 076401-1-14.
- [6] Elad Michael. On the origin of the bilateral filter and ways to improve it[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(10): 1141-1151.
- [7] Barash, Danny. A fundamental relationship between bilateral filtering, adaptive smoothing, and the nonlinear diffusion equation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(6): 844-847.
- [8] Lai Rui, Yang Yin-Tang, Wang Bing-Jian, Zhou Hui-Xin. A quantitative measure based infrared image enhancement algorithm using plateau histogram[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(21): 4283-4288.
- [9] 王炳健, 刘上乾, 周慧鑫, 等. 基于平台直方图的红外图像自适应增强算法[J]. 光子学报, 2005, 34(2): 299-301.
- [10] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. *Digital Image Processing*[M]. 3rd Edition. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [11] 周妮, 张湧, 吴滢跃. 一种新的实时红外图像增强技术[J]. 红外技术, 2010, 32(6): 324-327.
- [12] 魏新, 马丽华, 李云霞, 等. 基于图像分割和平台直方图均衡的红外图像增强算法[J]. 红外技术, 2012, 34(5): 272-275.