

基于 DMD 中波红外场景仿真系统光源温度的研究

胡文刚, 元 雄, 何永强, 耿 达, 唐德帅

(军械工程学院 电子与光学工程系, 河北省 石家庄 050003)

摘要: 在对基于 DMD 红外场景仿真系统的研究中, 为了提高仿真系统的性能, 对黑体光源温度的确定进行了研究。首先, 给出了黑体辐射的理论基础; 其次, 阐述了基于 DMD 的中波红外场景仿真系统的能量传递模型, 然后分析了影响系统能量传递效率的两个因素, 一是 DMD 能量传递效率, 二是投影系统的透过系数; 最后, 给出了计算黑体温度范围的参数公式, 通过 MATLAB 运算可以解出温度范围。

关键词: DMD; 红外场景仿真; 黑体光源; 温度范围

中图分类号: O439 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)08-0661-04

Research on Light Source Temperature-scope in the Mid-wave Infrared Scene Simulation System Based on DMD

HU Wen-gang, YUAN Xiong, HE Yong-qiang, GENG Da, TANG De-shuai

(Department of Electronic and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In the process of researching infrared scene simulation system based on DMD, in order to improve the performance of system, the temperature scope is investigated. Firstly, the theory of blackbody radiation is given. Secondly, the calculating model of infrared scene simulation system transmitting efficiency is displayed. Then, two factors which affected transmitting efficiency of system are analysed, one is transmitting efficiency of DMD, the other one is transmission ratio of projecting optical system. At last, the parameter formula of calculating temperature scope is given, which is used to get the result via the MATLAB software.

Key words: DMD, infrared scene simulation, blackbody, temperature scope

0 引言

基于 DMD 的动态红外场景仿真系统以其全数字化、高图像分辨率、高帧频、高稳定性等特点, 使得它在红外图像仿真技术中受到越来越多的关注。基于 DMD 的动态红外场景仿真系统主要由以下几部分组成: 光源、准直光学系统、图像生成部分、数字微镜器件 (DMD) 及其驱动电路、投影光学系统, 其基本原理是照明光源通过准直光学系统均匀照明 DMD, 图像生成部分将生成的数字图像传输到 DMD, 通过 DMD 驱动电路驱动数字微镜器件偏转, 以此来达到调制入射到 DMD 的辐射, 产生红外图像, 生成的红外图像通过投影光学系统投影到被测系统的入瞳处, 使得被测系统接收到的红外图像与真实目标产生的红外辐射一致, 以此来评测被测系统的性能。

在这过程中由于系统中的各种光学元件的反射、

折射、衍射及其吸收, 使得到达被测系统的红外辐射并不能真实的反映黑体光源最初发出的红外辐射, 由此系统如何来确定的黑体光源温度就显得尤其重要, 能提高仿真系统的性能, 提高仿真图像的对比度。

1 黑体辐射基础

1.1 光源的选择

在红外场景仿真系统当中, 光源的选择会极大的影响此系统的测试性能, 不同仿真波段的系统应该选择不同的光源, 并且要求其具有较高的温度稳定性、空间辐射均匀性及光能利用率, 黑体有发射率高、温度控制精度好及其良好的均匀性能均匀照射 DMD 芯片等特点, 因此, 黑体是红外场景仿真系统的最佳光源^[1]。其他可做红外光源的还有高温热源及其红外激光, 但是都有其明显不足。

1.2 黑体辐射理论

收稿日期: 2014-04-24; 修订日期: 2014-06-18.

作者简介: 胡文刚 (1972-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为光电对抗及信息处理。E-mail:terry962464@126.com

黑体，又称绝对黑体，它是理想化了的物体，它是指能够吸收全部的外来的电磁辐射，并且不会有任何的反射，即黑体对任何波长的电磁波吸收率为 1，而透射率为 0，在吸收外来电磁辐射的同时，它还对发射电磁辐射。

黑体的光谱辐射度 E 与黑体表面的绝对温度 T 及其波长 λ 有如下关系：

$$E = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} \left(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \right) \quad (1)$$

即普朗克定律^[2]。

式中： c_1 、 c_2 为辐射常数， $c_1 = 3.7418 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ， $c_2 = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ ， λ 为波长， T 为温度。

将 E 在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 之间积分得总辐射度 M

$$M = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda, T) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda \quad (2)$$

将普朗克定律中的光谱辐射度在全波段内积分，得到黑体的总辐射度，总的电磁辐射度与黑体的温度成正比，即：

$$M = \sigma T^4 \quad (3)$$

这就是斯蒂芬-玻耳兹曼定律。

式中： σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ； T 为黑体的开式温度。

对普朗克定律中的 λ 求偏微分之后等于 0，得峰值波长 λ_m ：

$$\lambda_m = 2898/T \quad (4)$$

此即维恩位移定律。

式中： λ 单位为 μm ； T 单位为 K 。

通过维恩定律，针对不同波段的红外场景仿真系统，可以简单估算出黑体光源的所需要的大致温度，但是如何更好更精确地计算出黑体所需要的温度将是研究重点。

2 基于 DMD 的红外场景仿真系统的能量传递模型

如图 1 所示，黑体光源发射出的红外辐射，经过准直系统均匀照射到 DMD 芯片上，经 DMD 的反射，再经投影系统，最后到达红外探测器，中间经过各种光学元件的反射、折射、衍射及其吸收（由于此系统的大气作用距离很短，所以忽略大气吸收），使得到达被测系统的红外辐射能量发生很大改变，由此影响光源温度的确定。

设从黑体发射出来的总辐射度为 M_i ，到达红外探测器的总辐射度为 M_o ，则 M_o 可以表达为：

$$M_o = M_i \cdot \tau_c \cdot g_D \cdot \tau_l \quad (5)$$

式中： τ_c 为准直系统的透过系数； g_D 为 DMD 的能量传递系数； τ_l 为投影系统的透过系数^[3]。

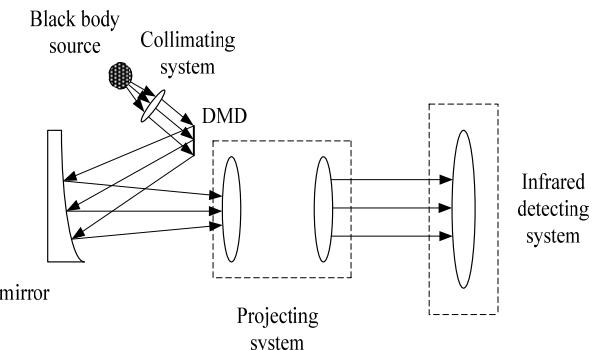


图 1 红外场景仿真系统能量传递效率理论模型

Fig.1 Calculate modulate of infrared scene simulation system transmitting efficiency

2.1 准直系统的透过系数

准直系统的透过系数跟准直系统的透镜数量及所用材料有关，本实验所用准直系统为镀增透膜的单片透镜，其在中波红外波段透过率为 95%，即：

$$\tau_c = 0.95 \quad (6)$$

2.2 DMD 的能量传递系数

当辐射从黑体发出，经 DMD 芯片的保护窗口的反射及吸收到达 DMD 芯片表面，由于 DMD 微镜片的尺寸跟光波波长相当，所以会发生衍射，再反射出去时再次受到保护窗口的反射及吸收，所以有：

$$g_D = \tau_D^2 \cdot (1 - \delta_D - \epsilon_D) \quad (7)$$

式中： τ_D 为 DMD 窗口的透过系数； δ_D 为 DMD 的衍射因子； ϵ_D 为 DMD 的吸收系数。

选用进口的硅（Si）单晶作为中波红外 DMD 芯片的保护光窗口材料，它是一种良好的短中波红外透光材料，它的红外透射光谱为 $1 \sim 7 \mu\text{m}$ ，具有硬度高、不溶于水、导热性能好、密度低等特点，通过在两面镀增透膜时，使其对 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的中波红外透过率能达到 95% 以上。即 $\tau_D = 95\%$ 。

如图 2 所示，由于 DMD 芯片是在很小面积上集成 1024×768 个 DMD 微镜片，每个微镜片的尺寸是 $12.68 \mu\text{m}$ ，每两个微镜片之间的距离是 $1 \mu\text{m}$ ，所以 DMD 可以看成是闪耀光栅的衍射^[4]，图 3 为闪耀光栅的衍射原理图。

有光栅方程：

$$d(\sin\alpha + \sin\beta) = m\lambda \quad (8)$$

其出射强度为：

$$I = I_0 \cdot \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right) \cdot \left(\frac{\sin \frac{N\delta}{2}}{\sin \frac{\delta}{2}} \right) \quad (9)$$

式中: α 为入射角; N 为光栅条数; δ 为位相差^[5]。

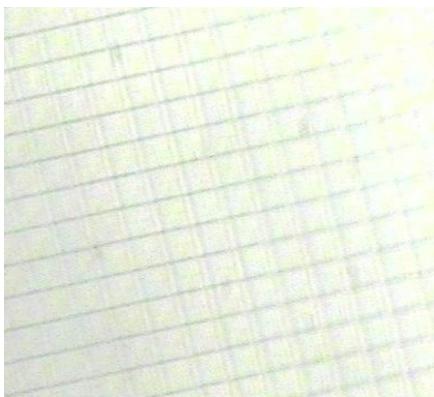


图 2 DMD 微镜片

Fig.2 Micro-mirror of DMD

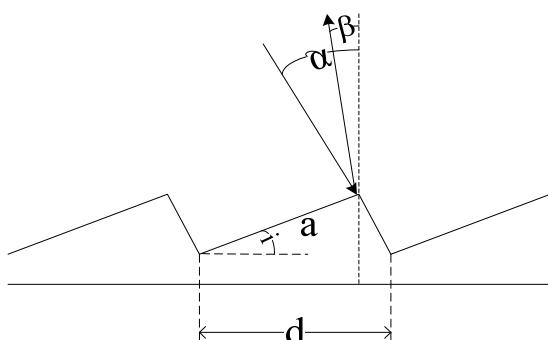


图 3 闪耀光栅衍射模型

Fig.3 Diffraction model of blazed grating

当闪耀状态时, 靠近零级的几个衍射极强上集中了 70% 的衍射能量^[6]。即 $1 - \delta_D = 70\%$ 。

DMD 微镜表面采用铝溅射工艺在半导体硅片上生成反射面, 其较高的反射率使得其吸收系数很低, 不到 1%。

综上, DMD 的能量传递系数 g_D 为:

$$g_D = \tau_D^2 \cdot (1 - \delta_D - \varepsilon_D) = 0.631 \quad (10)$$

2.3 投影系统的透过系数

投影系统的透过系数跟投影系统的透镜材料及其数量有关, 对于镀有高增透膜的单片透镜而言, 其对中波红外的透过率能达到 95%, 本投影系统将采用 4 片透镜的设计, 如图 4 所示。

即有:

$$\tau = 0.95^4 = 0.815 \quad (11)$$

联合式(5)(6)(10)(11)得此系统的输出光谱辐射

度:

$$M_o = M_i \cdot \tau_c \cdot g_D \cdot \tau_l = 0.494 M_i \quad (12)$$

即此系统的能量传递效率为 0.494。

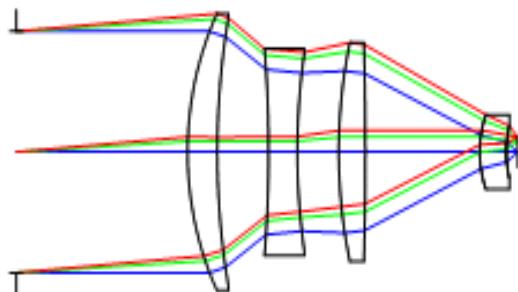


图 4 投影系统光路

Fig.4 Design of projecting optical system

3 黑体光源温度确定

通过 MATLAB 对式(2)在 3~5 μm 波段进行积分, 可得总辐射度随温度的变化规律。表 1 为黑体光源不同温度时在 3~5 μm 总辐射度^[7]。

对于中波红外探测器来说, 黑体在较窄温度 T 附近变化时, 像元对到达探测器的辐射度响应的灰度值 h 可以表示为 $h = C \cdot M_o$, 其中 C 为探测器与辐射度 M_o 之间的响应系数, 只跟探测器和系统相关系数有关^[8]。

联合式(2)及式(5)可得:

$$h = C \cdot M_o = C \cdot M_i \cdot \tau_c \cdot g_D \cdot \tau_l = C \cdot \tau_c \cdot g_D \cdot \tau_l \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda \quad (13)$$

对于确定在 3~5 μm 波段内, 当 T 为定值时, C , τ_c , g_D , τ_l 均为定值, 通过 MATLAB 即可以反解得到 T 的值, 对于灰度值在 0~255 之间时, 当 $h=1$ 时, 对应该探测器的灵敏阈, 此时得到光源的最低温度 T_0 , 当 $h=255$ 时, 对应探测器的饱和值, 此时得到光源的最高温度 T_1 。

4 结论

本文对基于 DMD 中波红外场景仿真系统中的光源选择及温度确定进行了分析。首先, 给出了黑体辐射的理论基础, 得到相关理论公式; 其次, 阐述了基于 DMD 的中波红外场景仿真系统的能量传递模型, 然后分析了影响系统能量传递效率的两个因素, 一是 DMD 能量传递效率, 二是投影系统的透过系数, 得到了系统的能量传递效率公式; 最后, 给出了计算黑

体温度范围的参数公式。但文中仍然存在很多不足，在未来的工作当中，研究系统本身温度对结果的影响

以及对于误差的分析及修正都将是未来工作的重点。

表1 3~5 μm 波段不同温度时的黑体辐出度

Table 1 Radiant exitance of blackbody at different temperature in 3~5 μm

温度/K	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
辐出度/(W/cm ²)	5.895×10^{-4}	0.009	0.053	0.172	0.409	0.793	1.338	2.048	2.917

72100D(1-9).

参考文献:

- [1] 王云萍, 赵长明. 基于 DMD 红外景象仿真系统[J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(6): 967-969.
- [2] Pieter A Jacobs. *Thermal Infrared Characterization of Ground Targets and Backgrounds*[M]. 1983.
- [3] Joseph P Rice, Jorge E Neira, Michael Kehoe, et al. DMD diffraction measurements to support design of projectors for test and evaluation of multispectral and hyperspectral imaging sensors[C]//SPIE, 2009, **7210**: 72100D(1-9).
- [4] 何永强, 耿达, 唐德帅, 等. 基于数字微镜器件的红外场景仿真系统设计[J]. 红外技术, 2014, **36**(5): 384-388.
- [5] 李林. 应用光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
- [6] 王大鹏. 数字微镜器件的相位调制性质[J]. 光学学报, 2007, **27**(7): 1255-1260.
- [7] 常虹. 基于 DMD 的双手红外成像制导仿真系统研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2006, 6.
- [8] 孙志远, 王晶, 乔彦峰. 环境对中波红外探测器测温精度的影响[J]. 中国光学与应用光学, 2010, **3**(6): 659-664.

(上接第 608 页)

- [4] Rudiger Duchateau. Customized electro-optical sensors for the German Armed Forces UAV programs[C]// Proc. of SPIE on Infrared Technology and Applications XXVI, 2000, **4130**: 322-326.
- [5] Liu Shi-chao, Qin Jie-xin, Qi Hong-xing, Xiao Gong-hai. IR line scanner on UAV[C]// Proc. of SPIE on International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011, 2011, **8193**: 81931C-1-81931C-7.
- [6] Sun Kyu Lee, Jun Hee Na, Chang Jun Yoon, et al. Small thermal optics design for UAV(Unmanned Aerial Vehicle) system[C]// Proc. of SPIE on Novel Optical Systems Design and Optimization XIII, 2010, **7787**: 77870S-1 - 77870S-7.
- [7] Rick C, Stevens Firooz A, Sadjadi Jacob R, et al. Small Unmanned Aerial Vehicle (UAV) real-time intelligence, surveillance and reconnaissance (ISR) using onboard pre-processing[C]// Proc. of SPIE on Automatic Target Recognition XVIII, 2008, **6967**: 696717-1-696717-8.
- [8] Fritze J, Münzberg M. The new megapixel thermal imager family[C]// Proc. of SPIE on Infrared Technology and Applications XXXVII, 2011, **8012**: 801205-1- 801205-8.
- [9] Carol Cheung, Benjamin Grocholsky. UAV-UGV collaboration with a PackBot UGV and Raven SUAV for pursuit and tracking of a dynamic target[C]// Proc. of SPIE on Unmanned Systems Technology X, 2008, **6962**: 696216-1 - 696216-10.
- [10] 李国柱. 无人机光电技术的应用与发展分析[J]. 舰船电子工程, 2013, **227**(5): 17-20.
- [11] 刘洵, 戴明. 无人机光电载荷的研制与改进[J]. 光电工程, 2008, **35**(3): 1-3.
- [12] 王正林. 无人机光电载荷及其应用[J]. 光电技术应用, 2013, **28**(1): 16-17.
- [13] 娄树理, 杨增胜, 周晓东. 无人机光电侦察、监视技术研究[J]. 航天电子对抗, 2007, **23**(2): 28-30.
- [14] 新浪军事网. 以色列 Bentol 公司推出超轻型无人机稳定载荷[EB/OL]. [2012-6-18]. <http://jczs.sina.com.cn>.
- [15] 新华网. 无人机优势、不足与未来发展三大关键词[EB/OL]. 2011 [2011-12-13]. http://news.xinhuanet.com/mil/2011-12/13/c_122414555.htm 2011.