

基于 Vega 的某凝视型红外热成像系统仿真研究

严文科 何永强 董伟

(中国人民解放军军械工程学院光学与电子工程系, 石家庄 050003)

摘要 基于 Vega 软件的红外仿真模块, 结合凝视型热成像系统的具体成像原理, 介绍了红外仿真的基本思路, 分析了 SensorWorks 模块的理论基础, 把模块模型分解为调制传递函数模型和噪声模型; 给出了具体的仿真结果。

关键词 凝视型红外热成像系统 SensorWorks 模块 调制传递函数模型 噪声模型

中图分类号 TP391.9; **文献标志码** A

凝视型热成像系统具有把系统的热灵敏度提高到单元探测器的 $(n_H n_V)^{1/2}$ 倍, 最大限度地发挥探测器快速响应特性的优点^[1], 因此被广泛用于夜间观察、搜索跟踪、测试测量等方面。该系统的核心部件就是凝视型红外焦平面阵列。结合光学系统的结构和红外热辐射的基本原理, 建立了辐射传输模型和光学系统模型, 采用了 Multigen 公司的 Multigen Vega 软件中的红外传感器仿真模块 SensorVision 和 SensorWorks, 重点研究该红外成像系统的仿真成像。

1 目标和环境辐射特性建立

SensorVision 模块通过确定大气状态、大气窗口、背景反射、太阳/月亮的反射、路径传输等要素来建立目标和背景的红外热辐射模型。

1.1 建立大气传输数据库

Vega 软件提供一个大气数据库工具 MAT(MO-SART), 它能根据经纬度、季节、时间、气象条件、观察角度、观察高度等要素来生成各种材料在设定条件下的辐射特性曲线。

1.2 为场景分配材料

纹理材料映射工具(TMM)提供了一种为纹理

创建材料映射的方法。通过该工具为目标和背景分配不同的材料, 使它们具有不同的红外辐射特性。

1.3 预生成红外辐射纹理

根据 SensorVision 模块的辐射等式

$$L_{\text{apparent}} = L_{\text{ambient}} R_{EF} T_{\text{path}} + L_{\text{direct}} \cos(\theta) \times R_{EF} (1 - f_{\text{rac}}) T_{\text{path}} + L_{\text{direct}} f_{\text{ang}} R_{EF} n_{\text{orm}} f_{\text{rac}} T_{\text{path}} + L_{\text{thermal}} (1 - R_{EF}) T_{\text{path}} + L'_{\text{path}} (1 - T_{\text{path}}) \quad (1)$$

L_{apparent} 为观察点处的辐射, L_{ambient} 为天空背景辐射, L_{direct} 为日/月辐射, L_{thermal} 为黑体表面辐射, L'_{path} 为大气路径辐射, T_{path} 为大气路径传输比, R_{EF} 为表面材料反射系数; $\cos(\theta)$ 为日/月高度角的余弦, f_{rac} 为日/月辐射中的镜面反射, f_{ang} 为镜面反射角, n_{orm} 为镜面反射因子。

通过 Sptexgen 工具可以离线生成红外辐射纹理, 在仿真过程中可直接调用, 从而节约系统的内存。

2 热成像系统模型建立

2.1 调制传递函数模型

红外热成像系统包括光学系统、探测器和电子线路, 每个环节都有各自的信号调制传递函数, 系统总的调制传递函数就是各个环节调制传递函数的乘积^[2]。即

$$M_{TF_s} = \prod_{i=1}^n M_{TF_i} = M_{TF_o} M_{TF_d} M_{TF_e} \quad (2)$$

2009年8月14日收到

第一作者简介: 严文科(1985—), 男, 汉族, 河南省周口市人, 硕士研究生, 研究方向: 虚拟仪器技术与应用。

以该理论为基础结合 SensorWorks 模块,建立该红外热成像系统的 MTF 模型。

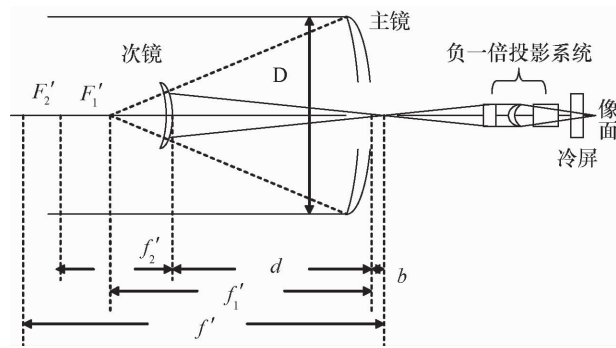


图1 光学系统结构图

2.1.1 光学系统调制传递函数模型(M_{TF_o})

该光学系统的结构形式为卡塞格伦系统和-1倍投影系统相结合的二次成像系统,-1倍投影系统有利于光学系统出瞳和热像仪冷屏的匹配。卡塞格伦系统是由两面反射镜组成,次镜为凸镜的双反射镜系统,次镜的横向放大率是负的,整个系统的焦距是正的。卡氏系统次镜挡光少,镜筒短,焦距长,象质好,因此在红外成像系统中得到广泛的应用^[3,4]。但是卡氏系统所成的像为倒像,所以要加一个-1倍投影系统进行矫正。

从 SensorWorks 模块面板中可以看到和光学系统相关的要素有光学透射比、离焦量、阿贝模糊和贝塞尔数。已知光学系统的焦距 f' 、相对孔径 D/f' 、通光口径 D 、空间频率 f 和工作波长 λ ($3\ \mu\text{m} \sim 5\ \mu\text{m}$),通光口径为毫米级,而探测的波长微米级,所以该光学系统为衍射限制系统,可得出空间截止频率

$$f_c = D_0/\lambda = 2D_0/(\lambda_1 + \lambda_2) \quad (3)$$

根据已知条件可得光学系统的调制传递函数

$$\begin{aligned} M_{TF_o} = M_{TF_{ol}} &= \frac{2}{\pi} \left\{ \arccos \left(\frac{f}{f_c} \right) - \left(\frac{f}{f_c} \right) \left[1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} = \\ &= \frac{2}{\pi} \left\{ \arccos \left[\frac{f(\lambda_1 + \lambda_2)}{2D_0} \right] - \left[\frac{f(\lambda_1 + \lambda_2)}{2D_0} \right] \times \right. \\ &\quad \left. \left\{ 1 - \left[\frac{f(\lambda_1 + \lambda_2)}{2D_0} \right]^2 \right\}^{1/2} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

$M_{TF_{ol}}$ —衍射受限光学系统调制传递函数。

2.1.2 探测器的光学传递函数(MTF_d)

与探测器相关的 SensorWorks 参数有像元数、探测器类型、帧频、像元尺寸、对向角(D_{AS})、探测偏差和过扫比(O_{SR})。

设焦平面面积为 $A_D = a \times b$,视场角 $2\omega = \omega_x \times \omega_y$ ^[5],根据视场角和焦距、探测器大小的关系得:

$$\left. \begin{aligned} \tan \frac{\omega_x}{2} &= a/(2f') \\ \tan \frac{\omega_y}{2} &= b/(2f') \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} a &= \tan \frac{\omega_x}{2} \times 2f' \\ b &= \tan \frac{\omega_y}{2} \times 2f' \end{aligned} \right\} \Rightarrow A_D。$$

则: $\alpha_x = \frac{a}{m}f'$, $\alpha_y = \frac{b}{n}f'$ 得到横向对向角 $D_{AS}(x)$ 和纵向对向角 $D_{AS}(y)$ 。因为凝视型焦平面探测器取消了光机扫描,而采用光子扫描,所以可以把它等效为一个单元探测器来求解调制传递函数。

(1) 探测器的空间滤波传递函数($M_{TF_{ds}}$)

空间滤波传递函数分为水平方向和垂直方向。对于水平方向的传递函数已知探测器面积 $a \times b$,空间张角 ω_x, ω_y 。由图1可以看出,该光学系统可以等效为一个透镜,因为系统探测目标距离与焦距相比可以看做无穷远,且图像充满视场,因此可以看做是平行光入射的透镜系统,而光瞳则是探测器的大小,可得到探测器的空间角频率为:

$$\varphi_x = x/\lambda = a/\lambda, \varphi_y = y/\lambda = b/\lambda$$

则探测器的空间滤波传递函数为

$$M_{TF_{ds}} = M_{TF_{dx}} M_{TF_{dy}} = \text{sinc}(\pi \alpha \varphi_x) \text{sinc}(\pi \beta \varphi_y) \times \text{sinc}(\pi \varphi_y/f_{Ny}) \quad (5)$$

$$\text{式(5)中} \quad f_{Ny} = O_{SR}/\beta \quad (6)$$

(2) 探测器的时间滤波传递函数($M_{TF_{dt}}$)

探测器可以等效为一个RC一阶低通滤波器^[1],其时间滤波传递函数为: $M_{TF_{dt}} = 1/[1 + (f/f_0)^2]^{1/2}$, f_0 为空间频率的3 dB 频率。

因此,探测器的调制传递函数为:

$$M_{TF_d} = M_{TF_{ds}} M_{TF_{dt}} \quad (7)$$

2.1.3 电子线路的传递函数(M_{TF_e})

和电子线路传递函数相关的 SensorWorks 参数有数模转换增益(A/D Gain)。已知处理因子大小为 δ ,数模转换增益为 K ,由于无法取得探测器公司

的资料,在此把电子线路等效为一个放大器,则电子线路的传递函数可等效为一个增益,即: $M_{TF_e} = K$ 。

2.2 噪声模型

对于红外探测器来说,噪声等效温差(N_{ETD})是评价系统性能的一个重要的和噪声相关的性能参数,结合 SensorWorks 模块中的过程因子(Proc Factor)、比探测率(D^*)、噪声因子(Noise Factor)和空间时间噪声比(Spat/Temp)来综合分析。

Lloyd 推导出在假设目标和背景均是黑体、探测器在整个光敏面上的响应率一致^[6]、探测器的比探测率只是探测器自身的一个参数而与 N_{ETD} 中的其它参数无关、目标和系统间的大气透过损失忽略不计、电子处理线路不产生附加噪声条件下,采用光子探测器的热成像系统的 N_{ETD} 表达式为:

$$N_{ETD} = \frac{\pi \sqrt{A_d \Delta f_R} T^2}{A_0 \alpha \beta \tau_0 c_2 D_0^* \int_{\lambda_1}^{\lambda} \frac{M_\lambda}{\lambda} d\lambda} \quad (8)$$

式(8)中 A_0 为光学系统的有效入射孔径; α, β 为系统在水平和垂直方向的瞬时视场的平面角; τ_0 为光学系统的光谱透射比; D^* 为光学系统的比探测率; A_d 为探测器的有效面积; Δf_R 为噪声等效带宽; c_2 为第二辐射常数, $1.488 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

该公式成立的条件只有在实验室中才能满足,而实际上目标和背景一般都是灰体,其辐射率不同且均不为 1;目标和系统间的大气损失不能忽略不计。所以要对噪声等效温差的表达式进行修正。已知过程因子 δ 、噪声因子 ζ 和附加空间噪声与随机时间噪声之比 γ ,设目标和背景的辐射率分别为 ε_T 和 ε_B ,大气光谱透射比为 τ_a ,根据噪声等效温差的定义可得:

$$N_{ETD} = \frac{\Delta T}{V_s / V_n} \quad (9)$$

式(9)中

$$V_s = \Delta \varphi_\lambda R;$$

$$V_n = \left[\int_0^\infty s'(f) M_{TF_e} df \right]^{1/2}。$$

其中 R 为探测器的响应度; $\Delta \varphi_\lambda$ 为目标与背景的单色辐射通量差; $s'(f)$ 为系统噪声功率谱; M_{TF_e} 为电子滤波器的传递函数。

因为

$$\Delta \varphi_\lambda = \frac{D_0^2}{4} \alpha \beta \delta \tau_a \tau_0 [\varepsilon_T M_\lambda(T_T) - \varepsilon_B M_\lambda(T_B)]。$$

所以

$$V_s = \frac{D_0^2 V_n D^*}{4 \sqrt{A_d \Delta f}} \alpha \beta \delta \tau_a \tau_0 [\varepsilon_T M_\lambda(T_T) - \varepsilon_B M_\lambda(T_B)]。$$

当 T_T 和 T_B 相差不大时,可以用微分来代替差分,求得噪声等效温差的最终表达式为

$$N_{ETD} = [\pi \sqrt{A_d \Delta f_R} (T_T - T_B)] \times \left\{ A_0 \alpha \beta \tau_0 D_0^* \left[\frac{c_2 \varepsilon_B (T_T - T_B)}{T^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda} \frac{M_\lambda}{\lambda} d\lambda + (\varepsilon_T - \varepsilon_B) \int_{\lambda_1}^{\lambda} M_\lambda d\lambda \right] \right\}^{-1} \quad (10)$$

当 $T_T > T_B$ 时, $\varepsilon_B M_\lambda(T_B) \ll \varepsilon_T M_\lambda(T_T)$,所以 $\varepsilon_B M_\lambda(T_B)$ 可以忽略,求得噪声等效温差的最终表达式为:

$$N_{ETD} = \frac{\pi \sqrt{A_d \Delta f_R} T^2}{A_0 \alpha \beta \tau_0 \tau_a \delta \varepsilon_T c_2 D_0^* \int_{\lambda_1}^{\lambda} \frac{M_\lambda}{\lambda} d\lambda} \quad (11)$$

3 结果和分析

取得仿真视景中的一幅图像,根据 SensorVision 辐射等式求得其在观察点处的辐射 L_{apparent} ,并根据其温度场分布和材质的辐射特性得出辐射场分布图如图 2。图 2、图 3 分别是未经过成像系统和经成像系统成像后的热辐射分布图,图 4 为仿真效果图。可以看出二者的热辐射分布规律是一致的。

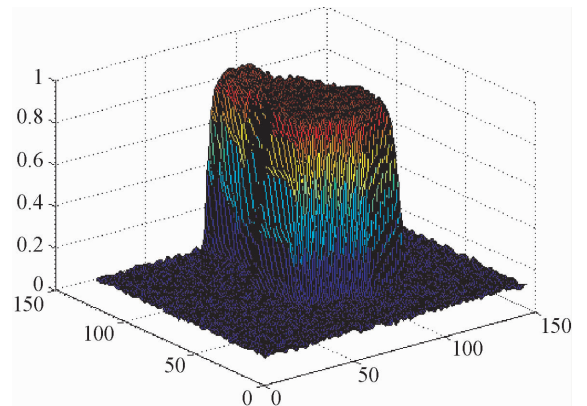


图2 辐射分布图

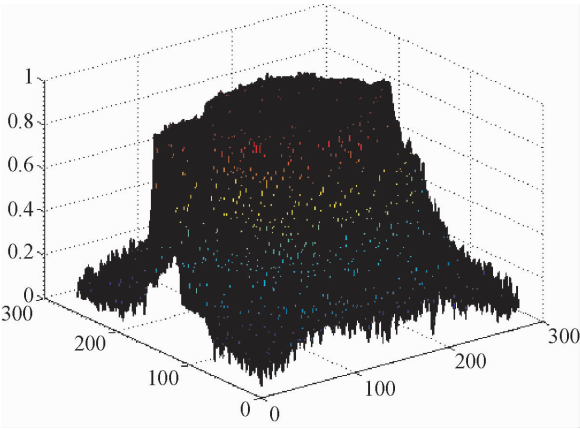


图 3 仿真图像辐射分布图

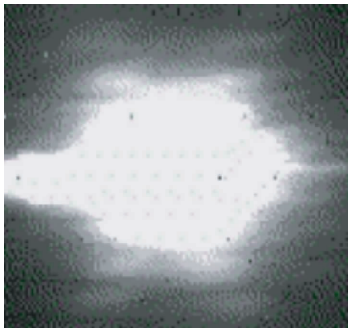


图 4 仿真效果图

从仿真效果图可以看出,仿真的结果和实际情况还有一定的差距,为进一步提高仿真的逼真度,要全面考虑实际中的各种因素,诸如:白噪声、边缘修正、雪花、光晕等。还可考虑结合图像处理算法,提高仿真的可信度。

参 考 文 献

- 1 张敬贤,李玉丹,全伟其. 微光与红外成像技术. 北京:北京理工大学出版社,1995:226—245
- 2 范宏波,唐 麟,潘顺臣. 采用热向系统 MTF(调制传递函数)建立虚拟热像仪的研究. 红外技术,2007;29(2):99—101
- 3 张幼文. 红外光学工程. 上海:上海科学技术出版社,1981:240—248
- 4 李 刚,张恒金,徐沛尧. 红外 R-C 光学系统设计. 红外技术,2004;26(2):60—63
- 5 虞 红,杨召伟,徐沛尧. 红外场景测角系统. 红外与激光工程,2008;37:578—581

Research on Simulation of an Starring Thermal
Infrared Imaging System Based on Vega

YAN Wen-ke, HE Yong-qiang, DONG Wei

(Optics and Electronic Engineering Department of Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, P. R. China)

[Abstract] Based on infrared simulation module of Vega software, the thought of infrared simulation is introduced, combined with the concrete theory on imaging of starring thermal imaging system. The foundation of theory about SensorWorks module is analyzed, and the model of module is divided into MTF model and nosie model. The concrete result of simulation is displayed.

[Key words] starring infrared thermal imaging system SensorWorks module MTF model nosie mode