

文章编号: 1672-8785(2009)09-0041-05

基于图像合成的红外点目标图像生成方法研究

张 建 官伏安

(91404 部队 93 分队, 河北秦皇岛 066001)

摘 要: 本文提出了一种红外图像仿真方法。首先对目标在探测波段内的辐射强度的组成和光谱分布特点进行了分析, 并对目标的辐射强度、光谱分布和运动等特征量进行了模拟。然后根据大气和成像系统的调制传递函数建立了相应的大气效应模型和成像系统效应模型。最后根据红外成像原理并结合探测器参数, 将目标的仿真模型与实拍的背景红外图像通过图像合成算法进行融合, 从而实现了目标与场景的快速生成。该方法通过理论数据和实验数据的结合, 提高了场景的可靠性, 对于测试和评价红外搜索跟踪系统具有一定的参考价值。

关键词: 红外图像; 点目标; 仿真模型; 图像合成

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A

Research on Method for Generating Images of Dynamic Infrared Point Targets Based on Image Synthesis

ZHANG Jian, GONG Fu-an

(91404 Unit of the CPLA, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: An infrared image simulation method is proposed. First, the radiation intensity and spectral distribution of a target in the detection waveband are analyzed and simulated. Then, the corresponding atmospheric effect model and imaging system effect model are established according to the modulation transfer functions of the atmosphere and the imaging system. Finally, in accordance with the infrared imaging principle and the detection parameters, the simulation model of the target is fused with the infrared image of the real background by using the image synthesis algorithm. Thus, the images of the target and scene are fast generated. The reliability of the scene is improved by combining the theoretical data with the experimental data. The method is of reference value to the testing and evaluation of an infrared search and track system.

Key words: infrared image; image simulation; simulation model; image synthesis

1 引言

20 世纪 70 年代以来, 国外已研制生产了多种型号的红外搜索跟踪系统, 并使用所研制的样机对目标进行了探测, 这是检验系统性能、改

进系统设计的重要手段。然而, 采用实弹射击方法进行性能检验极不方便, 由此人们对红外仿真的要求也就越来越迫切, 这是因为仿真技术可以降低武器系统研制成本、缩短研制周期和

收稿日期: 2009-03-24

作者简介: 张建 (1979-), 男, 云南曲靖人, 硕士, 主要从事光电对抗方面的研究。757483273@qq.com

提高效费比。

在检验红外搜索跟踪系统的反应时间、多目标处理性能、目标提取能力、目标跟踪算法等性能指标时,系统针对的是远距离点目标。它根据掠海导弹头向的红外特性,将计算机模拟生成的导弹红外点目标与实拍的背景进行合成,然后对红外搜索跟踪系统的反应时间、多目标处理性能、目标提取能力、目标跟踪算法等技术指标进行检验,这种方法具有重复性强、实施方便、费用低等优点。

2 技术实现方法分析

该系统首先用被试系统通过实验采集背景热图,然后根据红外成像原理并结合探测器参数,采用计算机模拟生成目标的红外辐射热图,这就能通过图像合成算法实现目标与环境场景的快速生成。该方法通过理论数据和实验数据的结合,提高了场景的可靠性。

该系统主要由仿真计算机、仿真软件、接口插卡、信号缆线等组成。系统中的仿真计算机是通过信号缆线与红外搜索跟踪系统的潜在目标提取单元相连。首先在仿真计算机上运行仿真软件,仿真开始后,每完成一帧合成图像,该图像就通过仿真计算机 I/O 口从内存中传送到专用接口插卡上,同时也通过 I/O 在专用接口插卡上产生与真实红外传感器输出相类似的同步控制信号。然后数据信号和同步控制信号在专用接口插卡上经过电平转换,再通过信号缆线注

入到红外搜索跟踪系统目标提取单元的传感器信号输入接口。仿真系统工作时的组成框图如图 1 所示。

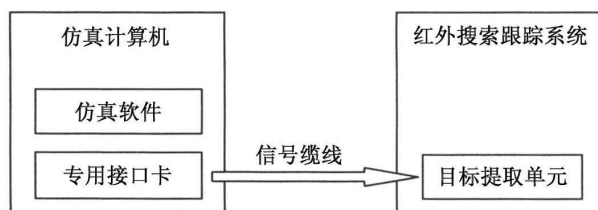


图 1 仿真系统组成框图

场景生成流程如图 2 所示。首先由人工输入目标的各项参数,模拟生成目标的辐射强度,再通过大气衰减模型及成像系统效应模型,得出目标辐射亮度的最大值和最小值;然后将实拍的背景红外图像依据其灰度值转换为辐射亮度值并求出最大值和最小值;接着结合目标和背景的最大值及最小值分别对目标和背景进行灰度量化;最后将目标嵌入背景中生成合成图像,然后将该合成图像通过计算机 I/O 送往接口卡,并由接口卡注入到红外搜索跟踪系统的目标提取单元。

3 目标仿真模型

3.1 模拟原理

当红外搜索跟踪系统对点源目标进行搜索探测时,目标辐射强度大小、目标辐射强度光谱与大气光谱透过率及探测器光谱响应率的一致性都会对系统探测产生影响。系统在自动提取

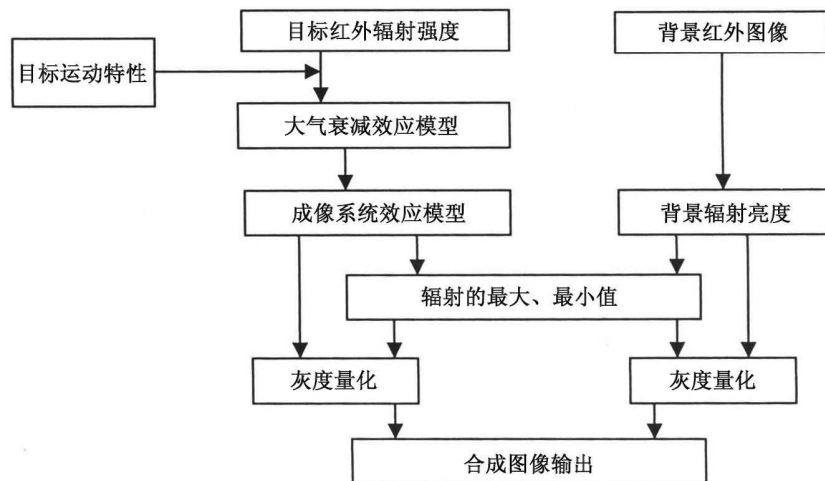


图 2 场景生成流程图

目标时,还需要考虑目标的运动特征。因此,有必要对目标的辐射强度、光谱和运动等特征量进行模拟,以使红外搜索跟踪系统获得与真实目标相同的目标信息。

3.2 特征量估计方法

对导弹头向在红外成像系统探测波段内的辐射强度进行模拟。导弹头向辐射强度主要由弹体气动加热辐射、羽烟辐射和对太阳、天空及地球的辐射反射等分量组成:

$$I_{t\Delta\lambda} = \int_{\Delta\lambda} [I_q(\lambda) + I_p(\lambda) + I_r(\lambda)] d\lambda \quad (1)$$

式中, $I_q(\lambda)$ 为气动加热光谱辐射强度,

$$I_q(\lambda) = \frac{M_q(\lambda)}{\pi} A_t$$

$$= \frac{\varepsilon(\lambda) C_1 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_s}\right) - 1 \right]^{-1}}{\pi} A_t \quad (2)$$

$I_p(\lambda)$ 为羽烟光谱辐射强度,

$$I_p(\lambda) = L(\lambda) A_p$$

$$= \sum_{i=1}^{i-\max} L_0(\lambda, T_i) [\tau_i(\lambda) - \tau_{i-1}(\lambda)] A_p \quad (3)$$

$I_r(\lambda)$ 为反射辐射光谱辐射强度,

$$I_r(\lambda) = \sum_{i=1}^N L_{surf}(\theta_r, \phi_r; \lambda)_i A_{ri} \quad (4)$$

导弹红外辐射的光谱特性可以用红外辐射强度的相对光谱分布表示,它与弹体及羽烟温度、弹体光谱反射率有关。由于弹体辐射、羽烟辐射和弹体反射的光谱分布不同,所以三类能量所占导弹辐射总能量的比例决定了导弹红外辐射的光谱分布。然而,三类能量所占比例是随观测角度而变化的,因此光谱特性是观测角度的函数。迎头观测时,羽烟发射、表皮发射和反射是主要成分。羽烟在中波波段有强辐射,而表皮发射和反射在长波波段较强,因此在总体辐射强度中,长波所占比例较大。

3.3 目标的运动特性

目标的运动特性是指目标在红外成像系统观测平面上的运动速度,也是目标运动速度在

观测平面上的投影,并与目标运动速度和观测角度有关。设导弹为匀速直线运动,则有:

目标初始直角坐标:

$$\begin{cases} x_0 = d_0 \sin \alpha_0 \\ y_0 = d_0 \sin \alpha_0 \\ z_0 = d_0 \tan \beta_0 \end{cases} \quad (5)$$

目标速度的三维分量:

$$\begin{cases} v_x = v \cos \alpha_v \sin \beta_v \\ v_y = v \cos \alpha_v \cos \beta_v \\ v_z = v \sin \alpha_v \end{cases} \quad (6)$$

目标 t 时刻的直角坐标:

$$\begin{cases} x_t = x_0 + tv_x \\ y_t = y_0 + tv_y \\ z_t = z_0 + tv_z \end{cases} \quad (7)$$

目标 t 时刻的水平距离:

$$d_t = \sqrt{x_t^2 + y_t^2} \quad (8)$$

目标 t 时刻的输出:

$$\text{目标方位角: } \alpha_t = \arctan(x_t/y_t) \quad (9)$$

$$\text{目标俯仰角: } \beta_t = \arctan(z_t/d_t) \quad (10)$$

$$\text{目标距离: } d_t = \sqrt{x_t^2 + y_t^2 + z_t^2} \quad (11)$$

式中, α_0 为目标初始方位角, β_0 为目标初始俯仰角, d_0 为目标初始水平距离, α_v 为目标速度矢量方位角, β_v 为目标速度矢量俯仰角, v 为目标速度。

3.4 大气衰减模型

在红外成像过程中,特别是在远距离进行成像时,大气湍流及大气中微粒的散射和吸收等作用会对成像产生十分重要的影响。因此在模拟点目标的红外成像过程中,要充分考虑大气的作用并对其效果进行模拟。实际的大气传输受到众多因素的制约,如地理位置、大气环境等,因此要找到一个任何气象环境条件下都适用的高精度模型是很困难的^[1]。

大气作用效果模拟的关键是确定大气调制传递函数,可将其近似为湍流和气溶胶调制传递函数之积。

湍流调制传递函数可以表示为^[2]

$$S_{MTF} = \exp \left\{ -57.53 v^{5/3} C_n^2(\lambda)^{-1/3} \right. \\ \left. \times R[1 - u(\lambda v/D)^{1/3}] \right\} \quad (12)$$

式中, S_{MTF} 为短时间曝光时的湍流调制传递函数, u 为经验系数(在近距离时取 1, 远距离时取 0.5), D 为成像器孔径, v 为角空间频率, C_n 为折射率结构系数(采用美国陆军夜视实验室提出的计算模型), λ 为辐射光波波长, R 是传输路径长度。

典型的气溶胶调制传递函数近似模型为^[3]

$$A_{MTF}(v) = \begin{cases} \exp[-A_a R - S R(v/v_c)^2], & v \leq v_c \\ \exp[-(A_a + S_a)R], & v > v_c \end{cases} \quad (13)$$

式中, S_a 与 A_a 分别为气溶胶的散射和吸收系数, v_c 为截止频率($v_c = \alpha/\lambda$), α 为气溶胶半径。在一般的大气条件下, v_c 相当小, 此时气溶胶的调制传递函数 A_{MTF} 常被认为是常系数衰减。

3.5 成像系统效应的建模

目标/背景的辐射分布经过成像系统的空间调制变换, 就形成了热红外图像。因此建立有效的成像系统效应模型已成为红外图像仿真研究的重要内容。

光学传递函数(OTF)是评价光学成像系统分辨率空间传递特性的特征函数。它从频域出发, 反映了光学系统对物空间频率含量的复现本领。光学传递函数由调制传递函数(MTF)和相位传递函数(PTF)组成。对于非相干光成像系统, 由于景物之间没有固定的相位关系, 所以只需要考虑调制传递函数即可。

在实现成像系统的空间传递效应时, 首先对场景的辐射亮度分布图进行傅里叶变换, 将得到的频谱图与系统各模块的调制传递函数相

乘, 然后作傅里叶反变换。这样便可得到经过成像系统各子模块作用后的辐射亮度分布图。红外成像系统效应仿真流程如图 3 所示。

在近似满足线性不变系统的条件下, 系统的总体函数等于各环节函数的乘积。这样, 系统的总调制传递函数就是各个组成单元的调制传递函数的乘积, 因此红外成像系统的总体调制传递函数 MTF_{sys} 可以表示为

$$MTF_{sys}(f) = MTF_o(f) \times MTF_d(f) \times MTF_e(f) \quad (14)$$

式中, $MTF_o(f)$ 、 $MTF_d(f)$ 、 $MTF_e(f)$ 分别为光学系统、探测器、信号处理系统的调制传递函数。

对于一个无遮拦的圆形衍射限孔径, 用单色光照射时, 光学系统的调制传递函数为^[4]

$$MTF_o(f) = \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{f}{f_c}\right) - \frac{f}{f_c} \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \right], \quad \frac{f}{f_c} \leq 1 \quad (15)$$

式中, f 为频率, 截止频率 $f_c = \frac{D_0}{\lambda}$, 它与平均波长和光学镜头数有关。当 $f > f_c$ 时, 上式为零。

非相干多色光学调制传递函数是每个成分波长处的光学传递函数的归一化加权的积分, 但 Gafni 等人^[5]指出, 在红外应用中, 多色方程经常是可以单色方程来近似的, 当波长取中心波长时, 空间频率远低于截止频率。

探测器的调制传递函数为

$$MTF_d(f) = \frac{\sin(\pi f W)}{\pi f W} \quad (16)$$

式中, f 为频率, W 为红外 CCD 单个探测元的宽度或长度。

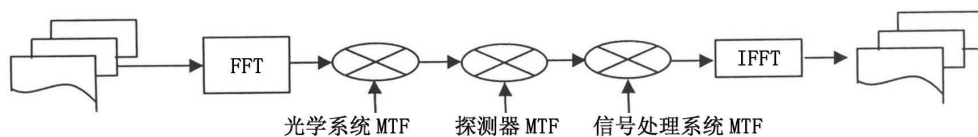


图 3 成像系统效应仿真的流程图

一个电路网络的传递函数定义为输出端电压的拉普拉斯变换与输入端电压的拉普拉斯变换之比, 其具体的值要视电路网络而定。在红外系统中, 最关键的是前置放大器, 它常常可以等效成一个 RC 低通滤波器。对于低通滤波器, 它的传递函数为

$$MTF_{eL}(f) = \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}$$

当用在诸如焦平面读出电路中的电荷传输器件、时间-延迟和积分电路、模拟存储器具有非 1 的电荷传输效率时, 其传递函数为

$$MTF_e(f) = \exp \left\{ -m(1-\varepsilon) \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi f}{f_s} \right) \right] \right\} \quad (18)$$

式中, m 为从探测器到输出放大器的传输门数, ε 为每门的电荷传输效率, f_s 为结构的采样频率。

3.6 灰度量化

红外图像的成像机理是将红外探测器接收到的场景 (包括目标及背景) 的红外辐射亮度 L 线性量化成灰度图像像素值 $Gray_L$, 即:

$$Gray_L = \left(Gray_{L_{\max}} - Gray_{L_{\min}} \right) \times \frac{L - L_{s_{\min}}}{L_{s_{\max}} - L_{s_{\min}}} + Gray_{L_{\min}} \quad (19)$$

反变换就是将灰度图还原成辐射亮度图, 即:

$$L_{Gray} = \left(L_{Gray_{\max}} - L_{Gray_{\min}} \right) \times \frac{Gray - Gray_{\min}}{Gray_{\max} - Gray_{\min}} + L_{Gray_{\min}} \quad (20)$$

场景中某一部分的辐射亮度越大, 反映在图像中的该部分的灰度值就越高, 也就越亮。目标和背景均有一个唯一的映射, 它可用来表征灰度值与辐射亮度的对应关系。如果目标和背景的量化不一样, 那么图像合成将会由于量化的缘故而造成结果图片不能正确表征结果物理信息。所以在进行图片合成之前要保证目标图片和背景图片的量化关系达到统一。

(1) 背景图像预处理。由于背景是实测的红外辐射热图, 先按式 (20) 还原背景数据, 即计算出背景中每个像素对应的辐射亮度 (文中默认图像灰度范围均为 $Gray_{L_{\max}} = 255$, $Gray_{L_{\min}} = 0$)。

(2) 统一量化关系, 校正辐射亮度形成图像。其中, 对应目标辐射亮度的最大 (小) 值是 $L_{O_{\max}} (L_{O_{\min}})$, 对应背景辐射亮度的最大 (小) 值是 $L_{B_{\max}} (L_{B_{\min}})$ 。那么合成后场景的辐射亮度的范围是:

$$L_{S_{\max}} = \max (L_{O_{\max}}, L_{B_{\max}})$$

$$L_{S_{\min}} = \min (L_{O_{\min}}, L_{B_{\min}})$$

根据式 (19)、场景参数以及 $L_{S_{\min}}$ 和 $L_{S_{\max}}$ 来量化目标和背景的红外辐射图像。

3.7 图像合成

在进行目标与图像合成时, 首先计算目标的运动信息, 得出目标在背景图像中的座标点, 然后将背景中该像素点的灰度值替换为目标灰度值, 从而完成目标与背景图像的合成。

4 结论

通过将目标的理论建模与试验采集的背景图像相结合, 利用数字图像处理技术和红外辐射相关知识, 可产生多批次红外目标和背景图像。这种方法可以用于测试红外搜索跟踪系统的反应时间、多目标处理性能、目标提取能力、目标跟踪算法等技术指标, 而且具有较强的针对性和实用性。

参考文献

- [1] 吴晗平. 红外辐射大气透过率的工程理论计算方法研究 [J]. 光学精密工程, 1998, 6(4): 35-43.
- [2] K Krapels, R G Driggers, R H Vollmerhausen, et al. Atmospheric turbulence modulation transger function for infrared target acquisition modeling [J]. Optical Engineering, 2001, 40(9): 1906-1913.
- [3] R Melamed, Y Yitzhaky, N S Kopeika, et al. Experimental comparison of three target acquisition models [J]. 1998, 37(7): 1902-1913.
- [4] Birch KG, Marchant AC. Intercomparison of calculated and measured optical transfer function (OTF) for a standard triplet lens [J]. ASSESSMENT OF IMAG. SYS.: VISIBLE & INFRARED., 1981, 274: 52-59.
- [5] G Gafni, M Azoulay, C Shiloh, et al. Large diameter germanium single Crystals for infrared optics [J]. Optical Engineering, 1989, 28(9): 1003-1008.