

文章编号:1007-2780(2016)04-0399-05

红外系统小目标成像自动调光方法

张 涛*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要:提出了一种实时调整红外相机积分时间的方法。针对成像为点目标且灰度值变化剧烈的情况,为保证红外辐射特性测量的精度,标定了相机在不同积分时间下亮度与成像灰度值的对应关系,确定了红外相机响应关系线性度较好的区域;提出了点目标弥散范围的计算方法,并对红外系统的模拟图像和真实图像进行匹配获得最优化估计的目标位置、尺寸以获取目标的所有灰度值,而后根据亮度与灰度的关系对积分时间进行调整。实验结果证明,可同时调整两个不同红外相机的积分时间以保证灰度值处于理想区间内,调整频率可达 25 Hz,满足高速飞行器试验的实时性要求。

关 键 词:红外相机;辐射特性测量;小目标测量;积分时

中图分类号:TP732.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163104.0399

Method of auto light control for small target in infrared system

ZHANG Tao*

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Science, Changchun 13003, China*)

Abstract: A measurement method for real-time adjusting integer time of infrared camera is proposed. Since the image of target is a point and the gray value is verified severely, the relationship between light and gray values in different integer times is calibrated for the precision of radiation measurement and the linear curve of response is fitted. Then the algorithm for the diffuse image spot of target in the detector is proposed. Furthermore, the size and central position of the target are estimated accurately by matching the simulated image and the actual image obtained from the IR imaging system. The total gray value is got and the integer time is adjusted based on the relationship between light and gray value. The experiment result shows that the integer time of two different cameras is adjusted, the gray value is in the linear region and the frequency is 25 Hz and the real-time request in the high speed air vehicle is met.

Key words: infrared camera; radiation measurement; small target measurement; integer time

1 引言

目标红外辐射特性测量是获取目标表面温度分布信息、探测识别红外目标和评价目标红外隐身效果的基础技术和重要手段^[1-2]。

根据在红外探测器上的成像大小,红外目标可分为面目标和点目标^[3](理想几何成像面积不足 1 个像元)两类。在传统的辐射特性测量中,受条件限制,一般将辐射特性测量系统布置在距离目标较近的位置,将目标视为扩展源,此时目标灰度值变化不剧烈。而随着目标向小型化、快速化发展,目标特性日趋复杂,成像为点目标的情况和灰度值变化剧烈的情况越来越多,在捕获阶段使进光量尽可能大,有利于及时发现目标,在目标灰度值变化剧烈的阶段及时调整进光量,使目标成像灰度值处于相机响应线性度良好的区域内,以保证测量精度。因此如何根据目标特性及时调整探测器的积分时间和中性滤光片就有了重要意义。

2 目标的弥散分析

目标在探测器靶面上成像为一弥散斑,即艾里斑,其线直径为:

$$\delta l=f'\cdot \Delta \theta=2.44\frac{\lambda f'}{D}=2.44\lambda F\text{ , }\quad (1)$$

其中: f' 为光学系统焦距, $\Delta \theta$ 为艾里斑的角直径, D 为光学系统口径, F 为光学系统相对孔径^[4]。

由此可知,对于典型的 F 数为 2,焦距为 800 mm 的光学系统,采用像元数为 320×256 ,单个像元尺寸为 $15\text{ }\mu\text{m}$ 的探测器,对 100 km 距离,直径为 5 m 的目标,其理论成像大小为 $40\text{ }\mu\text{m}$,约合 2.5×2.5 个像元,而根据式(1)计算,此时弥散斑的直径为不小于 $35\text{ }\mu\text{m}$,基本上目标已经全部弥散,可以满足探测需要但已经无法分辨细节,若目标距离为 50 km,同样的目标理论成像大小为 $80\text{ }\mu\text{m}$,即 5.5×5.5 个像元,同样无法满足美国工程光学学会(SPIE)^[5]对于扩展源目标的定义(9×9 个像元以上)。可见对于此典型目标,需要按照点目标方法进行处理。

点目标成像的特点有:灰度峰值比扩展源目标的峰值要低,而且目标尺寸越小,峰值越低。同

时目标成像边缘模糊,光斑的直径大于理想的几何成像计算结果,目标成像能量会扩散到周围的像元,仅计算单个像元灰度值不能反映目标的真实能量。但本文将亮度与此类点目标的亮度相等,并且处于同一位置的扩展源成像的像素灰度值称为点目标成像的等效灰度值,因此获得了这个等效灰度值后可以直接应用扩展源的测量方法进行点目标的辐射亮度测量。

3 红外相机积分时间调整算法

3.1 红外相机响应与饱和分析

对于使用的中波相机,其积分时间共 8 档,从长至短分别为 5.5 ms、5 ms、4 ms、3 ms、2.5 ms、0.8 ms、0.3 ms、0.1 ms,对其进行标定,将相机放置于面源黑体前,使整个相机成像均匀,而后不断升温黑体,并使用各档积分时间,计算整幅图像的平均灰度值,得到亮度和灰度值曲线如图 1 所示,图中横坐标数值为黑体的辐射亮度,纵坐标为相机成像灰度值,试验中所使用的相机为 14 位,则其灰度值范围为 0~16 383。

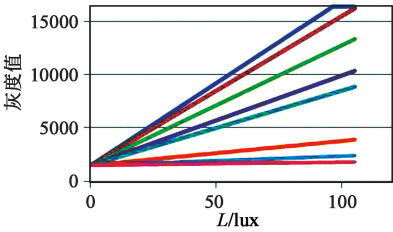


图 1 不同积分时间下的亮度和灰度值关系

Fig. 1 Relationship between light and gray value in different integer times

由图可见,在不同积分时间下,相机的响应都是线性的,而且其响应曲线斜率之比与积分时间之比相等,可为积分时间调整提供参考依据。

虽然相机响应区间在 0~16 383,但实际上在 3 000~12 000 内,其线性度最理想,所以调整积分时间时应保证其灰度值在此区间内。

3.2 积分时间调整算法

如前所述,对于的点目标成像,其弥散范围一般会大于 1 个像元,需要将目标弥散的能量累加,才是目标的真实能量^[6],因此需区分出目标弥散区域和背景,一幅典型的点目标成像图放大后如图 2 所示。



图2 点目标成像图

Fig. 2 Image of point target

图2为从 320×256 中截取了 45×45 的区域,图中矩形框范围内为目标弥散区域,矩形框与椭圆框之间为空气被目标加热区域,椭圆框之外为背景区域,考虑到标准正态分布中, 3σ 区域内覆盖了99%以上的能量,则以 3σ 为原则和最优化估计的方法判别目标弥散区域和背景区域之间的界限^[7-8],以及目标的整体等效灰度值,其步骤如下:

(1)遍历图像,取灰度值最大处 X, Y ,其灰度值为 G_h ,为防止遍历至坏元处,需结合坏元表将其剔除以保证该点为目标;

(2)以此点为中心,向上下左右四个方向延伸,以1个像元为步进单位,计算区域内所有像元灰度值的标准差 σ ;

(3)若某个方向上某像元灰度值 $G < G_h - 3\sigma$,则认为该像元为目标弥散区域和背景区域的边界;

(4)重复2、3步骤,求出所有边界;

(5)统计边界内所有像元灰度值标准差,进行迭代,直至边界稳定^[9-10];

(6)以最优化估计,计算稳定边界内的灰度值之和,作为目标真实的能量响应;

(7)依据图1中各积分时间下响应曲线,调整积分时间至合适档位。

可以看出,以上步骤中,以最优化估计计算灰度值之和对目标真实能量响应影响最大。

3.3 最优化估计计算目标

根据图像退化模型^[11],如果将目标建模为一个很小的面源,那么其成像的时域能量分布可以建模为该系统的脉冲响应 $PSF(H)$ 和目标理想几何成像 f 的卷积,再经过数字化和阵列下采样过程最终得到灰度图。易知点目标模型的参数如下:目标中心位置 (x_0, y_0) ,目标尺寸 (d) ,则计算目标灰度就归结为参量 (x_0, y_0, d) 的最优化

估计。

首先,目标在探测器上的成像与其中心位置相关,如前所述点目标成像能量分布在多个像元中,目标的亚像素中心位置决定了采样过程和影响了目标的成像。

建模时,需要根据已知的目标形状建立一个设定尺寸的参考目标,目标的尺寸就可以表示为真实目标相对于参考目标的放大倍率。在探测器上建立平面直角坐标系,以探测器中心的像元为原点,单个像元尺寸为单位长度,设目标理想成像的位置在 (x_0, y_0) ,理想几何成像的能量分布函数为 $f(x-x_0, y-y_0)$,目标均匀且等效灰度值为 h_t ,背景均匀且灰度值为 h_b ,则PSF作用后目标成像能量分布为:

$$h(x-x_0, y-y_0) = (h_t - h_b) \times PSF \times f(x-x_0, y-y_0) + h_b. \quad (2)$$

对于中心坐标为 (X, Y) 的探测器像元而言,像元内的某点 (x, y) ,其接受能量为 $h(x-x_0, y-y_0)$,则该像元的所有接收能量为

$$g(X, Y) = \int_{Y-1/2}^{Y+1/2} \int_{X-1/2}^{X+1/2} h(x-x_0, y-y_0) dx dy. \quad (3)$$

得到最终成像的灰度值分布后,对于模糊模型,其待定参数为 (x_0, y_0, d) ,设定参数时,首先通过红外系统获得真实的图像灰度值分布 g_0 ,然后通过式(4):

$$\operatorname{argmin}_{x_0, y_0, d} \|g_0 - g\|, \quad (4)$$

进行参量的最优化估计。

整个最优化估计的过程为:首先以一定的步长改变目标中心位置和尺寸,然后以上述参量序列模拟目标图像,得到其成像的各像元灰度值,而后根据边界形成模拟的目标图像和灰度分布,将真实图像和模拟图像进行匹配,目标成像所有像元的模灰度值和真实灰度值之差即为误差,利用搜寻算法计算此误差的均方根最小时的模拟图像,即为目标真实图像的最佳匹配,那么这一模拟图像所对应的目标参数即为最优估计量。

4 实验结果

红外相机的数字图像接口为Camera-Link base,使用高性能工控机作为硬件平台,使用Teledyne Dalsa公司的双路数字图像采集卡同时

采集集中波红外和短波红外的图像,并同时处理,两个相机的分辨率均为 320×256 ,位数 14 位,单个像元尺寸 $15 \mu\text{m}$ 。采用 Visual Studio2010 作为软件开发平台,软件界面如图 3 所示。

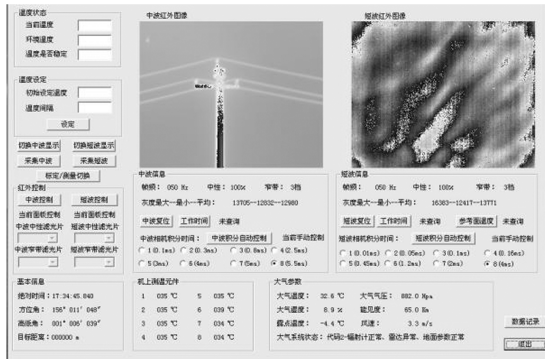


图 3 实时调光调光软件

Fig. 3 Software of real-time light adjusting

使用腔型黑体,调整其发射孔径,使其成像小于 9×9 个像元,而后不断升温黑体,使目标亮度逐渐增加,以 3.2 中所述策略计算合理积分时间并调整,成像图如图 4 所示,调整过程中亮度和灰度值关系如图 5 所示。

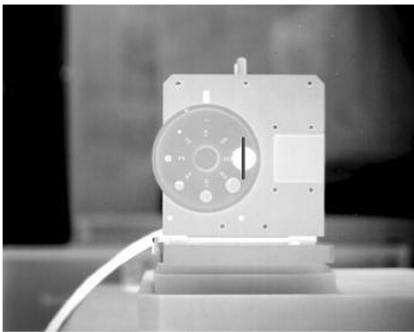


图 4 腔型黑体成像图

Fig. 4 Image of Cavity blackbody

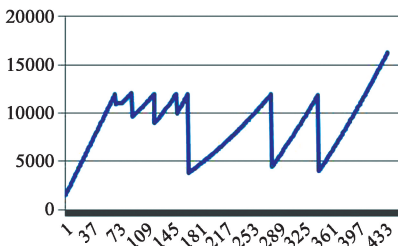


图 5 升温过程程亮度灰度值关系

Fig. 5 Relationship between light and gray value in the warming process

由图 5 可见,除最低档积分时间外,全过程目标灰度值均处于 4 800~12 000 之间,基本处于相机响应线性度较好的区域范围内,达到了预期效果,而在最低档积分时间下目标灰度值仍趋近于饱和的状态,则需要调整中性滤光片降低整体能量以防止目标灰度值过大。具体数据如表 1 所示。

表 1 升温过程各积分时间灰度值

Tab. 1 Gray value of different integer times in the warming process

积分 时间/ms	灰度 最大值	灰度 最小值	灰度 均值
5.5	12 001	2 000	6 893
5.0	12 000	10 076	11 203
4.0	12 000	8 974	10 202
3.0	12 000	7 530	9 404
2.5	12 000	10 000	9 158
0.8	12 000	4 800	7 840
0.3	12 000	4 974	7 495
0.1	16 383	4 745	9 076
全过程	--	--	8 549

类似的当黑体降温时,亮度减小,使用类似策略可调整积分时间增加,如图 6 所示,具体数据如表 2 所示。

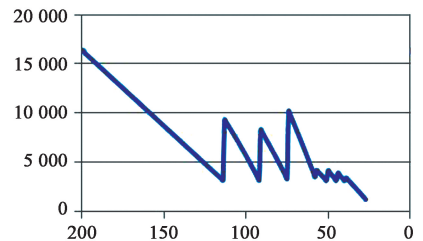


图 6 降温过程亮度灰度值关系

Fig. 6 Relationship between light and gray value in the cooling process

表 2 降温过程各积分时间灰度值

Tab.2 Gray value of different integer times
in the cooling process

积分 时间/ms	灰度 最大值	灰度 最小值	灰度 均值
0.1	16 383	4 294	9 847
0.3	9 703	4 309	7 492

续表

积分 时间/ms	灰度 最大值	灰度 最小值	灰度 均值
0.8	8 993	4 281	7 139
2.5	10 083	4 302	7 004
3.0	4 792	4 501	4 691
4.0	4 783	4 490	4 632
5.0	4 780	4 308	4 502
5.5	4 700	2 000	3 054
全过程	--	--	7 542

由以上可见,类似的算法同样能使目标灰度

值保持在理想区间内,但当亮度已经很低时即使调高积分时间也无法保证目标亮度。

5 结 论

在红外系统对小目标成像时,计算目标的弥散范围确定其全部灰度值,而后通过事先标定的不同积分时间下目标亮度与响应灰度值的关系对积分时间进行调整,使小目标成像的灰度值始终处于理想线性范围内,以保证辐射特性测量的精度。算法运算量小,可在工控机平台上实现对两个红外相机进行 25 Hz 的实时调光控制,已经在飞行器试验中得到应用,效果良好。

参 考 文 献:

[1] 牟达,李全勇,董家宁.地基红外系统探测空间目标红外星等的分析[J]. 红外与激光工程,2011,40(9):1609-1613.
MU D, LI Q Y, DONG J N. Analysis on ground-based infrared detection system detecting the infrared magnitude of space targets[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1609-1613. (in Chinese)

[2] 李春来,王跃明,刘银年,等.空间目标红外辐射谱测量系统[J]. 红外与激光工程,2007,36(6):857-861.
LI C L, WANG Y M, LIU Y N, *et al.* Spectrum measurement system of infrared radiation for spatial object[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 857-861. (in Chinese)

[3] 张云峰.基于加权最小二乘法的红外辐射定标[J]. 液晶与显示,2012,27(6):832-836.
ZHANG Y F. Radiance Calibration based on weighted least square method[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(6): 832-836. (in Chinese)

[4] 郝允祥,陈增生,周克平.红外天文学导论[M]. 北京:北京大学出版社,1993.
HAO Y X, CHEN Z S, ZHOU K P. *Instruction of Infrared Astronomy*[M]. Beijing: Peking University Press, 1993. (in Chinese).

[5] ZHANG W, CONG M Y, WANG L P. Algorithms for optical weak small targets detection and tracking: review [C]. *Proceedings of the International Conference on Neural Networks & Signal Processing*, Nanjing, China: IEEE, 2013: 14-17.

[6] 郭明,王学伟.空间目标/星空背景红外建模与仿真[J]. 红外与激光工程,2010,39(3):400-404.
GUO M, WANG X W. IR modeling and simulation of space target/star and space environment[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 400-404. (in Chinese).

[7] 刘火平,孟维平,宋立维,等.红外序列图像中不均匀背景消除新方法[J]. 液晶与显示,2012,27(4):539-544.
LIU H P, MENG W P, SONG L W, *et al.* New method for eliminating non-uniformity background of IR images [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(4): 539-544. (in Chinese).

[8] TARTAKOVSKY A G, KLIGYS S, PETROV A. Adaptive sequential algorithms for detecting targets in a heavy IR clutter[C]. *Proceedings of Signal and Data Processing of Small Targets*, Denver, CO, USA: SPIE, 1999.

[9] ROSENFELDA, KAK A C. *Digital Picture Processing*[M]. 2nd ed. New York: Academy Press, 1982.

[10] 常松涛,孙志远,张尧禹,等.基于点扩散函数的小目标辐射测量[J]. 光学精密工程,2014,22(11):2799-2887.
CHANG S T, SUN Z Y, ZHANG Y Y, *et al.* Radiation measurement of small targets based on PSF[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(11): 2799-2887. (in Chinese)

[11] 靳永亮,王延杰,刘艳滢,等.红外弱小目标的分割预检测[J]. 光学精密工程,2012,20(1):171-178.
JIN Y L, WANG Y J, LIU Y Y, *et al.* Pre-detection method for small infrared target[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 171-178. (in Chinese)