

文章编号 1004-924X(2014)11-2879-09

基于点扩散函数的小目标辐射测量

常松涛^{1,2}, 孙志远¹, 张尧禹^{1*}, 朱 玮¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:提出了一种基于点扩散函数(PSF)精确测量尺寸很小或者距离很远的一类小目标的红外辐射特性的方法。该方法在已知目标几何形状的前提下,采用倾斜刃边法测得光学系统的点扩散函数;对目标成像和探测器焦平面阵列采样过程进行建模,得到目标在探测器上成像的模拟图像;通过对红外系统捕获的模拟图像与真实图像进行匹配获得最优化估计的目标亮度、尺寸以及中心位置。最后,通过实验对该方法进行了验证。结果显示:圆形目标温度为 70℃,理想几何成像直径大于 4 个像元时,测得的辐射亮度最大误差为 2.35%;目标尺寸(面积)最大误差为 1.89%。该方法可用于获取目标和背景辐射特性,测试红外成像系统性能,完成图像复原和小目标定位等。

关键词:红外辐射测量;小目标测量;红外焦平面阵列;点扩散函数;倾斜刃边法;最优化估计

中图分类号:TP732.2;TN215 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142211.2879

Radiation measurement of small targets based on PSF

CHANG Song-tao^{1,2}, SUN Zhi-yuan¹, ZHANG Yao-yu^{1*}, ZHU Wei¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
- * Corresponding author, E-mail: zhangyaoyu2013@sina.com

Abstract: A measurement algorithm based on Point Spread Function (PSF) was proposed to accurately measure radiation characteristics of infrared small targets which are tiny or quite far away from the IR imaging system. With the method, the PSF of the optical system was measured by using the slanted edge method under the premise of given target shapes. Then, the processes of imaging and sampling of the infrared focal plane arrays were modeled and the simulated image of the target on a detector was obtained. Furthermore, the radiance, size and center position of the target were estimated accurately by matching the simulated image and the actual image obtained from the IR imaging system. Finally, experiments were performed to verify this method. The obtained results show when the temperature of a circular target is 70 °C and the ideal imaging diameter is greater than 4 pixels, the maximum error of radiance measurement is 2.35% and that of the target size (area) measurement is 1.89%. The experimental results demonstrate that the method is feasible and is suitable for capturing radiation properties of targets or backgrounds, performance measurement of infrared systems, image

收稿日期:2013-09-25;修订日期:2013-10-24.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA121502)

restoration and small target positioning.

Key words: infrared radiation measurement; small target measurement; infrared focal plane array; point spread function; slanted edge method; optimal estimation

1 引言

目标红外辐射特性测量是获取目标表面辐射温度分布信息、探测识别红外目标和评价目标红外隐身效果的基础技术之一。根据在探测器焦平面阵列上成像的大小,红外目标一般分为扩展源和点源(理想几何成像面积不足一个像元的目标)两类^[1]。高精度的辐射测量通常采用热像仪(红外相机)实现。相比之下,广泛应用于工业上的便携式红外辐射计精度低,作用距离短(一般为几米到几十米),测量结果为视场范围内的辐射亮度均值,并且要求测量区域包含多个像元且灰度值均匀,因此实际上它只能用于测量扩展源,不能实现高精度的较小目标的辐射测量。在传统的辐射测量中,目标往往作为扩展源处理,因此只需要获得目标成像的像元灰度值、大气透过率、程辐射和目标表面的发射率就可以计算出目标表面的辐射亮度和温度^[2]。但是光学系统衍射和像差等因素会使得目标成像时到达探测器的能量发散,因此目标成像尺寸较小时红外图像的灰度值会降低,并且图像形态特征弱化,细节丧失,将其直接作为扩展源处理就会产生较大的误差。

实际上,在红外目标跟踪和探测中,所关注的目标成像面积往往很小,导致目标成像细节部分的信息很少,通常称之为小目标。美国工程光学学会(SPIE)将小目标定义为成像面积小于 80 个像元的目标,大约为 $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$ ^[3-4]。小目标的辐射特性测量主要关注辐射亮度,尺寸以及中心位置等参量。目前,关于小目标的研究主要集中在两方面:一是对小目标的检测和识别,其主要工作是利用合适的算法处理图像,以尽早发现和定位目标^[5-8];二是点源目标的辐射测量,其前提是必须已知目标理想的成像面积^[1]。但在实际辐射测量过程中,目标理想的成像面积是不可知的。

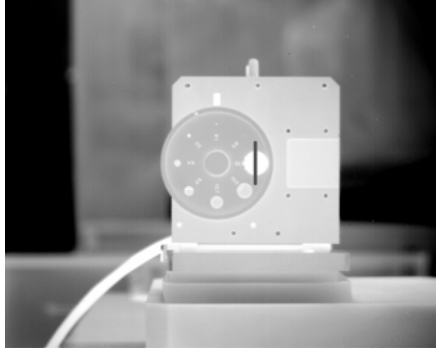
为解决小目标的辐射特性测量问题,本文提出了一种基于点扩散函数(Point Spread Function, PSF)的测量方法。该方法在已知目标形状的基础上建立成像模型,通过与实际目标图像的匹配来获得最优的辐射特性参数估计,由此得到目标的辐射亮度、尺寸以及中心位置。最后,通过多次实验验证了该方法的有效性。

2 红外小目标成像特征

通常,小目标是由于距离光学系统过远或者尺寸过小产生的,往往不能作为扩展源进行辐射特性测量。为了说明小目标的成像特征,本文利用 CI 公司的 SR-200LT 高温腔型黑体进行了实验。黑体温度为 $50 \text{ }^\circ\text{C}$, 出射口径通过靶轮调节,有 8 个档位,分别为 22.2, 15.9, 12.7, 9.5, 6.4, 3.2, 1.6 和 0.8 mm。红外相机的焦距为 50 mm, $f/\# = 2$ 。黑体距离相机 2.64 m 处清晰成像,如图 1(a)所示,作一条贯穿圆斑中心的直线,得到像元的输出灰度值(Digital Level, DL)随探测器像元位置的变化曲线,如图 1(b)所示,图中像元数表示圆孔理想的成像直径。

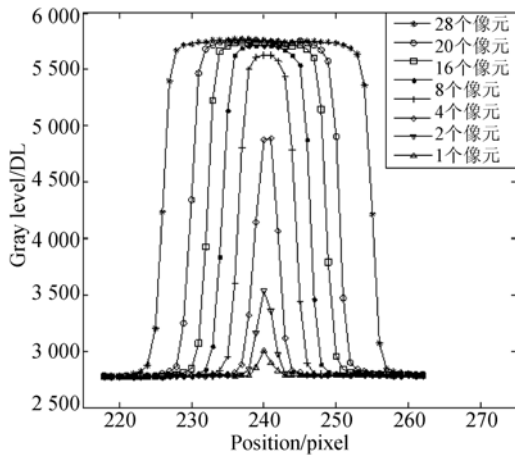
由图 1(b)可见,对于该红外成像系统,在圆孔的理想成像直径达到 12 个像元以上时,成像像元的灰度峰值接近,即认为黑体是扩展源。而在圆形目标的理想成像直径小于 8 个像元时,灰度峰值急剧下降,这时将黑体作为扩展源处理就会产生很大的误差。因此,小目标成像的特点有:灰度峰值比扩展源的峰值低,并且目标尺寸越小,峰值越低;目标成像边缘模糊,并且光斑直径大于理想几何成像,目标成像能量会扩散到附近的像元。为了测量这类小目标的辐射亮度,本文将亮度与小目标亮度相等,并且处于同一位置的扩展源成像的像元灰度值称为小目标成像的等效灰度值。因此,只要获得了这个等效灰度值,就可以直接应用扩展

源的测量方法进行小目标的辐射亮度测量。



(a) 2.64 m 处腔型黑体成像

(a) Image of cavity blackbody at distance of 2.64 m



(b) 探测器像元灰度值随位置的变化曲线

(b) Gray values of detector pixels versus positions

图 1 不同尺寸的圆形目标成像

Fig. 1 Image of circular targets with different sizes

3 小目标辐射特性测量的数学模型

3.1 目标图像退化模型

红外目标成像过程中,大气湍流、目标运动、光学系统像差、离焦、衍射和系统噪声等因素会导致图像模糊和变形,即图像退化^[9]。通过对入射到探测器上的目标能量进行采样和数字化可获得模糊数字图像^[10]。将成像过程看作一个线性平移不变(Linear Shift-Invariant, LSI)系统,则图像退化过程表示为:

$$g = S(H * f) + n. \quad (1)$$

其中: g 为获得的实际图像, H 为 PSF, f 为理想

几何成像, n 为噪声, $*$ 表示卷积运算, S 表示红外焦平面阵列的下采样过程。在测量过程中通常认为红外成像系统的 PSF 是不变的,并且分布均匀。建立的图像退化模型如图 2 所示。

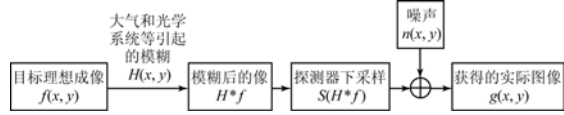


图 2 图像退化过程模型

Fig. 2 Model of image degradation process

3.2 点扩散函数的测量

PSF 是成像系统对理想点源目标的响应,又称为脉冲响应,通常表现为一个低通滤波器。线扩散函数(Line Spread Function, LSF)是成像系统对线信号的响应,边缘扩散函数(Edge Spread Function, ESF)是成像系统对阶跃信号的响应。三者的关系为:

$$ESF(x) = \int_{-\infty}^x LSF(x) dx = \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^{+\infty} PSF(x, y) dy dx. \quad (2)$$

对于一个给定的红外成像系统,目前有多种不同的 PSF 测量方法。其中,倾斜刃边法对目标要求不高,图像信噪比高,并且可以得到上采样的 ESF 以提高计算精度。由国家标准 ISO12233 定义的测量和分析数字照相机空间频率响应步骤中包含了利用倾斜刃边法对 ESF 的测量^[11]。

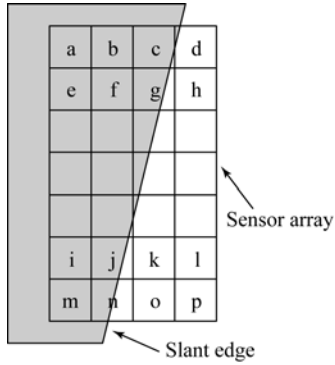
倾斜刃边法的原理如图 3(a)所示,图 3(b)中横轴为探测器像元中心到刃边的距离,纵轴为像元灰度值归一化得到的 ESF。理论上通过调整目标刃边倾角可得到任意大小的采样间隔。拟合这些采样点后得到 ESF,微分可以得到刃边法线方向的 LSF,然后利用傅里叶切片定理由 LSF 投影重建 PSF^[12]。

Tzannes^[13]等人提出了一种利用 Fermi 函数拟合来获得 ESF 的方法,ESF 的函数模型表示为:

$$ESF(x) = \sum_{i=1}^3 \frac{a_i}{\exp\left(\frac{x-b_i}{c_i}\right) + 1} + d. \quad (3)$$

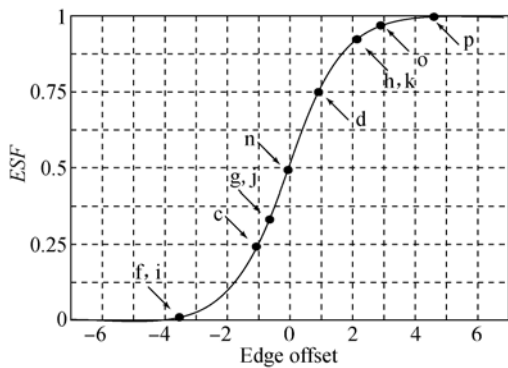
其中: a_i, b_i, c_i 和 d 为常数。

实验表明,使用 3 个 Fermi 函数的线性组合就能获得足够的拟合精度,并且拟合结果稳定,受误差影响小^[13]。本文采用基于 Fermi 函数的模型和非线性最小二乘法 (Nonlinear Least Squares, NLS) 拟合提取上采样 ESF 数据。



(a) 倾斜刃边在探测器阵列上成像

(a) Image of slanted edge on focal plane



(b) 上采样的 ESF

(b) Upsampled ESF

图 3 倾斜刃边法原理

Fig. 3 Principle of slanted edge method

3.3 小目标辐射测量原理

根据图像退化模型,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就可以建模为该红外系统的 PSF(H)与目标理想几何成像(f)的卷积,再经过数字化和探测器阵列下采样过程最终得到灰度图像。假设已经利用刃边法测得红外成像系统的 PSF,那么小目标成像模型就只包括 4 个参数:目标中心位置(x_0, y_0),目标

尺寸(d)和等效灰度值(h),所以小目标辐射测量问题归结为参量(x_0, y_0, d, h)的最优化估计。

首先,目标在探测器上的最终成像与其中心位置有关。由于 PSF 的影响,小目标成像能量分布在多个像元上,目标的亚像素中心位置(不一定在像元中心)即决定了像元的采样过程,并影响着目标在探测器上的最终成像。对于一个响应均匀并且 PSF 分布均匀的焦平面阵列而言,如果已知目标的中心位置就可以得到探测器的采样规律和最终输出的图像。

建模时,首先需要根据已知的目标形状建立一个设定尺寸的参考目标,则目标尺寸可以表示为待测目标相对这个参考目标的放大倍数。在探测器阵列平面上建立直角坐标系,以探测器的中心像元为原点,相邻探测元的中心距离为单位长度。假设目标理想几何成像的中心位置在探测器靶面上的亚像素坐标为(x_0, y_0),并且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 ,那么 PSF 作用后的目标成像能量分布为:

$$h(x-x_0, y-y_0) = (h_t - h_b) \cdot \text{PSF} * f(x-x_0, y-y_0) + h_b. \quad (4)$$

对中心坐标为(X, Y)的探测器像元而言,像元内的点(x, y)接收到的能量为 $h(x-x_0, y-y_0)$,那么该像元上接收到的总能量为:

$$g(X, Y) = \int_{Y-1/2}^{Y+1/2} \int_{X-1/2}^{X+1/2} h(x-x_0, y-y_0) dx dy. \quad (5)$$

这样就得到目标最终成像的灰度值分布 g ,即式(1)中的 $S(H * f)$ 。而对于模糊模型,由于等式左侧已知,右侧噪声可以去除,其中待定参数仅有 x_0, y_0, d 和 h 。设定参数时,首先通过红外成像系统获得真实的图像灰度值分布 g_0 ;然后通过式:

$$\arg \min_{x_0, y_0, d, h} \| g_0 - g \|, \quad (6)$$

进行参量(x_0, y_0, d, h)的最优化估计。

整个最优化估计过程为:首先以一定的步长改变目标等效灰度值 h ,中心位置和目标尺寸;然后采用上述参量序列模拟目标成像,得到其成像

的各个像元灰度值,最终得到模拟的红外图像;通过实验采集真实目标成像的灰度分布,将真实图像与模拟图像进行匹配;目标成像像元的所有点的模拟灰度值和真实灰度值的差值记为误差,利用搜寻算法计算当这一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图像,那么这一模拟图像对应的目标参数(h, x_0, y_0, d)即为最优估计量。

如图 4 所示,本文提出的小目标辐射测量方法的具体实现流程包括 PSF 测量、理想成像模型的建立、模拟图像的仿真和图像匹配。

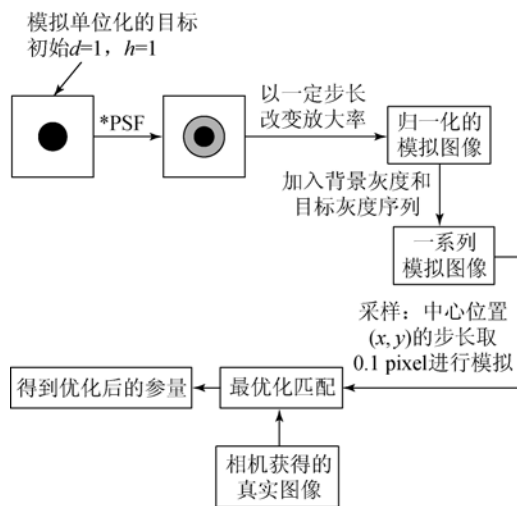


图 4 小目标辐射特性测量过程

Fig. 4 Process of radiation measurement of small targets

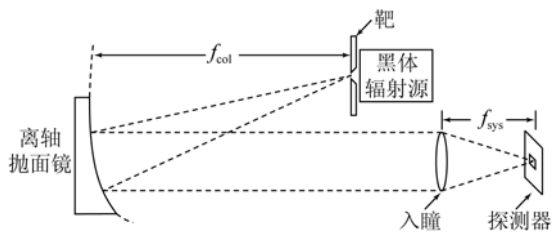
4 实验结果

4.1 小目标成像实验

为了验证本文小目标辐射特性测量方法的有效性,加工了带有不同口径圆孔的目标靶,安装于黑体前以模拟小目标辐射源。目标通过平行光管后成像,如图 5(a)所示,其中 f_{col} 和 f_{sys} 分别为平行光管和红外成像系统的焦距。采用 CI 公司的 METS 平行光管,工作波段为 $0.4 \sim 15 \mu\text{m}$,口径为 $12''$ (0.3048 m),焦距为 $120''$ (3.048 m)。辐射源(面源黑体)发射率为 0.97 ,温度为 $0 \sim 125 \text{ }^\circ\text{C}$,温度精度为 $0.008 \text{ }^\circ\text{C}$ 。利用 FLIR 公司的中波红外相机

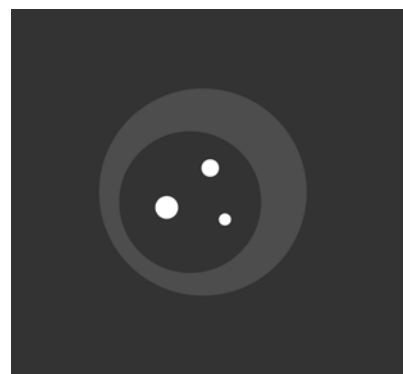
进行了辐射特性测量实验。该相机的参数如下:工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$,探测器像元数为 640×512 ,像元大小为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$,输出位数为 14 ,焦距为 50 mm , $f/\# = 2$ 。

辐射源温度设为 $70 \text{ }^\circ\text{C}$,目标靶上孔的直径(误差 $\pm 0.02 \text{ mm}$)为 $0.9, 1.8, 2, 3.6, 4, 6, 8$ 和 10 mm 。其中 $2, 4$ 和 6 mm 靶得到的图像如图 5(b)所示。



(a) 准直后的小目标成像示意图

(a) Schematic of imaging of a collimated small target



(b) 小目标的灰度图像

(b) Gray scale image of small targets

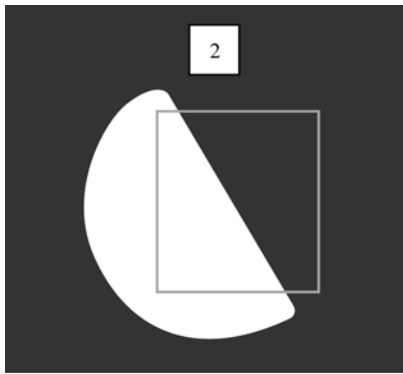
图 5 圆形小目标成像

Fig. 5 Imaging process of circular small targets

整个实验过程包括 PSF 测量,目标成像模拟和最优估计。

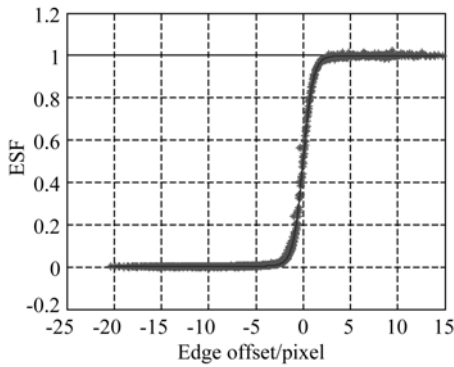
4.2 点扩散函数测量

将平行光管自带靶轮调节到刀口位置,调节相机清晰成像,如图 6(a)所示。采用刃边法测量 ESF,利用 Fermi 函数拟合数据得到 ESF 如图 6(b)所示,微分后得到 LSF 如图 6(c)所示。



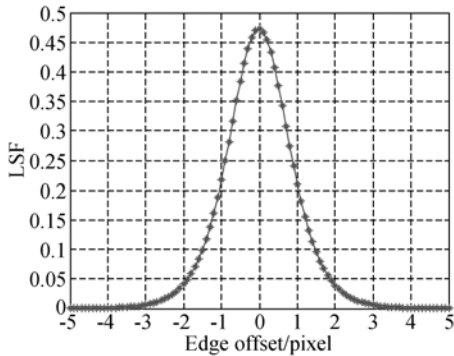
(a) 刃边图像

(a) Image of slanted edge



(b) 边缘扩散函数的 Fermi 拟合

(b) Fermi fitting of edge spread function(ESF)



(c) 刃边法线方向的线扩散函数

(c) Line spread function(LSF) in normal direction of slanted edge

图 6 刃边法获得 LSF 的过程

Fig. 6 Process of obtaining LSF using slanted edge method

旋转刀口使它与探测器坐标系 y 方向的夹角逐渐变化,同样得到各方向的 LSF。二维 PSF 表示为两个一维 LSF 的向量积^[14]:

$$PSF(x, y) = LSF(x) \otimes LSF(y). \quad (7)$$

其中: $LSF(x)$ 和 $LSF(y)$ 分别代表 x 和 y 方向上的一维 LSF。结果如图 7 所示。

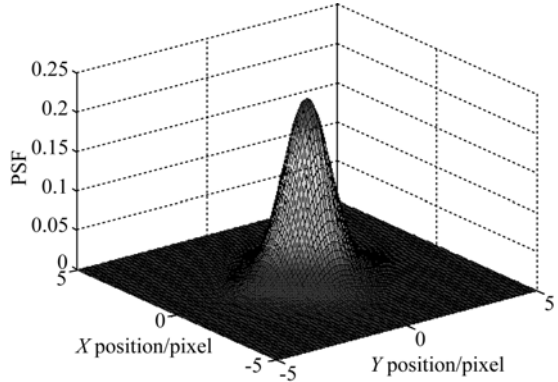


图 7 点扩散函数

Fig. 7 Point spread function(PSF)

4.3 目标成像模拟和最优化估计

图 8 所示为等效灰度值归一化后的模拟图像,在加入背景和目標当量灰度值后模拟图像的能量分布为:

$$h_2 = h_1 \times (h_t - h_b) + h_b. \quad (8)$$

其中: h_1 为归一化后的模拟灰度值, h_2 为模拟灰度值, h_t 为目标当量灰度值, h_b 为背景灰度值。用得到的结果与通过相机获得的目标图像进行匹配就可以得到最优化估计的参量 (x_0, y_0, d, h) 。

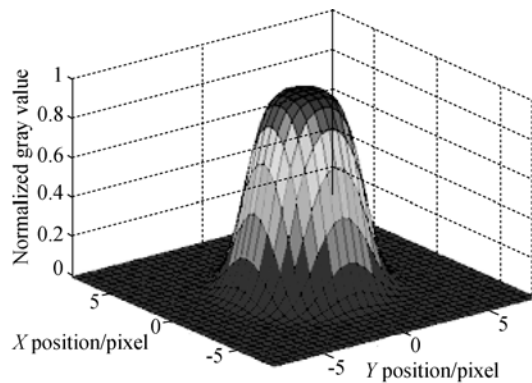


图 8 归一化的能量分布模拟

Fig. 8 Simulation of normalized energy distribution

4.4 实验数据

目标温度为 $70\text{ }^\circ\text{C}$, 面源黑体(即扩展源)的直接成像灰度值为 8 747, 亮度为 5.027 3, 作为本次

实验的参考真值,小目标辐射亮度的测量结果见表 1。

表 1 辐射亮度测量的实验数据

Tab. 1 Experimental data of radiance measurement

圆孔直径/mm	背景灰度/DL	测量目标灰度/DL	测量亮度/(W · m ⁻² · sr ⁻¹)	亮度误差/%	测量温度/°C
0.9	2 801.6	10 950	6.417 4	27.65	78.89
1.8	2 799.9	10 252	5.971 7	18.79	76.22
2	2 752.0	9 729.0	5.637 6	12.14	74.12
3.6	2 807.7	8 957.7	5.145 3	2.35	70.83
4	2 761.4	8 811.4	5.051 8	0.49	70.17
6	2 765.7	8 715.7	4.990 7	-0.73	69.74
8	2 797.3	8 797.3	5.042 8	0.31	70.11
10	2 762.8	8 762.8	5.020 8	-0.13	69.95

表 2 中列出了红外小目标的尺寸测量结果,目标理想的成像尺寸由式(9)得到。

$$\frac{A_t}{f_{col}^2} = \frac{A_i}{f_{sys}^2} \quad (9)$$

其中: A_t 和 A_i 分别为目标面积和目标理想的成像面积。由于在辐射测量过程中并未将圆孔直径作为已知量代入,因此其加工精度只影响理想成像直径的计算,而不会对目标的辐射亮度测量产生影响。孔径的加工误差为 0.02 mm,根据红外

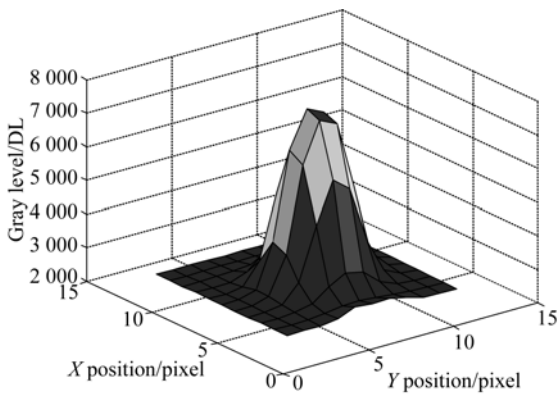
系统物像关系,理论成像直径的计算误差为 0.022 pixel。为了减小计算量,小目标直径测量的步长为 0.1 pixel,因此可忽略孔径加工误差对测量结果的影响。

图 9(a)和 9(b)分别为对参数最优化估计后得到的模拟图像和真实图像的对比,二者形状和灰度值分布相似,各像元的灰度值误差很小,如图 9(c)所示。由此可见,这种方法对辐射亮度测量和目标尺寸计算具有很好的精度。

表 2 小目标尺寸测量的实验数据

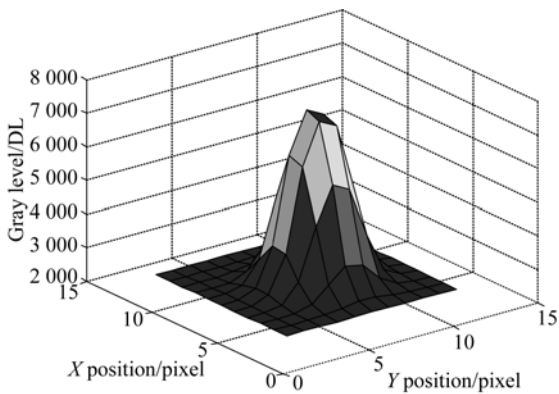
Tab. 2 Experimental data of area measurement of small targets

圆孔直径/mm	理论像元数/pixel	测得像元数/pixel	理想成像面积/pixel ²	面积测量值/pixel ²	面积误差/%
0.9	0.98	0.8	0.76	0.50	-34.20
1.8	1.97	1.7	3.05	2.27	-25.60
2	2.19	2.1	3.76	3.46	-7.98
3.6	3.94	3.9	12.17	11.95	-1.81
4	4.37	4.4	15.03	15.21	1.20
6	6.56	6.5	33.82	33.18	-1.89
8	8.75	8.7	60.12	59.45	-1.11
10	10.94	10.9	93.93	93.31	-0.66



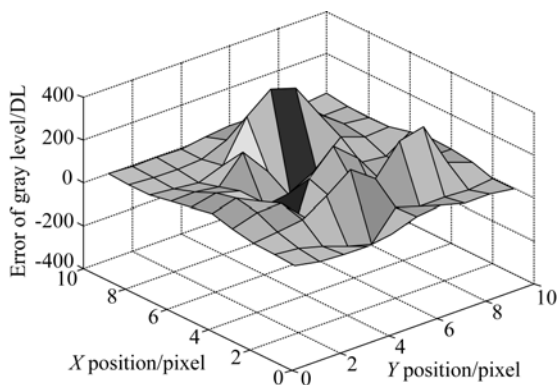
(a) 真实图像

(a) Real image



(b) 模拟图像

(b) Simulated image



(c) 模拟图像与真实图像的灰度差

(c) Gray-scale difference between simulated image and real one

图 9 模拟图像与真实图像的比较

Fig. 9 Comparison between simulated image and real one of circular target

在目标理想成像直径大于 3.6 个像元时,辐射亮度测量的最大误差为 2.35%,辐射温度的最大误差为 0.83 °C,目标尺寸(面积)测量的最大误差为 1.89%,多次实验说明该方法是可靠的。但是该方法对成像目标的尺寸敏感,精度随目标尺寸的减小而降低。目标尺寸较大时,匹配效果很好,但是在圆形目标理想成像直径小于 3.6 个像元时,目标的辐射亮度和尺寸测量误差急剧增大,本文的测量方法将不再适用。其原因可能与中心位置搜寻步长和 PSF 的测量精度有关,另外像元数较少导致目标细节丢失严重及用于优化的像素点(相当于约束条件数)减少,也会影响匹配精度。

5 结 论

本文在图像退化理论的基础上提出了基于 PSF 的小目标辐射特性测量方法,并通过实验研究了该方法的可行性。实验结果表明,圆形目标理想的几何成像直径大于 3.6 个像元时,辐射亮度测量的最大误差为 2.35%,目标尺寸(面积)测量的最大误差为 1.89%,测量精度较高。这种方法可以用于目标和背景辐射特性的获取、红外成像系统的性能测试、图像复原和小目标定位等。

该方法的优点在于不需要已知目标成像面积,仅仅需要知道目标的形状,并且可在得到目标亮度的同时获得目标成像位置和尺寸的信息。在计算目标中心位置时,由于无法得到参考标准值,实验中采用图 5(b)中 4 mm 和 6 mm 圆孔成像中心距的测量结果进行检验,其中心距的测量误差为 0.30 像元,说明该方法对小目标定位的研究具有一定的意义。下一步工作为:应用该方法测量不规则形状目标,改进最优化估计算法以及获得更精确的 PSF,并进行外场实验来考察本文小目标辐射测量方法的适用条件。

参考文献:

- [1] GERALD C. Holst, *Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems* [M]. Florida: JCD Publishing and SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- [2] YAO Y, WU Z S, YAO L X. Method of calculating the radiance of point-source target in infrared image [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2002, 23(9): 1347-1355.
- [3] TARTAKOVSKY A. Adaptive sequential algorithms for detecting targets in a heavy IR clutter [J]. *SPIE*, 1999, 3809: 231-242.
- [4] TARTAKOVSKY A. Effective adaptive spatial-temporal technique for clutter rejection inIRST [J]. *SPIE*, 2000, 4048: 566-576.
- [5] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 171-178. (in Chinese)
- [6] 刘兴森,王仕成,赵静. 结合统计分布和非下采样Contourlet变换的红外小目标检测[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4): 908-915.
LIU X M, WANG SH CH, ZHAO J. Infrared small target detection based on nonsubsampling contourlet transform and statistical distribution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 908-915. (in Chinese)
- [7] 刘伟宁. 基于小波域扩散滤波的弱小目标检测[J]. *中国光学*, 2011, 5(3): 503-507.
LIU W N. Dim target detection based on wavelet field diffusion filter [J]. *Chinese Optics*, 2011, 5(3): 503-507. (in Chinese)
- [8] 刘希佳,陈宇,王文生,等. 小目标识别的小波阈值去噪方法[J]. *中国光学*, 2012, 5(3): 248-256.
LIU X J, CHEN Y, WANG W SH, *et al.*. De-noising algorithm of wavelet threshold for small target detection [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 248-256. (in Chinese)
- [9] 吴燕,安博文,叶洪涛,等. 图像复原基本适用条件的红外成像实验研究[J]. *红外技术*, 2012, 34(5): 280-285.
WU Y, AN B W, YE H T, *et al.*. Infrared imaging experiment research of image restoration basic application conditions [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(5): 280-285. (in Chinese)
- [10] WANG G D, CHEN C Y, SHEN X B. Algorithms for optical weak small targets detection and tracking: review[C]. In: *IEEE Int. Conf. Neural Networks & Signal Processing*, 2003: 14-17.
- [11] International Organization for Standardization. ISO 12233; 2000, Photography-electronic still-picture cameras-resolution measurements [S].
- [12] ROSENFELD A, KAK A C. *Digital Picture Processing* [M]. Second Edition. New York: Academic Press, 1982.
- [13] TZNNES A P, MOONEY J M. Measurement of the modulation transfer function of infrared cameras [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(6): 1808-1817.
- [14] 李铁成. 基于倾斜刃边法的遥感图像调制传递函数计算及图像复原技术研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2011: 85-93.
LI T CH. *Research on modulation transfer function calculation and remote sensing image restoration based on slanted-edge method* [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2011: 85-93. (in Chinese)

作者简介:



常松涛(1988—),男,安徽阜阳人,博士研究生,2010年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事红外辐射测量方面的研究。E-mail: stchang2010@sina.com

导师简介:



张尧禹(1973—),男,吉林省吉林市人,博士,研究员,主要从事光电跟踪及瞄准方面的研究。E-mail: zhangyaoyu2013@sina.com