

应用四杆靶图像测量热成像系统焦距

孙军月, 马冬梅, 霍玉波

(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:采用实验室中四杆靶红外目标源,使其成像在热成像系统自身的焦面探测器上,采用放大倍率法测量与计算出系统的焦距。由于热成像系统的探测器像元尺寸一般较 CCD 像元大,为了降低像元尺寸对测量精度的影响,根据误差理论,合理选择四杆靶目标,使其能够达到满意的测试精度。这种焦距测量方法,原理简单直接,测量范围大,对于热成像系统的检测与装调,有着很好的实际应用价值。文中详细分析了影响焦距测量不确定度的因素,焦距的测量扩展不确定度可达到 $U = 0.4\%$ 。

关键词: 焦距; 四杆靶图像; 放大倍率法; 热成像系统

中图分类号: TN214 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2006)04-0220-04

The Focal Length Measurement of Thermal Imaging System by 4-bar Targets

SUN Jun-yue, MA Dong-mei, HUO Yu-bo

(ChangChun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Jilin ChangChun 130033, China)

Abstract: The focal length of a thermal imaging system was assessed by the magnification method using 4-bar targets as infrared objectives. However, the detector pitch is larger than that of CCD detector and limits the measurement accuracy. In order to improve the accuracy, appropriate 4-bar targets are chosen according to academic calculation. The uncertainty effects in measurement was analyzed and the uncertainty in measurement can reach $U = 0.4\%$.

Key words: Focal length; 4-bar image; Magnification method; Thermal imaging system

引言

焦距是光学成像系统关键技术指标之一,对其的精确测量是光电参数测试工作中必不可少的。目前,焦距的测量已有很多成熟的方法,比如利用几何光学的放大率法和精密测角法;但多在可见光波段^[1,2]。由于红外谱段的不可见性,使得可见光波段的测量方法在红外波段有着一定的限制。

对于红外光电整机系统,由于系统本身就带有探测器,因而能够直接接收红外光学系统所成的像^[3]。本文正是利用这一点,焦距测试原理是利用实验室中四杆靶红外目标源及光学准直系统,根据放大倍率法^[4],测量热成像系统(也称红外光电系统)的焦距。由于利用了光电系统本身的自成像原理,这种测量方法方便快捷。

1 放大倍率法测量系统的焦距

放大倍率法是焦距测量的基本方法之一,其主要原理如图1所示。被测热成像系统接收来自于光学准直系统的光信号,则平行光管焦面上的目标就成像在被测系统的焦面上。在平行光管焦距 f 和目标尺寸 y 已知的情况下,只要测出目标像 y' 的大小,就可根据公式(1)得到被测系统的焦距 f' 。

$$f/y = f'/y' \Leftrightarrow f y'/y = f' n l / y \quad (1)$$

若目标像成在焦面探测器阵列上,则有 $y' = nl$, 其中 n 为目标像在接收探测器上所占像元数, l 为探测器像元尺寸。

收稿日期: 2005-09-01

作者简介: 孙军月(1980-),女,山东省文登市人,硕士,主要从事红外光电系统静态性能参数评估、图像处理等方面的研究工作。

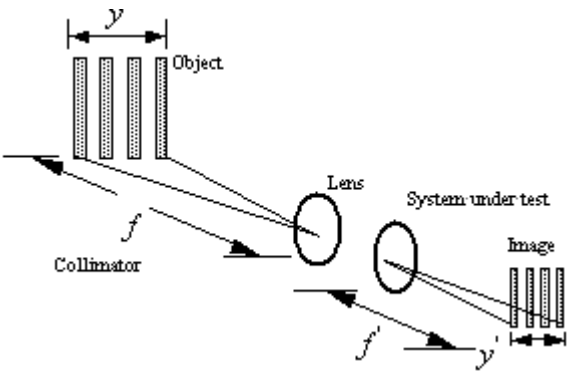


图1 放大倍率法测焦距示意图

Fig.1 The magnification focal length measurement method

应用四杆靶图像测量热成像系统焦距，其原理采用了放大倍率法，这里用四杆靶条纹目标代替传统的目标源。实验室中的四杆靶条纹目标，是由7个条纹组成的（四个白条纹，三个黑条纹），这七个条纹具有相同的尺寸，且高宽比为7:1。探测器所成的四杆靶图像，经过光电系统转换成模拟视频或数字图像信号输出，然后用图像采集卡将其采集到计算机中进行处理与计算。图2所示为四杆靶目标所成的红外图像。其灰度值波形如图3所示。

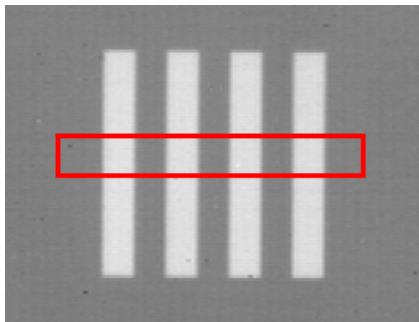


图2 四杆靶图像 Fig.2 The 4-bar image

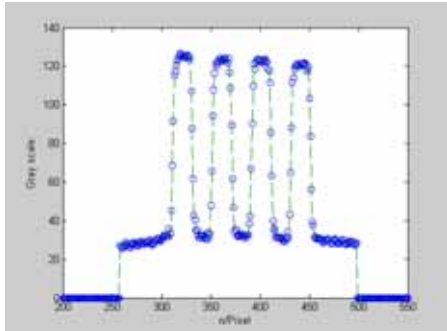


图3 四杆靶条纹灰度值波形图

Fig.3 The wave of the 4-bar image

2 探测器采样特性及条纹宽度计算

2.1 探测器采样特性及信号输出

探测器像元具有一定尺寸，其输出信号为一有限区域的积分效果。由于光学模糊直径及相位影响等因素，在探测器对场景目标进行采样时，会使目标边缘

部分模糊^[5]。如图4所示，方格表示探测器像元，细线表示场景模拟信号，粗线为探测器的响应输出。

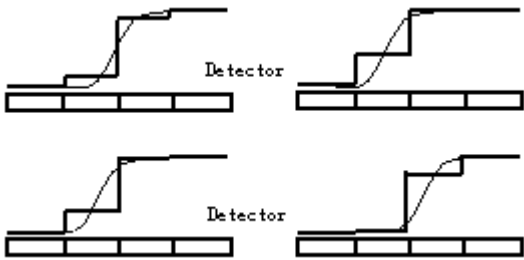


图4 探测器像元尺寸与模糊直径相当时的信号相位影响

Fig.4 Phasing effects with a detector array when the optical blur diameter is equal to the detector size

热成像系统的输出信号一般有两种：数字信号和模拟信号。而模拟信号为了与标准视频信号匹配，其输出信号往往是经过插值等人为变换后的数据。因此，我们在计算时要考虑到这个因素。对于我们的实验用热像仪，采集到的模拟图像条纹宽度 n_0 与像在探测器上实际所占像元个数 n 之间有一个二倍关系，即 $n = n_0/2$ 。

2.2 条纹宽度计算

编制软件程序，对采集到的四杆靶条纹图像进行处理。四杆靶图像的灰度值，对应着探测器像元的输出信号能量。选取条纹幅值的中间值为分界值（能量高于一半的占一个像元，低于一半的不计像元数），如图5所示。灰度值在这个值以上的设为1，以下设为0，这样就得到一个方波。

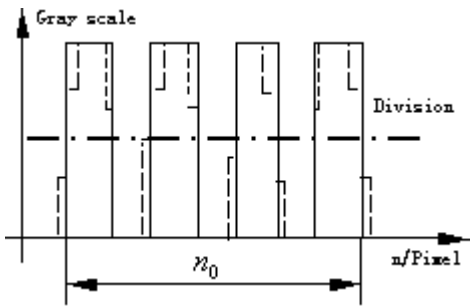


图5 求取条纹宽度示意图

Fig.5 Abbreviated notation of image wide acquisition

虚线表示条纹图像原始信号波形，实线表示量化后的方波信号，点划线表示求取条纹宽度的分界值。求得这个方波7个条纹的总宽度，就是四靶图像总宽度 n_0 。然后根据公式1计算出被测系统的焦距。

3 焦距测量精度分析

3.1 目标像宽度的测量不确定度

根据探测器的信号采样特性，所成图像边缘部分

会出现锯齿波,当选取一个分界值计算条纹宽度时,就会产生量化误差 Δn 。在测量当中,求取的条纹宽度与实际像所占像元数最多差一个像素,量化误差的极限值为 $\Delta n_{\max} = \pm 1$ 。因此目标像宽度的极限测量误差为 $\delta_y = 1/n$ 。当目标像在探测器上所占像元素 n 越大,则相对测量误差越小(探测器像元尺寸制造精度很高)。为了使 n 较大,则可以通过使用较大的目标靶来实现。

对于一个探测器阵列为 320×240 的热成像系统,尽可能最大利用探测器水平方向像元阵列,当取 $n = 300$ 时,则相对测量误差最大为 $\delta_y = 0.33\%$ 。

还需说明的是,四杆靶目标的尺寸是一系列值,不是连续的。实际测量时不一定有一个恰好合适的目标靶。这时,要选取与理论要求值最接近的目标靶。

3.2 焦距测量不确定度

不同于可见光范围,红外系统一般对周围环境因素要求很高。环境温度的漂移,系统的增益以及偏置都会影响红外光电系统的最终成像效果。但不论这些因素如何变化,所得的四靶图像边缘宽度在焦面位置基本不会发生变化。

不可避免的,平行光管焦距 f ,四杆靶目标尺寸 y 实际值的给出也有一定的误差,他们影响了最后焦距测量的不确定度^[6]。

因此,最终焦距的测量不确定度可由公式(2)给出:

$$\begin{aligned} u_{f'} &= \sqrt{\left(\frac{\partial f'}{\partial f}\right)^2 + \left(\frac{\partial f'}{\partial y'}\right)^2} u_y^2 + \left(\frac{\partial f'}{\partial y}\right)^2 u_y^2 \\ &= \sqrt{\left(\frac{y'}{y}\right)^2 u_f^2 + \left(\frac{f}{y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{fy'}{y^2}\right)^2 u_y^2} \end{aligned} \tag{2}$$

式中: u_f , u_y , $u_{y'}$ 分别为平行光管焦距、四杆靶目标尺寸和目标像宽度的测量精度引起的不确定度分量。取包含因子 $k = 3$,则扩展不确定度为 $U_{f'} = 3u_{f'}$ 。最后焦距的测量结果为: $f' = f_c \pm U_{f'}$, f_c 为焦距测量值。

4 实验测试结果

对于四杆靶红外目标,条纹与背景间温差是可调的。表1列出了焦距设计值为900 mm的热成像系统的焦距在不同温差下的测量数据,使用的目标靶宽度为12.579 mm。

从表1中可以看出,温差的变化对红热成像系统焦距的测量影响很小。因此,我们在测量时为了人眼操作和观察都方便,尽量把目标的温差设在一个较大的值。

在求取条纹宽度时,虽然我们选取分界值的时候尽量选取中间值,但由于人为操作的随机性,仍避免不了有一定的偏差。当然这个偏差在误差范围之内。为了尽量减小这一随机误差,我们可以在不同的温差下多次测量,取其平均值作为最后焦距测量的结果。

表 1 同一目标靶不同温差图像的焦距测量值(焦距设计值 900 mm)

Table1 The focal length calculated in different temperature difference for the same 4-bar target, (The designed focal length is 900 mm)

Temperature Diff./	n_0 /pixel	Focal length/mm
2.0	187	893.8
1.8	187	893.8
1.4	188	898.5
1.0	187	893.8
0.9	186	889.0
0.8	187	893.8
0.4	187	893.8
- 0.5	188	898.5
- 0.9	187	893.8
- 1.0	187	893.8
- 1.4	187	893.8
- 1.6	187	893.8
- 1.9	187	893.8
- 2.0	187	893.8

表2所示的是一个焦距设计值为800 mm的系统焦距测量数据,所用目标靶宽度为38.465 mm。各个温差下焦距测量平均值 $f_c = 812.0$ mm,其所用平行光管焦距 f 的相对测量误差 $\delta_f = 0.03\%$;目标像宽度 y' 的测量误差($n = 259$) $\delta_{y'} = 0.39\%$;目标尺寸 y 的测量误差 $\delta_y = 0.03\%$;则可得 $U_{f'} = 0.39\%$ 。焦距测量结果为: $f' = 812.0$ mm \pm 3.2 mm。

表 2 不同温差下焦距测量值(焦距设计值 800 mm)

Table2 The focal length calculated in different temperature difference (The designed focal length is 800 mm)

Temperature Diff./	n_0 /pixel	Focal length/mm
1.0	519	811.2
1.0	520	812.8
2.0	520	812.8
- 1.0	519	811.2

5 结论

用四杆靶图像测量热成像系统的焦距是可行的。虽然这种测量焦距的方法，精度受到探测器像元尺寸的限制，但它的优势在于四靶目标尺寸是一系列的空间频率值，这就为不同的系统提供了合适的目标源，使其能够达到满意的测试精度。尤其对于拥有较成熟光电系统检测装置的实验室，因其已经具备各种可与目标靶相匹配的平行光管及光学测试平台，使用这种方法测量热成像系统的焦距，方便快捷，测量范围大且精度较高，拓展了现有仪器测试功能。



图6 实验仪器图片

Fig.6 Photo of the experiment

参考文献：

- [1] 陈 磊, 高志山, 何 勇. 红外光学透镜焦距测量[J]. 光子学报. 2004, **33**(8): 986 ~ 988.
- [2] 陈安键. CCD 光电传感器在焦距测量中的应用[J]. 厦门大学学报. 2000, **39**(2): 275 ~ 277.
- [3] M. Tebaldi, et al.. Focal length assessment by self-imaging[A]. *SPIE*[C]. 2004, **5622**: 585 ~ 589.
- [4] GB 9919-88. 照相镜头焦距的测量方法[S].
- [5] Gerald C. Holst. *Sampling, aliasing, and data fidelity for electronic imaging system, communications, and data acquisition*[M]. JCD Publishing .Winter Park. FL. 1997.
- [6] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社. 2003.