



DOI: 10.12086/oe.2019.180458

一种面阵成像光谱相机空间分辨力的精确测量方法

储松南, 刘海涛, 胡奇琪, 王海峰, 张大勇, 骆永全*

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900

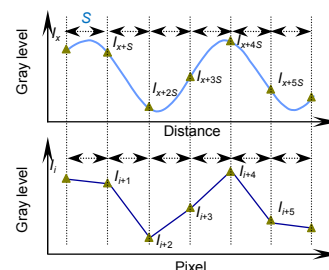
摘要: 目前在光谱成像领域建立由空间分辨力的量化测量方法,但在探测器分辨能力不足时,其存在测量时成像位置不同带来测量结果不同的现象。本文提出了一种适用于面阵成像光谱相机空间分辨力的精密测量方法,其基于黑白线对在精密平移下的光谱图像,绘制出单个像素的灰度随位移的变化曲线,理论上通过曲线的分割可获得各种可能成像位置下灰度随像素的分布结果,在实际操作时可通过一种曲线分割取点,直接得到各成像位置均能分辨的线对密度值。该方法有效地避免了现有方法在探测器分辨能力不足时的缺陷,通过对一台面阵成像光谱相机的实验测量验证了其可行性。

关键词: 光谱成像; 空间分辨力; 精确测量

中图分类号: TB872

文献标志码: A

引用格式: 储松南, 刘海涛, 胡奇琪, 等. 一种面阵成像光谱相机空间分辨力的精确测量方法[J]. 光电工程, 2019, 46(11): 180458



An accurate measurement method for the spatial resolution of area array spectral imaging equipment

Chu Songnan, Liu Haitao, Hu Qiqi, Wang Haifeng, Zhang Dayong, Luo Yongquan*

Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract: Quantitative methods have been formed to measure the spatial resolution in spectral imaging field, but the results may differ with imaging position change when the resolving power of detector is deficient. Based on the spectral images of black-white lines under accurate shift, a new method for detecting the spatial resolution of area array spectral imaging equipment is proposed. This method presents the curve showing the gray level variation with the displacement of object for a single pixel, and can obtain all the results of gray level distribution among pixels theoretically. Through one type of curve division, the density value of the black-white lines which can be discerned on any imaging position will be obtained. This method has overcome the shortcoming of current methods, and its feasibility is validated by an experiment for one area array spectral imaging equipment.

Keywords: spectral imaging; spatial resolution; accurate measurement

Citation: Chu S N, Liu H T, Hu Q Q, et al. An accurate measurement method for the spatial resolution of area array spectral imaging equipment[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(11): 180458

收稿日期: 2018-09-05; 收到修改稿日期: 2019-02-22

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2017YFC0803806); 现场物证溯源技术国家工程实验室开放课题基金资助项目(2017NELKFKT04)

作者简介: 储松南(1982-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光束精密控制的研究。E-mail: snchu@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 骆永全(1974-), 男, 硕士, 研究员, 主要从事光束精密控制的研究。E-mail: uestcaep@126.com

1 引言

空间分辨力是成像设备的一个重要性能参数，一般成像设备的空间分辨力主要受光学系统和探测器分辨能力的限制。光学系统的分辨能力主要受限于衍射极限，可通过计算评估^[1]；随着主流成像方式由化学感光成像发展到数字成像，探测器的分辨能力成为了许多成像设备空间分辨力受限的主要原因^[2]。探测器的分辨能力可以通过像元分辨力衡量，考虑成像位置的影响，有文章建议以像元分辨力的 $1/\sqrt{2}$ 来评估^[1-2]。对于限制成像设备空间分辨力的主要因素是光学系统还是探测器的问题，Gerald 等^[3]建立了通过 $F\lambda/d$ 值(F 为光学聚焦系统光圈数， λ 为光波长， d 为探测器像元尺寸)来判定的方法，认为该值小于 0.41 时，设备主要受探测器的限制，而该值大于 1 时，则主要受光学系统限制。

数字成像设备真实的空间分辨能力受杂散光、暗电流噪声、数模转换位数等具体因素的影响，因此其与上述计算结果可能存在偏差。目前针对数字成像设备的空间分辨力，国内通用的实验室测量方法是人眼判读分辨力板图像的方法^[4]，这种方法在实施时会受到人眼判读的随机性、数字输出设备的分辨率和对比度等外部因素的影响，可能导致不同实验室间的测量结果不同。

光谱成像技术是一种新型的数字成像技术，是将空间维信息和光谱维信息相融合的一门非接触式检测技术，在目标侦查、物证鉴定、医学检测等领域具有广泛的应用前景，因此光谱成像设备近几年得到了快速的发展，其中基于液晶可调滤光片、声光可调滤光片等滤光器件的面阵成像光谱相机由于快速的波长调

节及相对简单的光路结构而广受青睐。面阵成像光谱相机在单一波长下反映的是目标该波长的光强信息，一般采用结构相对简单的单色探测器，图像存储的也是单一的灰度值信息，因此对空间分辨力的测量，该领域建立有基于黑白台阶的测量方法^[5]和基于黑白线对的测量方法^[6]两种数值量化方法，这些方法有效避免了人眼判读法的弊端，减小了误差，但是在探测器的分辨能力是制约设备空间分辨力的主要因素时，仍然存在着不同成像位置提取的曲线结果不同，易造成误判的情况。本文采用基于黑白线对测量法的判据^[6]，提出了面阵成像光谱相机空间分辨力的一种精确测量方法，该方法全面考虑了成像相对位置的影响，可得到更加准确的结果。

2 理论推导

2.1 测量原理

图 1 上方给出了 Nyquist 极限频率下，黑白线对成的像与探测器的三种典型对应关系，其中线条方向与探测器像元排列方向平行。中间给出了基于黑白线对测量方法所采用的灰度随像素的分布曲线，该方法认为曲线上峰值与谷值的比值(peak to valley ratio, PVR)大于 $\sqrt{2}$ 则线对可分辨^[6]。下方是实际光谱面阵成像的结果。由图可见，此时不同成像相对位置得到的结果差异很大，存在完全不可分辨(a)和大对比度清晰成像(c)两种极端状态，因此在探测器的分辨能力不足时，只通过随机拍摄的几幅图像判定光谱成像设备的空间分辨力，可能存在误判的情况。

目前面阵成像光谱相机为提高灵敏度，一般优选大像元尺寸的探测器或采用像元合并技术，且红外波

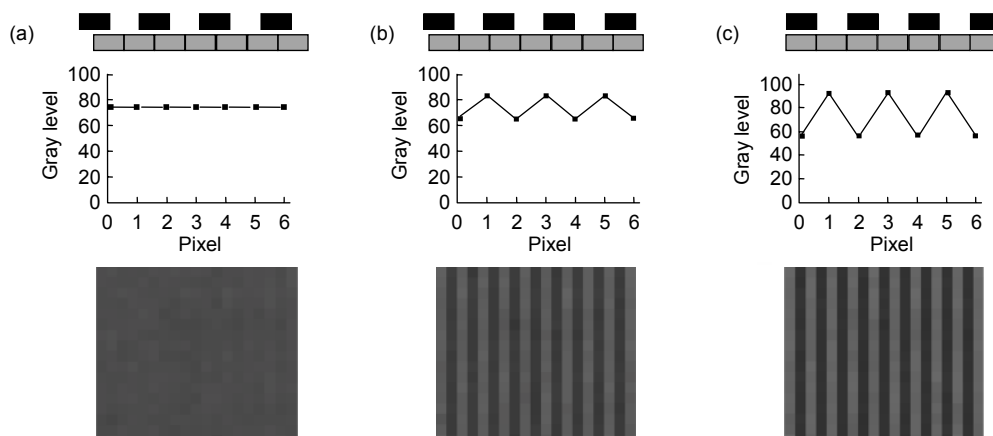


图 1 Nyquist 极限频率时三种典型成像结果
Fig. 1 Three types of typical imaging result at Nyquist frequency

段探测器分辨率普遍不高,所以光谱相机探测器的分辨能力不足是客观普遍存在的。有效避免探测器的分辨能力不足时空间分辨力的误判,需要有黑白线对与光谱相机所有可能相对位置下的成像结果。本文采用的方法为控制黑白线对沿黑白周期交替方向以一定步进精密平移,且每移动一步后拍摄一张光谱图像,以此来获取较多的成像结果。

后续的直观处理方法是针对每幅图提取如图 1 的灰度随像素的分布曲线,再比较每条曲线的差异,找出 PVR 取最小值的情况,再比较最小值与 $\sqrt{2}$ 的大小。这样做虽然可行,但数据处理量大,不宜快速得到结果。多步平移下的空间图像包含丰富的信息,常用于反演获得更加清晰的图像^[7-8],受此启发,本文提出了如下数据处理的改善方法。图 2 给出了黑白线对在逐步精密平移下的成像结果,每一行为一个成像位置下的结果,从上到下成像位置逐渐变化,由于探测器的

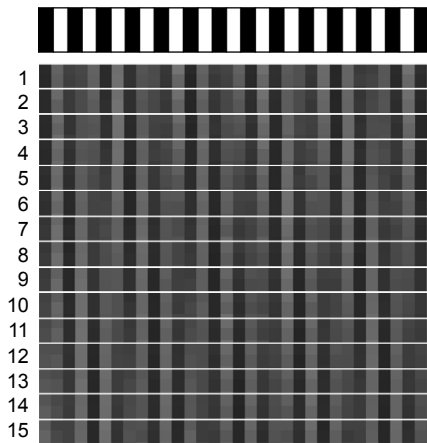


图 2 精密平移下黑白线对的成像结果
Fig. 2 Imaging results of blackwhite lines with accurate shift

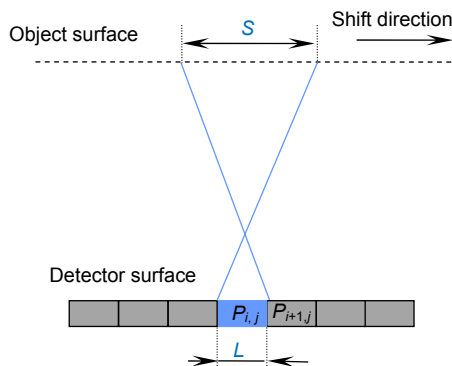


图 3 尺寸对应关系
Fig. 3 Dimensional relevance

分辨能力不足,横向方向上灰度随像素变化剧烈,而纵向方向上单个像素的灰度随着小步进的平移而缓慢变化。若黑白线对线宽恒定且像素成像稳定,只要平移步进足够小,则单个像素的灰度变化曲线将是连续且周期重复的,实际操作时在样品点足够的前提下可通过插值或拟合而得到该平滑曲线。

若忽略像素个体间的差异,可通过上述单个像素的灰度随位移的变化曲线得到各种可能成像位置的灰度随像素分布结果,具体的方法如下。取像素 $P_{i,j}$ 的灰度随位移变化曲线上任意一点 X ,该点的数值对应某一成像位置时像素 $P_{i,j}$ 的灰度值 I_x 。若成像时像元尺寸 L 对应的物面尺寸为 S (图 3),灰度随位移变化曲线上与 X 点距离为 S 的点对应物体移动距离 S 后的像素 $P_{i,j}$ 的灰度值 I_{x+S} 。考虑运动的相对性,物体平移距离 S 与探测器反向平移距离 L 的效果是一样,其等效于物体静止时像素 $P_{i,j}$ 反向移动到相邻像素 $P_{i+1,j}$ 的位置(i 变化方向为平移方向),若忽略像素间的差异,该值等于原拍照位置时的像素 $P_{i+1,j}$ 的灰度值 I_{i+1} 。依次类推,可将灰度随位移变化曲线对应到灰度随像素分布曲线,选取的起始点不同代表了不同的成像相对位置,这样通过灰度随位移变化曲线的分割可得到各种可能成像位置时的灰度随像素分布结果,且原始数据量由 m 个像素 n 步平移转化为 1 个像素 n 步平移。

2.2 方法的完善和数据处理

像元尺寸对应的物面尺寸 S 原则上可以通过成像参数计算出来,其测量值也可通过如下方法测量得到。若同时获取平移方向上两个相邻像素的灰度随位移的变化曲线,物体在移动距离 S 后第二个像素将重复第一个像素的灰度值,即第二个像素的灰度随位移变化

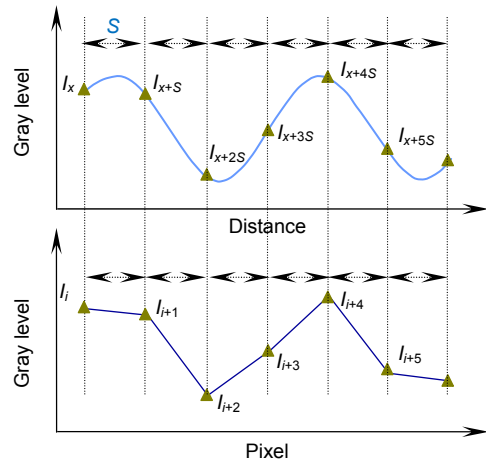


图 4 曲线对应分割示例
Fig. 4 Example for curve division

曲线按平移方向移动距离 S 将与第一个像素的对应曲线重合，据此可得到 S 值。

对于均匀照明的矩形靶标，其在像平面条纹交替方向上的光能量分布函数 $E(x)$ 可以按正弦形式傅里叶级数展开。

$$E(x) = A_{DC} + A_0 \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \times b \times \sin\left(\frac{n\pi x}{M}\right), \quad (1)$$

其中： A_{DC} 、 A_0 为常数， M 为矩形靶标的周期。探测器单个像元接收的信号是像元大小范围内光能量的积分，在条纹交替方向上，若某像元的起始坐标为 x_L ，像元长度为 L ，则其接收到的光能量可以表示为

$$G(x_L) = \int_{x_L}^{x_L+L} E(x) dx \quad (2)$$

在 Nyquist 频率附近，可忽略高频分量，只保留常数项和基频项，单个像元的光能量 $G(x_L)$ 相对于像元位置起始坐标 x_L 的分布可近似为正弦波形^[9]。对于最小值大于零的正弦波形，按照 2.1 节中介绍的单个像元灰度随位移变化映射到灰度在不同像元分布的方法，峰谷比(peak-to-valley ratio, PVR, 用 R_{PVR} 表示)值取最小值的灰度随像元的分布情况如图 5 所示，左右对称的三角形对应灰度取最小值的谷值像元，左右

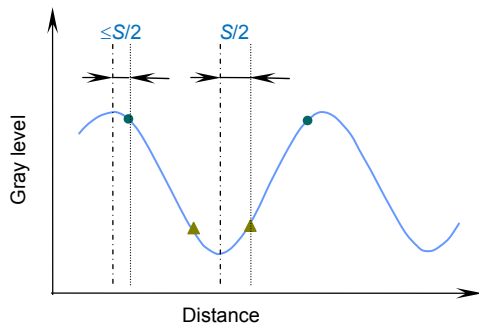


图 5 PVR 取最小值的曲线分割
Fig. 5 Curve division for PVR minimum

对称的圆点对应灰度取最大值的峰值像元。实际操作时，先在单个像元灰度随位移变化曲线的最小值左右两侧 $S/2$ 处确定起始三角形的位置，接着按等间距 S 分别向两侧分割取点，直到所取的点距离峰值 $\leq S/2$ ，该点即为圆点位置，两者灰度的比值实际为最大谷值与邻近峰值的比值。

其简单证明如下所述。可以用下面的简单函数表示图 5 中的连续曲线：

$$y = a + b \sin x, \quad (3)$$

其中： a 、 b 为正数，且 $a > b$ 。实际使用中，图 5 对应的分割可能遇到的典型情况如图 6 所示。

PVR 值可表示为

$$\begin{aligned} R_{PVR} &= \frac{a + b \sin(x_0 + nS)}{a + b \sin x_0} \\ &= \frac{a + b \sin(x_0 + nS)}{a + b \sin(x_0 - S)} \\ &= \frac{a + b \sin(x_0 - S - nS)}{a + b \sin(x_0 - S)}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中： $\pi/(n+1) < S < \pi/n$ ， n 为正整数。

当分割点稍微向右移动时对应的分割取点结果如图 7 所示。

对于图 7(a)，新的谷值位置为 $x_0 - S$ ，右侧峰值比左侧峰值更小，因此以右侧峰值比谷 PVR 值作为判定基准，可表示为

$$R_{PVR} = \frac{a + b \sin(x_0 + nS)}{a + b \sin(x_0 - S)}. \quad (5)$$

对于图 7(b)，新的谷值位置仍为 $x_0 - S$ ，左侧峰值比右侧峰值更小，因此以左侧峰值比谷值作为判定基准，PVR 值可表示为

$$R_{PVR} = \frac{a + b \sin(x_0 - S - nS)}{a + b \sin(x_0 - S)}. \quad (6)$$

对式(5)和式(6)求导，其结果分别为

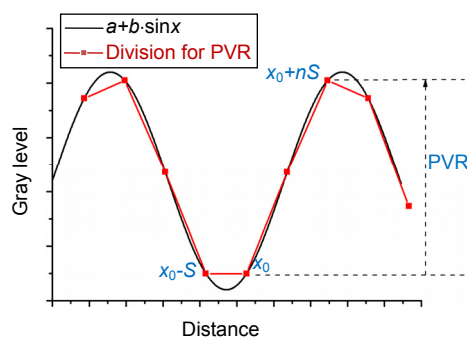
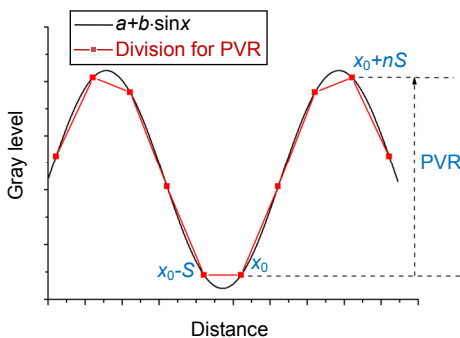


图 6 典型情况
Fig. 6 Typical results

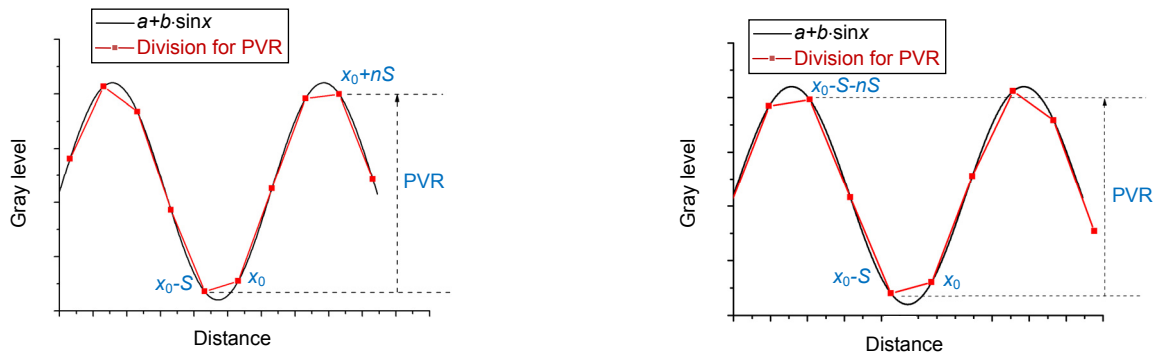


图 7 与图 6 对应的分割点右移

Fig. 7 The results of division points in figure 6 moving to the right

$$R'_{PVR} = \frac{ab[\cos(x_0 + nS) - \cos(x_0 - S)]}{[a + b \sin(x_0 - S)]^2} - \frac{b^2 \sin(nS + S)}{[a + b \sin(x_0 - S)]^2}, \quad (7)$$

$$R'_{PVR} = \frac{ab[\cos(x_0 - S - nS) - \cos(x_0 - S)]}{[a + b \sin(x_0 - S)]^2} + \frac{b^2 \sin(nS)}{[a + b \sin(x_0 - S)]^2}, \quad (8)$$

根据 S 的取值范围及图 7 中各点的位置可知, 式 (7) 和式 (8) 的值均大于 0, 另外考虑曲线的对称性, 分割点左移的情况下结果也相同, 因此按图 5 所示分割时, PVR 取值为最小值。实际操作时, 只用按图 5 的方式操作获得这个 PVR 值, 若该值大于 $\sqrt{2}$, 则黑白线对在任何成像相对位置均可分辨。

3 实验结果

实际测量面阵成像光谱相机的空间分辨力时, 可首先依据 $F\lambda/d$ 值判断限制空间分辨能力的主要因素, 在探测器的分辨能力是主要因素时, 才有采取本文方法的必要, 否则可直接采用基于黑白线对的测量方法。

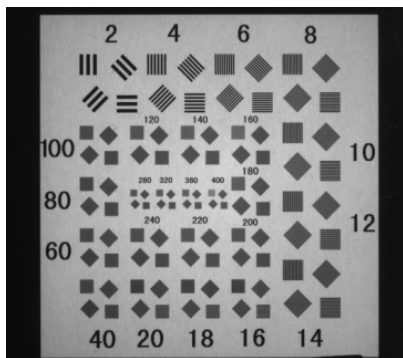


图 8 测试分辨力板

Fig. 8 The resolution board for testing

实验对一基于液晶可调节滤光片的光谱相机在 620 nm 波长进行了空间分辨力测试, 镜头 F 数为 2.8, 像元尺寸 11 μm , 计算得到 $F\lambda/d$ 值为 0.16, 因此采取本文的方法。黑白线对取自 A 型分辨力板 (图 8), 物体平移采用步进电机位移台且步进值为 1.5 μm 。首先通过多名实验人员观察放大显示的分辨力板图片, 初步判读结果为 40 lp/mm 线对模糊不清, 20 lp/mm 及 18 lp/mm 线对有条纹显示 (图 9 为某一成像位置下, 20 lp/mm 及 18 lp/mm 线对的成像结果及与黑白线对的对应关系), 16 lp/mm 线对条纹对比明显。为进一步准确判定系统的空间分辨能力, 对 20 lp/mm 及 18 lp/mm 线对采用本文介绍的方法进行数值分析。

4 数据分析

图 10 给出了 18 lp/mm 线对 (图 10(a)) 和 20 lp/mm 线对 (图 10(b)) 平移方向上相邻两个像素的灰度随位移的变化曲线, 为了减小探测器噪声及实际像素差异带来的影响, 像素灰度值选取了垂直于平移方向上 11 个像素的平均。图中两条实线的拟合方程分别为 (18 lp/mm 对应式 (9), 20 lp/mm 对应式 (10)):

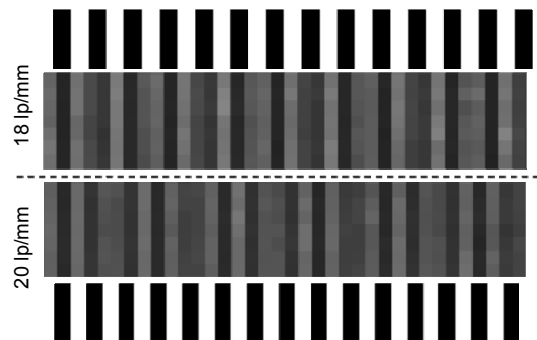


图 9 成像结果及与黑白线对的对应关系

Fig. 9 The imaging results and the correspondence of black-white lines

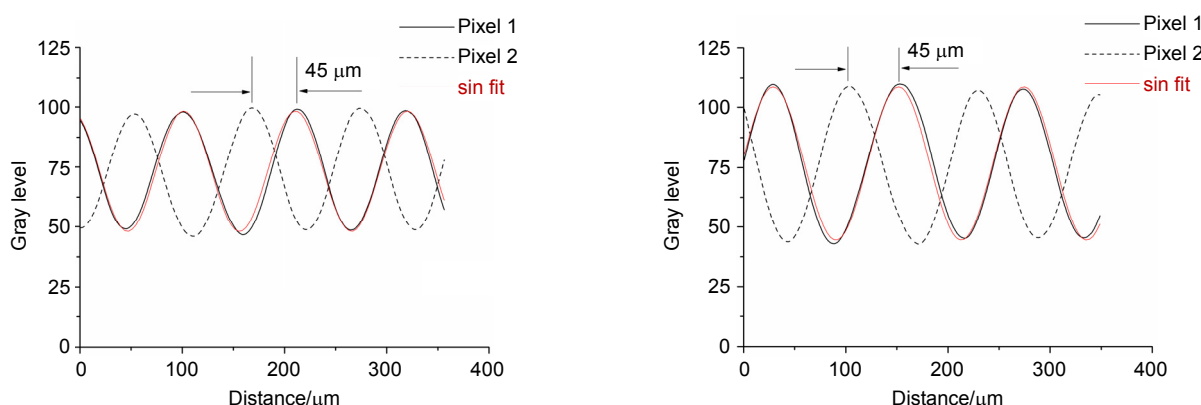


图 10 相邻像素的灰度随位移的变化。(a) 18 lp/mm; (b) 20 lp/mm
Fig. 10 Gray level variation of adjacent pixels with shift. (a) 18 lp/mm ; (b) 20 lp/mm

$$y = 76.44 + 32.00 \sin\left(\pi \times \frac{x - 1.74}{61.37}\right), \quad (9)$$

$$y = 73.18 + 25.14 \sin\left(\pi \times \frac{x - 74.02}{54.72}\right). \quad (10)$$

常数项代表平均灰度,系数项代表振幅,18 lp/mm 线对的振幅大于 20 lp/mm 线对,表示明暗条纹的灰度差异大,易于分辨,与图 9 的图片直观感受是一致的。两幅图中 Pixel 2 的对应曲线移动 45 μm 均与 Pixel 1 的对应曲线重合,所以 S 值为 45 μm。依据该 S 值按图 5 的方式分割 Pixel 1 的灰度位移曲线,得到 18 lp/mm 线对相应的 PVR 值为 1.685,20 lp/mm 线对相应的 PVR 值为 1.386,20 lp/mm 线对的 PVR 最小值已经小于 $\sqrt{2}$,在部分成像相对位置不可分辨,18 lp/mm 线对的 PVR 最小值大于 $\sqrt{2}$,因此在所有成像相对位置均可分辨。

5 结论

目前的数字成像设备在空间分辨力测量时需要考虑探测器的分辨能力限制带来的结果偏差。光谱成像领域已建立的空间分辨力量化测量方法^[5-6],虽然有效避免了人眼判读方法的不足,但探测器分辨能力不足带来的结果偏差仍未被考虑。本文提出的测量方法充分考虑了成像位置的影响,有效避免了这种偏差。

本文的方法适用于面成像光谱相机空间分辨力的实验室精确测量,其基于一系列精密平移下的黑白线对光谱图像,通过对单个像素灰度随位移变化曲线的一种分割取点,得到光谱相机在各种成像相对位置下都能分辨的空间分辨力结果。该方法充分考虑了误差来源,数据处理相对简单,利于不同实验间的空间分辨力测量结果保持一致。另外该方法还可以应用于面

阵成像系统调制传递函数的精确测量,方便找到与系统 Nyquist 频率匹配的测量目标。

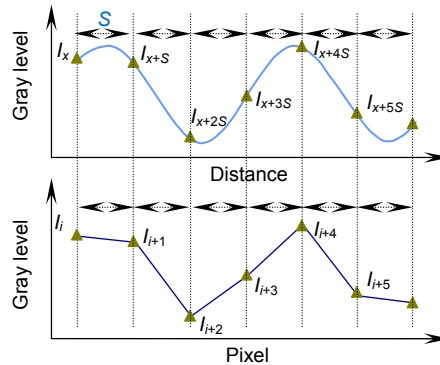
参考文献

- [1] Zhang S R. Basic parameter selection in the development of electro-optical imaging remote sensor[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 1981(2): 18–21, 17.
张声荣. 光电成像遥感器研制中一些基本参数的选择[J]. *中国空间科学技术*, 1981(2): 18–21, 17.
- [2] Ding X B. Comparison of static resolving power of CCD and photographic film[J]. *Image Technology*, 1997(2): 50–51.
丁晓波. 感光胶片与 CCD 的静态分辨力比较[J]. *影像技术*, 1997(2): 50–51.
- [3] Holst G C. Imaging system performance based upon FA/d [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(10): 103204.
- [4] Wu Q H, Hu J, Wu Z G, et al. Digital still cameras—Resolution measurements: GB/T 19953–2005[S]. Beijing: China Standard Press, 2006.
吴启海, 胡峻, 郭子刚, 等. 数码照相机分辨率的测量: GB/T 19953–2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [5] Polder G, van der Heijden G W A M. Calibration and characterization of spectral imaging systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4548: 10–17.
- [6] Wang W L, Li C Y, Tollner E W, et al. A liquid crystal tunable filter based shortwave infrared spectral imaging system: calibration and characterization[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 80: 135–144.
- [7] Wang L, Zhang P, Feng H J, et al. An inversion analysis method based on multi-shift imaging for improvement of CCD imaging resolution[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2003, 30(3): 62–65.
王凌, 张平, 冯华君, 等. 用多次移位成像提高 CCD 成像分辨力的反演解析[J]. *光电工程*, 2003, 30(3): 62–65.
- [8] Guzhov V I, Il'inykh S P, Marchenko I O. Method of increasing the spatial resolution in digital holographic microscopy[J]. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2018, 54(3): 301–306.
- [9] Yang H, Jiao W C, Zhu Y H, et al. Modulation transfer function of CCD camera at Nyquist frequency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(3): 313–316.
杨桦, 焦文春, 朱永红, 等. CCD 相机在系统奈奎斯特频率处的调制传递函数[J]. *光学学报*, 2002, 22(3): 313–316.

An accurate measurement method for the spatial resolution of area array spectral imaging equipment

Chu Songnan, Liu Haitao, Hu Qiqi, Wang Haifeng, Zhang Dayong, Luo Yongquan*

Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China



Example for curve division

Overview: Spatial resolution is an important performance parameter of digital imaging equipment. At present, the commonly used laboratory measurement method for human eyes is to interpret the image of the spatial resolution testing board. In the field of spectral imaging, a quantitative measurement method of spatial resolution based on data processing has been established. The spectral image of black-white line pair resolution testing board is taken in this method. If the ratio of the adjacent gray peak value and gray valley value (PVR) corresponding to the black-white line pair on the image is larger than $\sqrt{2}$, the line pair can be distinguished. However, when the detector is not capable of resolving the targets, the method has the phenomenon of different measurement results caused by different imaging locations, which will make the results obtained by different experiments difficult to be consistent. In order to solve the above problems, this paper proposes an accurate measurement method for the spatial resolution of the camera of array spectral imaging. By taking a series of spectral images of black-white line pairs under continuous precision displacement, the curve of variation of gray level with displacement of two adjacent pixels in the translation direction is drawn. If the difference in pixel sizes is ignored, the spacing between two curves in the translation direction corresponds to the imaging range value of a single pixel. With arbitrary points as the starting point and with the imaging range value of a single pixel as the space to segment the smooth gray level curve of a single pixel varying with displacement, the distribution results of gray level with pixel in various possible imaging locations can be obtained theoretically. Then, the minimum value of PVR value is found. If the minimum value is greater than $\sqrt{2}$, the black-white line pair can be distinguished at all imaging locations. If the minimum value is less than $\sqrt{2}$, the black-white line pair cannot be distinguished at the some imaging locations. As the gray level distribution of the black-white line pair image is close to sinusoidal distribution near Nyquist frequency, the moving step of imaging can be reduced by curve fitting, and the curve of pixel gray level changing with displacement is more smooth. Then, the paper proves that a simple curve segmentation method can directly obtain the minimum PVR value, which significantly reduces the data processing capacity of this method. At last, the feasibility and correctness of the method are verified by the experimental measurement for an area array spectral imaging equipment. This method can effectively avoid the defects of existing methods when the resolution of detector is insufficient, the data processing is relatively simple, and the results are reliable, which is conducive to maintaining the consistency of the measurement results of spatial resolution between different experiments. In addition, this method can also be applied to the accurate measurement of the modulation transfer function of the array imaging system, so as to quickly find the measurement target matching the Nyquist frequency of the system.

Citation: Chu S N, Liu H T, Hu Q Q, *et al.* An accurate measurement method for the spatial resolution of area array spectral imaging equipment[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, **46**(11): 180458

Supported by National Key R&D Program of China (2017YFC0803806) and National Engineering Laboratory for Forensic Science Open Object Fund (2017NELKFKT04)

* E-mail: uestcaep@126.com