

文章编号 1004-924X(2007)09-1353-08

空基紫外成像仪关键器件 ICCD 非均匀性校正技术

王加朋^{1,2}, 王淑荣¹, 李福田¹, 宋克非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 研究生院, 北京 100039)

摘要:从理论上分析了 ICCD 光电响应非均匀性的产生机理,并由此建立光电响应数学模型。基于两点多段非均匀性校正算法给出了 ICCD 非均匀性校正方程,并通过大量实验得到 ICCD 在特定条件下的校正系数。在实验过程中发现 ICCD 的雪花点(主要由探测器的随机噪声引起)和盲点是影响非均匀性改善的主要因素,采取相应照度的响应进行了补偿。结果表明:通过补偿和校正输出图像,可以有效地减小紫外成像仪由探测器的非均匀性所带来的测量误差,使非均匀性降低了 37.1%,在一定程度上减少了由于 ICCD 的物理特性和制造缺陷所带来的固有图像噪声。

关键词:紫外成像仪;ICCD;非均匀性;线性校正;两点多段校正法;噪声补偿

中图分类号:TN386.5;TN23 文献标识码:A

Non-uniformity correction of key device ICCD in ultraviolet imager

WANG Jia-peng^{1,2}, WANG Shu-rong¹, LI Fu-tian¹, Song Ke-fei¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China*)

Abstract: The mechanism of optoelectronic non-uniformity characteristic in Image Intensified Charge Coupled Device (ICCD) was analyzed, and then a response characteristic mathematic model was proposed. Base on the two-point multi-section method, a non-uniformity equation of ICCD in ultraviolet imager was given and correction coefficients were obtained in specific experiment condition. In the experiments, it is found that the "snow like flicker" (mainly composed of the shot noises of detector) and blind pixels are the main factors of the non-uniformity improvement, which can be compensated by the response values under corresponding illumination. The results show that the compensated and corrected image has effectively reduced the measurement error brought by non-uniformity of the detector and the uniformity decreases by 37.1%. Proposed method and experiment can reduce the intrinsic pattern noise brought by the physical characteristics of ICCD and fabrication defects in certain degree.

Key words: ultraviolet imager; Image Intensified Charge Coupled Device (ICCD); non-uniformity; linearity correction; two-point multi-section correction method; noise compensation

1 引言

除可见/近红外、热红外和微波遥感以外,空基紫外成像技术是一种具有突出优势的遥感技术,在地球环境监测、气象、军事预警、空间科学等卫星上发挥着重要作用。空基紫外成像仪工作在 245~380 nm 波段,主要用于对地球临边方向上紫外波段临边散射辐射特性的探测。根据气象局数据估算到达紫外成像仪焦平面的像面辐射照度最小可达 $2 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,属于微光探测,所以选用第二代像增强型电荷耦合器件 (ICCD) 作为成像探测器件。探测器材料、制造工艺、探测器内部读出电路的影响会造成 ICCD 的非均匀性,这种非均匀性不仅会影响系统的成像质量,降低空间分辨率和系统信噪比,严重时甚至会影响到成像系统的工作。为了使紫外成像仪输出的图像能够更准确地反映地球临边紫外辐亮度信息,提高测量准确度和有效改善图像质量,必须对紫外成像仪关键器件 ICCD 的光电转换均匀性进行分析和校正,这是保障空基紫外成像系统测量精度和系统可靠性的关键技术环节。本文从量化光学遥感测量的需求出发,分析了 ICCD 非均匀性产生的机理并根据非均匀性产生的原因,建立了相应的光电响应数学模型,基于两点多段非均匀性校正算法给出 ICCD 非均匀性校正方程,并通过大量实验得到 ICCD 在特定条件下的校正系数,结合随机噪点和盲点的初步补偿,实现了对 ICCD 的非均匀性校正。

2 ICCD 光电转换非均匀性产生的原因

紫外成像仪主要由光学系统、光谱转换面、光阴极、微通道板 (MCP)、荧光屏、光锥、CCD 以及驱动电路组成,其核心部件 ICCD 的结构如图 1 所示。

紫外成像仪的工作过程如下:

在感兴趣的紫外波段 (245~380 nm),紫外成像仪的光学系统将地球临边成像于光谱转换面上,实现由紫外光谱到可见光谱的转化,通过光纤面板耦合到 ICCD 的光电阴极上进行光电转换;

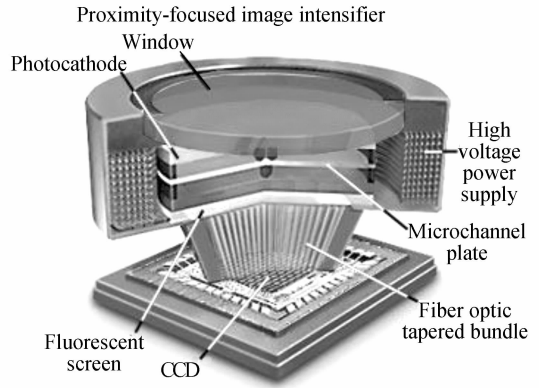


图 1 ICCD 结构示意图

Fig. 1 Schematic of ICCD's structure

所生成的光电子在高压电场的加速下通过 MCP 进行电子倍增,从而实现弱目标的放大;

倍增过的电子轰击到荧光屏上实现由电子到光子的转换;

光子通过光锥将增强过的紫外图像传递到 CCD 光敏区进行光电转换和存储;

在 CCD 驱动控制电路的控制下,将 CCD 积累的电荷转移出来形成供显示或存储用的标准电视信号输出。

ICCD 作为一个微光信号探测器,在天文目标观测,空间目标的捕获、跟踪和瞄准以及夜视应用等领域有广泛的应用^[1]。由于它的物理特性和制造缺陷,像增强器既是一个微光信号转换和倍增器件,同时也是一个噪声源。因此在微光像增强器技术中,图像信号的增加往往伴随着噪声的增加。ICCD 在进行图像信息的转换及增强时不可避免地伴随着附加噪声,从而使输出图像的均

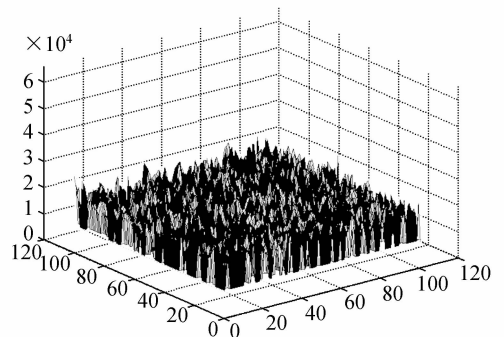


图 2 紫外成像仪 ICCD 器件的非均匀性 (100 pixel × 100 pixel)

Fig. 2 Non-uniformity of ICCD in UV imager (100 pixels × 100 pixels)

均匀性和信噪比下降。ICCD 的噪声有许多,如光阴极的暗电流、MCP 的热噪声、增益起伏噪声、荧光屏的散粒噪声和 CCD 本身的噪声等^[2]。图 2 反映了从一个 480 pixel×640 pixel 像元的 ICCD 中抽取一块像元的典型响应不均匀性状况。

分析紫外成像仪关键器件 ICCD 的光电转换非均匀性产生的原因对于建立相应数学模型很重要。下面就 ICCD 自身各部分和外界因素几个方面来分析非均匀性的来源。

2.1 光阴极的随机噪声

由于光电阴极的量子效率具有泊松分布几率,由此产生的光电子具有一定的随机性,这种噪声属于散弹噪声,存在于任何光电探测器中。在 CCD 积分时间内散弹噪声的数学期望为零,幅度的概率密度函数为高斯分布^[3]。ICCD 中由于 MCP 的数千倍放大作用,对输出图像的非均匀性有一定的影响。

2.2 MCP 增益非均匀性

微通道板在有信号输入时,有三种因素使微通道板的增益呈现非均匀性。(1)微通道板输入端的开口面积有限,随机变化的入射电子落入非开口面积不能进入通道,损失部分入射电子。(2)入射电子的运动方向与通道轴线一致时,电子直接贯穿通道而不倍增。(3)通道内二次电子倍增时,由于每个二次电子的出射角和动量不同,产生二次电子的数目不同,并且二次电子的逸出几率也与多种因素相关^[2,4-5]。(4)由于微通道板是众多通道的熔合阵列,因此阵列中部分区域间在通道直径上的偏差将造成相应区域间增益的不同,在像增强器的应用中就形成了输出像的固定图案噪声,严重时荧光屏上呈现非常明显的亮区或暗区,最常见的增益不均发生在复丝间的交界处,这种现象称为复丝边界噪声或“鸡丝”(Chicken wire)^[2]。

2.3 荧光屏的颗粒噪声

荧光屏的结构具有空间非均匀性,发光特性受到此非均匀性结构的制约。又由于荧光屏发光本身的量子效率是一个离散的变量,实测和理论分析证明,这一随机变量的几率分布符合泊松分布规律^[6]。所以当荧光屏受到电子激发时,其输出的光分布将呈颗粒状闪烁^[7],由此造成像管输出的噪声,并且使输出图像具有一定的非均匀性。

2.4 CCD 非均匀性原因

受目前的材料制造及工艺所限,CCD 器件的材料中会出现掺杂不均、厚度不等和探测元尺寸不均等各种缺陷,造成不同探测单元之间参量的不同,从而引起探测单元响应的差异^[8]。探测单元和读出电路之间的信号耦合以及读出电路的电荷传输效率也存在着差异,这些都将引起器件响应输出信号的非均匀性。

2.5 ICCD 的增益控制电路

ICCD 中 MCP 的自饱和现象和像增强器部分的自动亮度控制(ABC)电路严重影响了 ICCD 的线性工作范围。因此,本实验只能在 ICCD 的光电特性近线性区域内进行。图 3 为近贴式像增强器荧光屏随光阴极照度变化的曲线,可见只有当像增强器入射窗上照度 $<10^{-1}$ lx 时,输入输出才呈线性关系,测量数据才有实际意义。因此,要想扩展线性器件的工作范围必须对 ICCD 器件的非线性环节进行改造。

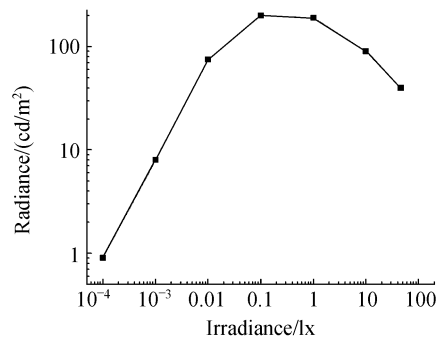


图 3 荧光屏随光阴极照度变化的曲线

Fig. 3 Curve of screen luminance vs. photocathode illuminance

2.6 与外界输入人相关的非均匀性

在紫外成像系统中,目标和背景紫外辐射的变化范围、紫外成像仪光学系统的背景辐射等外界特性均对成像器件 ICCD 的非均匀性产生影响。景物的紫外辐射变化主要有辐射总量和辐射光谱两种形式。由于 ICCD 光谱响应变化比较复杂,辐射总量的响应均匀性并不能保证其辐射光谱变化后仍有相同的均匀性。紫外光学系统的背景辐射条件的变化也将直接影响 ICCD 所处的工作环境、工作参数和工作性能,这类非均匀性与实际外界条件密切相关,在微光器件的研制和紫外成像系统的设计中很难直接观测到。如果把紫外

成像系统看成是地球大气光谱辐射强度与图像灰度的变换系统,人们可从实际紫外成像系统的图像信息传递过程去分析图像非均匀性的产生机理和变化形态,但要获得完整的分析结果都是很困难的,因为在紫外图像的传递过程中许多非均匀性因素是相互耦合并以综合形态表现出来的。在完整的紫外图像非均匀性产生机理和分析理论确立以前,采用实际测量方法是目前人们分析紫外图像非均匀性的一种有效手段。通常非均匀性测试采用标准黑体辐射面源,通过比较紫外成像系统的输入与输出图像的均匀性来获得对被测器件或系统的总体认识。

3 建立数学模型

国内外阵列器件的非均匀性校正算法大体可以分为两大类,即基于参考辐射源的校正算法(例如两点校正、多点校正算法等)和基于场景的校正算法(例如场景统计法、神经网络法等)。前者的基本思想是利用参考辐射源给焦平面器件提供均匀的辐照度,对每个探测单元的响应输出进行测量,由此计算出各探测单元的校正参数。而后者计算校正增益因子和偏置因子的数据不是取自参考源,而是全部或部分来自基于场景的估计。算法实现大多采用 DSP 或 FPGA 技术,主要是解决校正算法的实时实现问题。由于受当前技术水平的限制,后者目前尚无法满足实时实现的要求,因此在实际系统中比较青睐基于参考辐射源的校正算法。下面基于 ICCD 非均匀性的影响因素及相关假设建立非均匀性校正数学模型。

ICCD 众多光敏元对光辐射有各自的响应,这些响应没有一定的关系,而且光敏元的响应率又呈非线性,这给非均匀性校正带来了很大的困难。为此基于 ICCD 非均匀性产生原因的分析,可将非均匀性分为以下几个方面:第一是空间的非均匀性,也就是对同一光辐射通量不同敏感元的光电响应特性不一致;第二是非线性,即各个光敏元对同一光辐射通量增量的响应不同;第三是时间非均匀性,指同一光敏元在不同时间对相同光辐射通量的响应不同,可以说非均匀性是时变的;第四是光谱响应非均匀性。一般可以认为探测器的非均匀性是光辐射通量、像元位置、采样时间、光辐射波长的函数^[9],可用下式表示:

$$R = F(\Phi, i, j, t, \lambda), \quad (1)$$

其中, Φ 表示光辐射通量, i 和 j 表示敏感元的位置, λ 表示入射光辐射波长, t 表示 CCD 采样时间。

四种非均匀性可以分别用式(2)~(5)来表示:

$$R_1 = f(\Phi, i, j), \quad (2)$$

$$R_2 = \xi(i, j), \quad (3)$$

$$R_3 = \Psi(t), \quad (4)$$

$$R_4 = \gamma(\lambda). \quad (5)$$

由于本课题中的紫外成像仪在光学系统中加有紫外滤光片并使用了光谱转换技术,光辐射被限制在 CCD 光谱响应截止波段以内,式(5)对非均匀性的影响可不计。考虑到具体数学表达式的复杂性,通常认为探测器的非均匀性是线性变化的(除去像元盲点),所以式(3)可忽略。另外,探测器的非均匀性还包含光阴极暗电流、微通道板背景噪声、读出电路电噪声等固定噪声的影响,并且是加性噪声。在这样的情况下,探测器的非均匀性模型可表示为:

$$V_{i,j}(\Phi, t) = R_{i,j} \times \Phi + O_{i,j}(t), \quad (6)$$

其中 $V_{i,j}(\Phi, t)$ 为在入射光辐射通量为 Φ 时第 (i, j) 个探测元的输出信号; $R_{i,j}$ 为第 (i, j) 个探测元的光电响应特性的增益系数或特性曲线的斜率,与 Φ 不相关; $O_{i,j}(t)$ 是由暗电流输出造成的信号偏移量也就是特性曲线的截距,实验证明, $O_{i,j}(t)$ 基本上为随时间围绕某一值上下波动的随机噪声。从单个像元考虑,非均匀性校正基于稳定均匀光源的,光源的不稳定、光阴极光电发射的量子噪声、荧光屏的光电导产生一复合噪声、微通道板噪声以及帧间处理不均匀等一些不确定因素都会在一定程度上影响 ICCD 的光电响应,即在一定的时间内 ICCD 输出信号强度不稳定,因此会造成像元在某一段时间内输出响应围绕某一平均值上下波动。某一照度下,任取连续 15 frames 图像上空间的一点绘出图像灰度值随帧数变化曲线如图 4 所示。

考查每一瞬间的这一数值,可以看出它们是围绕其平均值起伏变化的离散随机变量。因此需要在稳定的入射辐射强度激发下,获得确定的累计平均光电子发射响应值并统计出响应波动范围(即阈值)。若某一像元的响应与累计均值偏差大于设定的阈值,那么将该像元判为噪点,并用该照度下响应的数学期望值代替该像元值作为补偿。

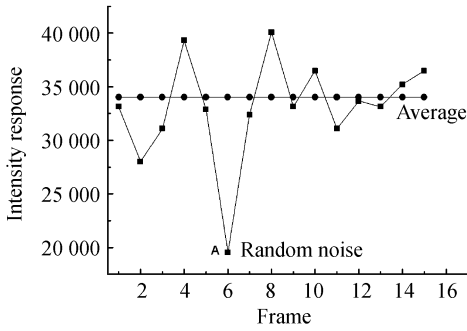


图 4 空间任意一点在连续 20 帧图像中的响应值变化曲线

Fig. 4 Variable response value of a random point in continuous 20 frames

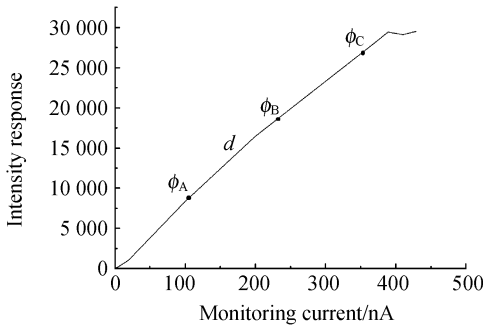


图 5 不同照度下的 ICCD 图像平均灰度响应曲线

Fig. 5 ICCD gray-tone response under different illumination levels

这样就可以消除时间项的影响, 即式(4)的影响可以忽略。由图 5 可知, 在本实验中平均光敏元在一定范围内呈线性变化, 所以化简式(6)采用如下线性模型:

$$V_{i,j}(\Phi) = R_{i,j}\Phi + O_{i,j}, \quad (7)$$

针对式(7)可采用下式加以校正:

$$U_{i,j}(\Phi) = G_{i,j} \times V_{i,j}(\Phi) + Q_{i,j}, \quad (8)$$

其中 $G_{i,j}$ 和 $Q_{i,j}$ 分别为校正增益和校正偏移, $U_{i,j}(\Phi)$ 为校正后的输出。通过式(8)对式(7)建立的 ICCD 响应模型进行非均匀性校正。校正目标为: 某一探测元在任一入射辐照度下的输出信号 $V_{i,j}(\Phi)$ 校正为整个面阵列 CCD 在辐照度 Φ 下的空间平均信号 $\langle V(\Phi) \rangle$, 即使 $U_{i,j}(\Phi) = \langle V(\Phi) \rangle$ 。图 6 为各像元非均匀性校正示意图。在 ICCD 工作范围内取两入射光辐射通量 Φ_1 和 Φ_2 作为定标点, 由式(7)可得:

$$V_{i,j}(\Phi_1) = R_{i,j} \times \Phi_1 + O_{i,j},$$

$$V_{i,j}(\Phi_2) = R_{i,j} \times \Phi_2 + O_{i,j},$$

取空间平均得:

$$\langle V(\Phi_1) \rangle = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1, j=1}^{m, n} V_{i,j}(\Phi_1)$$

$$\langle V(\Phi_2) \rangle = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1, j=1}^{m, n} V_{i,j}(\Phi_2),$$

将式(7)取空间平均得:

$$\langle V(\Phi) \rangle = \langle R \rangle \times \Phi + \langle O \rangle, \quad (9)$$

将式(9)代入式(7)整理得到第 (i, j) 个探测元的校正值

$$U_{i,j}(\Phi) = \langle V(\Phi) \rangle =$$

$$\frac{\langle V(\Phi_2) \rangle - \langle V(\Phi_1) \rangle}{V_{i,j}(\Phi_2) - V_{i,j}(\Phi_1)} V_{i,j}(\Phi) + \frac{V_{i,j}(\Phi_2) \langle V(\Phi_1) \rangle - V_{i,j}(\Phi_1) \langle V(\Phi_2) \rangle}{V_{i,j}(\Phi_2) - V_{i,j}(\Phi_1)}$$

令

$$G_{i,j} = \frac{\langle V(\Phi_2) \rangle - \langle V(\Phi_1) \rangle}{V_{i,j}(\Phi_2) - V_{i,j}(\Phi_1)}$$

$$Q_{i,j} = \frac{V_{i,j}(\Phi_2) \langle V(\Phi_1) \rangle - V_{i,j}(\Phi_1) \langle V(\Phi_2) \rangle}{V_{i,j}(\Phi_2) - V_{i,j}(\Phi_1)},$$

用式(8)就可以对处于 Φ_1 和 Φ_2 之间的像元进行校正。由 $(V_{i,j}(\Phi_1), \langle V_{i,j}(\Phi_1) \rangle)$ 和 $(V_{i,j}(\Phi_2), \langle V_{i,j}(\Phi_2) \rangle)$ 两点确定的直线即为 (i, j) 探测元的校正曲线。

两点校正是基于探测单元在工作范围内呈线性变化, 但实际上探测单元的响应为非线性。当工作范围发生变化时, 探测单元响应非线性就表现出来, 此时校正曲线与实际响应曲线的偏差增大, 相关系数变小, 校正响应模型的精度就会显著下降。而使用多点的线性插值算法和基于场景的校正算法(例如场景统计法、时域高通滤波法、人工神经网络法等), 虽然准确度高, 但运算量大, 受当前技术水平限制, 在工程上还存在一定的问题。为此结合 ICCD 实验数据(参见图 5 不同照度下的 ICCD 图像平均灰度响应曲线), 运用两点多段法对 ICCD 工作范围进行了分段校正, 然后每段均采用线性近似的办法来处理, 即用多段折线近似逼近理想的曲线。首先判断该灰度值在哪个线性区域内, 然后根据对应的校正参数对其进行校正。如图 5 所示, 当处于照度 Φ_A 和 Φ_B 之间的照度 d 下且读数为 $V_{i,j}$ 即 $V_A < V_{i,j} < V_B$ 时, 采用 AB 段校正参数; 当 $V_b < V_{i,j} < V_c$ 时, 采用 BC 段校正因子。如图 7 两点多段校正法原理所示。此种校正方法不用考虑光辐射照度 Φ (其实在微

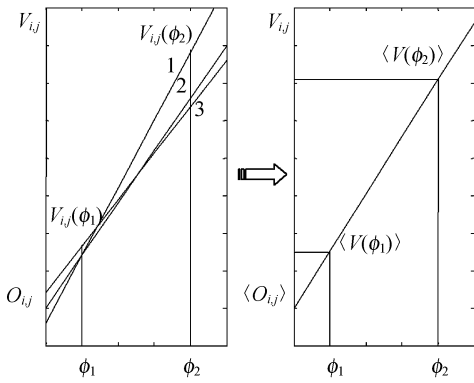


图 6 非均匀性校正示意图

Fig. 6 Schemes of non-uniformity correction method

光情况下很难测量)具体是多少,直接通过图像灰度值就可使输出图像的均匀性得到合理地校正。

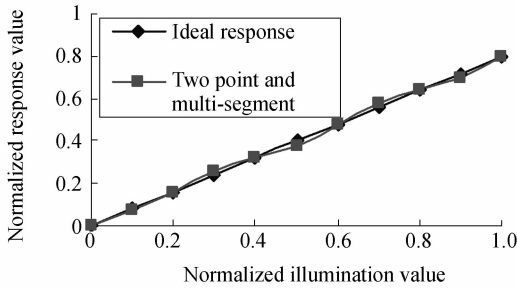


图 7 两点多段校正法原理

Fig. 7 Principle of two-point multi-segment method

4 实验结果分析

本实验选择了 Spheroptics 公司的 TX-20Z-UV 积分球系统作为光源。该积分球直径为 50.8 cm (20 inch), 开口直径为 20.32 cm (8 inch), 内部涂料为 spectralon 材料, 具有良好的朗伯余弦特性和抗紫外辐射特性。系统由卤钨灯和氙灯混合照明, 在 250~1 000 nm 能提供适宜的亮度输出和良好的均匀性。

为了考察 TX-20Z-UV 积分球系统输出的均匀性, 用硅探测器和中心波长为 350 nm 的滤光片所组成的辐射计测量了出射孔径的相对亮度。该辐射计视场约为 5°, 在积分球孔径上的投影是直径为 3 cm 的圆。测量在与出射孔径相垂直的方向进行, 在直径为 20.32 mm 的开口上共测量了 20 个位置的相对亮度, 最大的偏差出现在左上角为 2.5%。图 8 所示为实测的单独由氙灯照明情况下该积分球出射孔径的均匀性, 可见 TX-

20Z-UV 积分球系统的辐射特性是很接近朗伯辐射体的^[10]。

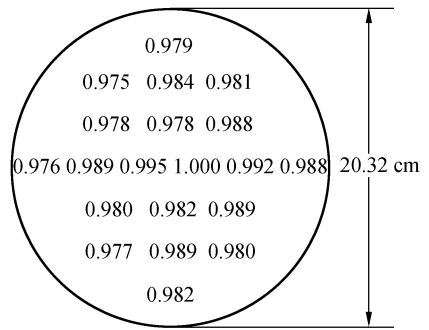


图 8 在 350 mm 处积分球出射孔径的均匀性 (300 W 氙灯照明)

Fig. 8 Uniformity of the integrating sphere exit aperture plane at 350 nm (illuminated by a 300 W xenon lamp)

在暗室中为了防止其他光源(如积分球氙灯和卤钨灯外置部分杂散光, 稳压电源和监测电流表显示杂光等)进入 ICCD 视场, 在 ICCD 前面加入了锥形光阑。同时为了减少光学系统像面照度不均和装调误差对 ICCD 均匀性的影响, 卸掉了成像仪光学系统, 使 ICCD 窗口直接面对积分球光源。图 9 为 ICCD 光电转换均匀性校正实验装置图。在试验中发现图像的“雪花点”严重地影响了探测器非均匀性的校正结果。经分析发现雪花点主要是由光电阴极暗电子发射噪声引起的, 并且这些随机噪声服从泊松分布^[5], 即随机噪声的出现属于小概率事件。所以有必要对阴极发射所引起的这部分散粒噪声进行抑制以提高图像信号信噪比。抑制散粒噪声最有效的方法是对被探测目标所发出的光进行长时间积累, 在此基础上设定一个阈值, 从而实现对被探测目标图像的保留以及对噪声图像的剔除。实验中紫外成像仪采用 PAL 电视制式 (25 frame/s), 按照 8 bit 进行采样, 总采样数为 640(H) × 480(V)/frame。为了提高图像量化精度和减小输出图像黑边现象对图像质量的影响, 将图像处理为 16 bit, 即每个像元有 2¹⁶ = 65 536 级灰度, 选取其中 616 × 470 有效像元作为操作数据。由于用有限采样来预测真实期望和方差的方法, 总存在一定的误差, 为了使数据的统计结果尽量精确, 所以要求选取的帧数越

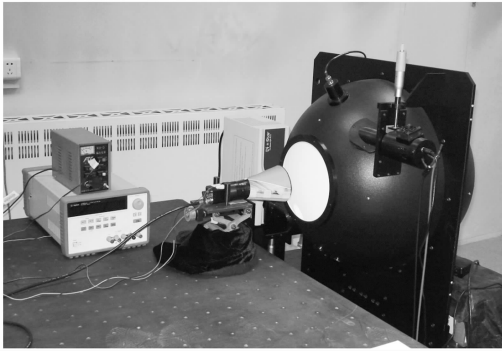


图9 ICCD 光电转换非均匀性校正实验装置

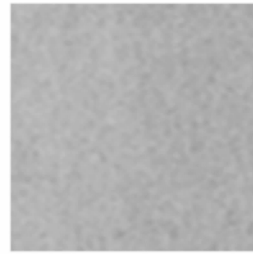
Fig. 9 Test facilities of ICCD's non-uniformity correction

多越好,当然也需综合考虑存储数据的容量和处理速度。本实验中连续采集了 20 frame 连续图像。由于探测器的制造缺陷不可避免存在盲元,其中包括死像元和过热像元,它们在一定程度上也降低了器件的均匀性。在红外探测器中大多采用预设比较门限值 σ 检测盲点和邻域插值法补偿盲点^[11]的办法。为降低 ICCD 的盲元对非均匀性校正的影响,同时兼顾校正速度,采用了均值法补偿像元。即当像元读出值小于前一校正点或大于后一校正点($V_{i,j} > V_{A,i,j}$, $V_{i,j} < V_{B,i,j}$)时,采用此照度下均值对其进行补偿。

对实验结果评价采用如下定义的指标:各光敏元在均匀适中辐照度下所输出的标准差与其平均值之比^[12],称为 ICCD 的不均匀性。即:

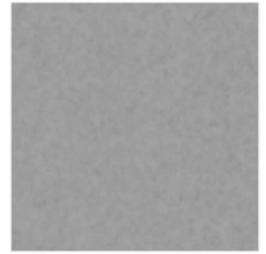
$$PRUN = \frac{1}{\langle V_{i,j} \rangle} \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (V_{i,j} - \langle V_{i,j} \rangle)^2}$$

实验结果表明,在不同光辐射通量下获得了十分逼近 ICCD 相应特性曲线的校正系数,显著提高了校正效果。图 10 中(a)和(b)分别为采用两点多段法校正前后的图像。校正后图像(b)与校正前图像(a)相比雪花点明显减小。PRUN 由校正前的 5.34% 减少到校正后的 3.36%,非均匀性降低约 37.1%。(c)和(d)为基于一定场景校正前后的图像。



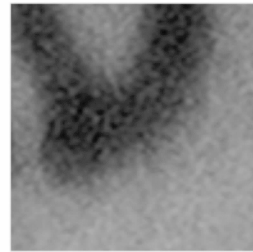
(a)采用两点多段法校正前的图像

(a)Image before correction



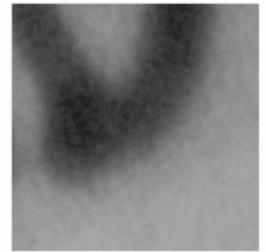
(b)采用两点多段法校正后的图像

(b)Image after correction



(c)基于一定场景校正前的图像

(c)Image before correction



(d)基于一定场景校正后的图像

(d)Image after correction

图 10 图像校正前后的效果

Fig. 10 Results of non-uniformity correction

5 结 论

ICCD 光电响应非线性和噪点抑制是 ICCD 非均匀性校正技术中的难题,目前还未有相关报道。本文从理论上分析了紫外成像仪的关键器件 ICCD 的光电响应非均匀性的产生机理,并根据非均匀性产生原因建立了光电响应数学模型,基于两点多段非均匀性校正算法给出 ICCD 非均匀性校对方程,并通过大量实验得到 ICCD 在特定条件下的校正系数,同时针对 ICCD 随机噪点和 ICCD 盲点采用相应照度的响应值进行了补偿。结果表明,通过校正输出图像可以有效地减小紫外成像仪由于探测器的非均匀性所带来的测量误差,使非均匀性降低了 37.1%,在一定程度上减少了由于 ICCD 的物理特性和制造缺陷所带来的固有图像噪声。

参考文献:

- [1] 艾克聪. 微光夜视技术的进展与展望[J]. 应用光学, 2006, 27(4): 303-307.
AI K C. Development and prospect of low-light-level (LLL) night vision technology [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(4): 303-307. (in Chinese)
- [2] 白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
BAI T ZH, JIN W Q. *Principle and Technology of Photoelectric Imaging* [M]. Beijing: Science and Technology of Beijing University Press, 2006. (in Chinese)
- [3] 闫丰, 于子江, 于晓, 等. 电晕探测紫外 ICCD 相机图像噪声分析与处理[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(4): 709-713.
YAN F, YU Z J, YU X, *et al.*. Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 709-713. (in Chinese)
- [4] LAPRADE B N. Low noise figure micro-channel plate optimized for Gen III image intensification systems[J]. *SPIE*, 1990, 1243: 162-172.
- [5] 但唐仁, 田景全. 低强度 X 射线影像系统的噪声分析及图像去噪处理[J]. 发光学报, 2002, 23(6): 615-618.
DAN T R, TIAN J Q. Imaging filter and noise analyse based on low intense X-ray image system[J]. *Chinese Journal of Luminance*, 2002, 23(6): 615-618. (in Chinese)
- [6] MORAN S E, UICH B L, ELKINS W P. Intensified CCD (ICCD) dynamic range and noise performance[J]. *SPIE*, 3137: 430-457.
- [7] 陈迎娟, 张之江. CCD 像素响应不均匀性的校正方法[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(2): 217-220.
CHEN Y J, ZHANG ZH J. Correction of CCD pixel non-uniformity[J]. *Opt. Precision Eng.*, 12(2): 217-220. (in Chinese)
- [8] 董珍时, 刘小波. 红外焦平面探测器非均匀性的简化数学模型[J]. 激光与红外, 2003, 33(3): 208-211.
DONG ZH SH, LIU X B. The simplified mathematical model research for infrared focal plane arrays nonuniformity [J]. *Laser and Infrared*, 2003, 33(3): 208-211. (in Chinese)
- [9] 王淑荣, 邢进, 李福田. 利用积分球光源定标空间紫外遥感光谱辐射计[J]. 光学 精密工程, 2004, 14(2): 185-190.
WANG SH R, XING J, LI F T. Spectral radiance responsivity calibration of ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space using integrating sphere[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 14(2): 185-190. (in Chinese)
- [10] 周慧鑫, 殷世民, 刘士乾, 等. 红外焦平面器件盲元检测及补偿算法[J]. 光子学报, 2004, 33(5): 598-600.
ZHOU H X, YIN SH M, LIU SH Q, *et al.*. Algorithm of Blind Pixels Auto-searching and Compensation for IR-FPA[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(5): 598-600. (in Chinese)
- [11] 蔡文贵. CCD 技术及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1992.
CAI W G. *The Technology and Application of CCD* [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 1992. (in Chinese)

作者简介: 王加朋(1980—), 男, 吉林农安人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 主要从事空间紫外光学遥感仪器应用研究工作。E-mail: wjp1009@126.com

通讯作者: 宋克非(1967—), 女, 吉林长春人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员, 主要从事空间紫外光学遥感仪器技术研究。E-mail: songkefei@sina.com