

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

# 电晕探测紫外 ICCD 相机图像噪声分析与处理

闫 丰<sup>1,2</sup>, 于子江<sup>1,2</sup>, 于 晓<sup>3</sup>, 娄洪伟<sup>1</sup>, 隋永新<sup>1</sup>, 杨怀江<sup>1</sup>

(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; 3. 空军航空大学 信息中心, 吉林 长春 130022)

**摘要:**分析了日盲电晕探测中探测器紫外 ICCD 相机噪声的构成特性,利用试验方法统计了 PROXITRONIC 公司第二代紫外 ICCD 相机不同增益下的光电阴极暗电子发射散粒噪声水平,提出了基于统计数据的阴极噪声的抑制方法,实现了对紫外 ICCD 相机散粒噪声的抑制。将此方法应用到电晕探测过程中,实验结果证明了该方法对图像噪声的抑制有效,保持了相机的动态范围。

**关键词:**紫外 ICCD 相机;像增强电荷耦合器件;散粒噪声;图像处理

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A

## Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection

YAN Feng<sup>1,2</sup>, YU Zi-jiang<sup>1,2</sup>, YU Xiao<sup>3</sup>, LOU Hong-wei<sup>1</sup>, SUI Yong-xin<sup>1</sup>, YANG Huai-jiang<sup>1</sup>

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

2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*

3. *Information Center, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)*

**Abstract:** The noise sources and its characteristics of a ultraviolet camera based on generation II ICCD were analyzed. Ultraviolet ICCD made by PROXITRONIC company was tested to give shot noise statistic data of the photocathode, which indicate the relationship between various MCP gain and shot noise created by photocathode. Based on statistic data, a restraining photocathode noise method was introduced to restrain the photocathode shot noise affection on image in image processing. Application of this method to corona detection, results show that this method is a availability in restraining image noise and keeing the dynamic range of the camera.

**Key words:** ultraviolet ICCD camera; charge coupled device; shot noise; image processing

## 1 引言

当高压输电线间电压增高到一定值将导致导

线表面的空气高度游离,从而失去良好的绝缘特性而变成导体,进而形成放电。严重的时候导线的表面空气会出现光圈、且伴有嘶嘶的声响,这种现象称之为电晕。电晕产生的同时伴有声、光、化

学反应等现象,容易导致供电设备的表面烧毛、腐蚀等结果,从而造成设备的寿命缩短,极易产生供电事故的发生。采用电晕探测来发现漏电故障点是一种可对电力系统故障点进行精确定位的探测方法<sup>[1]</sup>。电晕所发出的光其谱线范围涵盖了紫外、可见和红外谱段。由于多数情况下当可见谱段光出现的时候意味着故障点处的器件已经发生了损坏,而且利用电晕红外特性进行探测的手段受环境影响不能在白天使用,所以利用电晕紫外特性实现对其探测是目前电晕探测的首选方法。利用电晕能够发出波长在太阳日盲区<sup>[2]</sup>(220~280 nm)内的紫外光这一特征,可以通过探测太阳日盲区内紫外线存在与否的方法来实现对电晕的全天候可靠探测。由于电晕所发出的 220~280 nm 紫外光十分微弱,故而需要采用第二代增强型电荷耦合器件 (ICCD) 来实现对电晕的探测与成像<sup>[3]</sup>。

实际应用过程中,由于被探测的紫外目标(电晕)多为弱信号,需要使用 40% 以上的 MCP 放大(100% MCP 放大倍数为  $10^6$  倍)才能探测到电力系统中紫外目标—电晕的存在。而且由于紫外相机本身存在着暗电子发射,即便在没有紫外目标的前提下同样能够形成对图像的噪声干扰。在对弱信号进行放大的同时,不可避免地将噪声信号同时放大。为了既将紫外目标信号加以放大又能将紫外相机噪声对图像质量的影响降到最低,研究紫外相机图像噪声的形成以及特性十分重要。

## 2 紫外 ICCD 相机噪声分析

紫外 ICCD 相机由镜头、光电阴极、MCP 放大器、荧光屏、光锥、CCD 及其驱动电路组成。其核心部件 ICCD 的结构如图 1 所示。

紫外 ICCD 相机成像的过程如下<sup>[5]</sup>:

(1)景物所发出的紫外谱段光通过物镜照射在对紫外光敏感的光电阴极上进行光电转换;

(2)所生成的光电子经由高压电场加速后通过 MCP 进行电子倍增,从而实现对弱目标的放大;

(3)倍增过的电子轰击到荧光屏上实现电子→光子的转换。

(4)光子通过光锥将增强过的紫外目标图像照射在 CCD 上成像。

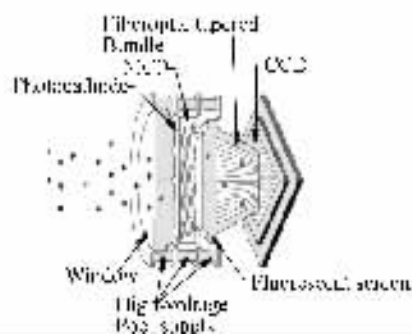


图 1 ICCD 结构示意图<sup>[4]</sup>图 2

Fig. 1 Construction of ICCD

(5)在 CCD 驱动控制电路的控制下,将 CCD 累积的电荷转移出来形成供显示用的标准电视信号输出。

经分析得知,此类紫外 ICCD 相机所成图像的噪声主要由以下几部分构成:

### 2.1 日盲阴极噪声 $n_{e_d}$

无光照下,由于热激发作用会随机地产生电子所造成的起伏。由于起伏单元是电子电荷量  $e$ ,故称为散粒噪声,又称散弹噪声,这种噪声存在于所有光电探测器中。散粒噪声的平均值为零,幅度的概率密度函数为高斯分布。对于用来进行微光探测的紫外相机而言,其放大倍数在数万倍乃至百万倍的水平。紫外相机内这部分噪声主要来源于光电阴极的暗电子发射。PROXTRONIC 公司出品的第二代日盲像增强器的暗电子发射可以达到  $3e^- / (cm^2 / s)$ 。<sup>[6]</sup>

### 2.1 光电子噪声 $n_{e_\gamma}$

由于光子本身也服从统计规律,平常说的恒定光功率,实际上是光子数的统计平均值,每一瞬时到达探测器的光子数是随机的。因此,光激发的载流子一定也是随机的,也要产生起伏噪声,即散粒噪声。因为这里强调光子起伏,故称为光子噪声。

光电子噪声为

$$n_{e_\gamma} = Q_E n_{\gamma_{pix}} [e^-], \quad (1)$$

其中:  $Q_E$  是阴极光电子转换的量子效率。对于第二代像增强器,  $Q_E$  的取值范围随入射光波长的不同而变化。对于波长为 220~280 nm 的紫外谱段光来讲,其量子效率  $Q_E$  介于 20% 左右。  $n_{\gamma_{pix}}$  为 CCD 每个像元上的光子数。

### 2.3 MCP 放大器噪声

MCP 是一种广泛应用的二维电子倍增器件。

由于电子在 MCP 通道中倍增是随机过程,因此 MCP 本身会对倍增的信号产生附加噪声,此噪声可以用 MCP 的噪声因子  $F$  来表示。其对相机的信噪比影响为:

$$\text{SNR}_{\text{out}} = \text{SNR}_{\text{in}} / F^{1/2}, F \geq 1, \quad (2)$$

文献[7-8]推导了  $F$  的计算公式。由文献[9]可知,第二代 ICCD 的 MCP 噪声因子通常在 1.6~2 左右。亦即在 MCP 开口面积比一定、第一次碰撞平均次级电子产额一定的前提下,由 MCP 给系统带来的噪声为一相对固定的比值。

## 2.4 CCD 噪声

CCD 的噪声可归纳为 3 类,即散粒噪声、转移噪声和热噪声。相比于像增强器的散粒噪声和光子电子噪声,由于前者均经过几万倍乃至上百万倍的放大,故而在紫外 ICCD 相机使用过程中 CCD 的噪声可以忽略不计。

紫外 ICCD 相机的噪声  $n_{e_s}$  为:

$$n_{e_s} \approx \sqrt{n_{e_g}^2 + n_{e_d}^2}, \quad (3)$$

电晕探测过程中,电晕所发出的紫外光十分微弱,综合分析紫外 ICCD 相机各部分噪声所占比重,由公式(3)可以看出紫外 ICCD 相机的噪声主要取决于光电噪声和阴极的暗电子发射噪声,而且这两部分噪声彼此独立。光电子噪声符合泊松分布,由于它是随着入射光强弱而变化的,故很难对其进行定量分析;而阴极暗电子发射噪声是器件内部噪声,故可以对其进行测量、统计,以找出其内在规律。

## 3 紫外 ICCD 相机噪声的抑制

### 3.1 图像散粒噪声的测定

紫外 ICCD 相机应用于电晕等日盲紫外目标探测时,相机所探测到的弱目标其入射光变化很小,故而可以视相机的入射光不变,由此光电子噪声也相对固定。实际使用过程中,随着 MCP 放大倍数的增加,阴极暗电子发射噪声同时也被放大,此时很容易干扰被探测目标的成像质量,导致被探测目标所成图像被噪声图像所淹没的后果。紫外 ICCD 相机的阴极暗电子发射噪声便成为对图像形成干扰的主要噪声来源,所以必须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为对被探测目标所发出的光进行长时间累积。此后,

在此基础上设定一个阈值将图像进行二值化,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。

由噪声分析可知,对于不同 MCP 增益水平下其噪声水平不同。所以,在设定二值化阈值的时候,其阈值该是随着增益水平的不同而变化的。如果采用固定的二值化阈值则对于增益水平比较低的时候意味着牺牲了图像信号的动态范围,由此容易造成对目标的采样困难。为了消除相机的散粒噪声并且保证图像信号良好的动态范围,需要对阴极暗电子发射形成的散粒噪声对图像所造成的影响进行评价以便设定相应增益水平下的二值化阈值。

对于实际应用于电晕探测的紫外 ICCD 相机 PROXTRONIC MINI (CCD 其有效像元为 752(H)×582(V)),为了测定它的暗电子发射导致的散粒噪声随增益变化的特性而开展了如下实验。将紫外 ICCD 相机的输入窗口遮拦,此时对于整个相机而言,其噪声主要为光电阴极暗电子发射噪声。将相机图像按照 8 bits 进行采样,即每个像素点有 256 级灰度(灰度值为 0~255),总采样点数为 720(H)×576(V)/帧。人为地将相机的 MCP 放大倍数分为 25 档(步长为 4% MCP 最大增益),在此基础上进行噪声测定。根据探测实际情况,对于 44% MCP 满负荷以下的增益,由于实验发现其散粒噪声很弱,故可不予统计。对于每一个固定增益水平,各选取其 1 min 时间的图像资料进行分析(PAL 制信号,25 帧/s)。考虑到 A/D 转换器本身的精度,设定灰度值为 16 以下的均视为黑电平。经过统计测算,不同增益水平下连续 50 帧平均每帧的噪声点数、不同增益水平下测得的最大噪声灰度值、以及不同增益水平下测得的最大噪声平均值依次如图 2、图 3、图 4 所

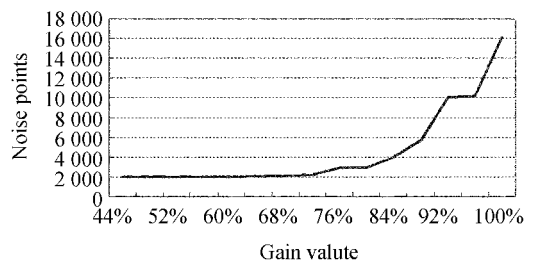


图 2 不同增益下连续 50 帧平均每帧噪声点的统计曲线  
Fig. 2 Statistic curve for average noise points number per frame under different gain value

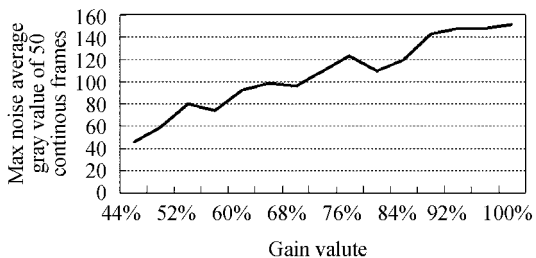


图 3 不同增益下最大噪声平均灰度值统计曲线

Fig. 3 Statistic curve for average gray values of max noise point unders in different gain values

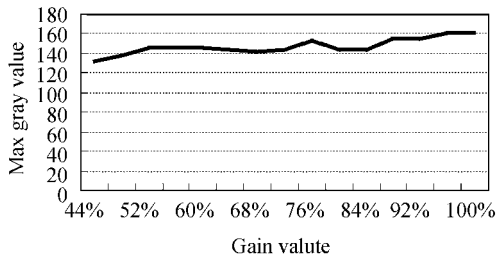


图 4 不同增益下最大灰度值统计曲线

Fig. 4 Statistic curve for gray values of max noise points under different gain values

示。由图中统计的数据可知,在不同增益水平下,图像噪声水平是不同的。

由图 2 和图 3 中连续 50 帧平均每帧的噪声点数和最大噪声平均值统计数据可知,随着 MCP 放大倍数的增加,散粒噪声的数量和强度在逐渐增加。其平均噪点个数以及最大强度平均值由 44% MCP 增益水平时的(1945 个点,灰度值 45)增加到了 100% 增益水平时的(16183 个点,灰度值 152)。同时可以看出, MCP 放大倍数从 44% 变化到 100% 时,散粒噪声的增长水平与增益水平的变化倍数相比变化不大,这就可以采用较高的增益来对弱目标进行放大。但是由于噪声最大强度平均值在增益增大的过程中增长很快,所以提示尽量避免使用很高的增益水平来对目标信号进行放大,以免噪声过强使得信噪比下降。

由图 4 中最大噪声值统计数据可知,散粒噪声点的强度普遍低于 161 级灰度值。由此可以推得当图像中某点的灰度值大于 161 时,其是信号点的可能性最大。

此外,根据对连续帧图像空间位置相同像素点灰度值的统计得知,散粒噪声在时间和空间上

都是随机的,由此可以采用 CCD 长时间累积的方法实现对散粒噪声的抑制。

### 3.2 图像散粒噪声的抑制

为了实现对紫外 ICCD 相机散粒噪声的抑制,可以采用多帧图像累积的方法或者连续帧图像之间作相关运算的图像处理方法来完成。后者具有计算速度快、实现简单等特点。由于在 MCP 放大过程中散粒噪声的时间特性很难掌握,使用在连续 2 帧之间作相关运算的方法对散粒噪声的抑制效果不理想。故而,可以利用连续 3 帧图像进行累积而后再与后续 3 帧图像累积所得的图像进行相关运算,此种方法更加适用于散粒噪声的抑制和弱目标信号的增强。在进行连续 3 帧图像累积的过程中,可以首先求出连续 3 帧图像每个像素点的灰度平均值,而后根据图像当时的增益水平,参照表 1 内的统计结果设定相应的二值化阈值。其过程如图 5 所示:

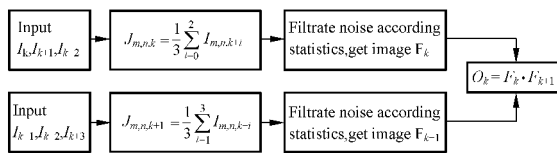


图 5 光电阴极散粒噪声的抑制过程

Fig. 5 Procedure for restraining shot noise from photo cathode

其中,  $I_k$  代表第  $k$  帧图像,  $I_{m,k}$  代表第  $k$  帧图像的第  $m$  行第  $n$  列像素的灰度值。

图 6 给出了增益为 76% 增益水平下的散粒噪声图像以及噪声抑制后的图像。

图 6 中(a)可以看到连续 4 帧图像均有散粒噪声点的存在,经过连续 3 帧累积(顺序为:1,2,3 帧累积,2,3,4 帧累积)而后得到的图像如图 6 中(b)所示,其噪声强度已经大大降低,由于噪声具有时间和空间上的随机性,所以对照统计获得的数据(该增益水平下噪声平均最大强度为 153)选取阈值为该增益水平下噪声最大强度 153 的 1/2,即阈值为 75 时进行噪声点的过滤,这样做的好处在于可以降低由于阈值选取过高而导致微弱目标信号被同时剔除的可能性。此后经过相关运算得到的图像(c)表明散粒噪声已被成功抑制。实验证明,这一方法同样适合其他增益水平下的散粒噪声的抑制。

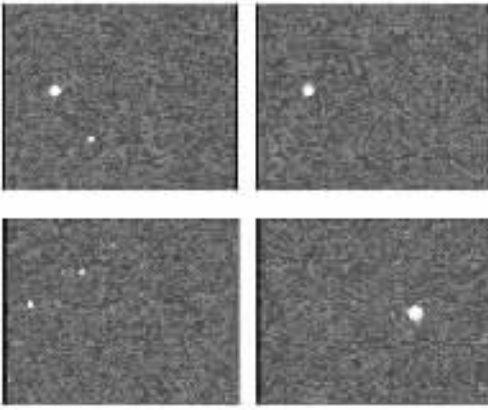
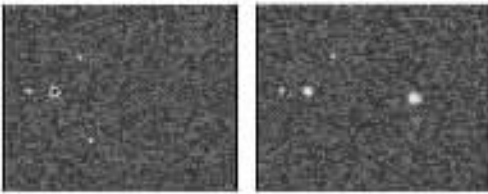
(a) 4 幅连续帧原始图像  $I_k$ (a) 4 original continuous frame images  $I_k$ (b) 3 幅连续帧积累图像  $J_k$  (c) 处理过的图像(b) 3 continuous frame accumulated images  $J_k$  (c) Processed images  $O_k$ 

图 6 测试结果

Fig. 6 Test results

## 4 结 论

采用实验的方法统计出不同增益水平下的紫外 ICCD 相机的光电阴极散粒噪声水平。根据所获得的统计数据可知:

(1) 随着紫外 ICCD 相机 MCP 放大倍数的增加,其阴极噪声点数也随之增加,但其增加趋势是非线性的。

(2) 随着 MCP 增益的增加,其噪声点最大强度(即噪声点图像的灰度值)变化不大。

(3) 不同 MCP 增益下紫外 ICCD 相机多帧最大噪声强度平均值随着增益的变大而增大。

在进行阴极噪声的抑制过程中可采用先将连续 3 帧图像进行累积求取其平均值,再依据统计结果进行图像二值化阈值的选取,最后进行相关计算的方法。此方法有利于在抑制噪声的前提下提高对弱信号目标的识别能力以及保证图像信号的动态范围。将此种方法应用于 PROXITRONIC 公司出品的第二代紫外 ICCD 相机图像噪声处理中,实验证明对于不同等级增益下的图像均可利用该处理方法在连续 4 帧图像时间内即可将阴极的散粒噪声剔除。该方法已成功应用于电晕探测当中的图像噪声抑制。

## 参考文献:

- [1] YAN F, WANG X. Using real-time embedded system with multiple DSPs in corona detection [J]. *SPIE*, 2006, 6027: 928-933.
- [2] SCHREIBER P, DANG T. Solar blind UV region and UV detector development objectives [J]. *SPIE*, 1999, 3629: 230-248.
- [3] BOSCH L A. *Delft electronics products B V. Dynamic uses of image intensifiers* [M]. Washington: SPIE Press, 1995.
- [4] <http://www.roperscientific.de/index.html> [Z].
- [5] PROXITRONIC Company. Introduction to image intensifier tubes [S]. PROXITRONIC. Bensheim, Germany. 7<sup>th</sup>, Feb., 2000.
- [6] PROXITRONIC Company. High performance image intensifiers [S]. PROXITRONIC. Bensheim, Germany. 05, 06, 2001.
- [7] POLLEHN H K. Performance and reliability of third-generation image intensifiers [J]. *Advances in Electronics and Electron Physics*, 1985, 64A: 61-69.
- [8] 韦亚一, 陶兆民. MCP 噪声因子的理论分析 [J]. *电子科学学刊*, 1993, 15(6): .  
WEI Y Y, TAO ZH M. Theoretical analysis of MCP noise factor [J]. *Journal of Electronics*, 1993, 15(6): .
- [9] MORAN S E, ULICH B L, ELKINS W P. Intensified CCD (ICCD) dynamic range and noise performance [J]. *SPIE*. 3137: 430-457.

作者简介: 闫 丰(1975-), 男, 长春人, 博士研究生, 主要从事信息融合技术研究以及嵌入式系统的开发。E-mail: yan.feng@126.com