

基于日盲紫外成像探测器的光子计数算法研究

杨 锋¹, 阮 莹², 吕 扬¹, 常文治³, 顾 燕¹, 赵维骏¹, 郭一亮¹,
杜 非³, 朱 波¹, 焦国力¹, 王广真³

(1. 北方夜视技术股份有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007;
3. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 为了完成对日盲紫外电晕信号的定量分析, 本文设计了基于时间域的弥散圆斑光子计数算法来对成像系统所采集的图像进行量化分析。首先阐述了单光子探测的原理以及光子计数原理; 然后设计了基于日盲紫外 ICMOS 的成像探测系统, 为了满足荧光屏的余晖响应, 优化了 CMOS 驱动, 使得帧频可达 390 fps; 然后通过分析传统的连通域光子计数算法, 提出了基于时间域的弥散圆斑光子计数算法; 通过仿真实验, 可知该算法较传统的技术算法具有更高的准确性; 最后通过对紫外灯源的实验, 验证了所设计的光子计数算法可以在成像探测系统中硬件实现, 并且计数的效果良好。

关键词: 日盲紫外; 光子计数; 时间域

中图分类号: TN233

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2022)03-0231-05

Research on Photon Counting Algorithm Based on Solar Blind Ultraviolet Imaging Detector

YANG Feng¹, RUAN Ying², LYU Yang¹, CHANG Wenzhi³, GU Yan¹, ZHAO Weijun¹,
GUO Yiliang¹, DU Fei³, ZHU Bo¹, JIAO Guoli¹, WANG Guangzhen³

(1. North Night Vision Technology Co. LTD., Nanjing 211106, China;

2. Electric Power Research Institute, SGCC, Fuzhou 350007, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: To complete the quantitative analysis of the solar-blind ultraviolet corona signal, a time-domain diffuse round-spot photon-counting algorithm is designed to analyze the image collected by the imaging system. First, the principles of single-photon detection and photon counting are described; second, an imaging detection system based on solar-blind ultraviolet ICMOS is designed. To meet the afterglow response of the screen, the CMOS driver is optimized to make the frame rate up to 390 fps. Then, by analyzing the traditional connected domain photon counting algorithm, a diffuse round spot photon counting algorithm based on the time domain is proposed, and experiments show that the algorithm designed in this study has higher accuracy than the traditional technical algorithm. Finally, through an experiment with an ultraviolet lamp source, it is verified that the designed photon counting algorithm can be implemented in the hardware of the imaging detection system, and the counting effect is good.

Key words: solar blind UV, photon counting, time domain

0 引言

太阳光中包含各种波段的光, 但是地球大气层中的臭氧层会对 220~280 nm 波段的紫外光进行吸收, 因此该波段的光很难到达地球表面, 该波段又被称为“日盲”紫外波段^[1]。我们通过 220~280 nm 紫外光的日盲特性对处于该波段的目標物进行检测成像, 能够

有效地排除掉阳光对其造成的影响。而高压输电线路由于其自身的故障会在大气中产生电晕, 电晕放电会放射出波段为 220~280 nm 的紫外光^[2-6]。传统的电晕探测技术有红外热探测和超声波探测, 日盲紫外电晕探测相比于这两种技术有极大的改进: 和红外技术相比, 在早期就能检测到高压输电线上的电晕放电现象, 并且不受周边环境干扰; 和超声波技术相比, 能

收稿日期: 2020-04-14; 修订日期: 2020-09-16.

作者简介: 杨锋 (1988-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事日盲紫外器件的成像探测和图像处理。E-mail: yangfeng_nnvt@163.com.

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助 (GIS 局部放电高精度光、电感知技术研究及应用, 52130420000J)。

够探测的距离长，并且能够检测出电晕放电产生的位置。如今，国内的紫外检测技术飞速发展，以国产碲铯阴极紫外像增强器为核心的紫外成像仪能够对电力设备故障进行实时的检测^[7-9]。

1 光子计数原理

在日盲紫外电晕成像探测过程中，一般是根据显示器上所显示的日盲紫外图像来主观判断电晕放电的程度，这样会带来很大的误差，所以需要具体的算法对日盲紫外电晕放电进行量化分析。考虑到日盲紫外电晕信号十分微弱，达到了单光子水平，普通的量化分析方法不能满足要求，因此需要设计合理的光子计数算法来对日盲紫外信号进行量化分析。

图1是单光子探测的原理图。首先，光信号通过光学镜头进行光学聚焦；然后，前端光电探测器将光信号转化成电信号；其次，将电信号输入至信号处理模块进行处理；最后，后端读出电路模块将处理之后的信号进行输出。其中，因为日盲紫外信号十分微弱，传统的固体探测器件难以达到要求，因此一般会采用真空器件对信号进行光电转换和电子倍增。与此同时，当需要对目标信号强弱进行分析并对其进行成像时，采用像增强器作为光电转换和成像器件^[10]。

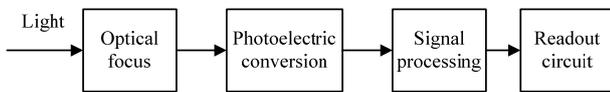


图1 单光子探测原理框图

Fig.1 Block diagram of single photon detection

当日盲紫外光子信号低于 $3 \times 10^{-15} \text{ W/cm}^2$ 时，光电转换器就会产生离散脉冲信号，合适的 CMOS 传感器就能探测到光子信号，所以能够统计日盲紫外信号光子的数量来实现对目标源信号的定量化分析。光子的能量公式为：

$$E = h \frac{c}{\lambda} \tag{1}$$

式中： h 为普朗克常数； c 为真空中的光速； λ 为光的波长。其中日盲紫外波段为 $200 \sim 280 \text{ nm}$ ^[3]，通过计算得出一个日盲紫外光子的能量为 $7.1 \times 10^{-19} \sim 1 \times 10^{-18} \text{ J}$ 。

日盲紫外光功率 P 表示为：

$$P = N \times E \tag{2}$$

式中： N 表示光子数； E 表示单光子能量，所以单位时间内通过的光能量表示光流强度。

目标源信号的光功率可以通过统计一个截面上的光子数量来计算得到^[4-7]。由于图像传感器靶面尺寸约为 1.56 cm^2 ，通过对单位时间内探测到的紫外图像上

出现的光斑进行计数统计，就能计算得出一帧图像的光子数以及日盲紫外信号源的光功率。

2 测试系统

本文所设计的日盲紫外成像系统原理框图如图2所示，成像系统主要由紫外 ICMOS 模组、可见光探测器、ARM+FPGA 嵌入式处理系统组成。其中，紫外 ICMOS 模组用来采集日盲紫外微弱信号，并经过模数转换将数字图像信号输入嵌入式平台中；可见光探测器采集可见光图像为日盲紫外信号提供位置信息；ARM+FPGA 嵌入式处理系统通过采集紫外数字图像信息，完成图像处理和光子计数算法，并将处理后的图像输出显示。

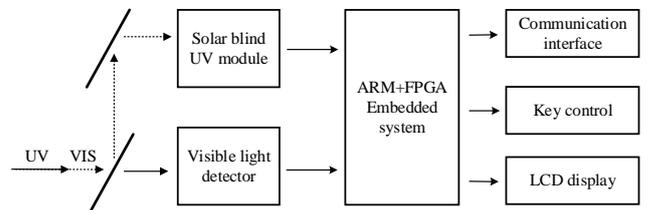


图2 日盲紫外成像系统整体设计框图

Fig.2 Block diagram of overall design of solar blind ultraviolet imaging system

图3是所设计的日盲紫外成像系统整机实物图，尺寸（长×宽×高）为 $244 \text{ mm} \times 135 \text{ mm} \times 96 \text{ mm}$ 。其中1为相机窗口，2为LCD液晶屏，3为按键控制面，4为电源充电口和TF卡槽，5为腕带。



图3 日盲紫外成像系统整机实物图

Fig.3 The physical picture of the solar blind UV imaging system

3 日盲紫外光子计数算法设计

3.1 传统光子计数算法分析

传统的光子计数算法通常为连通域标记光子计数算法，其算法主要思路为：假设单光子经过像增强器倍增以后，在荧光屏上所显示的每一个光斑都未重合。那么每一个光斑就对应了一个光电子，因此只需要对一帧图像中光斑出现的数量，就可以得出一帧图像中日盲紫外光子数。在连通域标记算法中，对经过图像预处理后的紫外图像进行二值化处理，得到一幅

二值化图像。每个由灰度 255 组成的连通域表示为一个光子事件，图 4 为连通域标记算法的示意图。

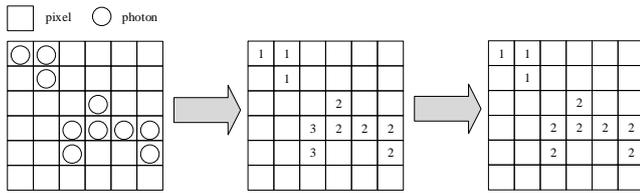
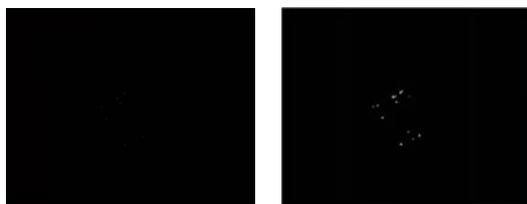


图 4 连通域标记算法说明

Fig.4 Connected domain labeling algorithm description

然后，对所采集到的一帧紫外图像进行连通域算法仿真分析，图 5 为所采集到的日盲紫外图像和二值化后的图像。



(a) 原始图像 (b) 二值化处理
(a) Original image (b) Binary processing

图 5 紫外图像二值化

Fig.5 UV image binary processing

通过对图进行连通域标记光子计数算法仿真，可以得出共有 12 个光子。通过分析二值化后的图像可知，连通域标记算法将光斑较大和较小的区域都默认为一个光子事件进行统计，这样显然影响了光子计数的准确度，因此需要对此光子计数算法进行改进。

3.2 基于时间相关的光子计数算法设计

弥散圆斑算法是一种从三维空间上统计光子数的方法，由于所设计的高帧频算法，可以使得光斑的变化在时间域上被捕获，因此本文在此基础上添加了时间因素，弥补光斑出现时间的随机性，找出四维空间中的最大点，约束条件如式(3):

$$\begin{cases} f_x'(x, y, z) \leq 0 \\ f_y'(x, y, z) \leq 0 \\ f_t'(x, y, z) \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

由于加入了时间的约束，所以只有找出一段时间内几帧图像同一位置光斑的极大值点才能准确计算光子数。本文采用的 CMOS 传感器图像输出频率为 3 ms 每帧，而荧光屏的余晖时间为 6 ms，即光斑在荧光屏上的起伏时间为 6 ms，因此我们通过连续采样得到 3 帧图像就能得到光斑的变化范围，如图 6 所示，其中 a、b、c 表示图像中光斑的灰度值。

如图 6 所示，中间一帧图像中 b 灰度值最大，可以将 b 记作一个光子数，因此只要中间帧图像中光斑

的灰度值大于前后帧图像光斑的灰度值，就能将其记为一个光子数。

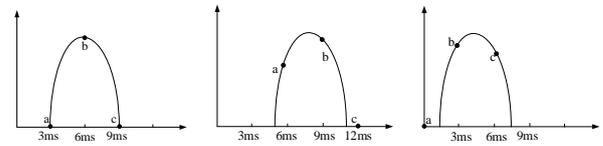


图 6 单个光斑脉冲连续采样图

Fig.6 Continuous sampling of single spot pulse

这样就能统计出一帧图像的光子数^[10]:

$$n = \sum_{k=1}^f \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Y(i, j, k) \quad (4)$$

式中: f 为日盲紫外成像探测器的帧频; k 为第 k 帧图像; (i, j) 为二维空间坐标; $Y(i, j, k)$ 为四维空间中的极大值点。由于日盲紫外成像探测器能达到 300 帧/s 的帧频，两帧之间的变化时间较小，因此 $Y(i, j, k)$ 又能满足:

$$B(i, j, k) \geq B(i \pm i', j \pm j', k \pm k') \quad (5)$$

式中: $B(i, j, k)$ 为第 k 帧 (i, j) 点的灰度值。由上式可见，极大值点 $Y(i, j, k)$ 的约束条件为: $B(i, j)$ 在 $i' \times j'$ 矩阵像素中具有最大的灰度值，且在前后 k' 帧的同一位置的灰度值也是最大的。根据日盲紫外成像探测器的输出帧频，这里 $k' = 1$ ，同时 $i' \times j'$ 矩阵可设定为 3×3 矩阵或 5×5 矩阵。

4 实验流程与不确定性度分析

4.1 光子计数算法的仿真实验分析

首先，本文用日盲紫外成像探测器采集图像，然后运用 Matlab 软件分别对两种算法进行仿真，比较仿真结果来判断时间相关的光子计数算法能否提高计数精度。

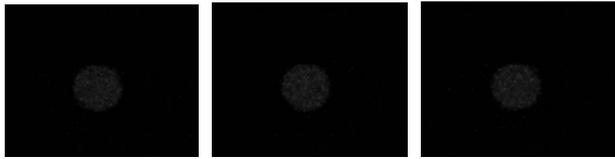
首先选用 260 nm 波段的紫外光源，然后日盲紫外成像探测器的增益电压调节为 2.5 V，调节紫外光源光功率密度，从 $3 \times 10^{-19} \text{ W/cm}^2$ 每次往上增加一个数量级，采集 3 组不同光强的实验图像，每组实验记录 3 幅图像，如图 7 所示。



(a) $3 \times 10^{-19} \text{ W/cm}^2$



(b) $3 \times 10^{-18} \text{ W/cm}^2$



(c) $3 \times 10^{-17} \text{ W/cm}^2$

图7 日盲紫外三组实验图像

Fig.7 Three sets of experimental images of solar blind ultraviolet

运用 MATLAB 软件对采集的图像仿真, 得出的光子数如表 1 所示。表 1 中的两种算法为连通域计数算法和基于时间相关算法。

表 1 两种算法光子计数统计表

Table 1 Photon counting statistic table of two algorithm

	Connected domain labeling algorithm	Dispersion circular algorithm
Group 1	7	6
Group 2	78	78
Group 3	88	291

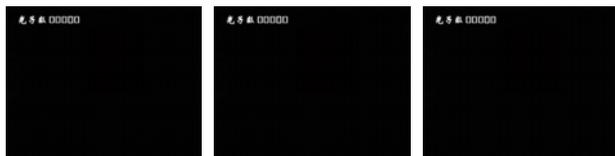
结果显示, 当信号源很弱时, 光子就会分散分布, 因此两种算法的计数结果比较相近。在增强紫外光源的光功率后, 光斑会重叠, 并且连通域标记光子计数算法得出的光子数量没有太大变化, 而本文所设计的算法随着信号的增强, 计数值不断增加, 由此可知, 弥散圆斑算法相对于连通域计数算法更加精确, 可对日盲紫外单光子进行准确统计。

4.2 基于日盲紫外成像系统的光子计数算法实验及分析

通过对两种算法的仿真分析可知, 本文所设计的光子计数算法更具准确性, 但由于所设计成像系统的资源和速度限制, 我们将日盲紫外图像的 14 bit 数据压缩成 8 bit 数据进行处理, 因此会使得计数精度上有所偏差, 所以通过对紫外光源的实验来验证硬件实现的效果。

实验采用氙灯作为日盲紫外目标源进行光子计数实验测试, 紫外 ICMOS 模组的增益电压保持不变, 进行了如下 3 组实验:

第一组, 关闭日盲紫外信号源, 实验结果如图 8 所示。



(a) 第一帧 (a) First frame
(b) 第二帧 (b) Second frame
(c) 第三帧 (c) Third frame

图8 第一组实验图像

Fig.8 The first set of experimental images

通过采集 3 帧图像, 所计算的光子数一直为 0, 说明所设计的成像系统暗计数良好。

第二组, 打开氙灯光源, 并调节光源强度到最弱, 采集到的图像如图 9 所示。



(a) 第一帧 (a) First frame
(b) 第二帧 (b) Second frame
(c) 第三帧 (c) Third frame

图9 第二组实验图像

Fig.9 The second set of experimental images

第三组, 输出光源光功率密度加到 $1 \times 10^{-18} \text{ W/cm}^2$, 采集到的图像如图 10 所示。



(a) 第一帧 (a) First frame
(b) 第二帧 (b) Second frame
(c) 第三帧 (c) Third frame

图10 第三组实验图像

Fig.10 The third set of experimental images

然后, 我们利用 Matlab 对每组连续的 3 帧图像进行所设计的光子计数算法仿真, 仿真结果与 FPGA 计算的结果如表 2 所示。

表 2 四组光子计数实验结果

Table 2 Results of four groups of photon counting experiments

	Group1	Group 2	Group 3
FPGA output result	0	24	141
Matlab simulation result	0	23	149

通过表 2 可知, 硬件实验的光子计数算法与仿真结果相近, 证明了所设计的基于时间域的弥散圆斑光子计数算法在成像系统中可以硬件实现, 并且效果良好。

5 结论

日盲紫外电晕探测是近年来一种新型的电晕探测方式, 但是紫外图像单靠人眼无法精确地判断电晕信号的强弱, 因此本文研究了日盲紫外光子计数算法, 通过对连通域标记算法和弥散圆斑算法进行分析提出了基于时间相关算法, 然后使用 Matlab 对两种算法进行了实验仿真, 结果显示基于时间相关算法对光子计数更加准确, 最后, 通过实验验证所设计的算法可以在成像系统中的 FPGA 硬件平台上实现, 并且

实现的效果良好,能够用于紫外成像仪中对信号进行量化分析。

参考文献:

- [1] 匡蕃, 顾燕. 紫外像增强器用于电力安全检测的研究[J]. *红外技术*, 2015, **37**(11): 986-990.
KUANG Lei, GU Yan. Research on the application of UV image intensifier in security detection of power equipment[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(11): 986-990.
- [2] Lavigne C, Roblin A, Langlois S. Solar-blind UV imaging photon detector with automatic gain control[J]. *Measurement Science & Technology*, 2002, **13**(5): 713.
- [3] 周伟, 吴晗平, 吕照顺, 等. 空间紫外目标探测系统技术研究[J]. *现代防御技术*, 2011, **39**(6): 172-178.
ZHOU Wei, WU Hanping, LV Zhaoshun, et al. Research on space ultraviolet target detection system[J]. *Modern Defense Technology*, 2011, **39**(6): 172-178.
- [4] Hutchings J B, Postma J, Asquin D, et al. Photon event centroiding with UV photon-counting detectors[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2007, **119**(860): 1152-1162.
- [5] 赵帅, 郭劲, 刘洪波, 等. 多像素光子计数器在单光子探测中的应用[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(5): 972-976.
ZHAO Shuai, GUO Jing, LIU Hongbo, et al. Application of multi-pixel photon counter in single photon detection[J]. *Optical Precision Engineering*, 2011, **19**(5): 972-976.
- [6] 赵勋杰. 光子计数成像原理及其应用[J]. *红外与激光工程*, 2003, **32**(1): 42-45.
ZHAO Xunjie. Photon counting imaging principle and its application[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(1): 42-45.
- [7] 何玲平, 尼启良, 李敏, 等. 楔条形阳极光子计数探测器成像性能的检测[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(11): 2699-2704.
HE Lingping, NI Qiliang, LI Min, et al. Detection of imaging performance of wedge-shaped anode photon counting detector[J]. *Optical Precision Engineering*, 2009, **17**(11): 2699-2704.
- [8] 吕扬. 日盲滤光片高精度透过率测试系统研制[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
LV Yang. Development of High-precision Transmittance Test System for Solar Blind Filters[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [9] 钱芸生, 周晓瑜, 胡晓明, 等. 一种连通域标记的紫外单光子计数的方法: CN 106054038 A[P]. 2016.
QIAN Yunsheng, ZHOU Xiaoyu, HU Xiaoming, et al. Method for Counting Single-photon Ultraviolet in Connected Domain: CN 106054038 A[P]. 2016.
- [10] 周晓瑜. 可见光/日盲紫外双光谱电晕探测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
ZHOU Xiaoyu. Research on visible/solar-blind ultraviolet bispectral corona detection technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.