

文章编号 1004-924X(2010)02-0496-07

“日盲”紫外增强型 CCD 的自动增益控制

章明朝^{1,2}, 周 跃^{1,2}, 闫 丰¹, 隋永新¹, 杨怀江¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为使“日盲”紫外增强型电荷耦合器件(SBUV-ICCD)适用于不同辐亮度目标的探测,并避免由于长时间高亮度照射引起的器件损害,提出了适用于 SBUV-ICCD 的自动增益控制(AGC)算法。应用连续 N 帧图像直方图求和作为分析对象,将其分为背景段、目标段、明亮段及饱和段,使用明亮段与目标段的比例系数及饱和段与明亮段的比例系数为控制参量,完成了 AGC 算法,并设计实验对其进行了验证。实验结果表明,通过控制饱和系数 <0.2 ,明亮系数在 $0.4\sim 0.8$ 内,当目标辐亮度突变或缓慢变化时该算法均能够在 $1\sim 3$ s内实现增益的调节,在保护相机的同时使图像具有较好的分辨率。

关键词:日盲紫外增强型 ICCD;自动增益控制
中图分类号:TN386.5;TP391.4 **文献标识码:**A

Automatic gain control of SBUV-ICCD

ZHANG Ming-chao^{1,2}, ZHOU Yue^{1,2}, YAN Feng¹, SUI Yong-xin¹, YANG Huai-jiang¹

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A Automatic Gain Control (AGC) algorithm for Solar Blind Ultraviolet Enhanced ICCD (SBUV-ICCD) was proposed to detect the targets with different radiation luminances and to avoid damaging the device when it was exposed to high intensity radiation. The sum of N consecutive frame histograms were treated as an analysis object, and it was divided into background section, target section, brightness section and saturated section. The AGC algorithm was accomplished by using the proportion factor of brightness section to target section and the coefficient of saturated section to brightness section as controlling parameters. Finally, experiments were designed for testing the algorithm performance. Through controlling saturate ratio below 0.2 and bright ratio in the range of 0.4–0.8, experimental results indicate that the algorithm can adjust the gain of ICCD quickly and effectively in 1-3 s whenever the target's luminance is up unexpected rapidly or changed slowly, obtained results show that proposed algorithm can offer a good image resolution while the camera is protected.

Key words: Solar Blind Ultraviolet Enhanced(SBUV) ICCD; Automatic Gain Control(AGC)

收稿日期:2009-07-22;修订日期:2009-08-04.

基金项目:吉林省科技发展基金资助项目(No. 20080516);中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目

1 引言

太阳在 220~280 nm 的紫外辐射被大气平流层附近的臭氧强烈吸收,使该谱段到达地表的辐射极为微弱。基于该事实,这一谱段被称为“太阳光谱盲区”,简称“日盲区”。利用该谱段进行信号探测,其背景简单,虚警率低,在电晕探测、森林火灾检测等领域有广泛的应用前景。由于地表附近大气对该谱段有强烈的吸收,到达探测器的信号极为微弱(一般为 nW 级),要进行有效的探测,必须使用具有较高增益的探测器件方可实现。目前应用的器件主要有光电倍增管(PWT)、第二代增强型电荷耦合器件(ICCD)和电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)。其中 ICCD 由于其具有体积小、重量轻、无需致冷、有较高的空间分辨率等优点而被广泛应用。ICCD 采用级联微通道板(MCP)作为放大器件,其增益高达 10^6 倍。为获得较优的成像质量、同时保护 ICCD 不被长时间过载而损坏,必须根据当前探测目标辐亮度调节增益值。因此,自动增益控制成为 ICCD 探测系统的必需组件之一。

目前自动增益控制技术多用于雷达接收机等电子线路中^[1],少量出现的用于成像系统控制的文献其应用对象也仅为红外或可见图像这种背景较为复杂,增益相对较低的场合。如 Killer^[2-3]提出对 ICCD 输出单帧图像的直方图进行分段求和来分析图像是过亮还是过暗,并据此调节增益。该方法对可见或红外图像较为实用,但由于其是对单帧图像的亮暗的综合评价,对局部图像过亮无能为力^[2]。Castracane 和 Gutin^[4]提出在光路中放置微机械反射镜去除图像的高亮点的方法,能有效地抑制局部高亮点,并防止在像增强器中出现图像发晕的现象。

“日盲”紫外探测获取的图像与红外或可见图像具有较大的差别。本文在仔细分析 SBUV-ICCD 成像特点的基础上,对连续帧图像的直方图求和进行分段分析,提出使用明亮系数及饱和系数作为控制参量的方法实现了 SBUV-ICCD 的 AGC 算法,并对算法的瞬态响应进行了分析,取得了较为满意的调节效果。

2 SBUV-ICCD 成像特性

2.1 ICCD 工作原理

ICCD 的典型结构如图 1 所示,主要由入射窗、光电阴极、MCP、荧光屏、耦合光纤、可见光 CCD 6 个部分组成^[6-8]。ICCD 基本工作原理为:从入射窗入射的光子照射到光电阴极上,按一定的量子转换效率转化为光电子,在加速电场的作用下光电子进入 MCP 进行倍增,然后聚焦到荧光屏激发出可见光,通过光纤光锥将图像耦合到可见光 CCD 上,最后由电子线路读出,完成从入射光到电子图像的转换。而 SBUV-ICCD 系指其光电阴极响应峰值位于为 220~280 nm 之间的 ICCD 器件。

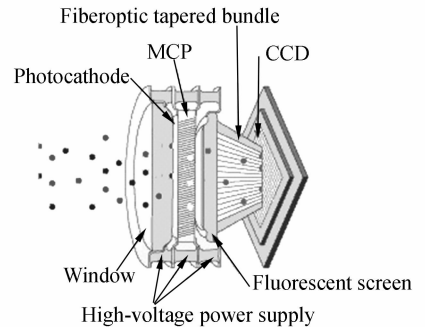


图1 ICCD 的结构示意图

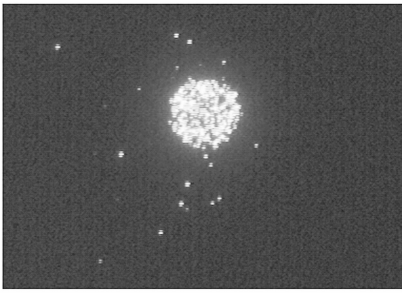
Fig.1 Representation of ICCD

ICCD 中是通过控制电压调节加载在 MCP 两端的倍增高压实现增益的调节,控制电压与增益之间的关系高度非线性,呈近似的指数关系^[2],加大了 AGC 的难度。

2.2 SBUV-ICCD 的成像特性

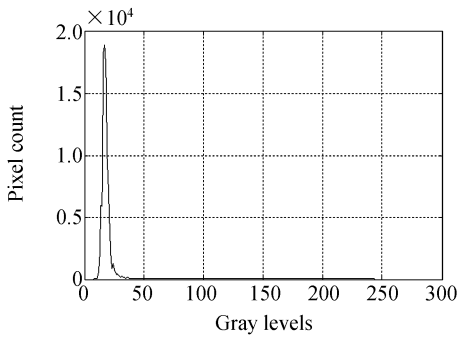
近地表大气等对“日盲”紫外辐射具有强烈的吸收作用,SBUV-ICCD 能够探测到的能量极为微弱,如电晕探测中目标的辐亮度一般在 nW 量级,要进行有效地探测,ICCD 必须具有较高的增益。如在紫外电晕探测中,至少需要 40% 以上的 MCP 增益(100% MCP 放大倍数为 10^6)才能探测到目标的存在^[9]。信号微弱、增益高使 SBUV 图像与可见或红外图像呈现出完全不同的特点。一帧典型的“日盲”紫外图像如图 2(a)所示,图 2(b)则为其直方图。

首先,图像中没有复杂的背景。红外和可见



(a) 典型 SBUV 图像

(a) Representative image of SBUV



(b) 直方图

(b) Histogram

图 2 典型 SBUV 图像及直方图

Fig. 2 Representative image of SBUV and histogram

图像的背景辐射来自于太阳或微弱的星光等,而如前所述,大气臭氧层的强烈吸收使太阳在近地表“日盲”紫外谱段的辐射极为微弱,因此即使在强烈的日光条件下图像中也没有复杂的背景信息,加之 ICCD 多用于大视场凝视探测,其输出图像的直方图一般呈单峰分布,目标及噪声占的像素相对较少。

其次,在有目标出现的情况下,图像中目标信号与背景对比强烈,目标内部像素灰度级较高。而没有目标时,滤光片带外及少量带内散射光子被高增益放大后的闪烁噪声点是图像的主要组成部分。同时,在滤光片制作完善的情况下噪点个数较少,单帧中没有噪点的概率高,因此在 AGC 算法设计时需要考虑多帧图像分析。

3 SBUV-ICCD 的 AGC 算法

3.1 算法结构

在以上分析的基础上,提出了适用于 SBUV-

ICCD 的 AGC 算法,其结构^[10]如图 3 所示,SBUV-ICCD 对收集到的目标辐射光子增强成像并输出视频信号,同时将该视频信号输入到自动增益控制单元中。自动增益控制单元主要由信号分析部分与控制逻辑部分组成,其中信号分析单元完成视频信号进行控制参量的提取,而逻辑控制单元按照预先设定的规则对 SBUV-ICCD 的控制电压进行调节,实现了增益的闭环自动调节。

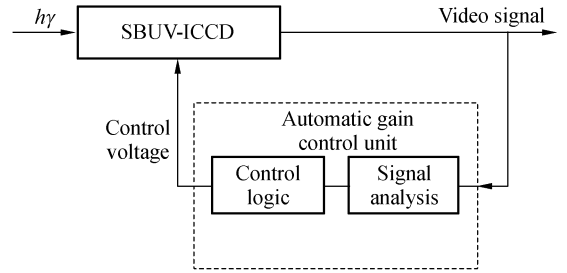


图 3 AGC 结构框图

Fig. 3 Block diagram of AGC

3.2 视频信号分析

信号分析模块主要完成分析 SBUV-ICCD 输出的视频信号,统计得到一组可作为判断当前视频图像过于明亮还是灰暗的变量,以判断当前增益设置是否适当。

本文主要通过直方图提出统计量完成增益设置评价的。直方图是图像分析评价中的一个重要指标,反映了各灰度级的分布情况。在 SBUV 图像中目标只分布在较小的区域,大部分为背景区域。同时,在使用 SBUV-ICCD 过程中常常出现没有目标的情况,这时图像中只有少数几个散射光子的闪烁噪声点图像,在噪声较弱的情况下甚至一个也不会出现。考虑上述因素,基于 N 帧图像直方图和分析,提出了两个统计量:明亮系数及饱和系数,完成视频信号的分析。

设有 N 帧连续图像,第 i 帧图像的直方图为 $h(n, i)$, n 表示灰度级,计算得到 N 帧图像的直方图的和:

$$H_s(n) = \sum_{i=0}^{N-1} h(n, i), n = 0, 1, 2, \dots, 255, (1)$$

根据 $H_s(n)$ 中灰度级的不同,将其分为四段,分别为背景段、目标段、明亮段及饱和段,如图 4 所示。图中 T_L 、 T_H 、 T_s 分别表示背景、明亮、饱和的分段阈值。使用 8 bit 表示灰度级,在 SBUV 图像中,背景像素为高斯分布,按照 3σ 原则, T_L

设置在 50~60 之间较为合适,而 T_H 一般设置为 190(75% 满量程), T_S 设置为 235(90% 满量程) 较为合适。提出的 AGC 的控制统计量为:

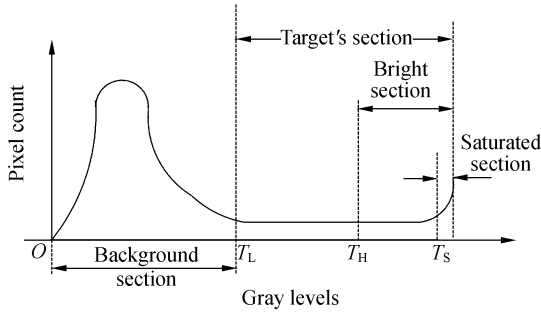


图4 直方图分段示意图

Fig. 4 Schematic drawing of histogram section

1) 明亮系数 η_b , 定义为在 $H_s(n)$ 中位于明亮段的像素个数和与位于目标段像素个数和之比, 如式(2)所示。

$$\eta_b = \frac{\sum_{n=T_H}^{255} H_s(n)}{\sum_{n=T_L}^{255} H_s(n)}. \quad (2)$$

2) 饱和系数 η_s 。定义为 $H_s(n)$ 中位于饱和段的像素个数和与位于明亮段的像素个数和之比, 如式(3)所示。

$$\eta_s = \frac{\sum_{n=T_S}^{255} H_s(n)}{\sum_{n=T_H}^{255} H_s(n)}. \quad (3)$$

3.3 AGC 控制逻辑

控制逻辑单元对信号分析输出信号进行判断, 分析当前照度情况下相机的增益设置是否恰当, 并进行调节。如前所述, ICCD 的增益与控制电压具有近似的指数关系。ICCD 的增益数学模型为:

$$G = k g^x + g_0, \quad (4)$$

G 表示相机增益, g 为增益因子, x 则表示控制电压, k, g_0 均为模型常数, 模型参数可由 ICCD 厂商提供。AGC 控制逻辑在获取 η_b 和 η_s 后, 能够在当前亮度下 ICCD 增益设置是否合适做出评价。图 5 给出了适用于 SBUV-ICCD 的 AGC 算法的流程图。在获取连续 N 帧图像的 η_b 及 η_s 后, 与预先设定合理阈值比较。首先分析 η_s 是否超过上限 η_s^t , 其次分析 η_b 是否在其上限阈值 η_b^t

与下限阈值 η_b^d 范围内, 根据分析结果调节增益。

η_b 及 η_s 反映了在目标段像素在像面的分布情况, 算法的实质就是要将这两个系数控制合理范围内。大量实验数据表明, η_s 如果大于 0.2 图像将出现较大面积的饱和, 而 η_b 的合理范围则为 0.4~0.8 之间, 对 $\eta_s^t, \eta_b^d, \eta_b^t$ 进行响应的设置即可。这里需要注意的是, 为保证成像的稳定, 不应过于频繁调节增益, 尤其是在经过定标, 建立其辐亮度与目标灰度级关系的系统中, 调节机构应在上述系数超过合理范围才进行增益调节。

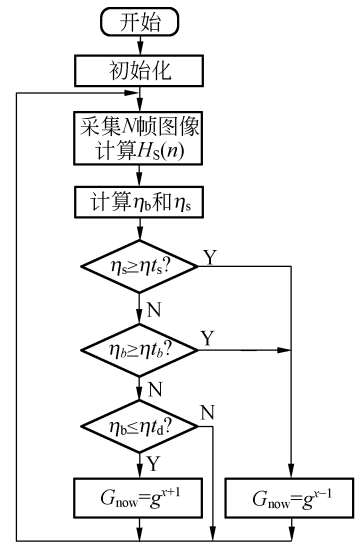


图5 AGC 算法流程图

Fig. 5 Flow diagram of AGC algorithm

结合实际应用, 采用单片机、10 位 D/A 芯片构成增益调节系统, 藉由串口发送数据, D/A 转换成控制电压, 完成 ICCD 的增益调节。增益控制电压范围为 0~5 V, 调节采用固定步长的方式, 即增加或减小增益均以固定的控制电压值为单位。

4 实验及数据分析

采用如图 6 所示的实验装置进行上述 AGC 算法的性能的验证。使用氙灯作为光源, 通过插入不同的中性衰减片组合实现光场辐亮度的调节, 而积分球则兼有衰减及匀光的用途, 同时通过连接在积分球上的光纤光谱仪实现积分球出口辐亮度的测量。在积分球出口处放置一分辨率板, 调节镜头焦距使分辨率板清晰成像在 SBUV-ICCD 像面上, 将输出视频输入到带有图像采集卡

的工业控制计算机中,在工控机中采用 National Instrument 公司的 Labview 软件完成图像的分析,并实现 AGC 算法。通过串口将设置增益值送入到增益调节电路板完成增益的调节。最终形成一个闭环的 AGC 系统。实验装置的实物图如图 7 所示。

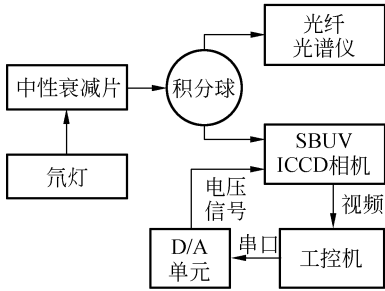


图 6 实验装置示意图

Fig. 6 Measurement setup for validation

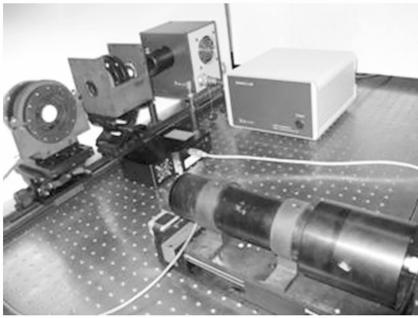


图 7 实验装置实例图

Fig. 7 Illustration of measurement setup

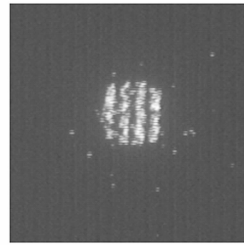
AGC 算法主要用于在辐亮度突变的情况下完成增益的自动调节,在保护相机的同时以期获得较好的图像分辨率。因此实验重点关注在辐亮度突变的情况下该算法是否能够正确地调节增益,调节性能能否满足需求。AGC 算法采用的部分参数如表 1 所示。

表 1 AGC 算法的部分参数

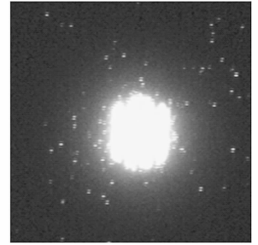
Tab. 1 Some parameters of AGC algorithm

Parameters	Values
N	3
η_b	0.5
η_d	0.15
η_s	0.75
c	4

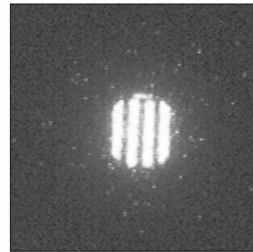
为测试辐亮度突然增加的情况,在支架中加入 2 片透过率大致为 10% 的衰减片,采集到的图像如图 8(a)所示,经测量此时积分球出口处的辐亮度值为 $6.757 \times 10^{-5} \mu\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^2)$,AGC 算法自动调节增益为 0.655 V。模拟辐亮度突变的情况,在小于 0.5 s 时间内突然撤走全部衰减片,在撤走瞬间,采集的图像如图 8(b)所示,可见目标辐亮度大为增加,图像中心已经面积饱和,无法辨别分辨率板。通过 AGC 算法的降低增益,经过 2.6 s 后,增益稳定在 0.060 V,获得的图像如图 8(c),此时分辨率板图像清晰可见。经测量此时积分球出口处辐亮度值为 $5.080 \times 10^{-3} \mu\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^2)$ 。



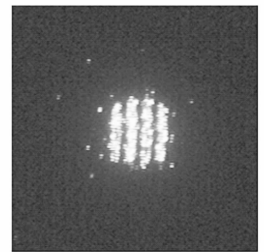
(a) 两衰减片稳定图像
(a) Stable image using 2 NAs



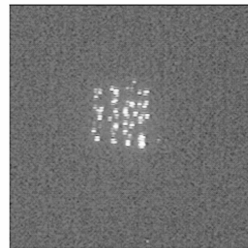
(b) 快速撤走全部衰减片
(b) Remove all NAs rapidly



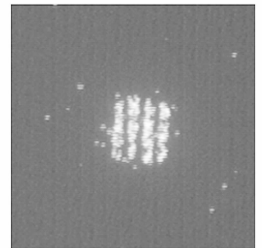
(c) 经 2.6 s 后输出图像
(c) Output image after 2.6 s



(d) 10% 衰减片稳定图像
(d) Stable image using 10% NA



(e) 快速插入一衰减片图像
(e) Image after inserting a NAs



(f) 经 1.2 s 后输出图像
(f) Output image after 1.2 s

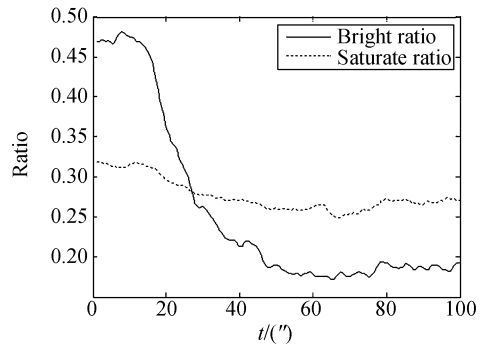
图 8 突变情况下实验结果

Fig. 8 Results when changing intensity rapidly

(NA: Neutral Attenuator)

同样,测试 AGC 了算法在面对辐亮度突然减低的情况,将一片通过率为 9% 的衰减片插入架中,此时采集的图像如图 8(d) 所示,此时增益稳定在 0.486 V,分辨率板图像较为清晰,测量得到积分球出口处的辐亮度为 $6.316 \times 10^{-4} \mu\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^2)$ 。在支架上迅速插入另一块衰减片,图像如图 8(e),分辨率板图像十分微弱,图像较为灰暗。AGC 算法开始增加增益,经过 1.2 s 后,增益稳定在 0.685 V,此时图像如图 8(f) 所示,分辨率板图像再次清晰可见。测量得到此时的积分球出口处的辐亮度为 $1.041 \times 10^{-5} \mu\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^2)$ 。通过上述实验,可见 AGC 算法在面对目标辐亮度突变的情况下具有很好的调节性能,能够快速有效的自动控制增益以获得较好的图像分辨率。

同时,考虑到在实际应用中较多地出现目标幅亮度非突变的情况,如车载或机载电晕探测设备在使用过程中目标与设备的距离渐变的情况,进行了相关实验研究 AGC 算法在上述情况时的性能。采用图 6 所示的装置,对氙灯缓慢调焦模拟目标辐亮度的变化,测量得到 AGC 算法作用下明亮系数 η_b 及饱和系数 η_s 的变化,通过分析两个系数的变化情况说明 AGC 算法的性能。实验中积分球出口辐亮度从 2.34×10^{-5} 到 $1.28 \times 10^{-4} \mu\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^2)$ 由弱缓慢增强时测量得到参



(b) 由强减弱

(b) From strong to weak

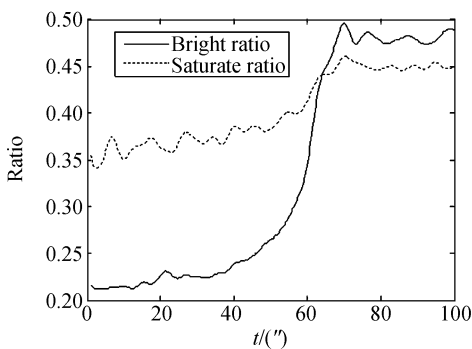
图9 非突变情况下实验结果

Fig. 9 Results when changing intensity slowly

数如图 9(a) 所示,反之由强缓慢变弱缓慢变化时测量得到的系数则如图 9(b) 所示。在试验中增加或减小目标辐亮度时,只要 η_b 及 η_s 在设置的范围内,算法不调节增益以保证增益的稳定性,一旦超过设定的范围,AGC 算法将适当的增加或减小增益,将 η_b 及 η_s 限制在合理范围内,保证图像有较优的分辨率。

5 结论

AGC 算法在保护 ICCD 器件,提高对不同目标辐亮度情况下的图像分辨率具有重要的作用。本文在分析 SBUV-ICCD 成像特点的基础上,将帧连续图像的直方图和分段,以明亮系数 η_b 及饱和系数 η_s 为统计参考量,提出了一种基于帧图像直方图和分析的 AGC 算法,将饱和系数控制在 0.2 以下,明亮系数在 0.4~0.8 内,可实现在辐亮度突然变化时或缓慢变化的情形下增益快速自动调节,并设计了实验进行验证。结果表明,该算法能够阻止 ICCD 相机长时间过载,并使输出视频具有较好的分辨率,在电晕探测、火灾预警等领域有广泛的应用。



(a) 由弱增强

(a) From Weak to strong

参考文献:

- [1] 李峥. 电子战接收机中的自动增益控制[J]. 电子对抗, 2006, 110(5): 26-29.
LI ZH. Automatic gain control strategy of EW receiver[J]. *Electronic Warfare*, 2006, 110(5): 26-29. (in Chinese)

- [2] FOWLER K R. Automatic gain control for image-intensified camera[J]. *IEEE Transaction of Instrumentation and Measurement*, 2004, 53(4): 1057-1064.
[3] FOWLER K R. Transient response for automatic gain control with multiple intensity thresholds for

- image-intensified camera[J]. *IEEE Transaction of Instrumentation and Measurement*, 2004, 55 (5): 1926-1933.
- [4] CASTRACANE J, GUTIN M. DMD-based bloom control for intensified imaging systems[J]. *SPIE*, 1999, 3633:234-242.
- [5] FRENKEL A, SARTOR M A, WLODAWSKI M S. Photo-noise-limited operation of intensified CCD cameras [J]. *App. Opt.*, 1997, 36(22):5288-5297.
- [6] Proxitronic Company. Introduction to image intensifier tubes [S]. *Bensheim: Proxitronic Company*, 2000.
- [7] Proxitronic Company. High performance image intensifiers [S]. *Bensheim: Proxitronic Company*, 2001.
- [8] DUNHAM M E. Performance factors for intensified CCD system[J]. *SPIE*, 1992, 1655:66-73.
- [9] 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 ZH J, YU X, *et al.*. Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (4): 709-713. (in Chinese)
- [10] VICTOR W K, BROCKMAN M H. The application of linear servo theory to the design of AGC loops [C]. *Proceedings of the IRE*, 1960: 234-238.

作者简介:



章明朝(1982—),男,浙江苍南人,博士研究生,主要从事光电探测信号处理,辐射定标技术,DSP 系统设计技术的研究。E-mail: zmchao2008@sina.com



周跃(1983—),男,四川南充人,博士研究生,2002年于东北师范大学获得学士学位,主要从事光电探测信号处理,目标检测及跟踪算法研究。E-mail: zhoyu385@126.com



闫丰(1975—),男,吉林长春人,助理研究员,2008年博士后出站,主要从事光电探测器件应用的研究。E-mail: yan.feng@126.com



杨怀江(1966—),男,辽宁丹东人,研究员,博士生导师,主要从事信息安全、光学信息融合及深紫外光刻技术的研究。E-mail: yanghj@sklao.ac.cn

通讯作者:



隋永新(1970—),男,吉林长春人,副研究员,硕士生导师,主要从事信息安全、光学信息融合及辐射定标技术的研究。E-mail: suiyx@sklao.ac.cn