

〈微光技术〉

基于自动门控电源的微光像增强器信噪比研究

倪小兵^{1,2}, 延波^{1,2}, 杨晔^{1,2}, 杨书宁^{1,2}, 智强^{1,2}, 李军国^{1,2}, 姚泽^{1,2}, 邓广绪^{1,2}

(1. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065; 2. 北方夜视科技集团有限公司, 云南 昆明 6502231)

摘要: 针对实验中同一微光像增强器的信噪比在装配自动门控电源后有偏低现象, 从而开展了以下研究: 首先通过借鉴微光像增强器的信噪比公式, 理论推导分析了阴极高压脉冲对信噪比的影响; 其次分别给微光像增强器光电阴极施加高压脉冲和直流高压, 通过实际测量两种状态下的信噪比, 来验证理论推导分析的正确性; 最后提出了一种自动门控电源阴极高压脉冲控制电路的设计方法, 解决了基于自动门控电源的微光像增强器测试时的信噪比偏低问题。

关键词: 微光像增强器; 自动门控电源; 阴极高压脉冲; 信噪比

中图分类号: TN223

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2017)03-0284-04

Study of Image Intensifier SNR Based on Auto Gated Power Supply

NI Xiaobing^{1,2}, YAN Bo^{1,2}, YANG Ye^{1,2}, YANG Shuning^{1,2},
ZHI Qiang^{1,2}, LI Junguo^{1,2}, YAO Ze^{1,2}, DENG Guangxu^{1,2}

(1. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China;

2. North Night-Vision Science & Technology Group Corp. Ltd., Kunming 650223, China)

Abstract: Aiming at image intensifier SNR degradation after auto gated power supply assembled, the following research work were carried out. First, the image intensifier SNR formula is used to analyze the effect that cathode high voltage affects the intensifier SNR. Two different cases of intensifier SNR are measured: cathode high voltage pulse and cathode DC high voltage. Then two kinds of cases are analyzed and compared. At last, this paper concludes the research and points out a new method of designing the cathode start control circuit with auto-gating power supply.

Key words: image intensifier, auto-gating power source, the cathode high voltage pulse, SNR

0 引言

微光成像技术作为军用夜视领域、光电子成像技术领域的重要技术分支, 一直以来受到国内外各军事部门的重视和支持。自微光夜视装备首次应用于战争中以来, 该技术先后经历了第0代、第1代、第2代和第3代发展阶段, 目前各大军事大国正致力于性能更加卓越的第4代、甚至第5代微光夜视像增强器技术的研发^[1]。微光像增强器作为一种低照度成像器件, 主要用于对夜间周围环境的观察, 但由于夜间环境非常复杂、变化较快, 例如夜战中, 作战人员需要经常在较亮区域与较暗区域之间移动, 周围环境明暗交替变化; 战场中爆炸强光等极端视场环境条件, 都要求

微光像增强器具有较宽的动态范围^[2]。自动门控电源的出现有效地提高了微光像增强器动态范围。与传统微光像增强器专用直流高压电源相比较, 自动门控电源将连续高压脉冲作用于微光像增强器光电阴极, 并将荧光屏电流转换成控制信号来调整阴极脉冲宽度, 从而控制光电阴极电子发射量, 达到调整荧光屏亮度的目的。

在基于自动门控电源的微光像增强器研究过程中发现, 微光像增强器光电阴极开启电压、MCP电压、荧光屏电压相同的条件下, 给光电阴极施加高压脉冲时比施加直流电压时测试的信噪比低。而信噪比作为微光像增强器的一项重要参数, 对微光像增强器性能有很大影响^[3]。针对上述问题本文开展了如下研究:

收稿日期: 2016-08-21; 修订日期: 2016-12-22.

作者简介: 倪小兵 (1988-), 男, 工程师, 主要从事电子学在微光夜视技术中的应用研究。

首先通过借鉴微光像增强器的信噪比公式,理论推导分析了阴极高压脉冲对信噪比的影响;其次分别给微光像增强器光电阴极施加高压脉冲和直流高压,通过实际测量两种状态下的信噪比,来验证理论推导分析的正确性;最后提出了一种自动门控电源阴极高压脉冲控制电路的设计方法,解决了基于自动门控电源的微光像增强器测试时的信噪比偏低问题。

1 基于自动门控电源的微光像增强器工作原理

自动门控电源主要通过 MCP 电压调控和阴极脉冲宽度调制来实现其对微光像增强器荧光屏亮度的有效控制,从而实现其在宽照度范围下的应用需求,是给微光像增强器电子光学系统提供能量的小型 DC/DC 电能转换器;具有体积小、功耗低、输出电压高、屏幕亮度可以通过阴极脉宽的关断自动控制的特点;是微光像增强器的重要组件之一,阴极门控工作状态下像管电子发射如图 1 所示。

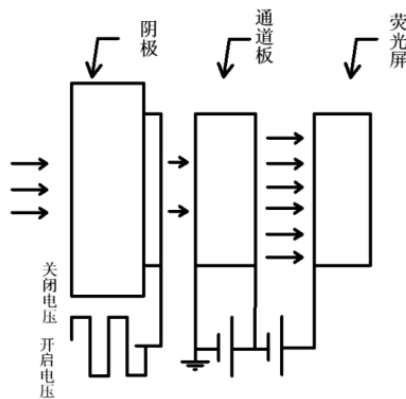


图 1 阴极门控工作状态下像管电子发射

Fig.1 Electron emission from the cathode gated state

像增强器的荧光屏电流大小反映了荧光屏亮度高低。自动门控电源通过采集荧光屏电流信号,将其转化成控制信号来控制 MCP 电压、阴极脉宽占空比,达到自动亮度控制的功能。

2 基于自动门控电源的微光像增强器信噪比偏低原因的理论分析及测试

2.1 微光像增强器信噪比简介

信噪比是指接收端的信号中有效信号功率与噪声信号功率比值,英文缩写 SNR 或 S/N 即 Signal-Noise Ratio,有时又被称作信噪比。微光像增强器的有效信号是指在荧光屏端有效图像,而噪声信号指荧光屏端的噪声图像。

微光像增强器的噪声源共有以下 11 种: MCP 热噪声、MCP 离子噪声、光电阴极热发射噪声、光子噪

声、光子反馈噪声、离子反馈噪声、离子噪声、宇宙射线辐射噪声、放射性源辐射噪声、固定闪烁点、MCP 固定图像噪声^[4]。

微光像增强器从荧光屏输出端测得的平均亮度 S 与噪声的均方根值 N 之比,被定义为该器件的信噪比,即公式(1)。规定的测试条件为:光源色温 2856 K;光电阴极输入照度 3×10^{-4} lx,亮度输出信号探测器带宽 20 Hz(相当于加有人眼时域带宽的低通滤波器)^[1]:

$$\frac{S}{N} = \frac{S_A - S_B}{K\sqrt{N_A^2 - N_B^2}} = \frac{S_A - S_B}{K\sqrt{(N_A + N_B)(N_A - N_B)}} \quad (1)$$

式中: S_A 为有光照射时输出信号直流分量(即有效信号); S_B 为无光照射时输出信号的直流分量(即有效信号); N_A 为有光照射时输出信号的交流分量有效值(即噪声信号); N_B 为无光照射时输出信号的交流分量有效值(即噪声信号); K 是等效带宽为 10 Hz 时的荧光屏发光光谱修正系数,该值与空间频率有关,根据荧光粉和荧光屏不同来校正。

2.2 光电阴极施加高压脉冲时的信噪比理论分析

给微光像增强器光电阴极施加高压脉冲主要影响光电阴极的电子发射量,从电子发射量的变化上来说,只要阴极高压脉冲的占空比发生变化,光电阴极的电子发射量在单位时间内就会有相应变化。以下通过信噪比的影响因素分析和信噪比公式推导相结合的方式分析了高压脉冲对微光像增强器信噪比的影响:

本文讨论光电阴极高压脉冲对像增强器信噪比影响,而噪声信号 N_A 、 N_B 中光电阴极热发射噪声、光子噪声、离子噪声、宇宙射线辐射噪声与阴极有关;MCP 热噪声、MCP 离子噪声、光子反馈噪声、离子反馈噪声、放射性源辐射噪声、固定闪烁点、MCP 固定图像噪声与阴极无关。

N_A 中与光电阴极有关的噪声信号设为 N_{A1} ,与光电阴极无关的噪声信号设为 N_{A2} ; N_B 中与光电阴极有关的噪声信号设为 N_{B1} ,与光电阴极无关的噪声信号设为 N_{B2} ,公式(1)中 $N_A = N_{A1} + N_{A2}$, $N_B = N_{B1} + N_{B2}$ 。光电阴极在门控状态下, N_{A1} 、 N_{B1} 与阴极电子发射量相关,而阴极电子发射量与占空比 λ 相关,所以 N_{A1} 、 N_{B1} 与占空比 λ 相关,公式(1)中 $N_A = \lambda N_{A1} + N_{A2}$, $N_B = \lambda N_{B1} + N_{B2}$ (本文中占空比均指负电平在一个周期之内所占的时间比率)。 S_A 为有光照射时输出信号的有效信号,与光电阴极电子发射量相关,而光电阴极电子发射量与占空比 λ 相关,所以 S_A 与占空比 λ 相关,同理 S_B 也与占空比 λ 相关。

光电阴极在门控状态下,将占空比 λ 引入公式(1)得:

$$\frac{S}{N} = \frac{\lambda(S_A - S_B)}{K\sqrt{(\lambda N_{A1} + N_{A2})^2 - (\lambda N_{B1} + N_{B2})^2}} \quad (2)$$

式中： λ 为阴极脉冲占空比， $0 < \lambda \leq 1$ ； K 是等效带宽为10 Hz时的荧光屏发光光谱修正系数，该值与空间频率有关，根据荧光粉和荧光屏不同来校正。

光电阴极施加直流高压（即 $\lambda=1$ 时）的微光像增强器荧光屏输出信号示意图如图2中(a)图所示，S1波形为荧光屏输出信号噪声信号，C线段为荧光屏输出信号有效信号，当像增强器工作时，光电阴极电平保持不变，光电阴极始终有电子发射到MCP，经过MCP倍增后到达荧光屏，始终有信号从荧光屏输出，当像增强器各极间电压一定的情况下该信号有效信号、噪声信号保持不变。

而光电阴极施加高压脉冲信号（即 $0 < \lambda < 1$ ）的微光像增强器，该阴极高压脉冲信号由开启电压（即光电阴极与MCP输入端加负压）、关闭电压（即在光电阴极与MCP输入加反向电压）组成，光电阴极施加高压脉冲的微光像增强器工作时，像增强器输出信号示意图如图2中(b)图所示，当阴极脉宽处在开启电压工作状态下时噪声信号如S2波形，脉宽处在关闭电压工作状态下噪声信号如S3波形。D线段为阴极只在负压工作状态下的像增强器输出信号中有效信号，与C线段相等，F线段为阴极在脉冲开启、关闭电压共同作用下的微光像增强器输出信号中有效信号。

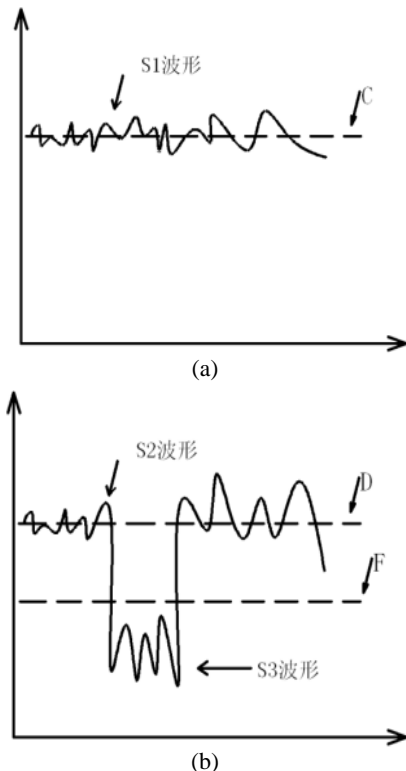


图2 像增强器输出信号示意图
Fig.2 The image intensifier output signal

公式(2)化简后得：

$$\frac{S}{N} = \frac{S_A - S_B}{K\sqrt{\left(N_{A1} + N_{B1} + \frac{N_{A2} + N_{B2}}{\lambda}\right)\left(N_{A1} - N_{B1} + \frac{N_{A2} - N_{B2}}{\lambda}\right)}} \quad (3)$$

式中： $0 < \lambda \leq 1$ ，当 $\lambda=1$ 时，公式(3)与公式(1)相等，光电阴极为非门控状态； $\lambda \neq 1$ 时，光电阴极为门控状态，且当像增强器各极之间电压不变只改变脉宽占空比时，相比较于非门控状态（公式(1)），上式中分子不变，分母变大，信噪比较非门控状态变小。

2.3 光电阴极施加高压脉冲时的信噪比测试

选用同一像增强器，在荧光屏电压、MCP电压、阴极开启电压都相同的条件下，在同一信噪比测量装置上进行实验，实验中只改变施加给像增强器光电阴极的高压脉冲占空比，得到的一组测试数据如图3所示。

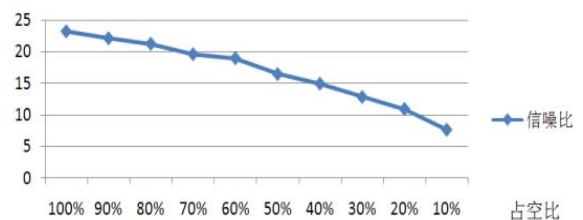


图3 不同占空比状态下信噪比曲线图

Fig.3 The SNR curves under different duty ratio

通过图3可以看出在荧光屏电压、MCP电压保持不变的条件下随着占空比降低，微光像增强器信噪比测试值明显降低。

当脉冲信号处于关闭电压状态下时，像增强器光电阴极在关闭电压的作用下，没有电子溢出，所以此时光阴极没有有效信号和噪声信号的产生，但MCP电压、荧光屏电压均正常且使MCP和荧光屏能正常工作，此时荧光屏输出信号均为噪声信号。随着占空比的降低，即关闭电压所占阴极脉冲信号的比例越来越大，势必产生更多噪声影响信噪比。脉冲信号处于关闭电压状态下像增强器信号输出图如图4所示。

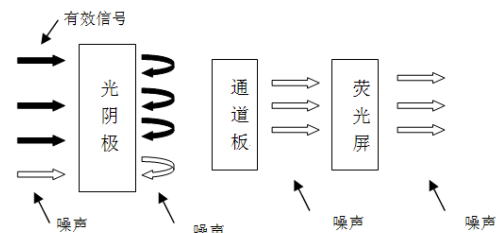


图4 阴极脉冲信号处于关闭电压状态下像增强器信号输出
Fig.4 The image intensifier output signal in cathode of high voltage pulse is closed

自动门控电源能给像增强器提供更宽的动态范

围,保证各种复杂环境条件下像增强器的正常使用,阴极脉冲信号的使用能对阴极组件进行有效保护^[5];而基于非门控电源的像增强器在高照度环境下具有局限性,且在高照度下阴极寿命容易受到损伤,故微光夜视装备大范围使用自动门控电源将是主流方式。同一像增强器光电阴极在门控、非门控工作状态下信噪比测试值有明显变化,阴极脉冲占空比越小信噪比越低,在设计自动门控电源过程中需要充分考虑到低照度时阴极脉冲占空比对信噪比的影响。

3 信噪比偏低问题的解决方案

通过以上分析,基于自动门控电源的微光像增强器信噪比在测试条件下,或者低光照条件下阴极高压脉冲占空比应该为 100%。微光像增强器在低照度环境下且各极施加直流高压,像增强器有较好的电子光学性能,低照度时取像增强器光电阴极工作在高压直流条件下;而在高照度条件下需要减少光电阴极电子发射量,以达到保护光电阴极的目的,阴极脉宽在高照度时再开启^[6]。现将自动门控电源阴极脉冲启动方式设计如图 5。阴极脉冲在照度 $10^{-3}lx$ 以下时,阴极脉冲不启动,当照度大于 $10^{-3}lx$ 时阴极脉宽启动。

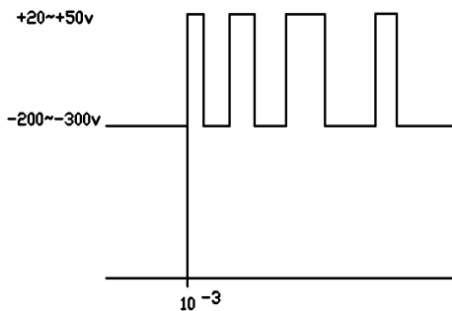


图 5 阴极脉冲启动方式

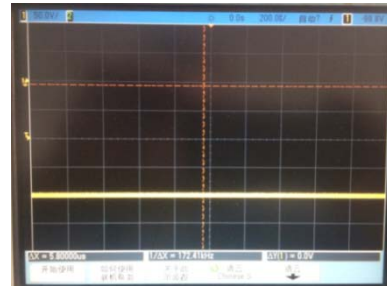
Fig.5 Cathode pulse starting mode

重新设计后的自动门控电源阴极脉冲信号如图 6,脉冲不启动时如图 6(a)、脉冲启动后如图 6(b)。

经过测试:改进后的某型号像增强器在荧光屏电压、MCP 电压不变的条件下,信噪比在 $10^{-3}lx$ 及更低照度下达到 23,较未改进时信噪比有明显改善。

4 结论

本文从理论公式推导和实际测量两方面分析了阴极脉冲占空比对基于自动门控电源的微光像增强器信噪比的影响,并提出了一种解决基于自动门控电源的微光像增强器信噪比偏低现象的解决办法,对于自动门控电源的阴极高压脉冲控制电路的设计具有指导意义。



(a)



(b)

图 6 改进后自动门控电源阴极输出信号

Fig.6 Improved auto-gating power source supply cathode out signal

参考文献:

[1] 向世明,倪国强.光电子成像器件原理[M].北京:国防工业出版社,1999: 6-7.
XIANG Shiming, NI Guoqiang. *Optoelectronic devices*[M]. Beijing: National defense industry press, 1999: 6-7.

[2] 黄林涛,赵宝升,张小秋.一种带新型自动门控电源的像增强器[J].激光与光电子学进展,2005,42(4): 29-32.
HUANG Lintao, ZHAO Baosheng, ZHANG Xiaoqiu. Auto-gated Power Supply For Generation II Image Intensifiers[J]. *Laser & Optoelectronics progress*, 2005, 42(4): 29-32.

[3] 郭晖,向世明,田民强.微光夜视技术发展动态评述[J].红外技术,2013,35(2): 63-68.
GUO Hui, XIANG Shiming, TIAN Min-qiang. A Review of the Development of Low-light Night[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(2): 63-68.

[4] 向世明,高教波,焦明印.现代光电子成像技术概论[M].北京:北京理工大学出版社,2010: 322-323.
XIANG Shiming, GAO Jiaobo, JIAO Mingyin. *Introduction to modern photoelectronic imaging technology*[M]. Beijing: Beijing Institute of technology press, 2010: 322-323.

[5] 延波,智强,李军国,等.基于自动门控电源的微光像增强器动态范围研究[J].红外技术,2013,35(5): 300-302.
YAN Bo, ZHI Qiang, LI Junguo. Study of Image Intensifier Dynamic Range Based on Auto-gating Power Source[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(5): 300-302.

[6] 邓广绪,延波,智强,等.微光像增强器自动门控电源技术研究[J].红外技术,2012,34(3): 157-158.
DENG Guangxu, YAN Bo, ZHI Qiang. Study of Technology of Auto-gating Power Source in Image Intensifier[J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(3): 157-158.