

文章编号 1004-924X(2020)12-2674-10

光电探测系统噪声特性研究与降噪设计

李 乐, 汪龙祺, 黄 煜*, 林冠宇, 王维彪, 张 航, 宋悦铭
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130023)

摘要:本文介绍了一种基于光电倍增管的锁相放大光电探测系统,并定量地对系统中光电倍增管、放大电路、高压电源的噪声特性进行研究,发现高压电源的纹波对系统噪声的影响很大。实验利用三台不同纹波的高压电源测试系统噪声,发现在无光条件下,系统噪声以光电倍增管暗噪声为主,高压纹波噪声近似线性地耦合进系统噪声中;在有光条件下,系统噪声以阳极电流散粒噪声为主,高压纹波贡献的噪声既随光电流增大而增大也与高压纹波正相关。基于以上研究,分析了高压电源的传递函数并优化反馈系数,设计了高稳定低纹波高压电源,高压纹波小于 5 mV。系统整机信噪比测试表明,使用自研高压可显著提升系统信噪比,相比较于其他高压电源(纹波 15 mV, 50 mV),最大信号下分别提升了 38% 和 125%。

关键词:光电倍增管;噪声;高压电源;纹波;信噪比

中图分类号: TN16; TN152 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202812.2674

Study on noise characteristics of photoelectric detection system and noise reduction design

LI Yue, WANG Long-qi, HUANG Yu*, LIN Guan-yu, ZHANG Hang, SONG Yue-ming

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130023, China)

* Corresponding author, E-mail: ssshycn@yahoo.com.cn

Abstract: A photoelectric detection system based on a lock-in amplifier was developed. The noise characteristics of each part of the system, such as the photomultiplier, amplifier, and high-voltage power supply, were analyzed quantitatively. Research has shown that the ripple of the high-voltage power supply has a significant effect on system noise. Three high-voltage power supplies with different ripples were installed in the system, and the noise was analyzed. The results showed that in darkness, system noise was mainly contributed by photomultiplier anode dark noise and noise from the high-voltage power supply ripple linearly coupling into the system. In light, photomultiplier anode shot noise contributed the most to the system noise, and noise contributed by the high-voltage power supply ripple showed a positive correlation with both light current and ripple value. Based on the above findings, the transfer function of the high-voltage power supply was analyzed, and its feedback coefficient was optimized. A high-voltage power supply with high stability and low ripple (less than 5 mV) was designed. The signal-to-noise ratio test of the system showed that the signal-to-noise ratio could be significantly improved by applying self-developed high-volt-

收稿日期: 2020-05-09; 修订日期: 2020-06-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 41527806); 吉林省重点科技研发项目资助(No. 20180201054SF)

age power supplies, which were 38% and 125% higher than those of other high-voltage power sources (ripples of 15 and 50 mV, respectively).

Key words: photomultiplier tube; noise; high voltage power supply; ripple wave; signal noise ratio

1 引 言

作为一种基于外光电效应原理的探测器,光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)具有高灵敏度、高稳定性、低噪声、线性度好等优点,在光谱学研究^[1]、单光子与高能粒子探测^[2-4]、核物理^[5-6]以及凝聚态物理领域^[7-9]具有广泛应用。近年来,随着真空紫外研究热度的上升,PMT器件凭借其在紫外波段的探测优势,受到器件制造商与研究单位的关注。北京滨松光子技术股份有限公司通过改进窗材料和光阴极制备工艺,研制了长寿命、高灵敏度的日盲型PMT探测器^[10]。中国科学院长春光机所的李寒霜等完成了紫外-真空紫外光电倍增管量子效率定标,不确定度优于3.4%^[11]。除了科研与工程应用,近年来针对PMT的设计理论与制造工艺的研究也有诸多进展。中科院西安光机所的郭乐慧等对3-inch光电倍增管进行优化设计并用于中微子探测,提升了PMT阴极有效探测面积^[12]。北京滨松光子技术股份有限公司的党向瑜提出了一种可以提高PMT光阴极量子效率的方法,将PMT的光阴极量子效率从25%提高至35%^[13]。

然而,PMT器件体积较大,工作时需要在其阴极和各级打拿级之间施加负高压,造成器件的噪声来源较多。PMT内部的噪声、后续放大电路的噪声以及高压电源所引入的噪声均会对系统的噪声产生影响。因此对PMT及其后续电路的噪声研究对于PMT的应用具有重要意义。中国科技大学的郭从良讨论了PMT的噪声模型^[14],东南大学的叶莉华研究了PMT前置放大器的设计与噪声机理^[15]。合肥工业大学的刘冬梅测试了不同PMT增益与前置放大器增益组合的噪声水平,并提出了最优的匹配组合^[16]。但是,以上研究中尚无对高压电源特性的讨论。如果高压电源的稳定性不佳,会造成PMT的增益发生变化。而高压电源稳定性取决于其内部反馈系数、器件温度漂移等因素,需要在设计时着重考虑。此外,高压电源纹波会通过分压电阻耦

合进入PMT的打拿级,并被逐级放大,增大PMT噪声。因此在光谱仪系统设计中,除了需要考虑PMT自身的光学特性与工作状态、放大器噪声以及后续模/数转换的精度等因素以外,对PMT高压电源的性能指标分析同样必不可少。

本文提出了一种基于超低噪声前置放大器和锁相放大技术的PMT电流放大器设计方案,并对探测器、放大电路和高压电路逐级进行噪声分析。研究发现,除探测器自身工艺参数与环境干扰外,影响系统噪声的主要因素为阳极电流散粒噪声、PMT暗噪声及高压电源纹波所引入的噪声。

2 探测器选型与采集系统设计

2.1 光电倍增管的选型与工作模式

本研究选用滨松公司的R7378A型PMT,端面受光结构,10级放大,双碱光阴极,可见、紫外波段灵敏。该探测器在不同高压电压下的增益与暗电流特性如图1所示。

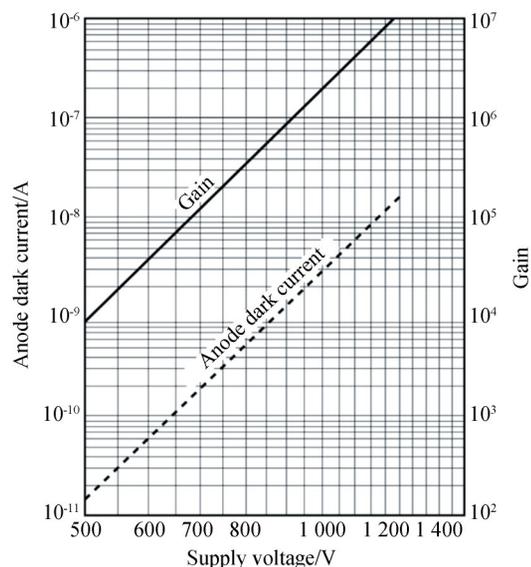


图1 R7378A的增益与暗电流特性
Fig. 1 Typical gain and dark current characteristics of R7378A

2.2 信号采集电路设计

本文基于PMT的电流工作模式,设计了一种锁相放大大型信号采集电路,其系统框图如图2所示。入射光被音叉调制后,经过光学系统,照射在PMT端面上。PMT由直流高压电源供电,光子在PMT中激发所产生的微弱电信号,经前置放大电路,锁相放大电路放大,转化为适合采集的直流信号。音叉调制器驱动音叉工作,并产生同频率、固定相位的正弦波,作为参考信号传递至锁相放大电路。

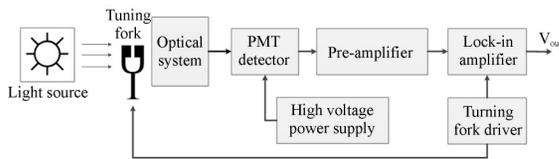


图2 PMT光电采集系统框图

Fig. 2 Structure diagram of PMT signal detection

前置放大电路原理如图3所示,选用AD549型集成运算放大器组成超低噪声电流放大电路,放大电路的增益等于反馈电阻 R_f 的值,为 2.4×10^6 ,积分电容 $C=30$ pF, R_f 与 C 组成阻容滤波器,其低通频率为2.2 kHz。信号经前置放大器放大后,进入锁相放大器。

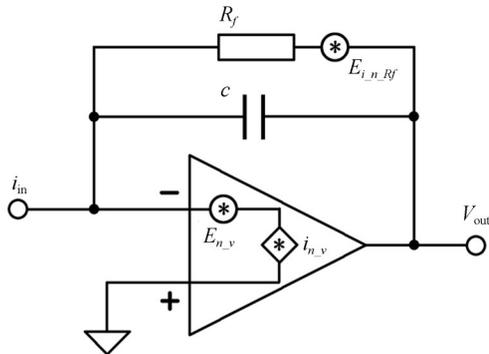


图3 前置放大器原理示意图

Fig3 Schematic of pre-amplifier

锁相放大器在系统中起到进一步放大信号,压缩带宽,减少噪声的作用,其结构如图4所示。信号经过放大、带通滤波、相关运算、低通滤波,到达下一级电路中;参考信号由音叉驱动器发出,经触发,移项,整形后进入相关器与信号进行相关运算。信号的中心频率设计为800 Hz,经过

相关运算,信号带宽可以被压缩至5 Hz。

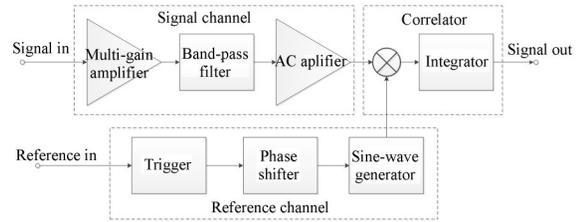


图4 锁相放大器结构框图

Fig4 Structure diagram of lock-in amplifier

2.3 实验设备与测试条件

利用标准光源对系统进行定标,在定标过程中利用电压表采集系统的输出电压,并实时上传到计算机中。通过分析不同信号强度条件下的结果,对系统的噪声特性、信噪比进行研究。其中,标准光源采用中国计量院光学与激光计量所的F08型卤钨灯标准光源。电压表采用吉时利2000型台式数字万用表,通过GPIB总线与计算机通讯。此外,为了测试不同高压纹波条件下的系统噪声,使用了3款高压电源,其型号与纹波指标如表1所示。将高压电源输出值设置为610 V,由图1可知,PMT的增益为 3×10^4 ,暗电流为50 pA。

表1 高压电源型号与指标

Tab. 1 Type and index of high-voltage power supply

编号	厂家(国家)	型号	纹波 (V_{p-p})/mV
1	长春光机所(中国)	自研	5
2	McPherson(美国)	7640	15
3	滨松(日本)	C9727	50

3 系统噪声分析

PMT的噪声包括光子噪声、光阴极噪声、二次发射噪声、阳极电流散粒噪声、阳极暗噪声以及其它多种因素造成的噪声等。各种来源的噪声对总噪声的贡献也存在很大差异。在工程应用中,仅关注对总噪声贡献最大的几项噪声来源,然后通过实验对计算结果进行校正。通常情况下,PMT的阳极暗噪声、阳极电流散粒噪声、阳极电阻热噪声是主要考虑的噪

声来源;此外,后续放大电路中的电路反馈电阻热噪声及放大器噪声也是必须考虑的噪声来源。

由于有效带宽内的噪声在放大电路中会被逐级放大,因此前级放大电路的噪声经放大后会远大于后续放大电路的噪声。本系统的前置放大器增益较大,所以相较于前置放大器噪声,后续锁相放大器噪声可忽略。讨论前置放大器噪声即可代表整个放大电路噪声。此外,系统噪声带宽由锁相放大器带宽决定,在 PMT 噪声与放大器噪声的计算中,带宽取 $\Delta f=5\text{ Hz}$ 。涉及电阻热噪声的计算中,玻尔兹曼常数(K)取值 $1.38\times 10^{-23}\text{ J/K}$,室温 $23\text{ }^\circ\text{C}$ 所对应的开尔文温度(T)取值 296 K 。

3.1 PMT 噪声分析

阳极暗噪声($I_{\text{nan,d}}$)是由基本电荷(e),暗电流($I_{\text{an,d}}$),PMT 增益(M)以及测量带宽(Δf)共同决定的,可由式(1)表示:

$$I_{\text{nan,d}} = \sqrt{2eI_{\text{an,d}}M\Delta f}. \quad (1)$$

阳极电阻热噪声($I_{\text{n,Ra}}$)仅与阳极电阻(R_a)本身有关,关系式如式(2)所示:

$$I_{\text{n,Ra}} = \sqrt{\frac{4KT\Delta f}{R_a}}. \quad (2)$$

阳极电流散粒噪声($I_{\text{nan,1}}$)与光电流($I_{\text{an,1}}$)相关,关系式如式(3)所示:

$$I_{\text{nan,1}} = \sqrt{2eI_{\text{an,1}}M\Delta f}. \quad (3)$$

利用式(1),式(2)计算可知阳极暗噪声和阳极电阻热噪声值,如表 2 所示;利用式(3)计算得到阳极电流散粒噪声与光电流的关系,如图 5 所示。

表 2 阳极暗噪声和阳极电阻热噪声值

Tab. 2 Anode dark noise and anode resistant noise

Anode Dark Noise ($I_{\text{nan,d}}$)	Anode Resistant Noise ($I_{\text{n,Ra}}$)
1.55 pA	0.15 pA

显然,从表 2 可知阳极电阻热噪声较小,相较于阳极暗噪声可忽略;而有光条件下二者又相较于阳极电流散粒噪声可忽略。因此,在理想条件下,PMT 器件的噪声在无光条件下以阳极暗噪

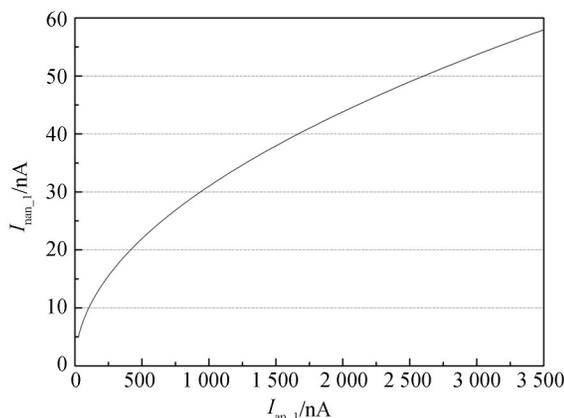


图 5 光电流($I_{\text{an,1}}$)-阳极电流散粒噪声($I_{\text{nan,1}}$)曲线

Fig. 5 Curves of shot noise and light current

声为主要来源,在有光条件下以阳极电流散粒噪声为主要来源。

3.2 放大器噪声分析

放大器噪声主要考虑电压噪声、电流噪声和电阻热噪声。

电压噪声包括宽带 RMS 噪声电压和 $1/f$ RMS 噪声电压,分别由式(4),式(5)表示^[17]:

$$E_{\text{nBB}} = e_{\text{bb}} \sqrt{f_H K_n}, \quad (4)$$

$$E_{\text{nf}} = e_{\text{norm}} \sqrt{\ln(f_H/f_L)}, \quad (5)$$

放大器电压噪声($E_{\text{n,v}}$)为二者的叠加,由式(6)表示:

$$E_{\text{n,v}} = \sqrt{E_{\text{nBB}}^2 + E_{\text{nf}}^2}. \quad (6)$$

由式(4)~式(6)计算得到放大器电压噪声值,如表 3 所示。

表 3 放大器电压噪声值

Tab. 3 Noise voltage of amplifier

Broadband RMS noise voltage (E_{nBB})	$1/f$ RMS noise voltage (E_{nf})	Noise voltage ($E_{\text{n,v}}$)
1 242 nV	25 nV	1 242 nV

将放大器电压噪声转换为电流,转换公式由式(7)表示:

$$I_{\text{n,e,v}} = \frac{E_{\text{n,v}}}{R_f}. \quad (7)$$

由式(7)计算可知放大器电压噪声贡献的噪声电流($I_{\text{n,e,v}}$)为 0.51 pA 。

放大器电流噪声包括宽带 RMS 噪声电流和

1/f RMS 噪声电流,分别由式(8),式(9)表示:

$$I_{\text{nBB}} = i_{\text{nbb}} \sqrt{f_H K_n}, \quad (8)$$

$$I_{\text{nf}} = i_{\text{norm}} \sqrt{\ln(f_H/f_L)}. \quad (9)$$

放大器电流噪声($I_{\text{n,v}}$)为二者的叠加,由式

(10)表示:

$$I_{\text{n,v}} = \sqrt{I_{\text{nBB}}^2 + I_{\text{nf}}^2}. \quad (10)$$

根据式(8)~式(10)分别计算得到放大器电流噪声值如表4所示。

表4 放大器电流噪声值

Tab. 4 Noise current of amplifier

(PA)

Broadband RMS Noise Current (I_{nBB})	1/f RMS Noise Current (I_{nf})	Noise Current ($I_{\text{n,v}}$)
3.9×10^{-3}	1.3×10^{-5}	3.9×10^{-3}

放大器的电路反馈电阻热噪声电动势($E_{i_{\text{n,Rf}}}$)仅与电路反馈电阻(R_f)本身有关,由式(11)表示

$$E_{i_{\text{n,Rf}}} = \sqrt{4KT\Delta f R_f}. \quad (11)$$

电路的反馈电阻热噪声电流($I_{\text{n,Rf}}$)由式(12)表示:

$$I_{\text{n,Rf}} = \frac{E_{i_{\text{n,Rf}}}}{R_f}. \quad (12)$$

因此, $I_{\text{n,Rf}}$ 与 R_f 的关系由式(13)表示:

$$I_{\text{n,Rf}} = \sqrt{\frac{4KT\Delta f}{R_f}}. \quad (13)$$

由式(13)计算得到 $I_{\text{n,Rf}}=0.19 \text{ pA}$ 。

通过以上分析可知,放大电路总噪声电流($I_{\text{n,sum}}$)由放大器电压噪声贡献的噪声电流($I_{\text{n,e,v}}$)、放大器电流噪声($I_{\text{n,v}}$)和反馈电阻热噪声电流($I_{\text{n,Rf}}$)组成,其值为三者的叠加,由式(14)表示:

$$I_{\text{n,sum}} = \sqrt{I_{\text{n,e,v}}^2 + I_{\text{n,v}}^2 + I_{\text{n,Rf}}^2}. \quad (14)$$

综合表2~表3及式(13)的计算结果,代入式(14)计算可知, $I_{\text{n,sum}} = 0.55 \text{ pA}$ 。

此时,放大电路的噪声约为PMT阳极暗噪声的1/3,说明放大电路噪声已被淹没在PMT阳极暗噪声中,已对系统噪声无影响。此时可以认为PMT的噪声即为系统噪声。

3.3 高压纹波贡献的噪声研究

研究发现,高压电源的纹波会增大PMT的噪声,其影响不可忽略。通常,高压纹波对PMT的噪声影响定性讨论比较多,而定量研究比较少。一方面,电压纹波不同,导致噪声不一;另一方面影响因素比较多,难以量化研究。我们经研究发现,高压纹波在两方面对PMT噪声产生

影响,一方面是高压纹波直接耦合进光电倍增管阳极,体现在无光条件下对PMT噪声的影响,另一方面是高压纹波通过分压电阻进入PMT的打拿级中,其噪声被逐级放大,导致有光条件下PMT的噪声增大。本文分别在无光与有光条件下测试了PMT的输出噪声,并对测试结果进行了分析。

在无光条件下,不同高压纹波(Rip_{HV})的PMT的噪声($I_{\text{n,pmt}}$),如图6所示,其中理论值是由式(1)推导得出的暗噪声值。由图6可知,无光条件下PMT的噪声大小与高压电源的纹波正相关,近似为线性关系。这说明高压纹波贡献的噪声会直接耦合在探测器上,对探测器噪声施加影响。

有光条件下,高压电源纹波对PMT的噪声的影响与光照强度相关。实验中测得的高压纹波、光电流与系统噪声的关系,如图7所示(彩图

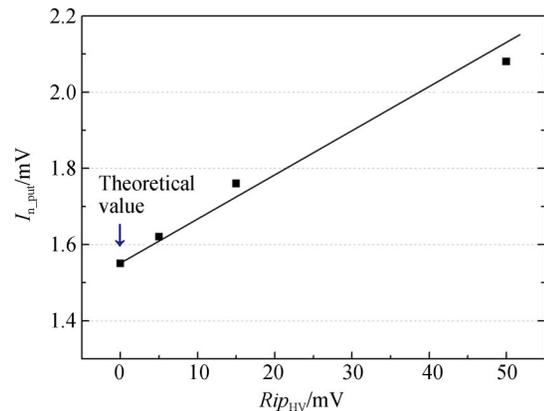


图6 高压纹波(Rip_{HV})-PMT噪声曲线($I_{\text{n,pmt}}$)(无光)
Fig. 6 PMT noise in different high voltage ripple wave in darkness

见期刊电子版)。黑色曲线为不同光电流下阳极散粒噪声的理论值。

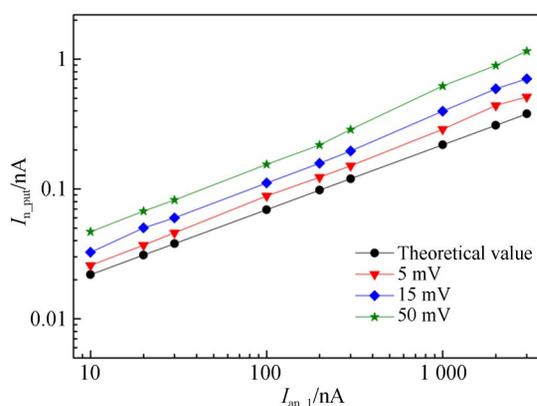


图 7 不同高压纹波条件下光电流 ($I_{an,1}$)-PMT 噪声 ($I_{n,pmt}$) 曲线 (有光)

Fig. 7 Curves of light current and PMT noise in different high voltage ripple wave in light

通过前文的分析,电路噪声可忽略,则有光条件下 PMT 噪声等于系统噪声 ($I_{n,sum}$),其主要由 PMT 阳极电流散粒噪声和高压纹波贡献的噪声 ($I_{nan,HV}$) 组成,此时 PMT 暗噪声能量较小,对总噪声影响可忽略。因此, $I_{n,sum}$ 可由式 (15) 表示:

$$I_{n,sum} = I_{n,pmt} = \sqrt{I_{nan,l}^2 + I_{nan,HV}^2}. \quad (15)$$

由式 (15) 得到 $I_{nan,HV}$ 的表达式如式 (16):

$$I_{nan,HV} = \sqrt{I_{n,pmt}^2 - I_{nan,l}^2}. \quad (16)$$

通过式 (16) 将图 7 中阳极电流散粒噪声去除,得到不同高压纹波贡献的噪声与光电流的关系曲线,如图 8 所示。

从图 8 中可以发现,在相同高压纹波条件下,高压纹波贡献的噪声随光电流的增加而增大,在对数坐标中,二者关系接近直线。图 9 为图 8 数据绘制的高压纹波-噪声曲线图。

从图 9 中可知,对于同一光电流,高压纹波越大,噪声越大,二者在对数坐标中也呈近似线性的关系。产生如图 8~图 9 现象的原因为 PMT 的高压被电阻分压,逐级施加在 PMT 内部的打拿级上,光电子通过打拿级的电场加速和放大,因此高压电源的纹波会在 PMT 打拿级上逐级地对光电流产生影响并积累到 PMT 阳极。由于高压电源纹波不可完全消除,因此其贡献的噪声也无法消除。优化高压电源设计,尽量减小其造成

的噪声,对降低系统噪声有重要意义。

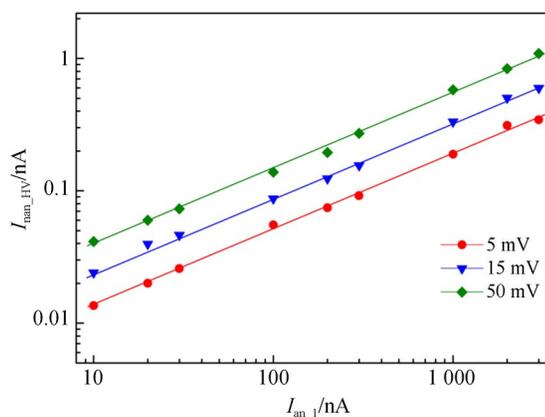


图 8 光电流 ($I_{an,1}$)-高压纹波贡献的噪声 ($I_{nan,HV}$) 曲线

Fig. 8 Curves of light current and noise contributed by high voltage ripple wave

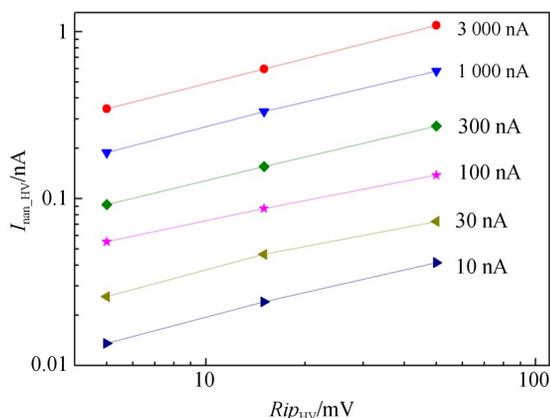


图 9 不同光电流条件下的高压纹波 (Rip_{HV})-高压纹波贡献的噪声 ($I_{nan,HV}$) 曲线

Fig. 9 Curves of high voltage ripple wave and PMT noise in different light current

4 高压电源方案

4.1 高压电源设计

根据前文的分析,为了进一步降低系统的噪声,需要设计低纹波、高稳定度的高压电源模块。本文采用他激式 DC-DC 变换器和电源电压调整式方案通过深度负反馈和提高电路稳定性并降低纹波。所设计的高压电源原理框图如图 10 所示。

电压调整电路与振荡器将输入的低压直流电源 (U_i) 变换为高频交流信号后,由 Cockcroft-

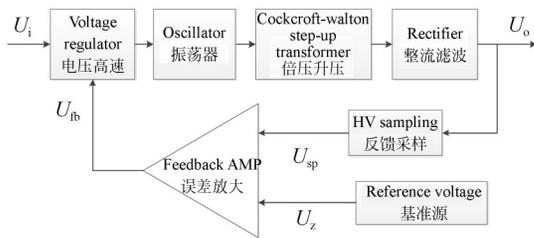


图 10 高压电源原理框图

Fig. 10 Schematic diagram of high-voltage power supply

Walton 倍压电路升压至高压,经整流滤波后成为输出电压(U_o)。输出电压经过反馈采样(U_{sp})后与基准电压(U_z)进行比较,其差值(U_{fb})通过误差放大电路反馈回电压调整电路,从而完成闭环反馈。设升压电路的反馈倍率为 K ,反馈采样电路倍率为 $1/\beta$,则电路的传递函数图如图 11 所示,其中 U_i 不参与反馈。

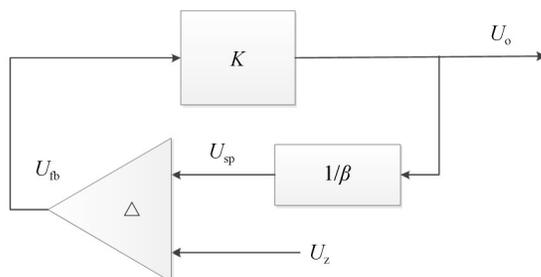


图 11 高压电源传递函数图

Fig. 11 Transfer function of high voltage power supply

由图 11 得到以上参数的关系式,如式(17)所示:

$$U_o = KU_{fb} = K(U_z - U_{sp}). \quad (17)$$

反馈采样(U_{sp})函数关系式如式(18)所示:

$$U_{sp} = \frac{1}{\beta} U_o. \quad (18)$$

由式(17),式(18)可得式(19):

$$U_o = \frac{K}{1 + \frac{K}{\beta}} U_z. \quad (19)$$

由式(19)可知, U_o 与 K , β , U_z 相关,其说明了高压电源的稳定性及纹波与电路设计指标的关系。反馈倍率 K 包括误差放大器的放大倍数、升压比、调整元件的调整系数;反馈系数 β 取决于采样电路的分压比; U_z 取决于基准电压源的器件特性。

4.2 改善高压电源纹波的措施

为了提高电路稳定度、达到 ≤ 5 mV的纹波指标,需要选用更高稳定度的基准源,将基准源的稳定性控制在 20 ppm 内,输出噪声不大于 20 μ V。在其它闭环控制环节中,运算放大器的漂移的变化控制在 0.5 μ V 范围内,反馈电阻与采样电阻温漂控制在 10 ppm 以内,以保证在深度负反馈状态下 K 值与 β 值的不稳定度优于 30 ppm。此外环路中其他因素也需要重点考虑,比如电源与高压输出的滤波,以及电路的电磁屏蔽,防止环境干扰进入电路。通过上述措施,该电路的稳定性高于 5×10^{-5} ,纹波指标小于 5 mV。输出纹波图如图 12 所示。

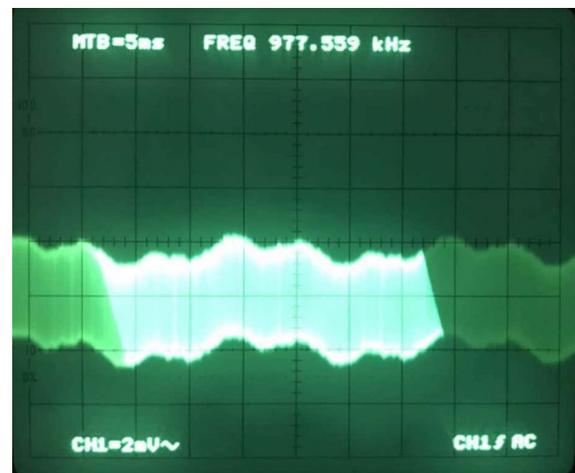


图 12 高压电源输出纹波实测图

Fig. 12 Ripple of high voltage power supply

5 试验结果

使用标准卤钨灯光源搭建定标系统,分别在光谱仪中使用三种不同纹波的高压电源进行光谱定标测试,测量了光谱仪在不同波长的信号与噪声,并计算信噪比。测试得到 PMT 输出电流与波长的关系,波长范围 300~690 nm,步进 1 nm。由于不同纹波的高压电源仅影响噪声,对系统的响应度无影响,因此所测得的曲线重合,如图 13 所示。在测试波长范围内,450 nm 处光栅与探测器效率最高,因此信号最大,达到 3 038 nA。而随着波长向红外和紫外方向移动,信号逐渐变小。当光线波长小于 300 nm 处,信号值低于 275 nA,波长大于 650 nm 处,信号值已低于 25 nA。

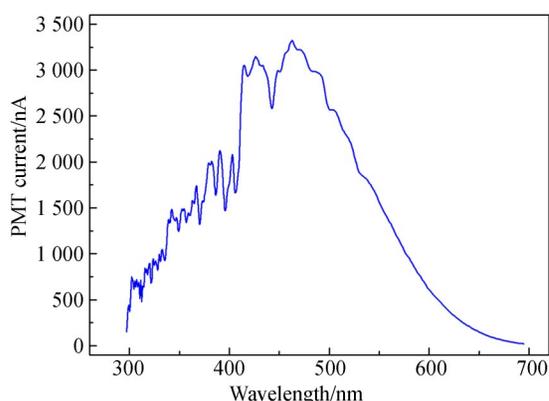


图 13 光谱仪在卤钨灯下的波长-光谱仪输出曲线

Fig. 13 Curve of the spectrogram output in different wavelength

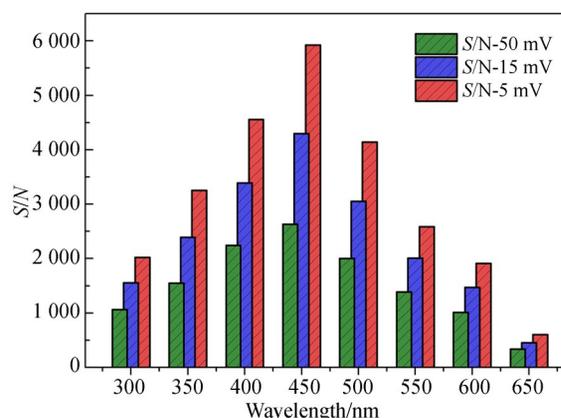


图 14 不同高压纹波条件下光谱仪的波长-信噪比曲线

Fig. 14 S/N of the spectrogram at wavelength in different high voltage ripple

测试得到的信噪比与波长的关系如图 14 所示。由图可知使用 5 mV 纹波的高压电源进行测试所得到的信噪比结果最优,而使用 50 mV 纹波的高压电源所得到的信噪比结果最差。例如,在 450 nm 波长光信号最大处,不同高压纹波得到的信噪比分别为 5 926 (5 mV), 4 294 (15 mV) 和 2 632 (50 mV), 5 mV 高压纹波所对应的信噪

比较后二者分别提升了 38% 和 125%; 在 650 nm 波长位置信号为 25 nA 时, 三者的信噪比分别为 603 (5 mV), 453 (15 mV) 和 333 (50 mV), 5 mV 高压纹波所对应的信噪比较后二者分别提升了 33% 和 81%。由此可见, 较低的高压纹波可以提高信噪比, 在小信号情况下能够大大提高光谱仪的探测极限。

6 结 论

本文介绍了一种基于 PMT 光电探测器的信号采集系统。通过对 PMT 的噪声、放大电路噪声以及高压纹波贡献的噪声进行分析与实验, 定量讨论了这些噪声对系统噪声的影响。研究结果表明, 在放大电路噪声较小的情况下, 无光条件下系统主要的噪声来源为 PMT 阳极暗噪声和高压纹波直接耦合到 PMT 阳极所贡献的噪声, 后者与高压电源的纹波呈近似线性关系; 在有光条件下系统主要的噪声来源为阳极电流散粒噪声和高压纹波通过 PMT 打拿级所引入的噪声, 后者随光电流的增大而增大, 在相同光电流条件下, 高压纹波越大, 所贡献的噪声越大。基于以上研究, 通过分析高压电源增益反馈传递函数, 优化了高压电源的各部分设计, 制备了纹波小于 5 mV 的高压电源, 并且在定标测试中证明使用自研高压电源的系统能达到更高的探测信噪比。相较于高压纹波为 15 mV 和 50 mV 对照组, 装备自研高压的系统在 PMT 输出电流为 25 nA 的小信号条件下信噪比分别提升了 33% 和 81%; 在 PMT 输出电流为 3 038 nA 的大信号条件下信噪比分别提升了 38% 和 125%。系统的探测极限被大幅提高, 尤其在小信号条件下, 这对于拓展系统的应用领域具有积极意义。

参考文献:

- [1] 张锐, 潘明忠, 杨晋, 等. 基于数字微镜器件的中阶梯光栅光谱仪的光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 2994-3000.
ZHANG R, PAN M Z, YANG J, *et al.* Optical

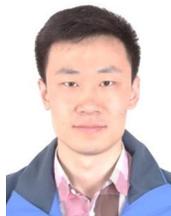
- System of Echelle Spectrometer Based on DMD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(12): 2994-3000. (in Chinese)
[2] WANG M Y, LI Z Y, CAI Y H, *et al.* Ultralow-Noise Single-Photon Detection Based on Precise Temperature Controlled Photomultiplier with En-

- hanced Electromagnetic Shielding [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(10):11-14.
- [3] 聂瑞杰,徐智勇,张启衡,等. SiPM阵列电子特性建模和三维测深仪前端电子学优化[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8):1661-1668.
- NIE R J, XU ZH Y, ZHANG Q H, *et al.* Model of Electrical Characteristics of Sipm Array and Optimization of Front-End Design for Three-Dimensional Depth Sounder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8):1661-1668. (in Chinese)
- [4] 安正华,赵小芸,李航旭,等. 电磁监测试验卫星高能粒子探测器光电倍增管研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2017, 37(11):1156-1160.
- AN ZH H, ZHAO X Y, LI H X, *et al.* Study of the photomultiplier for the purpose of the high energy particle detector of seismic electro-magnetic satellite [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2017, 37(11):1156-1160. (in Chinese)
- [5] ZHANG H Y, YU Y H, Khuram T, *et al.* Photomultiplier tube performance of the WCDA++ in the LHAASO experiment [J]. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A, 2020, 958.
- [6] KIM J H, BACK H K, JOO K S. Development of a wireless radiation detection backpack using array silicon-photomultiplier [J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2020, 52(2).
- [7] 董丽芳,李永辉. 大气压氩气射流等离子体放电发展速度研究[J]. *发光学报*, 2014, 35(04):476-480.
- DONG L F, LI Y H. Propagation velocity in hollow needle to plate discharge [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(4):476-480. (in Chinese)
- [8] 刘莹,董丽芳,牛雪姣. 介质阻挡放电中点线超四边形发光斑图研究[J]. *发光学报*, 2014, 35(10):1210-1214.
- LIU Y, DONG L F, NIU X J. Study on dot-line square superlattice luminous pattern in dielectric barrier discharge [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(10):1210-1214. (in Chinese)
- [9] 于广林,董丽芳,窦亚亚,等. 介质阻挡放电系统中带晕蜂窝六边形发光斑图[J]. *发光学报*, 2018, 39(11):1527-1532.
- YU G L, DONG L F, DOU Y Y, *et al.* Honeycomb superlattice pattern with hole in dielectric barrier discharge system [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(11):1527-1532. (in Chinese)
- [10] 党向瑜. 日盲型光电倍增管的制备及性能研究 [J]. *光电工程*, 2019, 46(6):53-58.
- DANG X Y. Preparation and properties of solar-blind photomultiplier tube [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(6):53-58. (in Chinese)
- [11] 李寒霜,李博,王淑荣. 紫外-真空紫外光电倍增管量子效率定标 [J]. *中国激光*, 2018, 45(8):158-161.
- LI H S, LI B, WANG S R. Quantum efficiency calibration of UV-VUV photomultiplier tube [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8):158-161. (in Chinese)
- [12] 郭乐慧,田进寿,卢裕,等. 一种用于中微子探测的3-inch光电倍增管的优化设计[J]. *物理学报*, 2016, 65(22):228501.
- GUO L H, TIAN J SH, LU Y. Optimization of the 3-inch photomultiplier tube for the neutrino detection [J] *Acta Phys. Sin.* 2016, 65(22):228501. (in Chinese)
- [13] 党向瑜. 一种提高光电倍增器光电阴极量子效率的方法 [J]. *半导体光电*, 2018, 39(02):221-224.
- DANG X Y. A Method of Improving Quantum Efficiency of PMT's Photocathode [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2018, 039(002):221-224. (in Chinese)
- [14] 郭从良,孙全军,方容川,等. 光电倍增管的噪声分析和建模[J]. *光学技术*, 2003(5):636-640.
- GUO C L, SUN C J, FANG R CH, *et al.* Noise Analysis and Modeling of Photo-multiplier [J]. *Optical Technique*, 2003, (5):636-640. (in Chinese)
- [15] 叶莉华,汪海洋,王文轩,等. 基于光电倍增管的低噪声前置放大器的设计及其信号处理[J]. *电子器件*, 2013, 36(3):340-343.
- YE L H, WANG H Y, WANG W X, *et al.* Low-noise Preamplifier Based on PMT and Its Signal Processing [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2013, 36(3):340-343. (in Chinese)
- [16] 刘冬梅,张现乾,赵蓓蓓. 基于光电倍增管模块的探测系统增益-噪声最优化研究[J]. *光电子技术*, 2017, 37(2):94-98.
- LIU D M, ZHANG X Q, ZHAO B L Research on Gain-noise Optimization of Detection System

Based on Photomultiplier Tube Modules[J]. *Optoelectronic Technology*, 2017, 37 (2) : 94-98. (in Chinese)

[17] KAY, ART. *Operational Amplifier Noise: Techniques and Tips for Analyzing and Reducing Noise* [M]. Boston: Newnes, 2012.

作者简介:



李 乐(1985-),男,黑龙江哈尔滨人,博士,副研究员,分别于2007年、2012年在吉林大学获得学士、博士学位,主要从事微弱信号检测及紫外遥感技术的研究。E-mail: liyue@ciomp. ac. cn



汪龙祺(1978-),男,河南洛阳人,博士,研究员,2012年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事高分辨率成像技术与光学设计方面的研究。E-mail: lixuyang2004@126. com

通讯作者:



黄 焯(1979-),男,山西朔州人,博士,研究员,硕士生导师,FY-3卫星太阳辐照度光谱仪主任设计师,主要从事空间紫外遥感技术与辐射计量方面的研究。E-mail: ssshycn@yahoo. com. cn