

文章编号:1007-1180(2010)11-0090-05

# 星等能量检测系统设计

付有余<sup>1</sup>, 甘新基<sup>1,2</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. 北华大学, 吉林 吉林 132021)

**摘要:** 空间目标场景模拟器是在实验室环境下进行星等探测能力评价和定标的设备, 该系统的关键是对弱星等的标定要求很高, 最高检测星等为 16 等星。本文设计了基于光电倍增管的单光子计数器作为模拟星的能量检测设备, 给出了光电倍增管的选择方法及其分压器的设计原理, 最后通过实验验证了该单光子计数器的测量精度能够满足定标的要求。

**关键词:** 单光子; 定标; 模拟星等

中图分类号: TH724      文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20102711.0090

## Energy Detector Design of Simulated Star Magnitude

FU You-yu<sup>1</sup>, GAN Xin-ji<sup>1,2</sup>(1. *Changchun Insittute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*2. *Beihua University, Jilin 132021, China*)

**Abstract:** The Space target scene simulator (STSS) is the key device for evaluating and calibrating the ability of detecting star magnitude of optical detectors. In consideration of STSS needing to evaluate and calibrate 16<sup>m</sup> magnitude, a single photon counters based on photomultiplier is designed as a simulated star magnitude energy detector. The method for selecting photomultiplier and the design principle of potential divider are brought forward in this paper. Finally, It is proved that the simulated star magnitude energy detector has the enough ability to evaluate and calibrate the simulated magnitudes by an experiment, which is implemented to measure the accuracy of single photon counter.

**Keywords:** single photon, calibrate; simulated star magnitude

### 1 引言

空间目标场景模拟器是在实验室环境下进行星等探测能力评价和定标的设备。其特点是模拟器模拟的星等等级低，星等能量探测器的检测动态范围大；检测定标环境要求常温下暗计数极低<sup>[1-2]</sup>。本论文主要解决的问题是空间场景模拟器单光子检测定标系统的设计。

模拟星等能量的检测是空间目标可见光波段场景模拟器的关键技术。由于星等亮度低、动态范围大，所以必须在探测器的选择、低噪声电路的设计和屏蔽等方面加以考虑。本文分析了探测器的选择方法，讨论了关键的电路设计原理，最后通过实验验证了该系统的测量精度。

### 2 系统组成及工作原理

模拟星等能量检测器的结构原理如图 1 所示。它由光电倍增管模块、计数器模块、直流电源、调压器和计算机组成<sup>[3-4]</sup>。其中光电倍增管模块包含光电倍增管及其分压器、放大电路、阈值电路和整形电路等<sup>[5-6]</sup>，它们共同封装在一个屏蔽筒内，防止外部的电磁干扰。输出的信号是标准的 TTL 信号，经由计数器计数后通过 RS232 接口送入计算机。直流电源为计数器模块供电，同时也为光电倍增管的分压器提供分压。调压器用来控制光电倍增管的工作电压，以调整光电倍增管的增益系数，使输出信号得到最好的信噪比。

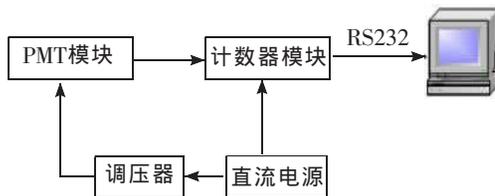


图1 模拟星等能量检测器的结构原理

### 3 模拟星标定装置的设计

#### 3.1 光电倍增管的光谱匹配选择

光谱匹配系数表征了各种光谱响应的光电阴极

对不同的辐射源的光谱利用率的高低，下面给出推导光谱匹配系数的过程<sup>[7-8]</sup>。

设光源辐射的平均功率为：

$$P = P_0 \int_0^{\infty} w(\lambda) d\lambda \tag{1}$$

其中， $P_0$ 是在相关光谱辐射特性  $w(\lambda)$  峰值时的每单位波长的入射功率， $w(\lambda)$  经过了归一化处理，即

$$w(\lambda) = \frac{w_{\lambda}}{w_m} \tag{2}$$

如果已知绝对光谱分布和绝对光谱响应，则入射光引起的光阴极电流为：

$$I_k = \sigma P_0 \int_0^{\infty} w(\lambda) R(\lambda) d\lambda \tag{3}$$

$\sigma$  是光阴极辐射灵敏度，单位 A/W； $R(\lambda)$  为相对光阴极光谱响应，它是关于波长的归一化函数，即

$$R(\lambda) = \frac{R_{\lambda}}{R_m} \tag{4}$$

联合 (3) 式和 (4) 式，得到光阴极电流为：

$$I_k = \sigma P \frac{\int_0^{\infty} w(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} w(\lambda) d\lambda} \tag{5}$$

将(5) 式中的无量纲积分的比值定义为匹配系数  $M$ ，即

$$M = \frac{\int_0^{\infty} w(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} w(\lambda) d\lambda} \tag{6}$$

$M$  是描述器件响应的波长范围与光源光谱的吻合程度的一个物理参数。 $M$  的取值介于 0~1 之间。 $M$  越大，表明匹配越好，探测的效果越好；反之， $M$  越小，匹配越差，探测的效果就越差。

如果入射到光电倍增管的光谱分布受到滤波器或其他光学设备的修正，匹配系数也必须相应地改正。如果滤波器或光学设备的透过率为  $f(\lambda)$ ，则匹配系数  $M$  为：

$$M = \frac{\int_0^{\infty} w(\lambda) R(\lambda) f(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} w(\lambda) f(\lambda) d\lambda} \tag{7}$$

当式 (5) 中的积分式用  $M$  代替时，光阴极电流为：

$$I_k = \sigma PM \quad (8)$$

注意上式中  $P = P_0 \int_0^{1200} w(\lambda) d\lambda$ 。

对光电倍增管的任何应用而言，拥有最大的光阴极电流的光谱响应是理想的。最大的光阴极电流对获得最大的信噪比至关重要。从 (8) 式中可以看到，当匹配系数  $M$  和峰值绝对光阴极灵敏度  $\sigma$  最大时，光阴极的电流最大。

然而，通常需要同时考虑匹配系数和绝对光阴极灵敏度。对于 S-20 和 S-25 两个光阴极材料，对色温为 2 856 K 的钨灯，其匹配系数分别为 0.112 和 0.227。显然，单从匹配系数来看，S-25 是 S-20 的 2 倍，但 S-25 的峰值绝对灵敏度为 43 mA/W，S-20 的峰值绝对灵敏度却是 64 mA/W，根据式计算得  $I_k(S-20) = 7.168 \times 10^{-3} P$ ， $I_k(S-25) = 9.761 \times 10^{-3} P$ ；计算表明，S-25 光阴极的响应电流仅比 S-20 高约 26.6%。再计算 S-4 在 2 856 K 时的响应电流为  $I_k(S-4) = 1.84 \times 10^{-3} P$ 。三者的响应电流关系为：

$$I_k(S4) : I_k(S20) : I_k(S25) = 1 : 3.9 : 5.3 \quad (9)$$

三者的信噪比关系为：

$$SNR(S4) : SNR(S20) : SNR(S25) = 1 : 2.6 : 1.06 \quad (10)$$

比较了三者的信噪比后可以很容易地看出，S-20 的性能最好。从以上分析来看，使用光谱匹配法可以定量、准确地选择光电倍增管。

### 3.2 光电倍增管分压器的设计

光电倍增管极间电压的分配一般由如图 2 所示的电阻链分压来完成的。

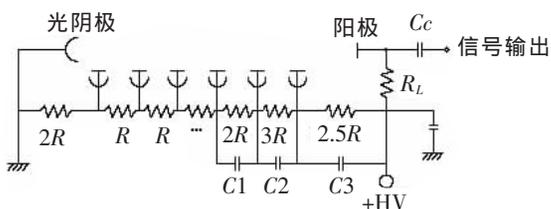


图 2 光电倍增管的分压器方式

确定分压器电流之后即可根据光电倍增管的最大阳极电压算出分压器的总电阻，再按照适当的极间电压分配，由总电阻求出各分压电阻的阻值。极间电压可以表达为：

$$V_j = \frac{E_{supply} r_j}{r_t} \quad (11)$$

式中  $r_t = \sum_{j=1}^{n+1} r_j$ 。

每一级的分压电阻可由分压器总电阻和特定的光电倍增管的电压比求得。根据分压比求得分压电阻为：

$$R_j = R_t \frac{r_j}{r_t} \quad (12)$$

其中， $R_j$  为  $D_{j-1}$  与  $D_j$  间的电阻。取各分压电阻  $R_1 = 600 \text{ k}\Omega$ ， $R_2 = R_3 = \dots = R_{11} = 300 \text{ k}\Omega$ 。则总分压电阻为：

$$r_t = \sum_{i=1}^{i=11} R_i = 600 + 10 \times 300 = 3.6 \text{ M}\Omega$$

光电倍增管的工作电压为  $V_{K-A} = 2000 \text{ V}$ ，则分压器电流约为 55.5 mA。

由于系统需要标定的最大光照度为零等星的照度，可根据这一照度计算阳极最大的输出电流值。对于零等星，大气外的光照度是  $L^0 = 2.54 \times 10^{-6} \text{ lx}$ ，考虑到大气衰减和模拟器光学系统的衰减，以及模拟器的光束输出口径（直径为  $\phi 400 \text{ mm}$ ），计算出场模拟积分球系统对应零等星照度时应输出的光通量约为  $6 \times 10^{-7} \text{ lm}$ 。而光电倍增管的阳极灵敏度为  $S_{anode} = 200 \text{ A/lm}$ ，因此，可以计算出对应零等星时阳极输出的最大电流约为 0.12 mA，此时分压器为最大阳极电流的 346 倍。因此，对于更低亮度的 6 星等，其阳极电流更低，只有  $0.4 \mu\text{A}$  大小，可以充分满足非线性输出的要求。

### 4 计数单元计数精度测试

计数单元的计数精度影响系统整体的计数率，要求其计数率的精度要比光电倍增管本身的线性度高才能不限制整个能量检测系统的精度。计数单元的作用是在光子计数系统中累计阈值电路输出的脉冲，并显示计数值和输出相应的数字量或模拟量。为了使系统有较大的动态范围，计数器必须具有高速计数率的性能。对于我们的计数要求，计数率应该满足 100 MHz，因此选择 Electirc Tubes 公司的计

数器模块 CT2。CT2 计数器的特点是标准 TTL 信号输入, 标准 5V 直流电压供电, 计数率达 100 MHz, 与微机串口连接, 方便数据采集。CT2 计数器外观如图 3 所示。



图 3 单光子计数单元

测量方法是<sup>[9]</sup>: 用脉冲发生器发出标准的 TTL 脉冲信号, 同时用经过标定的脉冲计数器和 CT2 进行测量, 经过对比计数结果即可确定 CT2 的线性度。脉冲信号发生器采用的是 PHILIPS8116A PULSE/FUNCTION GENERATOR, 频率计数器采用的是 PHILIPS PM6614 UNIVERSAL COUNTER。实验结果如图 4 所示。测量脉冲信号发生器 50 MHz 以下的周期信号时, 计数单元相对计数差值不大于 4/10 000, 因此具有很高的线性度。实验的计数结果如图 4 所示。从图 4 中可以看到, 名义计数率与实际测量计数率吻合得很好。通过实验数据计算, 计数误差不大于 2.01%。图 5 为光电倍增管的计数精度。

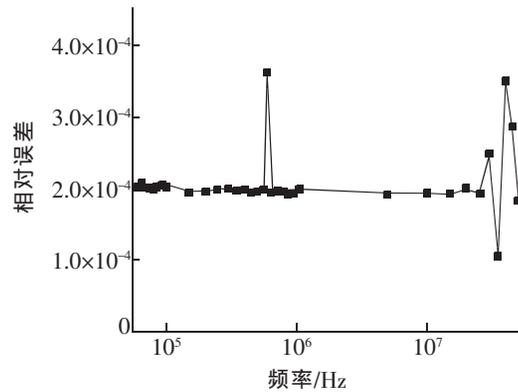


图4 CT2计数误差

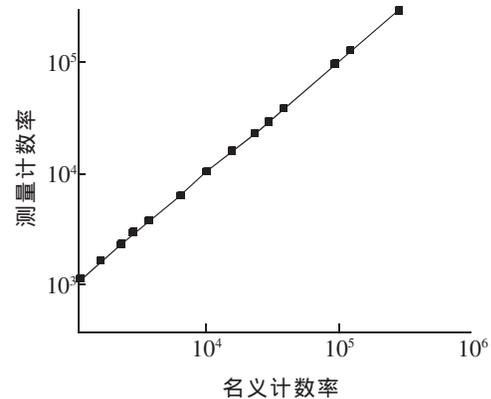


图 5 光电倍增管的计数精度

表 1 是采用该模拟星定标系统定标的实验值。由表中数据可以看出, 光子实测值与理论计数值非常吻合, 6 等星测量误差仅为 0.27%, 即使在 16 等星时误差也不超过 15%, 可以满足弱星等定标的工作。

表1 星等的光子计数实验值

星等	6 <sup>m</sup>	8 <sup>m</sup>	10 <sup>m</sup>	12 <sup>m</sup>	14 <sup>m</sup>	16 <sup>m</sup>
光子理论计数值 (S <sup>-1</sup> )	2.530 1×10 <sup>5</sup>	4.010×10 <sup>4</sup>	6.345×10 <sup>3</sup>	1.007×10 <sup>3</sup>	1.595 8×10 <sup>2</sup>	25.289 9
光子实测值 (S <sup>-1</sup> )	253 700	39 880	6 450	1 020	172	29

## 5 结 论

模拟星等能量的检测是空间目标可见光波段场景模拟器的关键技术, 该系统对弱星等的标定要求达

到 16 等星。本文设计了基于光电倍增管的单光子计数器作为模拟星的能量标定设备, 给出了光电倍增管的选择方法及其分压器的设计原理, 并通过实验验证了该单光子计数器的测量精度能够满足定标的要求。

## 参考文献

- [1] 张文明, 王效才, 马屹, 等. 星敏感器单星模拟光源系统[J]. 光电工程, 1998, 25(1): 74-78.
- [2] 宋小龙. 全轨道实时星模拟器[J]. 系统仿真学报, 1995, 448(22): 40-45.
- [3] 严福兴. 极微弱光电流测量电路的设计[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2006, 28(11): 114-121.
- [4] 郭培源, 付杨. 光电检测技术与应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [5] 王挺峰. 光子计数用倍增管的外围工作电路[J]. 光机电信息, 2009, 26(2): 39-44.
- [6] 王挺峰. 提高 PMT 光子计数系统探测灵敏度的方法[J]. 光机电信息, 2009, 26(3): 37-42.
- [7] Hamamatsu Co. *Photo Counting Using Photomultiplier Tube (Technical Information)* [M]. Hamamatsu Inc, 2001: 1-15.
- [8] Hamamatsu Co. *Photomultiplier Tubes Construction and Operating Characteristics Connections to External Circuits*[M]. Hamamatsu Inc, 2001: 6-12.
- [9] Gan X J, Guo J, Xu S Y. The calibration of faint simulation star magnitude based on single photon count technique[J]. *SPIE*, 2009, 738407: 1-11.

作者简介: 付有余 (1951-), 男, 汉族, 吉林长春人, 高级实验师, 主要从事光电对抗技术研究。E-mail: ganxinji@sina.com

## 美国科学家发明能产生电流人工树叶

据国外媒体报道, 近日, 美国北卡罗来纳州立大学的研究团队展示了一种神奇的水凝胶太阳能电池——人工树叶, 能够产生电流的人工树叶, 这一新型太阳能电池比硅电池更加环保和便宜。

研究人员利用植物中的叶绿素作为感光因子, 注入水凝胶制成的可弯曲电池中, 并外加碳材料, 如石墨或碳纳米管包裹的电极, 感光分子在太阳光照射下产生电流。研究人员之一北卡州大学的教授奥林表示, 尽管合成的感光分子可以用于太阳能电池, 但研究人员一直努力寻找更加绿色的方式利用太阳能。由于来自自然界的物体如叶绿素等含有水凝胶基质, 因此可以用于新型太阳能电池。

既然这一概念已经得到验证, 研究人员所要做的是使这种新型水凝胶电池更像真正的树叶。这一研究的下一步便是模拟植物的自我再生机理, 并提高新型电池的效率。奥林教授表示, 尽管现阶段该新型电池的效率仍很低, 还需要很长时间才能用于实际生活, 但这种利用自然界物体产生电流的理念在未来可能取代现有的晶体管技术。可以想象未来的屋顶上都覆盖着一片片人工树叶的太阳能电池的美好景象。

据悉, 这一研究项目是由美国空军研究工作实验室和美国能源部共同资助的, 同时韩国中央大学 (Chung-Ang University) 也参与了部分研究。