

空间目标场景模拟器的星等定标误差分析

甘新基^{1,2} 付有余² 郭 劲²

(¹北华大学, 吉林 吉林 132021
²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 标定模拟星等的大小以及标定精度是检验被标定的光测设备探测能力的关键。首先描述了空间目标场景模拟器的模拟星等定标原理, 基于普朗克黑体辐射定律推导了星等模拟的理论公式, 给出了在内场环境下模拟星等与照度以及光子数的关系模型, 并分析了影响模拟星等大小的主要因素。其次在分析了弱星等定标所存在的问题基础上, 提出了采用星等相对定标法对空间目标场景模拟器的星等进行定标的原理, 给出了相对定标的误差理论公式, 对影响模拟星等误差的因素进行了分析。实验结果表明, 空间目标场景模拟器的模拟星等定标能力达 12^m 星等, 定标精度在 ±0.2^m 以内。

关键词 空间目标; 星等定标; 误差分析; 场景模拟器

中图分类号 TH753 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200929s1.0211

Error Analysis of Star Magnitudes Scale of Space Target Scene Simulator

Gan Xinji^{1,2} Fu Youyu² Guo Jin²

(¹Beihua University, Jilin, Jilin 132021, China
²Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract Simulating star magnitude value and its precision is the key for inspecting the detectivity of calibrated optical measuring equipment. The principles of simulating magnitudes of space target scene simulator (STSS) are proposed at first. Based on Planck blackbody radiation law, the causal model of the simulated magnitudes and luminous flux, photon flux in the inner field is deduced, and the major factors that influence the magnitudes value are analyzed. A relative measuring method is used to scale the star magnitudes of STSS on the basis of considering the difficulties of scaling the dark star magnitudes. Afterward, all magnitude error factors, which will arise the simulate magnitude fluctuation, are pointed out. Finally, the theoretic formula of the simulating magnitudes precision error is worked out for the relative measuring method. Experimental results show that the scale ability of STSS achieves 12^m magnitudes, and magnitudes error is less than ±0.2^m.

Key words space target; star magnitudes scale; error analysis; scene simulator

1 引 言

空间目标场景模拟器(STSS)是在内场条件下开展空间目标监视与识别技术研究不可缺少的设备,用于模拟相对于地球无穷远处的空间目标,具有弱星等模拟、星光谱特性模拟、大气衰减模拟、大气湍流模拟和天空背景亮度模拟功能。目前,对星等

的模拟主要是用于星敏传感器标定和检测的单星模拟光源系统^[1],其星等模拟能力较低^[2,3],而空间目标场景模拟器的模拟星等达到 12 等星,因此在星等定标和定标误差方面带来较大的难度。现有的定标方法是通过对实际夜空中的星点进行星等敏感度测试进行标定的^[4],该方法的缺点是受实际天气状况的

基金项目: 中国科学院二期创新工程项目(KGCX2-SWJG-07-2)资助课题。

作者简介: 甘新基(1969—),男,博士,副教授,主要从事空间目标及其背景模拟研究技术和光电对抗技术等方面的研究。

E-mail: ganxinji@sina.com

影响,标定误差比较大。

本文通过对空间目标场景模拟系统光学系统中的研究,在基于星模拟原理的基础上对星等标定提出一种相对定标方法。这种星等相对定标法可以减少由于光学系统和检测标定系统中各种波动误差导致的标定误差。

2 空间目标场景模拟器的星模拟系统

空间目标场景模拟器的光学系统由星等调节、星等输出和检测标定分系统组成^[5]。星等调节系统采用 4 路碘钨灯(氙灯)光源,4 路带通滤光片调节模拟星的光谱;4 路变密度盘、4 路电子学调灯压机

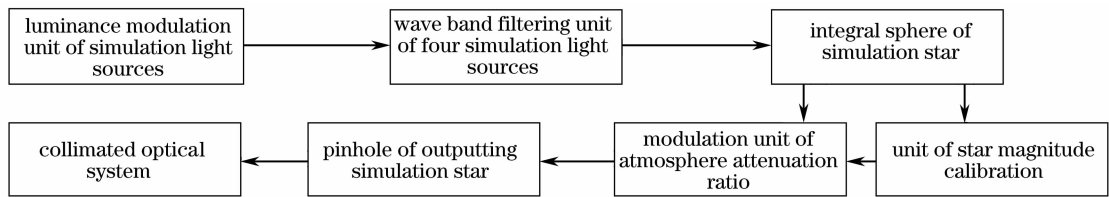


图 1 空间场景模拟系统组成原理框图

Fig. 1 System configure of the space target scene simulator

3 星等定标

3.1 星等模拟原理

星等模拟就是利用人造光源,经光学系统后使其能量及几何特性等于或接近该恒星。模拟系统采用输出稳定、光谱连续,且可再现黑体辐射的卤钨灯作为模拟星体的光源。卤钨灯光源共四路,分别模拟星的 B、V、R、I 4 个波段。通过带通滤光片控制光源的输出波段。由光源及亮度调节装置,产生亮度信号。B、V、R、I 4 个波段星光经积分球混光产生零等星光光源模拟系统。由针孔和准直物镜组成平行光光学系统,模拟无穷远恒星。用中性衰减片组、变密度盘、可调节电光源组合衰减的方法,改变输出星光的等级,并由星光亮度检测系统实时检测监视星光等级。本系统需要模拟 6^m~12^m 等星,共计 7 个星等,模拟过程中将以 0 等星亮度为基准,通过采用多个 2.512 倍衰减片的组合衰减模拟各等恒星的能量特性。

恒星的有效温度取为单位面积的辐射功率与恒星表面单位面积的辐射功率相等的黑体所具有的温度。根据普朗克定律,黑体的辐射能谱的描述为:

$$M_B(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 \{\exp[hc/(\lambda kT)] - 1\}}, \quad (1)$$

式中 $M_B(\lambda, T)$ 为波长 λ 处的黑体光谱辐射出射度,单位为 $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$, c 为光速, h 为普朗克常量, k 为波尔兹曼常量, T 为黑体的绝对温度。在不同

构用来微调星光通量,星等衰减片用来粗调输出星等大小。星等输出系统由 4 路星光光源及亮度微调装置、4 路星光亮度调节装置、星等调节装置、光积分器、积分球输出镜、可调针孔或十字分划板、准直物镜组成。星等输出系统采用折返式平行光管结构,由积分球产生的均匀光通过积分球输出镜照射在可调针孔上,针孔放置在主镜焦面位置,模拟星体的无穷远可见光,并可通过调节针孔的形状可使模拟的空间目标具有多形状的输出。星等检测标定系统由光谱检测单色仪、超低照度计、单光子计数器、亮度计以及主控计算机组成。空间目标场景模拟系统框图如图 1 所示。

温度下黑体具有不同的光谱特性分布曲线。

系统根据星光光谱将 400~900 nm 的光谱范围分成 4 个谱段(B, V, R, I),利用光积分器完成对这 4 个波段的光曲线积分。设 B, V, R, I 波段光源的色温分别是 T_B, T_V, T_R, T_I , 光源的光谱函数分别为 $M_B(T_B, \lambda), M_V(T_V, \lambda), M_R(T_R, \lambda), M_I(T_I, \lambda)$, 则输出的模拟星的光谱为

$$M_S(\lambda) = M_B(T_B, \lambda)\tau_B(\lambda) + M_V(T_V, \lambda)\tau_V(\lambda) + M_R(T_R, \lambda)\tau_R(\lambda) + M_I(T_I, \lambda)\tau_I(\lambda), \quad (2)$$

式中 $\tau_B(\lambda), \tau_V(\lambda), \tau_R(\lambda)$ 和 $\tau_I(\lambda)$ 分别为 B, V, R, I 波段的带通滤光片的透射率函数。选择不同的光源和不同的带通滤光片就可输出不同的模拟星等光谱。

3.2 星等的标定

星等标定可通过对模拟星等的照度检测直接标定出来。恒星的视亮度一般用视星等来表示。以在地球大气层外所接收到的星照度来衡量,零等星的照度为 2.54×10^{-6} lux,相邻两星等的照度比是 2.512 倍。若有一颗 m 等星和一颗 n 等星,两颗星的照度比为

$$E_m/E_n = (2.512)^{n-m}, \quad (3)$$

以零等星为标准,则 m 等星的照度为

$$E_m = 2.54 \times 10^{-6} / 2.512^m. \quad (4)$$

直接采用微光照度计测量场景模拟器输出的星等照度的方法称为绝对定标法,这种方法能够测量

的模拟星等大小取决于微光照度计的最小检测照度。目前照度计的最小检测照度为 1.0×10^{-8} lux, 它相当于大气外 6 等星的照度值, 因此绝对测量方法适合测量星等照度不小于 1.0×10^{-8} lux 的星等, 即不超过 6 等星。对于大于 6 等星的标定, 则无法采用绝对定标的方法, 此时采用星等的相对测量法进行测量。

星等相对测量法就是用星等照度与星等大小的关系确定一个标定星等, 根据每相差一等星亮度其照度值相差 2.512 倍的关系, 依次采用 2.512^n 固定倍率衰减片对标定星等衰减得到各个更低的星等

值, 再采用单光子计数器检测到的光子计数率结果判定模拟星等大小的方法, 即是模拟星等的相对测量法, 装置示意图如图 2 所示。该系统采用光纤输入方式将 4 路光源输入到混光积分球中, 通过积分球的主光路输出孔将模拟星光能量和光谱等特性输入到主光路中, 最后由准直光学系统输出。在积分球上有一光子流量检测孔, 可用单光子计数器检测由积分球输出的模拟星等的光子流量。当用微光照度计检测模拟星等的照度时, 可同时检测积分球光子流量, 就建立了模拟星等照度与光子流量的一一对应关系。

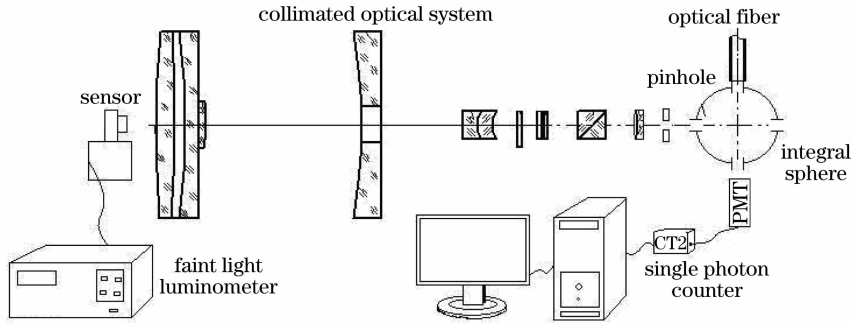


图 2 星等相对定标检测装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of detection system of star magnitude relative calibration

设模拟星的星等大小为 m , 其照度为 E_0 , 假设在黑体辐射的情况下, 表面辐射热星等为 m 的光子流量为

$$f_m(\lambda) = \frac{8.48 \times 10^{34} \times 10^{-0.4b}}{2.512^m T_e^4 \lambda^4 [\exp(1.44 \times 10^8 / \lambda T_e) - 1]}, \quad (5)$$

式中波长 λ 的单位为 10^{-10} m, T_e 为有效温度, $f_m(\lambda)$ 的单位为 $10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, b 为测辐射热改正系数。在照度 E_0 (或 m 星等) 下对应的光子流量为

$$Q_0 = \int f_m(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

设光学系统的透射率为 τ_s , 积分球主光路输出孔径和检测孔孔径分别为 d_1 和 d_2 , 则检测孔输出的光子流量为

$$Q_j = \frac{d_2^2}{d_1^2 \tau_s} Q_0, \quad (7)$$

则检测孔输出的光子流量与模拟星等的大小或者模拟星的照度大小存在一一的对应关系。

4 误差分析

由于场景模拟器结构复杂, 系统存在很多对星等标定造成干扰的因素, 对标定精度造成较大的影响。影响星等波动误差因素主要有模拟系统光源的

电源变化均方根误差 σ_1 、光源氙灯辐射通亮波动的均方根误差 σ_2 、光测试仪器亮度波动的均方根误差 σ_3 、准直光学系统光学元件、衰减片组及变密度盘透射率测量误差均方根误差 σ_4 , 综合以上各项误差, 则总误差均方差为

$$\sigma = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2)^{1/2}. \quad (8)$$

根据三倍标准差原理, 测量的照度波动误差为 $\Delta E_{\max} = 3\sigma$, 由于

$$\frac{E_m + \Delta E_{\max}}{E_m} = 2.512^{\Delta m}, \quad (9)$$

因此测量的星等波动误差为

$$\Delta m = \frac{\lg(1 + \Delta E_{\max})}{\lg 2.512} = \frac{\lg[1 + 3(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2)]}{\lg 2.512}, \quad (10)$$

当采用单光子计数器进行相对定标时, m 星等的波动误差为

$$\Delta M_a^M = \left| \frac{\lg(1 + 3\sigma_m / \bar{Q}_s^m)}{\lg 2.512} \right|, \quad (11)$$

式中 σ_m 为单光子计数器的光子计数标准差, \bar{Q}_s^m 是扣除暗计数后的光子计数平均值。同时, m 星等均值偏差为

$$\Delta M_\beta^m = \frac{\lg[1 + (\bar{Q}_s^m - Q_B^m)/Q_B^m]}{\lg 2.512}, \quad (12)$$

式中 Q_B^m 是标定星等确定的 m 等星的标准光子计数值。

5 实 验

为了确定相对误差法标定星等时的星等误差, 本文以图 2 所示的装置进行了实验, 实验在暗室环境下进行。实验采用最低检测照度为 1.0×10^{-8} lux 的微光照度计 Photo u2000 先标定一个 2 等星的照度值, 2 等星照度为 0.4×10^{-6} lux, 同时用单光子计数器测量该星等对应的光子计数值。在输出光路中加固定倍率衰减片, 衰减片衰减率为 2.512 的整数倍率, 即 $1/2.512^n$, 将星等照度衰减到 6 等星的照度; 用单光子计数器在积分球检测孔测量 6 等星的光子数; 依次加固定倍率衰减片, 测量 6~12 等星的光子数; 将各星等对应的光子计数值减去暗计数值, 得到真实的单光子计数; 通过比较实际各星等光子计数与标准光子计数可得到各模拟星等的实际值。

图 3 可以看到, 模拟星等越低光子流量越小, 由于单光子计数器暗计数影响的信噪比降低导致了模拟星等偏差随模拟星等的增大而增大。从图 4 可以看到, 模拟星等的波动误差也随着模拟星等的增大而增大, 因此模拟星等越大, 要求模拟系统的制造和装配精度以及标定仪器的检测精度越高。

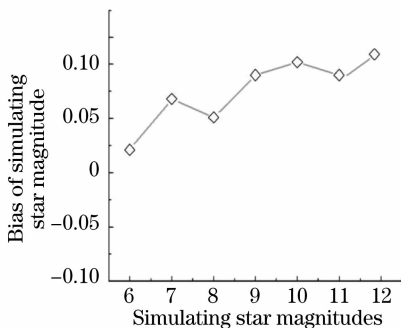


图 3 模拟星等的星等偏差

Fig. 3 Bias of simulating star magnitudes

从最后得到实际的模拟星等为

$$m_s = (m - \Delta M_\beta^m) \pm \Delta M_\alpha^m, \quad (13)$$

具体数据如表 1 所示, 可见空间目标场景模拟器的模拟星等定标能力达 12^m 星等, 定标精度在 $\pm 0.2^m$

以内。

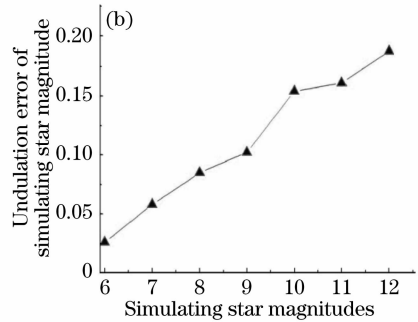


图 4 模拟星等的星等波动误差

Fig. 4 Fluctuation error of simulating star magnitudes

表 1 实际模拟得到的星等值

Table 1 Efficient simulation magnitudes

Simulated target magnitudes	Efficient simulation magnitudes
6 ^m	5.979 ^m ± 0.026 ^m
7 ^m	6.932 ^m ± 0.058 ^m
8 ^m	7.949 ^m ± 0.085 ^m
9 ^m	8.910 ^m ± 0.102 ^m
10 ^m	9.898 ^m ± 0.154 ^m
11 ^m	10.91 ^m ± 0.161 ^m
12 ^m	11.89 ^m ± 0.188 ^m

6 结 论

针对空间目标场景模拟器中的模拟星等定标问题提出了星等定标的方法, 分析了星等定标产生的星等误差, 提出了星等的相对测量法。实验结果表明, 采用相对测量法进行星等定标可以减少星等定标的偏差, 提高定标精度。由星等误差分析可知, 如果要进一步提高定标精度, 减小星等检测时的波动误差, 需减小模拟系统各部分的波动误差。另外单光子计数器的暗计数大小及其稳定性也严重影响模拟星等的标定精度。

参 考 文 献

- Zhang Wenming, Wang Xiaocai, Ma Yi *et al.*. Light source system for simulating single star used in calibration of star sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, **25**(12): 56~78
张文明, 王效才, 马屹等. 星敏传感器单星模拟光源系统[J]. *光电工程*, 1998, **25**(12): 56~78
- J. M. Kennel, S. A. Havstad, D. D. Hood. Star sensor simulation for astroinertial guidance and navigation[C]. *SPIE*, 1992, **1694**: 74~84
- Stephen E. Kendrick, Jennifer Turner-Valle, Dennis Ebbets *et al.*. Optical coronagraph testbed requirements and design for exoplanet and star simulation[C]. *SPIE*, 2004, **5487**: 1346~1357

- 4 Dong Ying, Xing Fei, You Zheng. APS star sensor performance assessment through real-sky observation experiments[C]. *SPIE*, 2005, **5638**: 541~550
- 5 Gan Xinji. The Research of the Simulation Star Energy Measure and Calibration Technique of Space-Target Scene Simulator in Visible wavelength Band [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2007. 9~10
- 甘新基. 空间目标可见场景模拟器星等能量检测与定标研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2007. 9~10
- 6 Martin V. Zombeck. Hand Book of Space Astronomy and Astrophysics[M]. 2nd edition, London: Cambridge University Press, 1990. 103~104