

地基光度测量方式对比

李冬宁^{1,2*}, 王成龙¹, 王丽秋¹, 郭同健¹

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:介绍了地基测量空间目标光度的两种方式。首先介绍了系统组成及对比测量原理,然后基于工程角度分析提出了宽谱段测量和滤光片测量两种方式,并给出了两种测量方式的误差分析。若G型恒星及空间目标在同一视场可选择宽谱段测量方式,若途经天区G型定标星较少,可以选择滤光片测量方式。外场实验验证表明,宽谱段测量方式信噪比较高,可探测的极限星等为16等星,在天气条件较好的情况下测量精度在0.15星等左右,而滤光片测量方式由于探测到的能量较少,在相同信噪比下可探测极限星等为14等星,天气变化较小条件下测量精度在0.02星等左右,两种测量方式误差相当,但宽谱段测量方式定标恒星数量增加2.4倍,便于数据处理与计算。

关键词:光度测量;地基测量;CCD相机;空间目标

中图分类号:V556 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20150803.0456

Comparison of ground-based photometric measurement ways

LI Dong-ning^{1,2*}, WANG Cheng-long¹, WANG Li-qiu¹, GUO Tong-jian¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

** Corresponding author, E-mail: ldn_email@163.com*

Abstract: In order to realize photometric measurement, two types of measurement way are established. First, the system composition and the contrast measurement principle are introduced, and then wide spectrum measurement way and filter measurement way based on the analysis of engineering are proposed. If G-type stars and space target in the same field of view, the wide spectrum measurement way can be chosen; if G-type reference stars is less, filter measurement way can be chosen; measuring error analysis for these two ways is given. Finally experimental results indicate that the wide spectrum measurement way has high signal noise ratio(SNR); the limiting magnitude is 16 m, and the measurement precision can reach 0.15 magnitude under better weather condition; under the same SNR condition, due to the less energy detected by filter measurement way, limit magnitude is 14 m; under the condition of small weather changes, measurement precision can reach 0.02 magnitude. Two types of measurement errors are almost the same, but the number of stars calibrated by the wide spectrum measurement way increases by 2.4 times, which is advantageous for the data processing and calculation.

Key words: photometric; ground-based; CCD; space targets

收稿日期:2014-12-19;修订日期:2015-02-16

基金项目:吉林省自然科学基金资助项目(No. 201115124)

1 引言

伴随着人类在航空航天领域技术的不断发展,以及对空间资源的持续开发,空间目标尤其是人造空间目标的数量也逐年递增。对这些目标的观测、监管与识别一直是研究的重点方向^[1]。雷达和光测设备承担着监控与识别的大部分任务,相关技术日趋成熟与完善。近年来越来越多的研究人员对中高轨目标的状态信息颇感兴趣,地基光度测量设备不仅可以获取中高轨目标的时间与位置信息^[2],也可以获取可见光亮度、偏振特性和辐射光谱等信息^[3],它弥补了雷达对轨道高度的限制,拥有比空基测量设备设计周期短、投资成本低、处理带宽不受限的优点。随着地基设备跟踪技术的发展以及大口径光学系统的技术进步^[4-5],利用地基光电设备对空间目标的状态进行辅助判断成为主要手段。

由于该领域的研究有着重要的研究意义与应用价值,中、美、俄等航天大国已经开展了相关项目的研究计划。其中比较著名的有 MIT(美国麻省理工学院)承担的重大项目 GEODSS(地基光电深空空间监视系统)、SBV(天基可视计划)、AEOS(美国毛伊高级光电系统)等项目,主要研究空间目标的探测、跟踪、包括光度识别。其中 GEODSS 能够探测 5 600 ~ 40 000 km 的空间目标,白天观测能力达到 8m_v,夜晚观测能力达到 16.5m_v。一些国际学术交流会议,如 AMOS^[6],已经将中高轨空间目标光度测量研究列为主要研究内容之一,为该领域的开发研究学者提供了更多的交流平台。如 Sanchez^[7]等利用光变曲线的数据反映目标的状态信息及姿态控制方式等。Beavers^[8]等建立了盒状卫星模型并以美国东岸的七颗通讯卫星为样本,并匹配了观测数据,证实了其光变曲线具有规律性。目前我国对空间目标的观测与监视活动主要集中于中低轨道上的已知轨迹目标,中高轨目标的探测与监视还在起步阶段。承担主要观测任务的设备包括国家天文台的空间碎片望远镜以及长春光学精密机械与物理研究所(长春光机所)和成都光电技术研究所的光电观测设备。

其中空间碎片望远镜均未配有颜色滤光片,无法给出明确的星等信息,平一鼎对未安有滤光片的系统进行了光度测量研究,星等精度优于 0.5 等。长春光机所某型号的 1 m 口径望远镜,焦距 2 m,并配备了光谱滤光片,可进行更高精度的光度测量,本文是基于该设备进行的相应研究工作。

光度测量在天文学领域已经有了较成熟的应用技术,但在靶场尤其是外场对空间目标进行光度测量还在起步阶段,利用光变曲线的特性可判定卫星的生存状态是否受控。随着 EMCCD 器件的广泛应用,地基光电设备探测能力扩大到了白天^[9],并便于数据的实时获取与处理。在跟踪测量过程中,由于大气密度、大气透过率的不确定性、天空背景变化以及瞬时天气变化都会影响设备的测量精度^[10-11],要求测量系统有着精确的流量定标^[12-15]。本文从系统组成及测量原理出发,提出了两种可行性方案。

2 系统组成及其工作原理

2.1 光度测量系统组成

系统由光学成像系统、跟踪控制系统、图像采集与处理系统等部分组成,光学系统的前组结构采用了经典的牛顿式结构型式,主镜为球面,次镜组校正像差,使一次像面轴上点成完善像。图像由科学级 EMCCD 获取,探测器前装有中性滤光片和 B、V 颜色滤光片,探测到的图像由图像采集与处理系统进行采集保存,最后获取的数据经由专门的数据处理软件处理,得到供理论分析的资

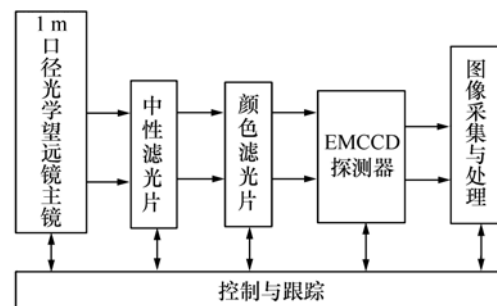


图1 光度测量系统原理图

Fig. 1 Block diagram of photometric system

料。跟踪控制系统对全程测量进行控制与协调,其系统组成如图1所示。

光度测量需要恒星定标与对比测量,所以要求目标与定标星能够处于同一视场,光学系统畸变限制在一个像素之内,系统非均匀性 < 2%,并对杂散光进行抑制,所以系统具体参数设计如表1所示。

表1 光学系统参数表

Tab.1 Parameter list of optical system

入瞳直径	φ1 000 mm
焦距	2 000 mm
相对孔径	1:2
光谱波段	460 ~ 750 nm
视场	0.235° × 0.235°
像元分辨率	1.65"

2.2 光度测量系统的工作原理

卫星等空间目标一般不发光,主要靠反射太阳光进行测量。根据光谱型分类,太阳为G型光谱型恒星,所以测量波段主要集中在500 ~ 700 nm。这一辐射流还需经过望远镜的光学系统和滤光片(有限波段),最后才被探测器接收并产生响应。那么目标星等计算表达式为:

$$m = -2.5 \lg \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda} P_{\lambda}(z) F_{0\lambda} d_{\lambda} + a, \quad (1)$$

式中: λ_1, λ_2 为波长范围, Φ_{λ} 为响应函数, $P_{\lambda}(z)$ 是天顶距为 z 的方向上的单色大气透过系数, $F_{0\lambda}$ 为卫星在地球大气外的单色辐射流, a 为观测星等的零点常数。

从式(1)可以看出,所获得的观测星等将和大气的消光情况以及测量系统的响应函数密切相关。由于目标受到的消光随时随地在变,所以观测星等值很难得到绝对量。若待测目标与已知恒星出现在同一视场中,通过与已知星等的恒星比较,可以得到反射太阳光的卫星等空间目标的星等。用式(2)来表示星等和照度的关系:

$$m_B = m_A + 2.5 \lg(E_A/E_B). \quad (2)$$

式中: m_A 和 m_B 分别表示恒星和卫星等空间目标的星等, E_A 和 E_B 分别表示恒星和卫星等空间目标的照度。

在光学系统口径和积分时间不变的情况下,

目标图像的灰度与照度成线性关系。利用此线性关系,由图像灰度 DN 可计算出卫星等空间目标星等,灰度表示的星等计算式也称为较差法,用式(3)表示:

$$m_B = m_A + 2.5 \lg(DN_A/DN_B). \quad (3)$$

利用光度测量系统在相近的太阳高角、观测仰角条件、大气背景下拍摄卫星等空间目标图像与恒星图像,由卫星等空间目标灰度值、恒星的灰度值和恒星的已知星等来计算卫星等空间目标的星等。

3 测量方式

由于 CCD 探测器响应波段较宽,而太阳色温约为 5 700K,光谱型属于 G 型恒星^[16],选择 G 型恒星为参考星可使测量误差最小。那么当视场中同时出现卫星和 G 型恒星时,因为同视场且光学系统视场较小,可较好地消除大气的影得到较高的测量精度。当视场中无 G 型恒星出现时,可采用其它恒星为参考,定标恒星类型扩大,更利于大气的修正。

根据工程实际,提出宽谱段测量和滤光片测量两种方式,为了实现这两种测量方式,设计了一组滤光片转轮系统,如图2所示,在滤光片转轮上装有全通滤光片和颜色滤光片,放置于探测器与调焦系统之间,通过滤光片转轮控制机构实现滤光片的切换,每次切换使得光学系统、滤光片、CCD 探测器同轴。

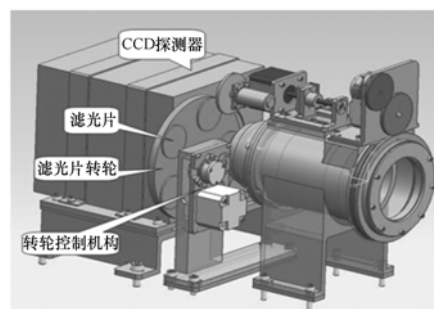


图2 转轮系统结构图

Fig.2 Structure of rotate system

3.1 宽谱段测量方式

卫星等空间目标反射太阳光,经过大气衰减,

进入 1 m 口径望远镜主镜,图像由科学级 EMCCD 获取,经由图像记录设备的采集保存,数据经光度数据处理软件计算分析,得到目标星等值。所谓宽谱段测量是指可见光谱段 460 ~ 750 nm 的光能量经过光学系统全部被探测器接收,以 G 星为参考,不加颜色滤光片的测量方式。宽谱段测量方式接收能量多使信噪比增大,提高测量精度。通过设置滤光片转轮位置,选择全通滤光片档位即可实现宽谱段测量。天文上星等小于 12 等星的恒星为 373 万颗, G 型恒星占 16%, 约 597×10^3 颗,测光系统视场为 $12' \times 12'$, 每帧图像平均有 0.18 颗 G 星。在同一视场利用较差法的定标恒星数量较少,所以宽谱段测量方式适合在测量运动较慢的卫星或对仪器测量精度进行标定时使用。

3.2 滤光片测量方式

滤光片测量方式是在系统中加入光谱滤光片,进行光谱修正,使测光系统光谱响应与人眼可见函数相一致,以其他光谱型恒星为参考的测量方式。通过设置滤光片转轮,可选择 B 波段或 V 波段进行测量。将系统中加入光谱滤光片后,进入到探测器的光能量会由于滤光片的作用有所削弱, CCD 探测器量子效率曲线见图 3, 滤光片光谱透过率曲线见图 4, 加上光学系统的透过率可以得到图 5 的系统光谱响应曲线。从图 5 可以看出系统的光谱响应范围明显减小,接收的光能量也就减少,探测的极限星等也就越低。

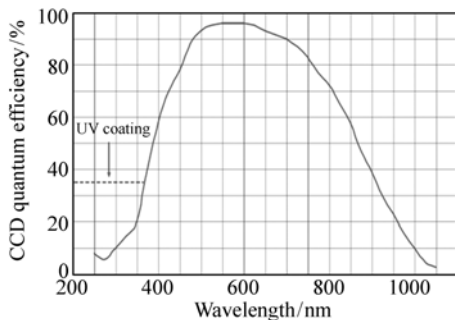


图 3 EMCCD 量子效率曲线

Fig. 3 Curve of EMCCD quantum efficiency

为了减小大气对测量精度的影响,滤光片测量方式采取处理方法和宽谱段测量方式相同的较差法测量。宽谱段测量方式只能使用 G 型恒星,

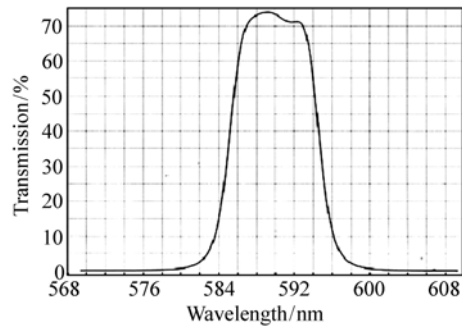


图 4 滤光片光谱透过率曲线

Fig. 4 Spectrum transmittance of optical filter

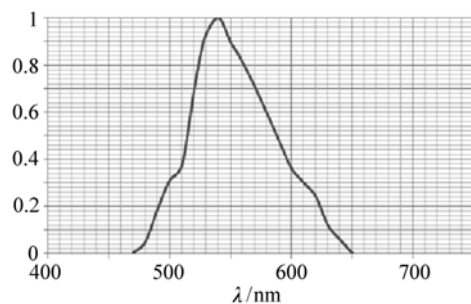


图 5 系统光谱透过率曲线

Fig. 5 Spectrum transmittance of photometric system

而滤光片测量方式不受这个限制可采用所有恒星。只要知道恒星星表中 V 星等标准值即可。星等小于 12 星等的恒星为 373 万颗,测光系统视场为 $12' \times 12'$, 每帧图像平均有 0.44 颗恒星,是宽谱段定标星的 2.4 倍,大大增加了定标恒星的数目。

4 测量误差分析

光度测量系统误差源主要有:测量系统的不均匀性、中性滤光片透过率测量误差、杂散光、探测器暗噪声、天空背景噪声、系统的信噪比等。

天空背景噪声可通过目标和背景不同像元之间的差分消除;在每次测量任务前,对探测器暗噪声进行测量,予以扣除。测量系统的不均匀性标定后为 σ_1 ;中性滤光片透过率测量误差为 σ_2 ;测量系统信噪比优于 20:1,其测量误差为 σ_3 ;若标准大气条件下,高角 45° 时大气影响估算 σ_4 ,宽谱段测量方式不同光谱型恒星带来测量误差为 σ_5 ,

滤光片测量方式系统光谱响应与人眼视见函数差别误差为 σ_6 。

宽谱段测量方式测量误差为：

$$\sigma_w = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_5^2} = 11.1\% . \quad (8)$$

滤光片测量方式测量误差为：

$$\sigma_L = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_6^2} = 10.7\% . \quad (9)$$

对式(3)两边微分可得到测量星等误差为：

$$dm_B = 2.5 [(dDN_A/DN_A) - (dDN_B/DN_B)] \times lge . \quad (10)$$

用均方差表示：

$$\sigma m_B = 1.09 \times \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2} , \quad (11)$$

式中： σm_B 为卫星星等误差， σ_A 为标准恒星测量误差， σ_B 为卫星测量误差。

用 σ_w 代替 σ_A 和 σ_B ， σ_L 代替 σ_A 和 σ_B 可分别得到用宽谱段和滤光片方式的星等误差为 0.17 和 0.16，二者精度相当。影响星等误差主要是系统的信噪比和大气，通过提高信噪比和选择

较好天气，星等误差可以优于 0.1 个星等。

5 实验验证

宽谱段测量方式实验利用寻星专用软件挑选视场内有两颗 G 型恒星同时出现的情况下进行拍摄，经过图像转换，保存为 BMP 格式，再利用专用的图像处理软件对图片进行灰度值提取，采用同一视场的两颗定标恒星进行互相标定的方式进行验证，试验中选取 20 组不同亮暗程度的 G 型恒星，EMCCD 工作频率 1Hz，每组拍摄两分钟图像进行存储，从而忽略大气对测量的影响，对分割的 120 幅 BMP 图像中的星象进行测量，得到标准值与测量值的差值，并求取平均值，表 2 为所选择的 20 组星象的星等信息，图 6 为视星等的测量精度的检验结果。计算 20 组数据的平均精度为 0.150 12，标准差为 0.008 635。

表 2 视星等信息表

Tab.2 Information of visual magnitude

组数	A 星星等(m_v)	B 星星等(m_v)	组数	A 星星等(m_v)	B 星星等(m_v)
1	7.954	8.356	11	13.542	14.263
2	8.242	9.461	12	8.025	14.254
3	9.535	10.658	13	9.245	13.586
4	10.352	10.694	14	10.569	12.584
5	8.623	10.582	15	13.558	15.120
6	10.210	11.581	16	12.532	14.251
7	9.515	11.657	17	8.654	12.562
8	10.624	12.025	18	9.152	12.985
9	8.157	13.854	19	7.613	10.251
10	9.546	14.685	20	7.412	7.689

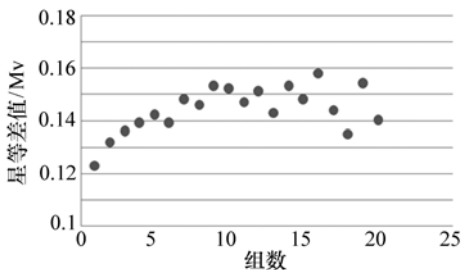


图 6 20 组数据视星等精度检验图

Fig.6 Twenty group accuracy test of visual magnitude

设置相应滤光片，采用同一视场的两颗定标恒星进行互相标定的方式进行验证，测量过程同宽谱段测量方式，表 3 为所选择的 20 组星象的星等信息，图 7 为 V 波段的测量精度的检验结果，平均精度为 0.020 2，标准差为 0.003 526。表 4 为所选择的 20 组星象的星等信息，图 8 为 B 波段的测量精度的检验结果，平均精度为 0.020 4，标准差为 0.003 676。

表3 V波段星等信息表

Tab.3 Information of V band magnitude

组数	A 星星等(m_v)	B 星星等(m_v)	组数	A 星星等(m_v)	B 星星等(m_v)
1	5.452	6.436	11	6.964	8.684
2	6.287	7.156	12	7.651	9.643
3	7.168	8.362	13	8.493	10.682
4	8.265	9.653	14	9.675	13.952
5	9.715	10.652	15	10.685	12.885
6	10.584	11.255	16	11.895	13.984
7	11.740	12.331	17	6.981	12.258
8	12.912	13.587	18	8.151	11.741
9	5.154	7.692	19	5.562	12.412
10	5.522	8.716	20	6.126	11.416

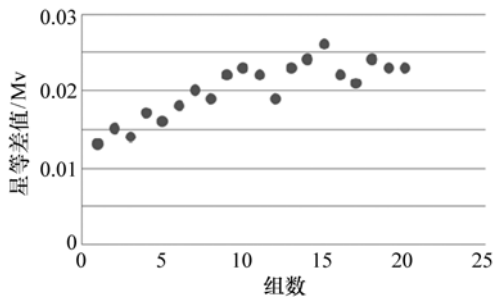


图7 20组数据V波段星等精度检验图

Fig.7 Twenty group accuracy test of V band magnitude

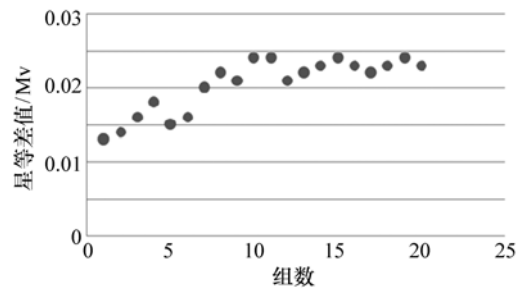


图8 20组数据B波段星等精度检验图

Fig.8 Twenty group accuracy test of B band magnitude

表4 B波段星等信息表

Tab.4 Information of B band magnitude

组数	A 星星等(m_v)	B 星星等(m_v)	组数	A 星星等(m_v)	B 星星等(m_v)
1	5.561	6.647	11	6.985	8.445
2	6.768	7.383	12	7.741	9.027
3	7.454	8.952	13	8.524	10.813
4	8.223	9.453	14	9.145	13.742
5	9.065	10.461	15	10.134	12.463
6	10.412	11.592	16	11.832	13.515
7	11.798	12.524	17	6.053	12.322
8	12.446	13.545	18	8.056	11.645
9	5.035	7.512	19	5.653	12.822
10	5.025	8.154	20	6.731	11.943

6 结论

本文借鉴传统天文学测量恒星星等的方

法^[17],滤光片测量方式同宽谱段测量方式相比,接收能量少,但可使探测极限星等下降,约下降1.2星等。滤光片测量方式更利于实时消除大气影响。在相同信噪比条件下,测光精度要高于宽

谱段测量方式。

经外场实验验证两种测量方式定量比较,宽谱段测量方式信噪比较高,可探测的极限星等为16等星,在天气条件较好的情况下测量精度可达0.15星等左右,而滤光片测量方式由于探测到的

能量较少,在相同信噪比下可探测极限星等为14等星,天气变化较小条件下V波段与B波段测量精度可达0.02星等左右,两种测量方式误差相当,但宽谱段测量方式定标恒星数量增加2.4倍,便于数据处理与计算。

参考文献:

- [1] 高昕,王建立,周泗忠,等.空间目标光度特性测量方法研究[J].光电工程,2007,34(3):42-45.
GAO X, WANG J L, ZHOU S ZH, *et al.*. Photometric characteristic measurement of space target[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(3):42-45. (in Chinese)
- [2] 唐轶峻,姜晓军,魏建彦,等.高轨空间碎片光电观测技术综述[J].宇航学报,2008,29(4):1094-1098.
TANG Y J, JIANG X J, WEI J Y, *et al.*. Review of optical observations of high apogee space debris[J]. *J. Astronautics*, 2008, 29(4):1094-1098. (in Chinese)
- [3] 李雅男,孙晓兵,毛永娜,等.空间目标光谱偏振特性[J].红外与激光工程,2012,41(1):205-210.
LI Y N, SUN X B, MAO Y N, *et al.*. Spectral polarization characteristic of space target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1):205-210. (in Chinese)
- [4] 伞小刚,孙宁,卓仁善,等.大口径光电经纬仪主反射镜支撑结构设计[J].光学精密工程,2013,21(12):3111-3117.
SAN X G, SUN N, ZHUO R SH, *et al.*. Design of supporting structure for primary mirror of large aperture theodolite[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12):3111-3117. (in Chinese)
- [5] 高文,朱明,贺柏根,等.目标跟踪技术综述[J].中国光学,2014,7(3):365-375.
GAO W, ZHU M, HE B G, *et al.*. Overview of target tracking technology[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3):365-375. (in Chinese)
- [6] HALL D. AMOS Galaxy 15 Satellite Observations and Analysis[C]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Maui, USA: AMOS, 2011:94-101
- [7] SANCHEZ D J, GREGORY S A. Photometric measurements of deep space satellites[J]. *SPIE*, 2000, 4091:164-182.
- [8] BEAVERS W I, SWEZEY L W. Photopolarimetric object characterization and size measurement, final report[C]. Proceedings of the 1995 Space Surveillance Workshop, Lexington, USA: PSSW, 1995:5-6.
- [9] 续敏,王建立,王建军,等.CCD在卫星星等测量中的应用[J].半导体光电,2008,29(1):447-450.
XU M, WANG J L, WANG J J, *et al.*. Application of CCD in satellite magnitude measurement[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, 29(1):447-450. (in Chinese)
- [10] LO'PEZ-MORALES M. Millimagnitude-Precision Photometry of Bright Stars with a 1 m Telescope and a Standard CCD [J]. *PASP*, 2006, 118:716 - 721.
- [11] 乔健.舰载光电成像系统探测能力分析[J].光学精密工程,2013,21(10):2520-2526.
QIAO J. Analysis on detection ability of shipborne optic-electronic equipment[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10):2520-2526. (in Chinese)
- [12] 江登表,李勃,陈启美.用于高动态范围图像生成的CCD辐照度标定[J].光学精密工程,2013,21(11):2980-2988.
JIANG D B, LI B, CHEN Q M. CCD irradiance calibration algorithm for HDR image acquisition[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11):2980-2988. (in Chinese)
- [13] 门涛,徐蓉,刘长海,等.光电望远镜暗弱目标识别算法及探测能力[J].强激光与粒子束,2013,25(3):587-592.
MEN T, XU R, LIU CH H, *et al.*. Dark target identification algorithm and detecting ability of optoelectronic telescopes [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(3):587-592. (in Chinese)
- [14] 庄诚,隋成华,唐轶峻.GEO空间碎片光度测量标定方法的研究[J].天文研究与技术,2011,8(4):343-346.
ZHUANG CH, SUI CH H, TANG Y J. Research of Photometric Calibration of Geosynchronous-Orbit(GEO) Space Debris

- [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2011, 8(4):343-346. (in Chinese)
- [15] 张已化,姚东升,谈斌. 地基光电系统空间目标探测影响因素分析[J]. *光学学报*, 2008, 28(6):1178-1182.
ZHANG J H, YAO D SH, TAN B. Analysis on effect factors of ground-based electro-optic system detection ability on space object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6):1178-1182. (in Chinese)
- [16] 刘杰,王建立,吕天宇,等. 钠激光导星星等计算方法研究[J]. *中国科学*, 2013, 43(3):318-323.
LIU J, WANG J L, LV T Y, *et al.*. Research on the calculation method of sodium laserguide star magnitude[J]. *Science China*, 2013, 43(3):318-323.
- [17] 杨光普,邹文波. CCD 恒星光度测量方法研究进展[J]. *天文学进展*, 2012, 30(4):467-486.
YANG G P, WU W T. Progress in the stellar CCD photometric methods[J]. *Progress in Astronomy*, 2012, 30(4):467-486.

作者简介:



李冬宁(1982—),女,辽宁锦州人,博士研究生,助理研究员,2005年于吉林大学获得学士学位,主要从事光电精密跟踪测量技术的研究。E-mail:ldn_email@163.com



王丽秋(1973—),女,吉林长春人,硕士,副研究员,1996年于四川大学获得学士学位,2002年于中国科学院研究生院获得硕士学位,主要从事光电测控方面的研究。E-mail:wanglq@ciomp.ac.cn



王成龙(1981—),男,辽宁沈阳人,硕士,助理研究员,2005年于中国科学技术大学获得学士学位,2011年于中国科学院研究生院获得硕士学位,主要从事数据处理与系统控制方面的研究。E-mail:wangcl@ustc.edu



郭同健(1981—),男,吉林长春人,博士研究生,副研究员,主要从事精密跟踪伺服控制技术方面的研究。E-mail:tjguo_ciomp@yahoo.cn