

引用格式: MA Yan, MA Chi, XIE Yan-hao, *et al.* Space Target Luminosity Measurement Based on Video Remote Sensing Satellites[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12):1228002

马岩, 马驰, 解延浩, 等. 基于视频遥感卫星的空间目标光度测量[J]. *光子学报*, 2019, **48**(12):1228002

基于视频遥感卫星的空间目标光度测量

马岩¹, 马驰², 解延浩², 王放¹

(1 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

(2 长光卫星技术有限公司, 长春 130102)

摘 要: 基于“吉林一号”视频系列卫星开展空间目标光度测量试验, 阐述了视频星对空间目标成像以及光度反演原理, 利用相机探测器输出图像的灰度值反演计算目标光度学特征. 根据误差传递原理分析了辐射定标系数偏差和目标图像噪声对反演精度的影响, 并以恒星作为标准辐射源对反演精度进行验证, 结果表明恒星类点目标光度反演误差小于 0.15 Mv. 列举了空间目标拍摄及反演结果样例, 并对视频星观测试验结果进行了统计和说明, 得到视频星的极限探测距离、捕获概率以及观测效能, 分析结果表明视频星的灵活成像模式可较好地适用于空间目标观测任务.

关键词: 空间光学; 空间监视; 光度测量; 空间目标; 视频卫星; 信噪比; 误差传递; 照度; 目标探测; 遥感

中图分类号: V556

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20194812.1228002

Space Target Luminosity Measurement Based on Video Remote Sensing Satellites

MA Yan¹, MA Chi², XIE Yan-hao², WANG Fang¹

(1 *Beijing Institute of Tracking Telemetry & Telecommunication, Beijing 100094, China*)

(2 *Chang Guang Satellite Technology Co. LTD, Changchun 130102, China*)

Abstract: Experiments on measuring the photometric characteristics of space targets were conducted based on Jilin-1 video satellites, the method of using video satellite to image space targets and perform luminosity inversion were demonstrated. The inversion and estimation on luminosity characteristics of targets was based on grey scale value of output images from camera sensor. An analysis on the effect from the error of radiation calibration coefficient and image noise on the inversion precision was also conducted based on the principle of error transfer. By using star targets as the standard radiation source, the inversion precision was verified. Results show the error of luminosity inversion is less than 0.15 magnitude. A statistics analysis on targets filmed by Jilin-1 satellites was performed and examples were listed, giving estimation on the maximum sensing distance, probability of target capture and the observation performance. Results show that the agile imaging mode of video satellite which is designed for ground remote sensing performs well in space target observation as well.

Key words: Space optics; Space surveillance; Luminosity measurement; Space target; Video remote sensing satellites; Signal to noise ratio; Principle of error transfer; Illumination; Object detection; Remote sensing

OCIS Codes: 280.4788; 280.4991; 120.0280; 110.2960; 110.4280

0 引言

随着航天技术的发展和经济社会对航天资源与日俱增的依赖, 人造空间目标的数量逐年递增, 如何利用

基金项目: 国家自然科学基金重大项目重点课题(No.61890965), 吉林省科技厅重点科技攻关项目(No.20170204069GX)

第一作者: 马岩(1977—), 男, 副研究员, 硕士, 主要研究方向为光电信息处理预分析. Email: mayan888@sina.com

通讯作者: 马驰(1991—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为光学设计和光学遥感. Email: machi_hitedu@163.com

收稿日期: 2019-07-03; 录用日期: 2019-09-20

<http://www.photon.ac.cn>

目标多维度特征实现空间资产的运行维护与安全管理成为热点研究方向,光度特征是空间目标的重要物理特征之一,能在一定程度上反映目标的尺寸、形状、类别、表面材质、姿态及运行状态等特征,可以用于空间目标的辅助识别^[1-2].光电测量方法是获取空间目标光度特性最有效且应用最广泛的方法^[3],按照光电设备部署的位置进行分类,可分为地基观测和天基观测^[4].其中,天基观测不受地域限制和大气干扰,同时对目标的观测视角更灵活,获取的空间光度特性数据效率更高且更准确.但天基观测装备研发成本高、制造难度大,组网需耗费较多的财力和人力,难以满足日益增长的空间目标光度测量需求^[5].

国外已经有了利用对地遥感卫星实现空间目标观测的先例,如2012年法国航天局调动Pleiades遥感卫星对与地面失联的Envisat卫星进行拍摄,确认了目标的运行状态^[6].我国“吉林一号”遥感星座视频系列卫星(简称视频星),在设计中将对恒星和月球的观测作为在轨定标手段,因此具备了空间目标观测的能力.2017年入轨至今视频星执行了数百余次空间目标观测试验,获取了各类天体及空间目标等图像.视频星在地面实验室进行了辐射定标试验,建立了图像与拍摄目标能量的关系,因此可以根据遥感器成像辐射传递原理从目标图像中反演得到目标光度学参数,即实现空间目标光度天基测量.本文重点阐述视频星针对空间目标开展的光度测量试验过程及结果,并给出光度反演误差分析方法及在轨评估方法,以填补当前空间目标天基光度测量能力的短板.

1 视频卫星空间目标光度测量原理

1.1 视频卫星空间目标成像模式

吉林一号视频卫星是新型敏捷卫星,能够实现三轴姿态快速、高精度、任意方位调整.星上同时配置了长线阵和大面阵两种探测器,因而具备多种新颖的成像模式以及优越的成像性能,包括空间目标及天文目标拍摄功能,图1为视频星拍摄得到的国际空间站图像.

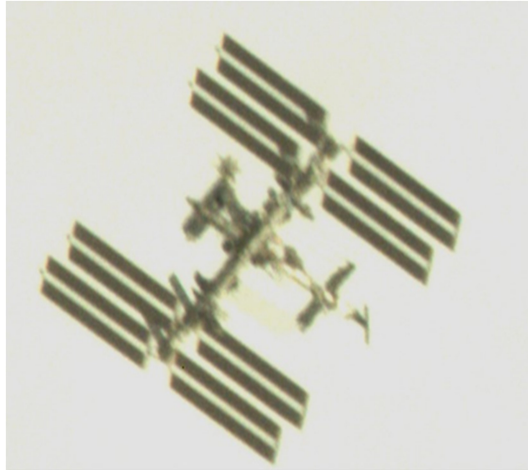


图1 视频星拍摄国际空间站图像

Fig.1 Image of the International Space Station taken by video remote sensing satellite

视频星的主要参数如表1所示,卫星采用太阳同步轨道,因此试验测量的目标主要为中低轨道目标.视频星具有较高的指向精度和姿态稳定度,可保证相机大概率捕获到预知轨道的空间目标.

视频星执行拍摄任务时,需预先依据交汇窗口的拍摄距离、光照条件以及相对运动角速度等因素选取成像模式.如图2,针对空间目标,视频星可以采用两种模式进行拍摄:

1) 惯性空间稳定成像模式.通过拍摄目标轨道预报结果合理选择交汇窗口,视频卫星调整姿态对交汇区域定点凝视成像,利用目标本身的轨道运动实现捕获目标,完成拍摄任务.该种成像模式的捕获概率较高,但由于目标相对相机焦面的运动角速度较快,获取的目标图像帧数较少;同时,相机的最大曝光时间较小,该种模式一般适用于高亮度目标观测.

2) 惯性空间跟踪成像模式.根据预报的运动轨迹特征,预先设定卫星姿态机动,相机光轴伴随目标运动而转动,实现对目标的动态跟踪监视.该种成像模式对卫星的指向精度以及目标轨道的预报精度提出了更高的要求,因而捕获概率降低,但可降低目标的运动造成的图像模糊,同时增加获取的目标图像帧数.最重要的

是,对目标的跟踪成像增加了目标在探测器像元内的驻留时间,因而可极大地提高目标的曝光时间,因此该种成像模式适用于暗弱目标的观测.

表 1 吉林一号视频卫星主要参数

Table1 Main parameters of Jilin-1 video satellite

Parameter	Value	
Orbit type	SSO	
Orbit altitude	535.35 km	
Resolution	Video	0.92 m
	Multi-spectral	3 m
Width	19 km×4.5 km	
Band	Visible, BGR Bayer	
Quantization	12 bit	
Control system	Three-axis stabilized	
Attitude stability	0.001°/s(3σ)	
Pointing precision	0.03°(3σ)	

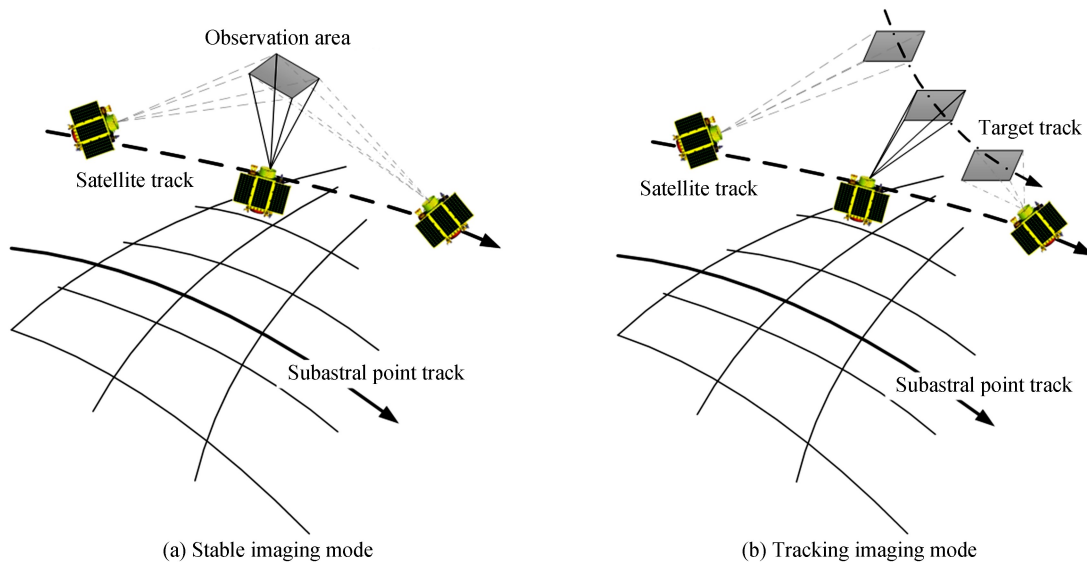


图 2 视频卫星空间目标成像模式示意

Fig.2 Imaging mode of space target photographed by video satellite

1.2 光度反演模型

空间目标一般不发光,光度特性主要表征为目标表面对太阳光的散射特性^[7].按照光谱型分类,太阳为 G 型光谱型恒星,所以测量波段主要集中在 450~800 nm 的可见光范围内.光度的衡量单位是视星等,它是天文学领域用来表征天体目标亮度的单位,计算星等大小的基准是相差五个星等时照度差一百倍,即星等相差一倍,亮度相差 2.512 倍^[8],目标的星等可以表示为

$$m_{obj} = -2.512 \log_{10} (E_{obj}/E_0) \quad (1)$$

式中, E_0 是零星等对应的照度, E_{obj} 是目标的照度.

图 3 为空间目标成像过程示意图,将拍摄目标按照网格划分成多个微面元,每一个微面元与相机探测器的一个像素对应,目标微面元的面积为 S_1 ; n 为目标微面元表面法线向量, i 为目标微面元与相机入瞳中心连线与 n 的夹角.拍摄目标与相机光瞳的距离为 R ,相机焦距为 f ,探测器像元尺寸为 d ,目标在探测器成像的像元数为 k ,微面元相对光瞳的立体张角为 ω .

相机光瞳接收目标表面第 (x, y) 个微面元出射的光通量可以分别用辐亮度和照度表示为^[9]

$$d\Phi = L_{(x,y)} \cdot \cos i \cdot S_1 \cdot \omega = E_{(x,y)} \cdot S_2 \quad (2)$$

式中, $L_{(x,y)}$ 为目标微面元发光辐亮度, $E_{(x,y)}$ 为目标微面元在光瞳处产生的光照度.

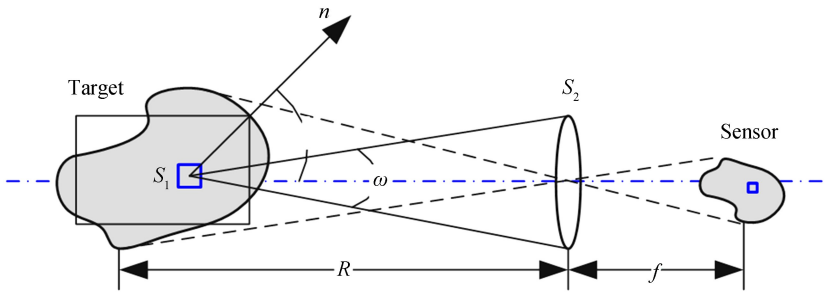


Fig.3 Sketch of imaging process of space target

根据几何成像关系有

$$\frac{\cos i \cdot S_1}{R^2} = \frac{d^2}{f^2} \quad (3)$$

$$\omega = S_2 / R^2 \quad (4)$$

因此,目标在光瞳处产生的光照度可以用微面元辐亮度表示为

$$E_{\text{obj}} = \sum_k L_{(x,y)} \cdot \frac{d^2}{f^2} \quad (5)$$

在相机参数不变的情况下,目标图像的灰度与目标辐亮度成线性关系,可以表示为^[10]

$$L_{(x,y)} = k_{\text{Gain}} \cdot \text{DN}_{(x,y)} + \beta_{\text{Bias}} \quad (6)$$

式中, $\text{DN}_{(x,y)}$ 为探测器 (x,y) 像素输出图像灰度值; k_{Gain} 、 β_{Bias} 是辐射定标系数,与探测器增益、曝光时间相关,由相机的实验室辐射定标获取.图4为实验室辐射定标场景,在设置好相机的曝光时间和增益以后,采用大口径的积分球对相机入瞳进行照射,积分球出射光亮度用波谱仪精确测量,从低到高调节积分球的亮度即可建立相机输出灰度与辐亮度关系.相机每一档曝光时间设置和增益设置的组合为一种工况,每一种工况都需要重复上述实验过程.相机执行拍摄空间目标任务时,曝光参数和增益参数需在已经测量的工况中选取;视频星相机在地面实验室进行了曝光时间为0.2~500 ms、增益在0.65~5.6范围内的组合工况辐射定标测量,可满足星等范围-2~10 Mv的空间目标拍摄及光度反演任务需求.图5为视频星的一台相机在曝光时间为0.2 ms、增益为0.65的工况条件下获取的图像灰度与目标辐亮度关系曲线,曲线的斜率即代表Gain参数,截距代表Bias参数.

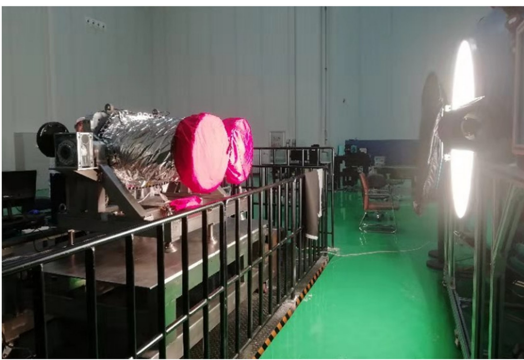


Fig.4 Radiation calibration of camera

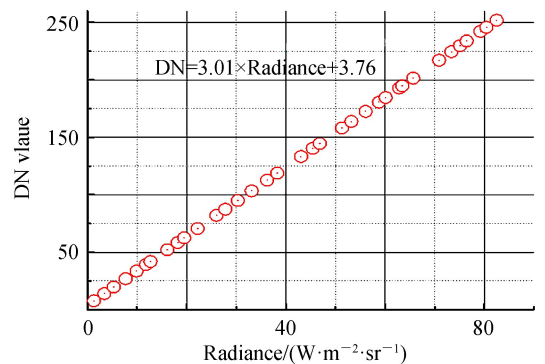


图5 图像灰度与目标辐亮度关系曲线

Fig.5 Curve of relationship between image DN value and target radiance

利用阈值分割法可提取目标图像中的目标有效灰度值^[11].联合式(1)、(5)和(6)即可利用拍摄的目标图像计算目标的视星等,实现目标的光度反演.

1.3 探测能力分析及其曝光时间设置

目标光度测量过程中,相机曝光时间需进行合理的设置,一方面不能造成目标信号饱和,另一方面需尽量延长曝光时间,提高图像信噪比,进而提高反演精度.因此,卫星在执行拍摄任务之前,需根据交汇窗口条件及目标几何尺寸预估成像信噪比,并以此为根据设置相机曝光参数.

视频星光学系统及探测器主要参数见表 2.

表 2 光学系统及探测器主要参数
Table 2 Main parameters of optical system and detector

Parameter	Value
Focallength	3 200 mm
Aperture	320 mm
Pixel size	5.5 $\mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$
Darknoise	$< 6 \text{ e}^- \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{pix}^{-1}$
Readoutnoise	3.8 e^-
Quantumefficiency	60%
FWC	21.5 ke^-

首先,需对目标在相机入瞳处产生的光照度进行估算.假设目标为表面粗糙的球形朗伯反射体,目标星等可估算为^[12]

$$m_{\text{obj}} = m_{\text{sun}} - 2.5 \log \left\{ \frac{\pi h^2}{R^2} \cdot \rho \cdot [\sin(\psi) + (\pi - \psi) \cos(\psi)] \right\} \quad (7)$$

式中, m_{sun} 是太阳在大气层外的视星等, h 是目标直径, ρ 是目标表面反射率, 取 0.1, Ψ 是目标观测相位角, 可由轨道参数推演得到.

根据目标在入瞳处的辐照度可以计算得到像面上单个像元产生的光子数为

$$N_s = \int \frac{E_{\text{obj}} \cdot \pi \cdot (D/2)^2 \cdot t_0 \cdot \tau_0 \cdot (1 - \tau_1) \cdot \eta_q}{hc/\lambda} d\lambda \quad (8)$$

式中, D 为相机通光口径, t_0 为曝光时间, τ_0 为光学系统透过率, τ_1 为光学系统遮拦比, η_q 为探测器量子效率.

视频星焦面采用 CMOS 型探测器, 探测器噪声来源主要有: 背景噪声、散粒噪声、暗电流噪声、读出噪声^[13]. 其中, 背景噪声主要由太阳和地气光等杂散光的随机波动引起, 拍摄空间目标过程中背景为深空背景, 可忽略杂光影响; 暗电流噪声是热产生的随机噪声, 等值电子数等于暗电流产生的电子数 N_d 的平方根, 即 $n_d = \sqrt{N_d}$; 散粒噪声由目标入射光子流的随机波动产生, 属于白噪声, 它与信号总光子数的平方根成正比, 即 $n_k = \sqrt{N_s}$; 读出噪声属于暂态噪声, 数值可由探测器手册得到, 记 $n_r = \sqrt{N_r}$.

以上各种噪声相互独立, 因此系统总噪声的方差是所有噪声贡献的方差的总和, 即

$$N_{\text{noise}} = \sqrt{n_k^2 + n_d^2 + n_r^2} \quad (9)$$

目标成像的信噪比为

$$\text{SNR} = \frac{N_s}{N_{\text{noise}}} \quad (10)$$

在不考虑背景噪声的情况下计算得到不同星等目标的信噪比与曝光时间关系曲线如图 6 所示. 一般认为信噪比大于 5 时, 目标满足探测要求^[14]. 视频星相机最长曝光时间为 0.6 s, 在不考虑目标相对运动的条件下, 视频星可探测的极限为 13 Mv. 对于低星等目标, 过长的曝光时间会导致图像饱和, 信噪比达到最大值. 为防止饱和现象的出现, 信噪比上限阈值设定在 0.7 倍的饱和信噪比, 即设定积分时间使预估信噪比等于 100.

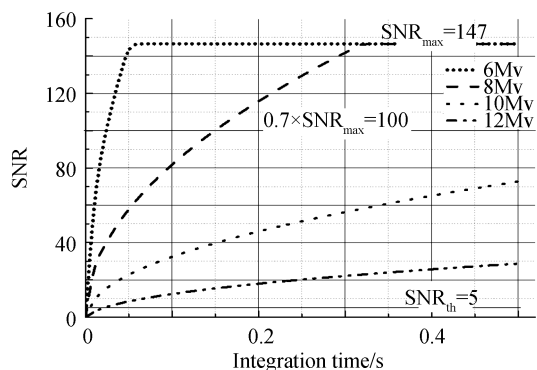


图 6 曝光时间与探测信噪比关系曲线
Fig.6 Curve of relationship between exposure time and signal-to-noise ratio

2 反演精度评估及验证

2.1 反演过程中的误差传递

根据光度反演模型, 反演误差主要由两方面误差决定: 一是辐射定标系数(主要是 k_{Gain} 系数)测量误差, 二是图像中目标信号耦合的噪声造成的误差. 根据误差传递原理, 结合式(5)、(6)中 E_{obj} 的表达式, 可以得到

$$\sigma_{E_{\text{obj}}} = \left| \sqrt{(\sum \text{DN}_{(x,y)})^2 \cdot (\sigma_{\text{Gain}})^2 + (k_{\text{Gain}})^2 \sum (\Delta \text{DN}_{(x,y)})^2} \cdot \frac{d^2}{f^2} \right| \quad (11)$$

式中, $\sigma_{E_{\text{obj}}}$ 为计算得到的目标光照度标准差; σ_{Gain} 是辐射定标系数标准差, 视频星利用地面靶场进行在轨辐射精度测量, 辐射定标系数偏差小于 10%; $\Delta \text{DN}_{(x,y)}$ 是噪声造成的 DN 偏差, 当 DN 值较高时, 与散粒噪声相比, 暗电流噪声、读出噪声及背景噪声可忽略不计. 探测器输出 DN 值与信号电子数是线性关系, 则根据式 (9) 可以粗略估计 $\Delta \text{DN}_{(x,y)} \approx \sqrt{\text{DN}_{(x,y)}}$.

利用式 (1) 可以推导建立目标星等标准差与目标光照度标准差的关系, 即

$$\sigma_m = \frac{\partial m}{\partial E_{\text{obj}}} \times \sigma_{E_{\text{obj}}} = \frac{-2.512}{\ln(10) E_{\text{obj}}} \sigma_{E_{\text{obj}}} \quad (12)$$

联立式 (11) 和 (12) 即可计算目标光度反演误差.

当目标是亚像元成像情况时, 可视为点目标, 图像中每个像素点的灰度值是系统点扩散函数在每个探测单元内积分的结果^[15]. 为简便分析, 采用系统的理论点扩散函数模型进行分析, 根据相机的设计模型模拟得到的点目标成像结果如图 7 所示.

点目标光照度测量误差主要由目标图像中心像素灰度值决定, 以曝光时间 0.2 ms、增益 0.65 工况为例, 代入辐射定标系数分析得到二者关系曲线如图 8 所示. 对于多数情况, 拍摄得到的图像目标中心像素灰度值在 140~220 范围内, 对应目标星等测量标准差为 0.08~0.16 Mv.

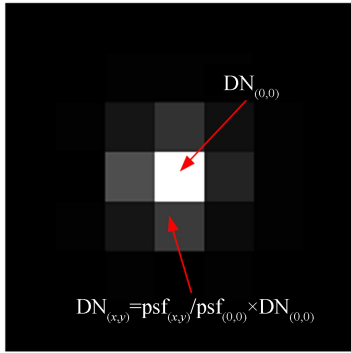


图 7 点目标亚像元成像模拟结果

Fig.7 Simulation results of point target sub-pixel imaging

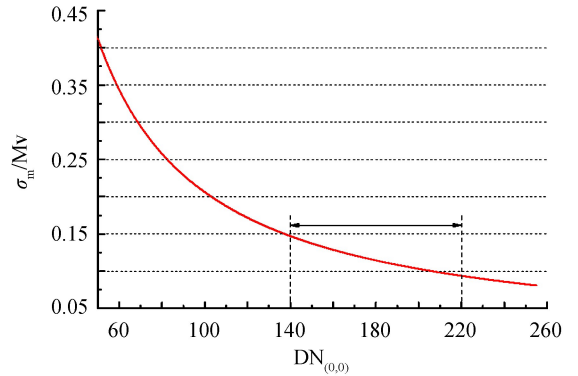


图 8 中心像素灰度与反演星等标准差关系曲线

Fig.8 Relation curve between gray level of central pixel and standard deviation of inversion magnitude

需要特别说明的是, 上述分析是以假设目标亚像元成像情况为前提条件. 而当目标在像面占的像素较多时, 目标轮廓边缘弥散像素相对目标总像素的占比下降, 因而散粒噪声的影响下降, 目标的星等反演精度会相对提高. 即目标在探测器输出灰度值最大值一定的情况下, 在探测器上响应的像素越多, 反演精度越高.

2.2 反演精度在轨评估

根据天文观测结果, 大量的恒星辐射非常稳定, 是极好的标准辐射源. 现阶段, 星表已经存储了大量的恒星光度数据, 其精度优于 1%. 如, 欧洲空间局 1989 年发射的依巴谷卫星历经 4 年时间在轨对恒星目标进行观测, 并建立了依巴谷星表. 依巴谷星表包含百万余颗暗至 11 等的恒星, 其可见光宽光谱波段辐射测量内部精度优于 0.2%^[16].

视频星同样具备天文目标的拍摄能力, 因此, 可以利用恒星目标作为参照标准标定相机的反演精度. 此外, 恒星可以在一定程度上模拟系统对点目标成像的情况, 从而使评估方式更接近于相机的真实工作情况, 评估结果更为真实有效. 图 9 为拍摄得到的恒星目标图像, 按照文中方法代入成像参数反演得到目标星等值.

表 3 详细说明了恒星参数及光度反演结果, 恒星参照数据来源于依巴谷星表. 根据计算结果可以看出, 恒星目标光度测量在轨标定的误差与理论计算的误差基本一致, 其最大反演误差小于 0.15 Mv, 可见基于视频星图像的目标光度测量具有良好的精度.

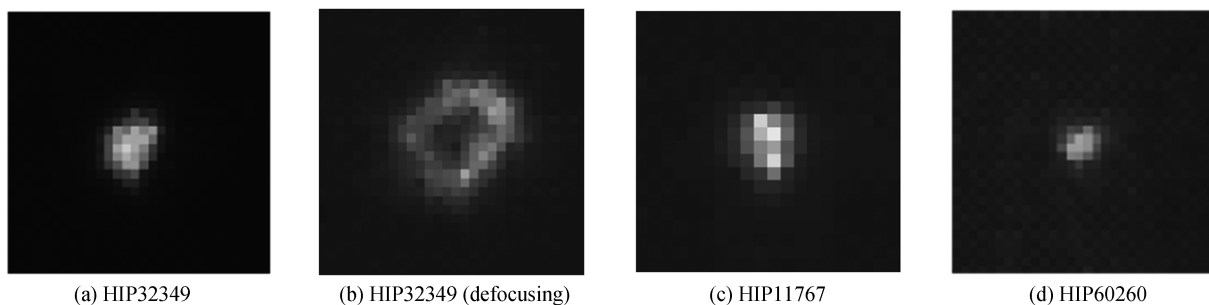


图9 恒星目标拍摄图像
Fig.9 Stellar photography

表3 恒星光度反演结果
Table 3 Stellar photometric inversion results

Reference star number	Magnitude	Exposure time	k_{Gain}	β_{Bias}	Inversion of magnitude	Theoretical calculation error	Actual metrical error
HIP32349	-1.46 Mv	0.2 ms	3.01	3.76	-1.38 Mv	0.06 Mv	0.08 Mv
HIP32349 (defocusing)	-1.46 Mv	0.2 ms	3.01	3.76	-1.37 Mv	0.06 Mv	0.09 Mv
HIP11767	1.97 Mv	1 ms	14.58	8.58	1.91 Mv	0.09 Mv	0.06 Mv
HIP60260	3.55 Mv	5 ms	69.17	18.43	3.69 Mv	0.17 Mv	0.13 Mv

空间目标观测距离变化范围较大,成像过程中探测器可能出现离焦的情况.理论上,探测器接收了目标出射到相机光瞳的全部能量,相机离焦仅造成图像模糊,而在能量上并不造成损失,因此对目标光度反演精度并不造成影响.为了对该假设进行验证,调节相机焦面位置使其相对无穷远目标成像位置具有一定的偏离量,并对 HIP32349 恒星目标再次进行拍摄.对比图 8(a)和(b)所示的拍摄图像,可以看出星点目标由于离焦表现成为环形形状.对比离焦和非离焦状态下的目标反演误差,二者几乎一致,表明相机在一定范围内离焦并不对反演精度造成影响.若相机离焦量过大,会导致光学系统能量集中度严重下降,目标无法成像.根据相机的光学设计特性,离焦量需控制在点目标成像弥散直径小于 20 像素.视频星具备在轨调焦能力,通过拍摄目标距离可计算目标合理成像焦面位置并上注调焦指令,从而避免相机过度离焦.

3 视频星拍摄结果分析

图 10 中列举了利用视频星拍摄的典型目标图像,包含了稳定成像和跟踪成像两种.其中,稳定成像过程中由于相机长时间曝光,目标运动拖尾形成一条间断的直线;而跟踪成像模式下目标能量则较好地集中在一定的圆形区域中.

表 4 为图 10 中 4 个样例目标拍摄条件及光度反演结果.

对视频星的多次拍摄结果进行统计和分析,得出:

1)探测距离方面,对于直径 5 m 以上的空间目标,视频星探测距离大于 2 000 km.

2)捕获概率方面,目标的捕获概率与成像模式相关,对于低轨空间目标,稳定成像模式下目标捕获概率约为 90%;跟踪成像模式的捕获概率与目标的相对运动角速度相关,在相对运动角速度小于 1°/s 的条件下,捕获概率可达 60%左右.

3)成像模式应用方面,跟踪成像模式基本可以消除目标相对探测器的位移,极大地延长了目标的有效曝光时间,提高了目标的信噪比,有利于提高光度测量精度.

4)观测效能方面,平均统计来看,对于 400~850 km 太阳同步轨道的空间目标,单颗视频星每个月具有 10 个可观测窗口;对于 400~850 km 的 45°倾角圆轨道空间目标,单颗视频星每个月具有 13 个可观测窗口,可见视频星的灵活模式对于空间目标观测具有较高的观测效能.

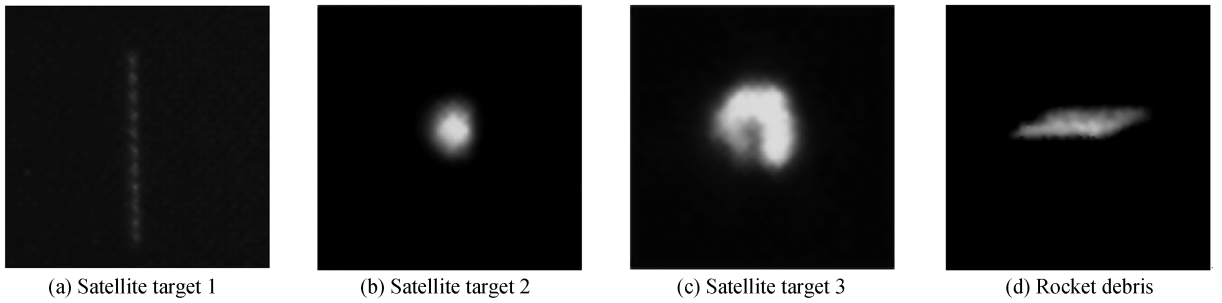


图 10 空间目标拍摄图像及光度反演结果
Fig.10 Space target image and luminosity inversion results

表 4 空间目标拍光度反演结果

Table 4 Luminosity inversion results of space target

Target	Imaging mode	Exposure time	Imaging distance	Angular rate of target	Sun phase angle	Inversion of magnitude
Satellite target 1	Stable imaging	50 ms	2500 km	$0.1^\circ/\text{s}$	69°	5.67 Mv
Satellite target 2	Tracking imaging	8 ms	900 km	$0.57^\circ/\text{s}$	51°	2.98 Mv
Satellite target 3	Tracking imaging	10 ms	937 km	$0.15^\circ/\text{s}$	26°	2.35 Mv
Rocket debris	Stable imaging	5 ms	220 km	$2.2^\circ/\text{s}$	48°	6.52 Mv

4 结论

利用对地遥感卫星可以快速增强空间目标天基监视系统效能.本文提出了利用“吉林一号”视频系列卫星进行空间目标在轨光度测量方法,并对测量精度进行分析,分析结果表明对于亚像元成像目标光度反演标准差小于 0.2 Mv.采用恒星作为标注辐射源对反演精度验证,结果表明恒星目标星等反演误差与理论分析误差基本一致.因此视频星具备较好的天基空间目标光度测量精度.

遥感卫星辐射定标系数偏差随着卫星在轨时间增加而逐渐增大,对目标光度反演精度影响也会逐渐加重.后续可以利用恒星目标对辐射定标系数进行矫正,进一步提高目标光度测量精度.

参考文献

- [1] ZHOU Yan-ping, SHU Rui, TAO Kun-yu, *et al.* Study of photoelectric detecting and identifying of space target[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(1): 68-73.
周彦平, 舒锐, 陶坤宇, 等. 空间目标光电探测与识别技术的研究[J]. *光学技术*, 2007, **33**(1): 68-73.
- [2] PAPUSHEV P, KARAVAEV Y, MISHINA M. Investigations of the evolution of optical characteristics and dynamics of proper rotation of uncontrolled geostationary artificial satellites[J]. *Advances in Space Research*, 2009, **43**: 1416-1422.
- [3] LO'PEZ-MORALES M. Mill magnitude-precision photometry of bright stars with a 1m telescope and a standard CCD [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2006, **118**: 716-721.
- [4] DU Xiao-ping, LI Zhi, WANG Yang. Research on the building of us space situational awareness capability[J]. *Journal of Equipment Academy*, 2017, **28**(3): 67-73.
杜小平, 李智, 王阳. 美国太空态势感知能力建设研究[J]. *装备学院学报*, 2017, **28**(3): 67-73.
- [5] LEMMENS S, KRAG H, ROSEBROCK J, *et al.* Radar mappings for attitude analysis of objects in orbit[C]. The 6th European Conference on Space Debris, Darmstadt, 2013:20-24.
- [6] WANG Xue-yao. Development status research of foreign space target detection and identification systems[J]. *Spacecraft Engineering*, 2018, **27**(3): 86-94.
王雪瑶. 国外空间目标探测与识别系统发展现状研究[J]. *航天器工程*, 2018, **27**(3): 86-94.
- [7] ZENG De-xian, DU Xiao-ping. Analysis and simulation of characteristics of space objects for space-borne optical sensor [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2008, **28**(6): 560-566.
曾德贤, 杜小平. 空间目标在天基光学探测中的特性分析与仿真[J]. *空间科学学报*, 2008, **28**(6): 560-566.
- [8] SU Zeng-li. Analysis of luminosity features of satellites on space-based surveillance[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2006, **25**(1): 52-56.
苏增立. 天基观测目标国外空间目标探测与识别系统发展现状研究卫星光度特性分析[J]. *飞行器测控学报*, 2006, **25**

(1): 52-56.

- [9] ZHOU Shi-chun. Introduction to advanced infrared photoelectric engineering[M]. Beijing: Science Press, 2014: 16-25.
周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 16-25.
- [10] HAN Qi-jin, PAN Zhi-qiang, WANG Ai-chun. In-orbit radiometric calibration and quantitative application for civil remote sensing satellite payloads[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, **34**(2): 57-65.
韩启金, 潘志强, 王爱春. 民用遥感卫星载荷在轨辐射定标与定量应用[J]. 航天返回与遥感, 2013, **34**(2): 57-65.
- [11] LI Zhen-wei, ZHANG Tao, SUN Ming-guo. Fast recognition and precise orientation of space objects in star background [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(2): 589-599.
李振伟, 张涛, 孙明国. 星空背景下空间目标的快速识别与精密定位[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(2): 589-599.
- [12] SHELL J R. Optimizing orbital debris monitoring with optical telescopes [C]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii, 2010:14-17.
- [13] TOKUDA T, YAMADA H, SASAGAWA K, *et al.* Polarization-analyzing image sensor for μ TAS based on standard CMOS technology[J]. *Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan*, 2009, **129**(8): 331-333.
- [14] WEI Yang-jie, DONG Zai-li, MIAO Lei, *et al.* New otsu threshold improvement method for detecting small infrared targets[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(11): 23-26.
魏阳杰, 董再励, 缪磊, 等. 新的 Otsu 阈值改进方法的红外小目标检测[J]. 光电工程, 2004, **31**(11): 23-26.
- [15] CHEN Wei-zhen, ZHANG Chun-hua, WANG Xue-wei, *et al.* Moving target simulation of space observation serial images[J]. *Laser&Infrared*, 2008, **38**(3): 300-303.
陈维真, 张春华, 王学伟, 等. 空间观测序列图像目标运动成像仿真[J]. 激光与红外, 2008, **38**(3): 300-303.
- [16] XU Chun. A flux calibration method for remote sensing satellites using star flux[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, **36**(5): 581-588.
许春. 一种利用恒星进行遥感卫星辐射定标的方法[J]. 红外与毫米波学报, 2017, **36**(5): 581-588.