

文章编号 1674-2915(2011)02-0124-05

低轨微小卫星及小碎片搜索/跟踪 机动式大视场光电望远镜

高 昕¹, 王建立², 唐 嘉¹, 韩昌元², 赵金字², 明 名²

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;
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:有效反射面积小,运动速度快的空间低轨卫星和小碎片的日益增多对现有地基探测跟踪技术提出了挑战。本文分析了国外现有低轨小目标光电探测技术的发展现状,结合低轨小目标的探测需求,提出了一种用于低轨微小卫星及小碎片搜索/跟踪探测的机动式车载大视场光电望远镜设计方案。介绍了该望远镜的光学系统、跟踪架及载车,描述了它的工作模式和图像处理,讨论了系统的搜索和探测能力。结果表明,该望远镜对 300 km 轨道高度的目标搜索能力达到 13.5 星等(相当于直径 5 cm 目标),可以满足搜索和跟踪低轨微小卫星及小碎片探测的实际需求。

关键词:低轨;碎片;小卫星;搜索跟踪望远镜;光电望远镜

中图分类号:TH752 文献标识码:A

Mobile telescope with large FOV for searching and tracking low-orbit micro-satellites and space debris

GAO Xin¹, WANG Jian-li², TANG Jia¹, HAN Chang-yuan², ZHAO Jin-yu², MING Ming²

(1. *Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China;*
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: As more and more small satellites and debris appear in low orbits, it presents a big challenge to ground-based detecting and tracking techniques for those objects with fewer effective reflecting areas and high speeds. In this paper, the present status of detecting and tracking techniques for small objects in low orbit is analyzed. An automotive truck-based telescope with a large Field of View (FOV) is designed to search/track micro satellites and small debris. The optical system and system mount in the telescope are introduced and its working mode and data processing are described. Finally, it discusses searching and detection abilities of the proposed system. The obtained results show that the telescope has the capability to search 13.5 magnitude objects (5 cm object in diameter) at the 300 km altitude orbit. It can satisfy the requirements of searching and tracking micro satellites and small debris in low earth orbits.

Key words: low orbit; space debris; small satellite; searching and tracking telescope; photoelectric telescope

1 引言

2008年4月28日和2009年9月23日,印度分别用一枚火箭发射了10颗和7颗卫星,除了690和960 kg的两颗大卫星外,其余15颗均为1~16 kg的外国小型卫星,最小的仅为1 kg。2009年8月30日和2010年6月11日,韩国两次试图发射轻型运载火箭,其有效载荷是韩国人自行建造的小型卫星。在此之前,伊朗、朝鲜等国家都发射过运载火箭,试图将本国研制的小卫星送入地球轨道。这说明,世界上一些国家都在积极研制微小卫星,以显示其利用空间的能力。欧洲一些大学和研究机构力推3个30的小卫星技术,即30 cm大小,30 kg重量和30 W功率的微小卫星,这些低轨小卫星的轨道高度为300~700 km,目标的尺寸小、暗弱、运行速度快。随着这些成本低、功能简单、应急发射的低轨微小卫星数量的增多,快速发现、尽快识别这些低轨微小卫星目标,并进行编目,已向研究人员提出了技术挑战^[1]。

另外,随着各国航天发射活动的迅速增加和卫星的解体与碰撞事故的发生,地球低轨轨道上产生了数量巨大的低轨空间小碎片。由于大于厘米级的碎片对在轨空间卫星,特别是载人空间试验站都可能产生致命的破坏,因此对低轨空间小碎片(1~30 cm)的搜索发现与跟踪编目提出了迫切要求。

当前,地基空间目标探测与跟踪的主要手段是雷达和光电望远镜。由于雷达属于主动探测,其探测能力与作用距离的4次方成反比,而光电系统的探测能力与距离的平方成反比。一般情况下,雷达低轨目标探测能力为目标尺寸30 cm,1~30 cm尺寸目标则选用地基大口径、大视场搜索望远镜进行探测^[2]。

美国的空间目标监视系统对10 cm以上的低轨目标主要依赖地基雷达,中高轨目标则依赖光电系统。对于1~10 cm的低轨目标,美国国防部(DOD)和宇航局(NASA)均提出了探测与跟踪要求,其采用的手段是地基大口径、大视场地基搜索望远镜。其中,美国NASA与美国空军研究实验室(AFRL)于2010年研制了1.25 m级搜索跟踪

望远镜(Meter Class Autonomous Telescope, MCAT)^[3],以期实现低轨1~10 cm碎片的搜索发现与跟踪测量;美国国防部先进项目局(DARPA)正在研制口径为3.5 m,视场为3.5°的大口径地基搜索望远镜,用于低轨暗弱目标的搜索,甚至采用了曲面CCD^[4];美国空军的3 m旋转水银搜索望远镜,也正用于低轨目标的搜索发现^[5]。另外,美国天文界正在研制的用于小行星搜索发现的2~8 m级地基望远镜^[4],也规划用于低轨小目标的搜索发现,如8.4 m口径3°视场的LLST望远镜,4个1.8 m口径,3°视场的PAN STARRS望远镜阵。

为了搜索发现微小卫星,满足载人航天预警的需要,同时实现对低轨空间目标撞击等突发事件监测,本文提出了用于低轨微小卫星及小碎片搜索/跟踪机动式大视场光电望远镜的设计方案。

2 低轨微小卫星及小碎片搜索/跟踪机动式大视场光电望远镜

2.1 总体考虑

机动式大视场光电望远镜光学系统在保证像质的前提下应尽量增大视场,提高搜索和探测能力;同时应尽量减轻整机重量,满足车载机动式要求;另外,还应具有自动识别目标和远程控制功能。

提出的光电望远镜采用主焦点光路形式,有效通光口径为1.2 m;主镜采用双曲面,校正镜采用非球面设计,2.8°视场内80%的能量集中在24 μm内;为满足车载机动式要求,主镜使用轻量化SiC材料,轻量化后的1.2 m口径SiC镜坯重量只有100 kg;为减轻整机重量,系统采用桁架式轻量化的地平式跟踪架,采用车载一体化的设计思路,望远镜转动部分的重量不超过2.5 t;采用Hough变换,提高系统搜索探测能力并实现数据的自动处理。

2.2 光学系统

为实现大视场设计要求,且满足较高的光学成像质量,望远镜采用了主焦点光学系统。主镜为双曲面,口径 $D_1 = 1\ 230\ \text{mm}$,校正镜为4片透镜,其中两片一面为二次曲面的非球面,如图1所示。20℃时,该系统在2.8°视场处的弥散斑半径

(RMS) 小于 $12\ \mu\text{m}$, 其点列图如图 2 所示。20 °C 时, 系统 MTF 轴上值为 0.71 (@ 211 p/mm), 2.8° 视场处的 MTF 平均值为 0.62 (@ 21 p/mm) (其中

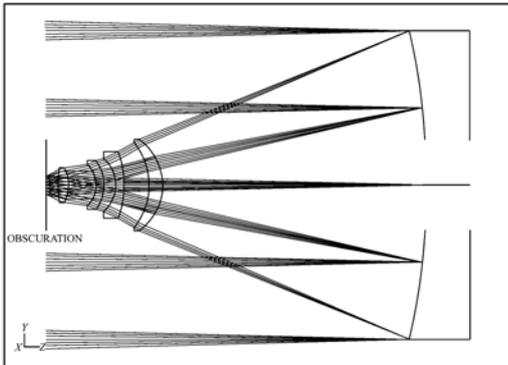


图 1 光学系统光路图

Fig. 1 Diagram of optical system

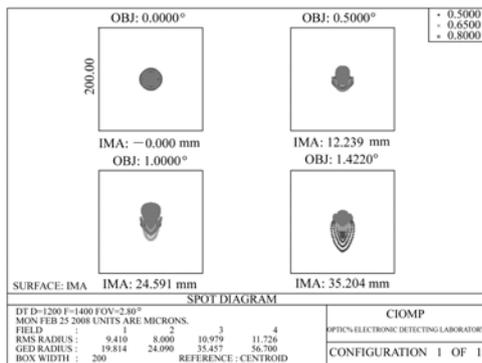


图 2 点列图

Fig. 2 Spot diagram

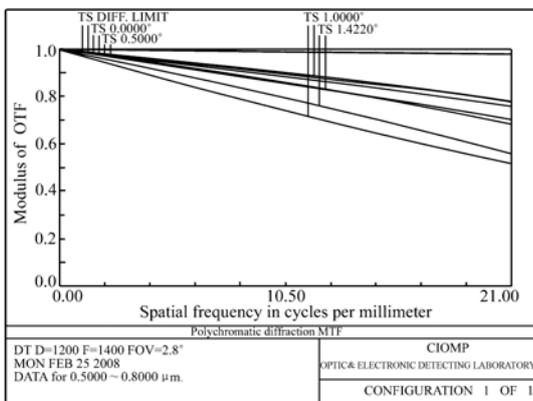


图 3 MTF

Fig. 3 Diagram of modulation transfer function

子午方向为 0.56, 弧矢方向为 0.68), 如图 3 所示。系统能量集中度如图 4 所示, 轴上 80% 的能量集中在半径为 $10.6\ \mu\text{m}$ 的圆内, 2.8° 视场内 80% 以上的能量集中在半径为 $12.2\ \mu\text{m}$ 的圆内。

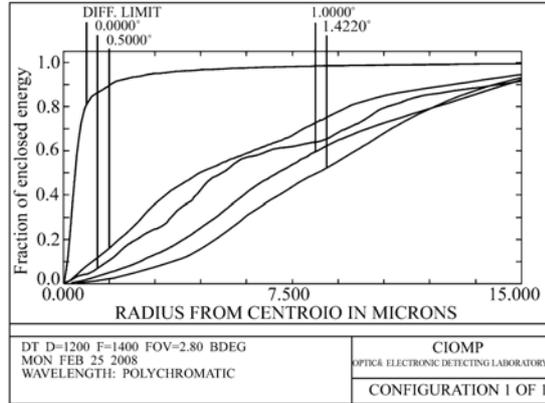


图 4 能量集中度

Fig. 4 Diagram encircled energy

综上所述, 光学系统设计达到了预定的要求, 设计参数如下:

- 入瞳口径: 1 200 mm
- 焦比: 1.17
- 焦距: 1 400 mm
- 探测视场: 2.8° (对角线)
- 焦面尺寸: 69.54 mm
- MTF: 0.62 (@ 21p/mm)
- 弥散斑半径 (RMS): $< 12\ \mu\text{m}$
- 80% 能量集中度半径: $< 12.2\ \mu\text{m}$
- 光学筒长: 1412.68 mm
- 后工作距离: 43.89 mm

2.3 光学主镜

光学主镜材料采用中科院长春光机所研制

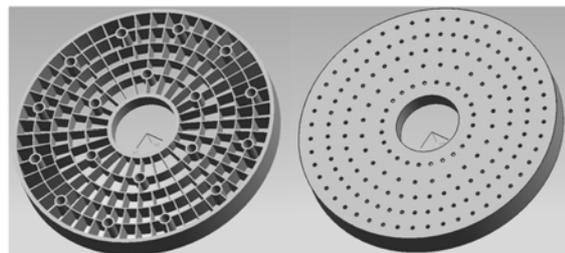


图 5 1.2 m SiC 轻量化主镜

Fig. 5 1.2 m SiC light weighted primary mirror

的 RB-SiC 轻型材料,图 5 是轻量化设计的 1.2 m SiC 主镜。与其他光学材料相比, SiC 比刚度高,采用中间夹心轻量化设计,轻量化率可达 70%,轻量化设计的 1.2 m SiC 主镜只有 100 kg,可以大大减轻主镜支撑结构的重量,从而减轻望远镜整机的重量。

2.4 跟踪架及载车

为了实现望远镜机动式工作的能力,望远镜跟踪架采用桁架结构,底座与载车一体化设计,由此进一步减轻了重量,降低了望远镜高度,提高了通过性。采用轻量化设计的望远镜整机重量不超过 4 t,如图 6 所示。

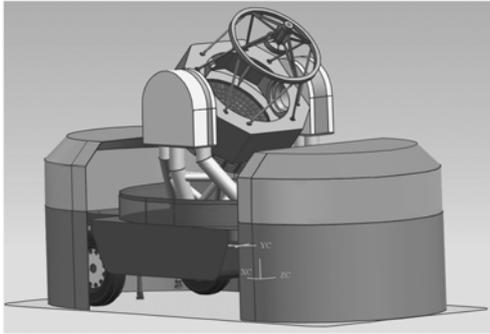


图 6 望远镜及其载车

Fig. 6 Telescope and vehicle

2.5 图像处理

对于低轨运动目标的搜索,望远镜可处于静止状态,等待目标穿越视场。由于快速目标在视场内处于直线拉条状,可以利用 Hough 变换识别出目标。Hough 变换是由 Paul Hough 提出的一种

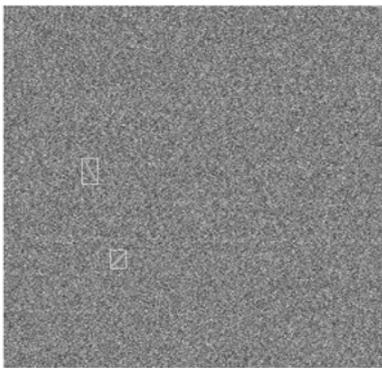


图 7 信噪比为 2:1 时目标识别效果

Fig. 7 Target detection at 2:1 SNR

经典的直线检测方法,可实现一种从图像空间到参数空间的映射关系。采用 Hough 变换,在信噪比为 2:1 的条件下,可以很快识别出目标,如图 7 所示。文献[5]结论是在信噪比为 1:1 的条件下,识别条状卫星图像的概率可以达到 50%。

2.6 工作模式

望远镜具有凝视搜索、跟踪、轨道面拦截等工作模式。对低轨目标可以采用凝视搜索的方式,一旦发现目标后,采集几点数据,即可用圆轨道预报方式进行引导捕获跟踪,进而跟踪测量,得到目标一定弧段的数据。对于不准确的预告,可以采用沿轨道跟踪搜索的模式调整。

2.7 搜索探测能力分析^[4]

对于 CCD 给定图像的任意一像素,总的探测信号强度由下面的公式给出:

$$S_{\text{net}} = S_{\text{sky}} + S_{\text{D}} + S_{\text{obv}}, \quad (1)$$

式中 S_{sky} 代表天空亮背景产生的光子信号强度, S_{D} 代表暗电流信号强度, S_{obv} 代表观测目标的信号强度。暗电流和天空能产生不需要的背景信号。结合以上各因素,噪声可以由下面的公式计算得到:

$$N = \sqrt{N_{\text{read}}^2 + S_{\text{sky}} + S_{\text{D}} + S_{\text{obv}}}, \quad (2)$$

式中 N_{read} 表示读出噪声。此时信噪比由式(3)给出:

$$\text{SNR} = \frac{S_{\text{obv}}}{\sqrt{N_{\text{read}}^2 + S_{\text{sky}} + S_{\text{D}} + S_{\text{obv}}}}. \quad (3)$$

最后,求解上面的方程可以得到目标信号强度与其它因素的关系式。结果为:

$$S_{\text{obv}} = \frac{SNT^2 + \text{SNR}\sqrt{\text{SNR}^2 + 4(N_{\text{read}}^2 + S_{\text{D}} + S_{\text{sky}})}}{2}. \quad (4)$$

这时,通过关联在要求信噪比下所需探测的信号强度与探测目标光强度特征的关系,就能确定在给定探测器积分时间下的系统探测阈值。

根据上面计算公式和表 1 的望远镜及探测器等参数,分别计算出 1.2 m 口径大视场望远镜对低轨不同轨道高度搜索探测能力为:

300 km: 优于 13.5 星等;

500 km: 优于 14.2 星等;

1 000 km: 优于 15.1 星等;

在信噪比为 5:1, 积分时间 1 s 时的跟踪探测能力不低于 18 星等。

表 1 搜索/跟踪机动式大视场光电望远镜参数

Tab.1 Parameters of mobile optoelectronic telescope with large FOV for searching and tracking

系统参数	参数值	系统参数	参数值
CCD	2 K × 2 K	望远镜系统遮拦	10%
像素尺寸	24 μm	望远镜形式	主焦点
CCD 读出噪声	15 e ⁻¹	波段	400 ~ 700 nm
暗电流	可以忽略	光学镀膜	标准铝
量子效率	80%	信噪比	2:1
CCD 量子效率曲线	如图 12 所示	天空亮度	21 星等/(") ²
望远镜 F 数	1.2	观测角度	天顶
望远镜口径	1.2 m		

3 结 论

本文提出的采用大视场光学设计、轻型主镜材料、紧凑式结构设计, 满足车载机动式要求的大视场搜索望远镜方案, 对 300 km 轨道高度的目标

搜索能力达到 13.5 星等, 相当于直径 5 cm 目标的探测能力^[6], 可以满足搜索和跟踪低轨微小卫星及小碎片的实际需求。该大视场搜索望远镜可机动式全国流动观测, 平常可作日常观测, 当有突发空间事件时, 可以作为应急设备在短时间内到达适合观测地点开展工作。

参考文献:

- [1] SPENCER D R, CHARLES B, HOGGE C B, *et al.*. Space Debris[J], 2000, 2:137-160.
- [2] 王建立, 陈涛. 空间目标监视用地基高分辨率光电成像望远镜总体需求及关键技术分析[J]. 中国光学与应用光学, 2008, 1(1):36-48.
WANG J L, CHEN T. General requirements and key technologies of ground-based high resolution OE imaging telescope for space target surveillance[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2008, 1(1):36-48. (in Chinese)
- [3] Orbital debris optical measurements[EB/OL]. (2009-08-06)[2010-11-11]. <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/measure/optical.html>.
- [4] MARK R A. Blind search for micro satellites in LEO: optical signatures and search strategies[C]. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii, Sep. 2007.
- [5] ROGER J H. Wide field of view satellite tracking[D]. Ottawa Royal Military College of Canada, 2000.
- [6] MARK K M, MATNEY M J, HEJDUK M D, *et al.*. An investigation of global albedo values[C]. Proceeding of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Hawaii, Sep. 2008.

作者简介: 高 昕(1973—), 男, 天津人, 博士, 高级工程师, 主要从事飞行器光电测控总体技术方面的研究。

E-mail: gaixin526@sina.com