

# 国外地基光电系统空间目标探测的进展

张景旭

(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** :简要介绍了国外先进地基空间监视系统的发展现状,从地基光电系统观测空间目标的角度描述了星火光学靶场 3.5 m 口径望远镜系统及 3.67 m 口径高级光电(AEOS)望远镜系统,给出了这两种望远镜系统的工作性能和所开展的工作。通过对这两套系统的设计理念和先进单元技术的研究,对构造“用于卫星成像的地基光电系统”的相关技术进行了初步探讨,针对目前提出的“对卫星成像的大口径地基光电观测设备”的总体研制方案,提出了建造应用自适应光学技术的 1.8 m 地平式望远镜的观点,提出该系统应设计为一个功能可扩展的光学平台。

**关键词** :卫星成像;光电望远镜;自适应光学技术;液晶;综述

中图分类号:TH743 文献标识码:A

## Progress in foreign ground-based optoelectronic detecting system for space target detection

ZHANG Jing-xu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract** :The present situation of advanced ground-based space target detecting systems at abroad are introduced in this paper. Then, two kinds of ground-based optoelectronic tracking systems for detecting the space target, 3.5 m telescope and 3.67 m Advanced Electric Optical System(AEOS) telescope, are described and the working performance and working missions for two telescopes are given. On the basis of the design concept and advanced technological schemes reported above, the technologies relating to “ground based optoelectronic system for satellite imaging” are discussed. For the overall scheme of “large aperture ground-based optoelectronic observation equipment for the satellite imaging”, the viewpoint to build a 1.8 m altazimuth telescope with adaptive optics technology is put forward, which suggests that the telescope is designed to be an optical table with expandable function.

**Key words** :satellite imaging; optoelectronic telescope; adaptive optics technology; liquid crystal; review

## 1 引言

随着全球太空资源开发热潮的进一步高涨和

未来太空作战趋势的加剧,地球外层空间正逐步变成新的军事斗争领地。在这种新的军事斗争形式中,空间目标监视系统起着基础性和关键性作用。空间目标监视系统的任务是对重要空间目标

进行精确探测和跟踪,确定可能对航天系统构成威胁的航天器的任务、尺寸、形状和轨道参数等重要目标特性,对目标特性数据进行归类和分发。空间目标主要指卫星,包括工作的卫星和不工作的卫星,同时也包括各种空间碎片,如进入空间轨道的助推火箭、保护罩和其他物体,还包括进入地球外层空间的各种宇宙飞行物,如彗星和小行星。据统计,从1957年10月到1988年7月底,美国空间跟踪网跟踪到的大小空间目标达1.8万多个,而1987年为7000多个,其中只有5%是工作卫星,其余是空间垃圾,如失效的卫星、未级火箭、仪器舱盖和卫星及火箭解体后的碎片。空间目标监视具有重要的军事价值,不仅可以帮助确定潜在敌人的空间能力,还可以预测空间物体的轨道,对可能发生的碰撞和对己方空间系统的攻击进行告警等<sup>[1]</sup>。

目前,世界上最先进的空间目标监视系统还是冷战时期美苏两国为监视敌方导弹进攻及侦察卫星而建造的地基跟踪系统。这两大系统中共有50多部雷达及各种光学和光电探测器,每天平均进行15万次观测,以保持对约1万个太空物体的跟踪。它们能探测到低轨道上10 cm大小和地球同步轨道上1 m大小的碎片。在美国,最先进的超级计算机也投入到了对太空垃圾的监视当中。超级计算机拥有超强的处理能力,可运用复杂的运算技术对太空监视系统拍下的照片进行处理,大大提高照片的质量,帮助科学家们判断太空垃圾的类型和危害程度。我国也启动了“空间碎片研究行动计划”,现已初步具备观测空间碎片的能力,并建立了空间碎片动态数据库。

美国专门为空间监视任务研制并部署的探测器主要包括专门的光学探测器和雷达探测器两种。美国对空间目标的监测主要依靠全球布站的各种空间探测器来完成,对空间目标特性的数据处理以及空间目标的编目管理则是由设在美国科罗拉多州夏延山的“空间监视中心”负责。“空间监视中心”由美国空间司令部管理,该中心建立了一个能够判别出地球空间轨道上所有物体的数据库,该数据库包括大约10000个物体。该空间监视中心向军方各作战司令部、国家航天航空局(NASA)、国家海洋与大气局(NOAA)以及其它组

织和科学研究部门提供各种例行的日常报告和专题报告。

组成空间监视系统的各种空间探测器,依据其性质和隶属关系不同,可以分为3类:属于美国国防部所有、专门用于空间监视的探测器称为“专用空间探测器”,主要包括贝克·纳恩像机和“地基光电深空空间监视系统”(GEODSS)等光电探测器和“海军空间监视”(NAVSPASUR)系统与AN/FPS-85相控阵雷达等雷达探测器。现在美国有3个“地基光电深空空间监视系统”站仍在使用,分别部署在美国新墨西哥州的索科里、夏威夷的毛伊岛、印度洋上的迪戈加西亚岛。

## 2 地基光电系统

空间探测是个大课题,涉及的技术层面较多,为了突出地基光电系统成像观测空间目标的特点,本文将详细介绍美国空军研究实验室定向能理事会在新墨西哥州柯特兰空军基地星火光学靶场的3.5 m口径望远镜系统及美国空军定向能理事会在夏威夷毛伊岛光学站建立的3.67 m口径AEOS望远镜系统。这两套先进的地基光电系统所展示的设计理念及先进的单元技术成果对我们今后研制类似的大口径系统具有指导意义,特别在自适应光学应用上所展现的技术多样性更具指导意义。

### 2.1 星火光学靶场3.5 m口径望远镜系统

#### 2.1.1 系统概况

星火光学靶场(SOR)隶属于美国空军研究实验室定向能理事会,位于美国新墨西哥州柯特兰的东南末端,掩映在马扎罗(Manzano)山脉的丘陵中<sup>[2]</sup>,它是空军用于自适应研究的世界级观察台。靶场的设计建设始于上世纪80年代初,到2005年才完成所有系统的安装调试工作。靶场布局如图1所示。

靶场的用途主要是为了研究地基激光束控制技术。通过自适应光学的应用进行综合束控试验,以验证满足GBL反卫武器的光束控制和大气补偿系统的可行性和综合能力。利用系统资源先后开展了对卫星的激光照明主动跟踪成像<sup>[3]</sup>、对卫星激光测距、长波红外捕获跟踪卫星、自适应光



美军先后开展了低轨卫星激光照明、强激光束对卫星照射及卫星主动跟踪等实验<sup>[3]</sup>。美国空军飞利浦实验室开展泛光束实验,对低轨卫星及不带角反射器的卫星进行相干激光束照射<sup>[4]</sup>,用近红外相干激光对选择的低轨卫星照射并在可见光波段进行跟踪。此外,先后对38种不同卫星进行了照亮。用1 m净口径星火光束定向器发射激光照明,用1.5 m口径望远镜进行捕获跟踪。强激光束对卫星照射实验采用了红宝石激光及YAG倍频激光。红宝石激光为20 J(6 ms),YAG倍频激光为0.09 J(10 ns,20 Hz)。该实验主要是演示激光束快速指向卫星将其照明并进行精确跟踪。实验中对带角反射器斜距1 000~6 000 km的几种低轨卫星进行了激光束照射。用1.5 m口径望远镜进行红宝石激光返回接收;用3.5 m口径望远镜进行YAG倍频激光返回接收。

利用星火1.5 m口径望远镜加装长波红外相机对卫星进行全天候捕获跟踪而无需目标照明,所用相机为128 pixels×128 pixels Si:As焦平面LWIR相机,波段为7~24 μm。

飞利浦实验室在1995~1997年利用星火3.5 m口径望远镜对卫星开展激光测距实验<sup>[5]</sup>。所用激光为YAG倍频激光(300 mJ,250 ps,10 Hz)。对GPS、NAVSTAR等卫星进行测距,所得数据用于对其轨道修正。轨道高度:GFZ(400 km),GPS(20 000 km)。

## 2.2 毛伊岛光学站3.67 m口径望远镜系统

### 2.2.1 系统概况

毛伊光学站架设在毛伊岛上高4 048 m的哈莱卡拉山上,主要包括毛伊光学系统(AMOS)、毛伊光学跟踪识别设施(MOTIF)及毛伊高级光电系统(AEOS)。

毛伊光学系统(AMOS)是一套光度测量和激光设备,它的基本任务是开发新型光电探测设备,同时也承担对航天飞机和卫星的观测,对轨道碎片的探测和跟踪,并执行对卫星进行激光照射的任务。空军毛伊光学系统包括一台1.58 m卡塞格伦望远镜、一台激光发射器和一台AMOS获取设备。用这个系统进行的空间探测包括测量、跟踪、红外目标识别和补偿成像。激光发射器用于在夜间照射空间目标,使望远镜能对目标成像。

望远镜的分辨率相当高,能够分辨出航天飞机敞开的有效载荷舱中的物体,可识别出同步轨道上10 cm大小的物体。1993年进行了对AMOS白天近红外成像系统(ADNIS)的试验,使毛伊光学系统的工作时间从局限于夜间扩大到全天24 h。

毛伊光学跟踪识别设施(MOTIF)代号TEAL BLUE,由两台并联安装的1.22 m卡塞格伦望远镜组成,从1979年10月开始即成为空间测控网的专用设备。该系统能对近地轨道和深空空间目标进行可见光和长波红外成像识别,对于轨道高度≤4 800 km的卫星,能够测量其反射特性、热辐射特性并能成像<sup>[6]</sup>。这个系统原来只能在有限的时段工作,1990年对其中一台望远镜进行了改造,使其在日落前和日出后各能工作2 h,使每天的工作时间从6 h增加到10 h。

毛伊AEOS是一种采用自适应技术的大型空间目标跟踪望远镜。该望远镜系统由一台主望远镜和一台辅助望远镜组成,主望远镜口径为3.67 m,辅望远镜口径为1.6 m。望远镜安装在直径27.4 m的圆顶内,望远镜工作时,圆顶打开并整体下降。这样的设计可使望远镜整个外露,以保持周围温度一致,还可排除震动,从而提高空间目标成像的质量。系统布局如图4所示。



图4 毛伊光学站布局

Fig. 4 Photo of Maui optical station

### 2.2.2 AEOS 3.67 m口径望远镜

AEOS的3.67 m望远镜如图5所示,系统建于1997年。系统总重120 t,主镜直径3.67 m。主镜镜面采用可变形弯月形薄镜,背面装有941个促动器,用以驱动镜面变形,以补偿因大气扰动引起的空间目标图像畸变。系统为主动光学系



图 5 带 AO 的 3.67 m 口径大型望远镜

Fig. 5 3.67 m large-aperture telescope with AO

统,望远镜视场角为 1 mrad,能极有效地跟踪和识别空间目标,并能探测近地轨道(轨道高度在 300 km 以下)上 10 cm 大小的碎片。

利用 AEOS 进行光学配对探测具有很多优点。3.67 m 口径允许快速探测暗弱目标,且夏威夷岛的海拔高度提供了好的大气视宁度条件,便于夜间观测碎片目标。在哥伦比亚号航天飞机失事的前 4 天,利用 3.67 m 望远镜长波红外摄像机成功记录并拍摄了航天飞机在轨图片,获得了高清晰图像,为后续事故原因分析提供了直接有效的第一手资料。图 6 为该图片。

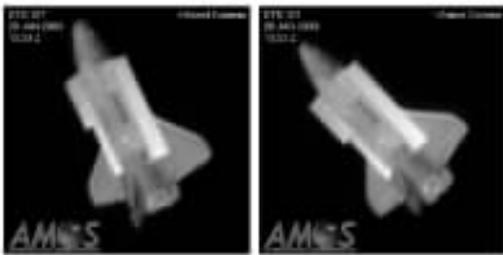


图 6 哥伦比亚号航天飞机

Fig. 6 Columbia space plane

### 2.2.3 AEOS 自适应光学系统

据 2002 年的报道,AEOS 系统首次采用两种新颖的自适应光学方案,在地面试验过程中获得了 SEASAT 卫星图像和国际空间站图像。在该系统中作为变形镜的替代方案采用了基于 MEMS

技术的“静电薄膜镜”及基于液晶技术的“双频向列相液晶”这两种新型器件<sup>[7]</sup>。传统的自适应光学系统受限于高价位、高功耗及大尺寸空间,只能在天文、激光束控制、眼科医学成像及激光通信等部分系统中应用,基于静电薄膜镜及双频向列相液晶技术的自适应光学系统则具有低价位、低功耗及尺寸小而轻等优点,除天文应用外,还可用于激光束控制、激光腔模式控制、眼科医学成像、激光通信及实时全息照相。应用方式除固定站应用外,还可扩展到舰船、载车等动载体的军事商业应用方面,甚至天文爱好者也可应用。在此次对这两种新型器件的概念演示验证过程中,只对太阳照明的明亮的地球低轨卫星成像。由于器件动态范围及执行元件元数匹配的限制,自适应系统只利用了 3.67 m 口径内的 1.12 m 口径。

#### (1) 静电薄膜镜

典型的微机械薄膜镜是在印刷电路板支架上固定硅片,在硅片上镀镍层作为基底,然后镀上铝膜构成薄膜镜。电极阵列被制作在印刷电路板上,当电极通电时,在电极上面的薄膜镜部分就会产生静电力,引起镜面变形。如图 7 所示,闭环 Strehl 比可达到 1。图 8 为叠加上 Shack-Hartmann 透镜组的薄膜镜电极分布图,具有 37 执行元的器件。电极布成六角形,薄膜镜直径仅为 15 mm,电极中心距为 1.75 mm。由于不能控制接近边缘的部分,因而只能控制薄膜镜电极阵列 70% 的部分。正方形的 Shack-Hartmann 波前传感器阵列布局可以匹配上探测器阵列入瞳焦面。透镜组阵列由边长为 600 μm 的正方形阵列组成,焦距为 72 mm。波前传感器相机为 64 pixels × 64 pixels

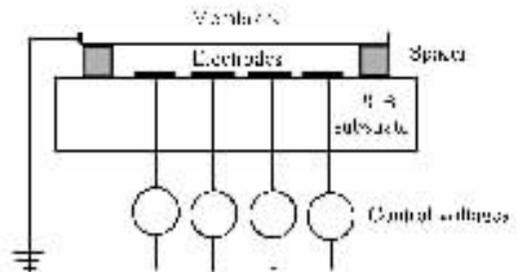


图 7 静电薄膜镜原理图

Fig. 7 Schematic diagram of electrostatic membrane mirror

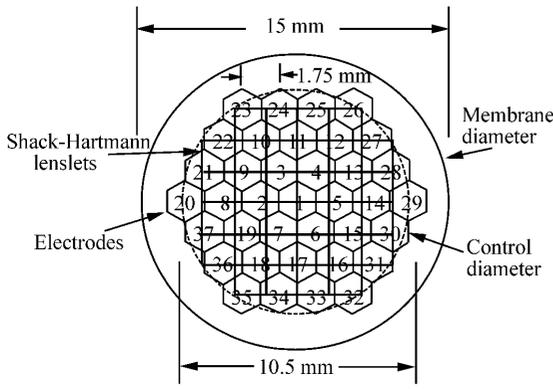


图 8 电极布局原理图

Fig. 8 Schematic diagram of pole layout

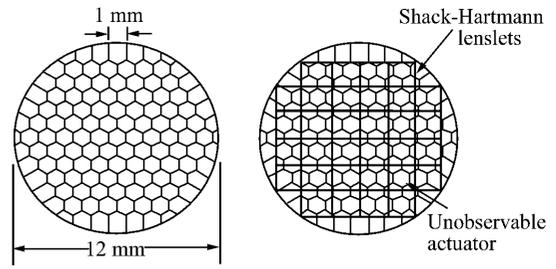


图 10 元数分布图

Fig. 10 Distributions of the elements

Lincoln 实验室 12 位相机 帧频 1 300 frames/s, 可构成开环带宽为 1 000 Hz 的波前控制系统。

(2) 双频向列相液晶器件

液晶是一种兼具液体和晶体双重特性的材料,它是单轴双折射材料,具有介电常数不同的两个轴(快轴和慢轴),受慢轴取向的光偏振相位将受快轴偏振的影响。向列相液晶性质是当交变电场作用于材料时晶轴发生旋转,导致相位延迟,使晶轴与光传播方向不再互相垂直。使用双频材料是为了快速降低和提高相位延迟,原理如图 9 所示。叠加上 Shack-Hartmann 透镜组的多块液晶器件元数分布如图 10 所示。在 12 mm 的圆面上布置了 91 个液晶单元。图中显示了液晶元与波前传感器透镜组在几何形状上的不匹配,这种不匹配会造成波前传感器探测波前倾斜时产生放大效应。为了解决这一问题,系统采用了空间滤波

技术。影响自适应应用的主要限制是液晶材料的色散,限制了光学频带不能超过几百纳米,但对太阳照亮的低轨卫星的可见波段的观测是可行的。

图 11 为利用薄膜镜器件获得的 SEASAT 卫星图像,波前传感器每个透镜的视场为 30 μrad。图 12 为利用液晶器件获得的国际空间站图像,波前传感器每个透镜的视场为 60 μrad。

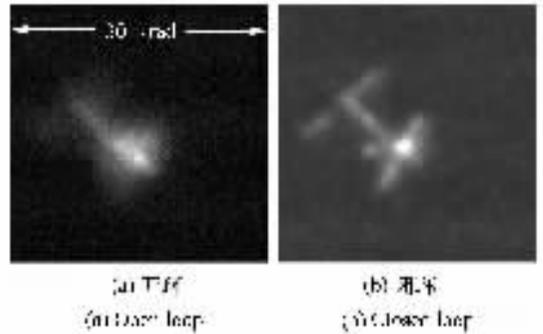


图 11 SEASAT 卫星图像

Fig. 11 Image of SEASAT satellite

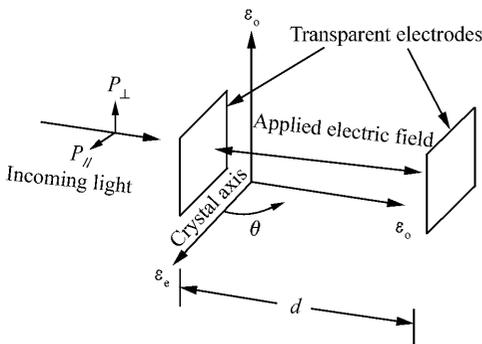


图 9 双频向列相液晶器件原理图

Fig. 9 Schematic diagram of double-frequency nematic liquid crystal device

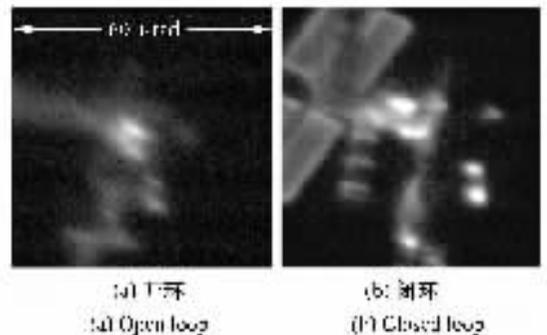


图 12 国际空间站图像

Fig. 12 Image of international space station

### 3 对卫星成像的大口径地基光电观测设备方案设计

(1)基于国内外相关设备情况,若开展“对低轨卫星成像的地基光电望远镜系统”的研制,口径定位在 $\varphi 1.8\text{ m}$ 是现实可行的,从镜体毛坯料的购买到加工都是可以解决的。

(2)主系统采用卡式结构,能同时满足可见及 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 、 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 两个红外波段的观测为最好,以可见光为主。

(3)系统应是一个功能可扩展的公用光学平台(可开展环境热控、跟踪架控制、镜体控制、镜体清洁、光学准直、卫星跟踪、低轨卫星跟踪成像及高次波前补偿和激光反卫等实验)。

(4)系统采用地平式结构跟踪架,固定站工作方式。

(5)基于SOR3.5 m的实验结果,对800 km轨道高度的人造卫星进行成像时,可分辨30 cm尺寸细节,该系统所表现出的分辨能力为 $0.1''$ 。对

轨道高度为340 km的低轨卫星,若能分辨30 cm尺寸细节,设备的分辨能力应为 $0.2''$ 左右。若要克服大气扰动( $1\sim 2''$ )的影响,必须采用自适应光学技术。

(6)该系统中的自适应光学技术的方案应重点选择基于液晶技术的双频向列液晶器件构成的自适应系统,同时,研制发展基于MEMS技术的静电薄膜镜构成的自适应系统,以保证系统紧凑、结构简单。

### 4 结束语

大口径光电望远镜具备较高的集光能力和分辨力,配备上AO系统及主动光学系统后展现出了非凡的探测能力,在天文观测、航天领域具有巨大潜在应用价值。在这一领域,我们和科技发达国家还存在很大的发展差距,随着相关单元技术的进步和积极的技术积累,开展 $2\sim 4\text{ m}$ 级大口径望远镜系统的研制已成为可能,这是一种带有领域性的系统技术。

#### 参考文献:

- [1] 李东源. 国外的地基对空间目标光电探测系统浅析[J]. 光电对抗与无源干扰, 2003, 69(1): 9-11.  
LI D Y. The foreign ground-based electro-optic detecting system to the space targets[J]. *Electro-optics Warfare & Radar Passive Countermeasures*, 2003, 69(1): 9-11. (in Chinese)
- [2] FUGATE R Q. The starfire optical range 3.5 m adaptive optical telescope[J]. *SPIE*, 2003, 4837: 934-943.
- [3] RIKER J F, FUGATE R Q, HOLCOMB T, et al.. Active tracking with moderate power lasers[J]. *SPIE*, 2004, 5552: 123-132.
- [4] RIDER D B, VOELZ D G, STONE D, et al.. Statistical and radiometric measurements of coherently illuminated, non-augmented low earth orbit satellites[J]. *SPIE*, 2003, 2312: 193-201.
- [5] GILBREATH G C, DAVIS M A, ROLSMA P, et al.. NRL@SOR: Satellite laser ranging with robust links[J]. *SPIE*, 1997, 3065: 116-121.
- [6] COWAN W D, LEVAN P D, BARNABY D P, et al.. Starfire optical range long wavelength infrared acquisition camera, initial performance report[J]. *SPIE*, 2003, 2475: 236-242.
- [7] DAVID D, JOHN G, SERGIO R, et al.. Demonstration of new technology MEMS and liquid crystal adaptive optics on bright astronomical objects and satellites[J]. *Opt. Express*, 2002, 10(25): 1508-1519.

作者简介: 张景旭(1965—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要研究方向为大型光电经纬仪的结构设计。

E-mail: zhangjx@ciomp.ac.cn