文章编号:1001-5078(2018)11-1323-07

·综述与评论·

# 相机阵列在空间目标观测中的应用综述

曾海瑞1,孙华燕2,杨 彪1,张廷华2

(1. 航天工程大学研究生院,北京 101416;2. 航天工程大学光电装备系,北京 101416)

**摘** 要:相对大口径光学系统,相机阵列光学系统具有开发周期短、成本低的特点,近年来,被 广泛使用于空间目标观测项目,以实现低成本、大视场、高分辨率、高探测能力的光学观测,在 太空安全中具有重要的应用价值。介绍了国内外相机阵列光学系统在空间目标观测中的应用 现状与最新进展,针对空间目标观测中的需求,着重从视场、分辨率、探测能力三个方向分别对 相机阵列光学系统的结构组成和性能参数进行介绍,并进行比较,总结了相机阵列光学系统在 空间目标观测中存在的问题及发展趋势。

关键词:相机阵列;空间目标;光学观测;太空安全 中图分类号:V556.5 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2018.11.001

# Survey of the application of camera array in space target observation

ZENG Hai-rui<sup>1</sup>, SUN Hua-yan<sup>2</sup>, YANG Biao<sup>1</sup>, ZHANG Ting-hua<sup>2</sup>

(1. Graduate School, Aerospace Engineering University, Beijing 101416, China;

2. Department of Optical and Electronic Equipment, Aerospace Engineering University, Beijing 101416, China)

**Abstract**: Comparing with large aperture optical system, camera arrays optical system has characteristics of short development cycle and low cost, and has been widely used in space object observations in recent years. It has important application value in space security which can bring about optical observation with low cost, wide visual field, high resolution and high detection ability. In the paper, the latest applications and progresses of the camera array optical system at home and abroad are briefly reviewed. In view of the needs of space object observation, the structure and performance parameters of it are introduced from three aspects of field of view, resolution and detection capability. Also the existing problems and development trends of the system in space object observation are summarized. **Key words**; camera array; space object; optical observation; space security

1 引 言

众所周知,随着航天科技的发展,人类空间活动 的加剧,地球轨道空间分布了大量人造目标,包括卫 星、火箭残骸和大量碎片,这些空间目标分布在不同 轨道,严重影响了人类的空间活动,对太空安全造成 威胁<sup>[1]</sup>。因此对这些空间目标进行有效地观测、识 别,具有重要的战略意义<sup>[2]</sup>。空间目标的观测目前 主要有两种方法:雷达观测和光学观测<sup>[3]</sup>。光学观 测具有直观性强,成本低,不受地面杂波干扰影响, 能够对空间目标进行有效搜索跟踪的优势,因此多 国都建立庞大的光学观测系统对空间目标进行 观测。

作者简介:曾海瑞(1995 - ),男,硕士研究生,主要研究方向为空间目标光电探测。E-mail:965588021@qq. com 收稿日期:2018-01-26;修订日期:2018-03-21

空间目标观测又以大视场、高探测能力、高分 辨率为需求。近年来,由于大口径光学观测系统 的种种限制,一些空间目标观测项目选择使用商 用相机阵列和商业摄影镜头来实现低成本、广域 的观测<sup>[4]</sup>。如 FAVOR、RAPTOR、PANOPTES 和 dragonfly 等项目都依赖于多个带有商业镜头的相 机,每天晚上都可以在广阔的天空中对空间目标 进行观测<sup>[5-8]</sup>。相对大口径光学系统研制周期 长、发展技术困难,成本高的缺点,相机阵列光学 观测系统具有开发周期短、分辨率高、视场大、探 测能力强的优势,发展迅猛<sup>[9-10]</sup>。因此基于各种 应用需求,国内外都在相机阵列系统上进行了大 量的研究,利用相机组阵特性在各个能力等方面 突破,提高性能。本文主要从大视场、高探测能 力、高分辨力这三个方面对国内外相机阵列光学 系统在空间目标观测中的应用现状进行介绍,分 析了其存在问题和发展趋势。

为了更好地了解相机阵列在空间观测中的广泛 应用,表1列出了近年来,国内外运用到相机阵列系 统且较为著名的空间观测项目。

表1 使用商用镜头的相机阵列的项目列表

Tab. 1 list of items for the camera array using commercial lenses

Project	Start	Name	Description
AROMA-W	2010	AGU Robotic Optical Monitor for Astro-physical objects, Wide-field	Active galactic nuclei
ASAS-SN	2013	All Sky Automated Survey for SuperNovae	Supernova search
AWCam	2012	Arctic Wide-Field Camera	Exoplanet search from high latitudes
CAMS	2010	Cameras for All-sky Meteor Surveillance	Minor meteor shower observation
CATS	2012	Compound Arctic Telescope Survey	10000 square degree transient and transit search
COLD	2012	Commercial Optics for LEO Debris	Wide-field search for space debris in LEO
ConCam	2003	Continuous Camera	All-sky camera for monitoring transient phenomena
DragonFly	2016	Dragonfly Telephoto Array	Low surface brightness objects
EvryScope	2014	Wide Seer, full-sky gigapixel-scale telescope	Time-domain all sky observation for exoplanets, supernova et al
FAVOR	2005	Fast Variability Optical Registration	Sub-second time domain, wide-field imaging
FlyEye	2013	Fly's Eye Camera System	Large etendue time-domain survey
HAT	1999	Hungarian-made Automated Telescope	Extra solar planet detection
Honghe		Honghe Station Lens Array	LEO satellite tracking
ISON VT-53e	2003	International Scientific Optical Network	Satellites in low earth orbit
KELT	2007	Kilodegree Extremely Little Telescope	Transiting exoplanets
MASCARA	2014	Multi-Site All Sky Camera	Finding key targets for exoplanet atmosphere studies
MASTER-VWF	2009	Mobile Astronomical System of the TElescope Robot-Very Wide Field	Prompt GRB observations
MiniMegaTortora	2010	Telescopic Ottimizzato per la Ricerca dei Transienti Ottici RApidi	Rapid transients, meteors, satellites in LEO
MMT-6	2012	Mini-Mega-Tortora-6-lens system	Rapid transients, meteors, satellites in LEO
MMT-9	2014	Mini-Mega-Tortora-9-lens system	Rapid transients, meteors, satellites in LEO
Mini WASP	2012	Mini Wide-Area Search for Planets	Amateur exoplanet search similar to WASP
PANOPTES	2014	Panoptic Astronomical Networked Optical observatory for Transiting Exo- planets Survey	Transiting exoplanets
PSS	2012	Photopic Sky Survey	All sky, high resolution, full color image
Pi of Sky	2009	Pi of Sky	Search for short duration optical transients
QES	2010	Qatar Exoplanet Survey	Exoplanet discovery
RAPTOR	2002	RAPid Telescopes for Optical Response	Detect and track transient objects
Sova-5	2014	Sight-part of the Pritsel system	Satellites in low earth orbit
Starbrook (UK)	2010	United Kingdom Satellite Surveillance	Space situational awareness-satellite tracking
SuperWASP	1999	Super Wide Angle Search for Planets	Photometry of planetary transits
TrES	2004	Trans-Atlantic Exoplanet Survey	Exoplanet search
SSA	2012	Lens Array Demo	Space situational awareness-satellite tracking
WIDGET	2004	WIDefield telescope for Gamma-ray burst Early Timing	Gamma-ray burst optical after glow monitoring

#### 2 大视场相机阵列系统

对于观测系统的大视场需求,根据几何光学原 理,望远镜系统视场和焦距成负相关关系<sup>[11]</sup>,在不 降低焦距的情况下,相机阵列系统采用多镜头多传 感器系统对空间不同区域进行观测,来扩大观测 视场<sup>[12]</sup>。

#### 2.1 基于视场拼接的大视场相机阵列系统

日本的青山学院大学于2010年开始进行 ARO-MA-W项目,该项目用于对广域天体目标的自动化 光学测量<sup>[13]</sup>。该项目的成像系统由 12 台数码单反 相机组成,包括2台f200 mm/F2.8的佳能EOS5D 和 10 台 f 100 mm/F 2.0 的 EOS350D 相机,如图 1 (a) 所示, 光轴指向不同, 经过视场拼接后, 系统观 测视场达到 45°×30°,极限探测星等为 12(曝光时 间为20s),后端接有四台计算机,进行数据分析与 控制。每台照相机和赤道望远镜都由一台计算机控 制,观测数据分别由四台计算机获取,并通过局域网 转发到一台分析机,分析机可以实现自动化的点目 标提取,并与星表进行比较,以确定目标位置,从而 对光学瞬变现象进行记录,实现空间目标的检测与 跟踪。



(a)成像系统

图 1 AROMA-W 系统

Fig. 1 AROMA-Wsystem

该相机阵列系统的优势在于利用佳能 EOS5D 和350D相机的视场大小不同,按照一定的位置进 行设置组合,经过调整指向,使得重叠视场变小,可 观察视场大大增加。最后经过有效的视场拼接,将 各个相机同时观察到的图像拼接在一起,实现大视 场观测,从而可以对更多的目标进行监视、识别。但 是由于此系统的成像系统采用的是不同镜头,所以 不同相机之间球差、像散和畸变差异较大,导致图像 差异大,使目标的数据提取比较造成困难,如光度 测量。

2009年,匈牙利科学家 Bakos G 等人发起 HAT-South 监测网络<sup>[14-15]</sup>,是世界上第一个完全采用同 类自动控制宽视场望远镜组成的全球天体监视网 络,其具备整个半球的全天时监控能力,它的相机均 采用相同型号类型。该监视网络构建的主要目标是 探测识别大量的长周期小半径的太阳系外行星。 HATSouth 采用6组望远镜阵,布设在南半球的三个 不同位置,每个测站布置两组系统,实现了全经度覆 盖。如图2所示,单个望远镜阵列采用4个0.18 m 口径、f/2.8的商业天文望远镜,视场为8.2°×  $8.2^{\circ}$ ,后端采用四个 4k × 4k 的商业相机成像。各 个站的两组系统的监视网络可以实现 2°×8.2°× 8.2°立体角的连续观测。



图 2 装有 4 台相机的 HATSouth 分系统 Fig. 2 HATSouth subsystem with 4 cameras

为开展地球同步轨道(GEO)空间目标监视试 验,上海天文台在2017年研制了具有超大视场的 "地球同步轨道带动态监视光学系统样机"<sup>[16]</sup>。系 统样机由4个尼康定焦镜头组成,分别安装在4个 赤道仪上,镜头口径为143 mm,焦距为400 mm,分 别配备一台科学级 CCD 相机, 分辨率为 3056 × 3056, 像素尺寸为 24 µm。单个单元视场约为 5° × 5°,构成相机阵列后视场可达到10°×10°。经过视 场拼接得到大视场图像后,通过后端数据处理技术, 用相邻帧图像差分法去除大部分恒星虚警,利用航 迹关联确认目标,每个夜晚可观察识别视场内50个 GEO 目标,能够同时对 27 颗 GEO 目标进行连续 观测。

基于视场拼接的大视场相机阵列系统主要包括 前端成像系统和后端数据处理系统。前端成像系统 由不同组的多个相机构成,相机的视场大小可以不 同,经过一定的指向调整,使得视场重叠区域尽量地 减小;后端处理系统主要包括图像处理系统和数据 分析系统,关键技术是图像拼接。

2.2 基于广角镜头的大视场相机阵列系统

为了使系统达到更大的视场,对整个天空进行 全方位观测,在视场拼接的基础上,人们往往使用半 球形照相机,如鱼眼镜头相机和反射式全天空相机。 但是此类相机的一个重要限制是它们有效的光阑很 小<sup>[4]</sup>。而洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory)开发的 RAPTOR-Q 系统<sup>[17]</sup>选择另 一种方法,使用一些小的广角镜头来覆盖所有或大 部分可见的天空。该系统使用了 5 个 *f* 24 mm/*F* 1.4 的镜头,有效孔径为 17.14 mm,视场几乎是典 型的鱼眼镜头或反射式全天空照相机的三倍。最后 将图像拼接在一起,视场可以达到 180°×180°。图 3 显示了来自 RAPTOR-Q 系统的示例图像。



(a)成像系统

(b)系统拍摄图像

图 3 RAPTOR-Q 系统 Fig. 3 RAPTOR-Q system

2.3 高时间分辨率下的大视场相机阵列系统

为了在大视场观察的同时,提高时间分辨率,俄 罗斯的天体物理天文台于 2012 年研制了 MMT –  $6^{[18]}$ 项目,实现对空间目标进行快速广域的测量,对 于这样的监控,需要选择最优的参数集,即视场的角 度大小、探测极限星等和时间分辨率。事实上,在观 测区域 $\Omega$ 检测到的事件数量M与焦距F、CCD 像素 个数 $N^2$ 、像素大小u、目标直径D、焦距F、曝光时 间t以及事件持续时间T有关,关系如下所示:

$$M \propto \Omega \cdot \text{Flux}_{\min}^{-\frac{3}{2}} \left(\frac{t}{T}\right)^{-\frac{3}{2}} = D \left(\frac{D}{F}\right)^{\frac{1}{2}} T^{\frac{3}{2}} t^{-\frac{3}{4}} N^2 u^{\frac{1}{2}}$$
(1)

式中, Flux<sub>min</sub>为可检测到物体的最小光通量。由上 式可以看出,随着曝光时间的减短,时间分辨率的提 高,可检测物体的最小光通量减小,从而可以在更大 的视场内发现更多的事件。基于此原理,该项目通 过在6路不同的望远镜光路系统中前部加入不同的 颜色滤光片和偏振片,形成不同的组合,其单通道光 路设计如图4所示,设置不同曝光参数对空间目标 进行图像采集,以获得空间目标的瞬时不同的颜色 信息和偏振信息,最大视场达到 30°×30°,时间分 辨率达到亚秒级。

该系统采用模块化设计,由一组基本单元组成, 每个单元安装6个相机,分别安装在单独的挂载上。 单元内的每一个相机都放置在具有遥控控制的悬架 内,因此可以独立于其他装置。此外,每个通道都拥 有一套颜色和偏振滤光器,可以拆卸。系统具有不 同运行方式:在单色或者白光的常规大视场观测,提 供最好的信噪比;窄小视场跟踪观测,所有的相机都 指向同一点,即新发现瞬态,并观察它不同的颜色和 不同的偏振信息,同时获得所有可能的瞬态类型的 信息。模式转换预计将小于 0.3 s。



图 4 MMT-6 项目单通道光路设计方案

Fig. 4 MMT-6 project single channel optical path design scheme

为了直观地了解不同的大视场相机阵列系统的 区别,表2列出了不同的大视场相机阵列系统的性能参数。

表2 各大视场相机阵列系统性能参数对比

Tab. 2 Comparison of performance parameters

of	each	large	field	camera	array	system
----	------	-------	-------	--------	-------	--------

Name	Field of View∕(°)	Temporal Resolution⁄s	Limit/ 级数	
WIDGET	62 × 62	5	10	
RAPTOR A/B	40 × 40	60	12	
RAPTOR Q	180 × 180	10	10	
BOOTES	16 × 11	30	12	
$\pi$ of the Sky	33 × 33	10	11.5	
AROMA-W	25 × 25	5 ~ 100	10. 5 ~ 13	
MASTER-VWF	20 × 21	5	11.5	
MASTER-Net	30 × 30	1	9	
FAVOR	16 × 24	0.13	10 ~ 11. 5	
TORTORA	24 × 32	0.13	9 ~ 10. 5	
Mini-MegaTORTORA	30 × 30	0. 13 ~ 1300	12. 5 ~ 17. 7	

由表2可以看出,虽然以上项目的相机阵列系 统都实现了视场的扩展,但是扩展的范围以及其他 的性能参数均有所差异。由于采用了广角镜头, RAPTOR Q 系统的视场最大,但是其探测能力较低; MMT 系统的时间分辨率最高,并且探测能力较强, 这主要归功于其独特的光路设计(在不同通道的光 路中加入不同滤光器组合),但是其视场却只能达 到 30°×30°。因此在大视场相机阵列系统中镜头 的选择和光路的设计尤为关键。

#### 3 高探测能力相机阵列系统

相机阵列系统的高探测能力是通过高精度同步 控制实现的,使相机阵列系统各子成像系统对同一 目标区域同时成像,利用多帧图像的交集部分,进行 图像的叠加,可以降低对目标的亮度要求,从而提高 系统的探测能力。

美国的泛星计划<sup>[19]</sup>,成立于 2002 年,目的是观 测并搜寻可能会撞向地球的小行星,其采用 4 架口 径 1.8 m 望远镜对准同一天区,数据将经过对比以 移除由于芯片缺陷产生的 CCD 伪影以及像素坏点 和宇宙射线的影响,然后把光线输入汇总(图像叠 加),暗天体所占像元上的光电信号被叠加到 4 倍, 相对孔径等效于单个的 3.6 m 天文望远镜。然而 CCD 的噪音(热噪音和读出电路的噪音)数量较小, 只占像元数值的极小一部分,并且具有随机误差特 点,也即 4 个 CCD 上的噪音不会在精确对应的像元 上发生相加,提高了图像信噪比。

Dragonfly项目<sup>[8]</sup>是由美国多伦多大学主导进 行的,在2016年对宇宙中表面超低亮度的星系结构 进行自动化普查。该项目的成像系统如图5(b)所 示,由24个f400 mm/F2.8的佳能长焦镜头组成, 口径135 mm,表面涂有高性能的亚波长纳米复合光 学涂层,统一安装在一个框架上,构成相机阵列,并 包括24个科学级的商用CCD。图5(a)系统成像能 力相当于一个口径0.4 m、F1.0的折射望远镜,视 场为2.6°×1.9°。系统镜头和相机个数最初为8 个,镜头采集的数据由非共用的光路分别进行传输, 对空间光度变化进行仔细跟踪,从而减少系统误差, 提高背景估计和目标识别的准确性。

国内,2008 年长春光学精密机械与物理研究所 王鸣浩等人利用4台110 mm 口径望远镜搭建了捆 绑式望远镜系统实验平台,提出了将多镜筒捆绑在 一起对同一空域进行观测。通过对多路图像进行叠 加来抑制背景随机噪声、提高图像的信噪比和系统 的整体探测能力,实验证明:图像信噪比平均提高 1.58倍,探测能力近似提高 0.5个星等<sup>[20]</sup>。2009 年,国防科技大学 ATR 实验室<sup>[21]</sup>也利用四个小口 径的大视场望远镜组成一个望远镜束系统,经过图 像配准叠加,信噪比提高 1.4 倍。



图 5 Dragonfly 成像系统 Fig. 5 Dragonfly imaging system

航天工程大学光电工程教研室于 2013 年设计 相机阵列光度测量系统<sup>[9]</sup>,能够实现对空间目标的 有效跟踪测量,如图 6 所示。成像系统由 2 个佳能 EOS-1DC 相机和 2 个天文相机组成,镜头为 4 个 f 400 mm/F 2.8 的佳能镜头,1DC 相机的探测星等 可达到 11.85,天文相机可达到 13.82。系统通过相 机组阵,突破单个相机极限探测星等,探测能力提高 约0.416 个星等。除此之外,在观测快速运动空间 目标过程中,通过合理设置曝光时间,可在短曝光条 件下达到长曝光时间的探测能力,在提高探测能力 同时,避免了运动模糊。



图 6 航天工程大学相机阵列光度测量设备 Fig. 6 Camera array photometric equipment of space engineering university

由以上不同的高探测能力相机阵列系统可知, 当各个相机指向空间同一目标区域时,经过对不同 相机获取到的图像交集部分进行叠加等处理,的确 能降低目标的亮度要求,提高系统的探测能力,但是 同时也降低了系统的视场,使得可同时观测目标数

### 4 高分辨率相机阵列系统

对于高分辨率的需求,斯坦福大学利用100个 佳能相机,进行一定组阵排列,构建了高分辨相机阵 列系统<sup>[22]</sup>,在成像不完全重合情况下,适当降低各 相机之间成像重合度并增加相机个数,然后将各相 机获取的图像进行融合,从而显著增加成像分辨率。 除了多镜头多传感器系统,多镜头单传感器阵列系 统在空间目标观测中应用也很广泛,其中以合成孔 径望远镜为代表。根据光束组合方式不同,合成孔 径望远镜分为迈克尔逊型和菲索型<sup>[23]</sup>,如图7所 示。欧洲地基系统的旗帜甚大望远镜阵列(Very Large Telescope Array)<sup>[24]</sup>属于迈克尔逊型望远镜, 其由四个口径为 8.2 m 的主望远镜和四个口径为 1.8 m 的可移动望远镜组成。不同望远镜的光束组 合在一起,然后通过干涉仪发生干涉获取相干信息。 迈克尔逊型望远镜利用多个镜头获取多通道,将来 自不同位置孔径的光传输到光束合成器上,在出瞳 面上获得干涉条纹,即复相干度信息,经傅里叶逆变 换获得目标的像。



(a)甚大望远镜阵列
 (b)菲索型望远镜
 图 7 迈克尔逊型和菲索型望远镜
 Fig. 7 Michelson and fiso telescopes

美国 NASA、JPL 和洛克希德·马丁((Lockheed Martin)先进技术中心<sup>[25]</sup>建立了由9个125 mm 口径独立小望远镜组成的等效口径为610 mm 的多孔径菲索型成像干涉仪实验系统,该系统能够通过提取波前信息获得相位差异的传感技术实现倾斜误差和相位误差的控制。美国麻省理工学院(MIT)空间系统实验室<sup>[26]</sup>开展了自适应侦查 Golay3光学卫星的研究工作,对子孔径结构、子孔径控制和多孔径相位主动光学控制进行了研究,并已经建造了自适应光学 Golay3 望远镜实验系统,系统是由三个口径210 mm 的独立小望远镜呈正三角形排列构成的合成孔径阵列,等效直径 600 mm,通过采用自适应控制技术实现波前的精密控制,达到高精度的共相

成像。

## 5 结 论

随着世界各国空间活动的加剧,空间目标逐日 增多,因此对空间目标进行有效地监测、识别,在太 空安全中起着关键的作用。本文从大视场、高分辨 率、高探测能力三个方向,就相机阵列光学观测系统 在空间目标观测中的应用现状进行介绍和分类,并 对不同项目的相机阵列进行比较,分析性能参数的 差异及其原因,并强调后端图像处理的重要性。虽 然相机阵列系统在空间目标观测的应用广泛,但同 时也存在一些缺点,也是之后研究需要克服的困难, 主要表现在:

1)镜头和传感器之间的非一致性。各个镜头 和传感器由于制造工艺的问题,在光学性能上不能 保持一致性。

 2)分系统控制精度。各个分系统不管指向同一区域以提高探测能力,还是不同区域以增大视场, 都对其指向精度提出了很高的要求。

3)相机镜头性能本身的局限性。相机阵列系统大部分选用商业镜头,相对专业定制的天文镜头,商业镜头的热稳定性、灵敏性等一些性能会有所欠缺。

#### 参考文献:

- [1] WANG Jianli. Development of technologies for detection and identification of space objects with ground-based E-O systems[J]. Journal of Spacecraft TT & C Technology, 2015,34(6):489-499. (in Chinese)
  王建立.空间目标地基光电探测与识别技术的发展
  [J].飞行器测控学报,2015,34(6):489-499.
- [2] LIU Hao, Zhe L I, Shi J, et al. Study on classification and recognition of materials based on convolutional neural network[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(8):1024 1028. (in Chinese)
  刘昊,李喆,石晶,等. 基于卷积神经网络的材质分类

刈天,字前,石间,寺·基丁卷枳枰经网络的材质分尖 识别研究[J].激光与红外,2017,47(8):1024 - 1028.

- [3] SHAN Bin, LIANG Yongqi, LI Hengnian. Attitude and angular speed estimation of spacial objects based on photometric observation [J]. Acta Optica Sinica, 2017 (5): 136 147. (in Chinese)
  单斌,梁勇奇,李恒年. 基于光度观测的空间目标姿态 与角速度估计[J]. 光学学报,2017(5):136 147.
- [4] Ackermann M, Cox D, Mcgraw J, et al. Lens and Camera Arrays for Sky Surveys and Space Surveillance [C]//Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies

Conference, 2016.

- [5] Kasahara S. FAVOR (FAst Variability Optical Registration)-two-telescope complex for detection and investigation of short optical transients [J]. Astronomische Nachrichten, 2010, 325(6-8):677.
- [6] Vestrand W T, Borozdin K N, Brumby S P, et al. The RAPTOR experiment: a system for monitoring the optical sky in real time [C]// Astronomical Telescopes and Instrumentation, 2002;4845.
- [7] Guyon O, Walawender J, Jovanovic N, et al. The PAN-OPTES project: discovering exoplanets with low-cost digital cameras [C]// SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. 2014, 73 (12):91453V.
- [8] Abraham R, Dokkum P V, Conroy C, et al. Future prospects: deep imaging of galaxy outskirts using telescopes large and small[J]. Outskirts of Galaxies, 2017:434.
- [9] Xu Taohu, Construction and implementation of the space target observation system based on commercial camera
  [D]. Beijing: Institute of Equipment, 2015. (in Chinese)
  徐韬祜,基于商业相机的空间目标实况观测系统构建 与实现[D]. 北京:装备学院, 2015.
- [10] LUO Hao, MAO Yindun, YONG Yong, et al. Optical prototype and experimental results of geosynchronous orbit dynamic monitoring system[J]. Chinese Journal of Space Science, 2017, 37(3):350 360. (in Chinese) 罗浩, 毛银盾, 于涌,等. 地球同步轨道带动态监视光 学系统样机及试验观测结果[J]. 空间科学学报, 2017, 37(3):350 360.
- [11] YU Daoyin, TAN Hengying. Engineering optics[M]. Beijing: Mechanical industry press, 2006. (in Chinese) 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版 社,2006.
- [12] Bersier D. The all-sky automated survey for supernovae [C]// Revista Mexicana de Astronomia y Astrofísica Conference Series, 2016.
- [13] Takahashi I, Tsunashima K, Tatsuhito T, et al. Optical wide field monitor AROMA-W using multiple digital single-lens reflex cameras[J]. The First Year of MAXI: Monitoring Variable X-ray Sources, 2010.
- [14] Bakos G, Afonso C, Henning T, et al. HAT-South:a global network of southern hemisphere automated telescopes to detect transiting exoplanets [C]//IAU Symposium. 2009, 253:354-357.
- [15] Pál A, Bakos G Á. Astrometry in wide-field surveys [J].
   Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2006,118(848):1474-1483.
- [16] LUO Hao, MAO Yindun, YU Yong, et al. A method of

GEO targets recognition in wide-field opto-electronic telescope observation[J]. 光电工程,2017,44(4):465 -465.(in Chinese)

罗浩,毛银盾,于涌,等.利用超大视场光电望远镜观测 GEO 中的目标识别方法[J].光电工程,2017,44 (4):465-465.

- [17] Wren J, Vestrand W T, Wozniak P, et al. A portable observatory for persistent monitoring of the night sky[C]// Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems III. International Society for Optics and Photonics, 2010: 329 - 334.
- [18] Karpov S, Katkova E, Beskin G, et al. Massive photometry of low-altitude artificial satellites on Mini-Mega-TORTO-RA[C]// Revista Mexicana de Astronomia y Astrofísica Conference Series, 2016.
- [19] Kaisera N, Aussela H, Burkeb B, et al. Pan-stars—a large synoptic survey telescope array [ C ]//Proc. of SPIE, 2002:154-164.
- [20] WANG Minghao, CHEN Tao, WANG Jianli, et al. Measurement and analysis of image SNR in binding style telescope[J]. Optics & Precision Engineering, 2009, 17(1): 92 97. (in Chinese)
  王鸣浩,陈涛,王建立,等. 捆绑式望远镜图像信噪比测量及分析[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(1): 92 97.
- [21] WANG Hongyi. A new method to enhance astronomical sky survey[J]. Signal Processing, 2009, 25(8):1228 1232. (in Chinese)
  王宏义,韩建涛,陈曾平. 一种提高天文巡天探测能力的新方法[J]. 信号处理,2009,25(8):1228 1232.
- [22] Wilburn B, Joshi N, Vaish V, et al. High performance imaging using large camera arrays [J]. Acm Trans Graph, 2005,24(3):765-776.
- [23] MEINEL A B. Aperture synthesis using independent telescope[J]. Appl. Optics, 1970, 9:2501 - 2504.
- [24] Umana G, Buemi C S, Trigilio, et al. Spitzer, very large telescope, and very large array observations of the galactic luminous blue variable candidate HD 168625 [J]. Astrophysical Journal, 2010, 718(2):1036-1045.
- [25] WANG Xiaoming, QIAO Yanfeng. Design of foundation multi-aperture imaging system validation experiment[J]. Chinese Journal of Optics & Applied Optics,2010,3(6): 671-678. (in Chinese)
  王晓明,乔彦峰. 地基多孔径成像系统验证实验设计 [J]. 中国光学,2010,03(6):671-678.
- [26] Fan Junliu. Tilt error of Golay3 telescope system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(11):111102.