

平流层飞艇平台光电侦察系统关键技术

李福东 王哲 周峰 安超 曹桂丽

北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 平流层飞艇平台运行在距地面 20 km 的高度,能够长期定点悬浮或者机动巡航,是一个良好的预警、监视、跟踪平台,光电侦察系统是未来平流层飞艇监视侦察装备的核心。简述了平流层遥感相对飞机平台和卫星平台的优点,根据平流层平台的特点,分析了平流层光电探测系统相对飞机平台光电系统在探测距离方面的优势。结合国外典型的光电侦察系统现状,介绍了光电侦察系统的组成和工作原理,并在现有光电侦察系统的基础上,对未来平流层平台光电侦察系统的关键技术进行了研究,给出了相应解决方案,可以为未来平流层光电侦察系统的设计方案提供参考。

关键词 遥感;光电系统;平流层;飞艇

中图分类号 TP70 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.020003

Key Technique of Photoelectric Reconnaissance System for Stratospheric Airship

Li Fudong Wang Zhe Zhou Feng An Chao Cao Guili

Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China

Abstract Stratospheric airship works in stratosphere about 20 km above ground. It can cruise or belocated in the air, and has become a good platform for reconnaissance, surveillance or track. Photoelectric system is an important equipment on the stratospheric airship. The advantage of remote sensing on stratospheric platform is introduced, especially on detectable distance. The components and principle are introduced according to the typical existing photoelectric systems. Furthermore, the key technique of photoelectric system for stratospheric airship is analyzed, and the design method is explained. This paper can be referenced for the design of such systems in the future.

Key words remote sensing; photoelectric system; stratosphere; airship

OCIS codes 280.4991; 280.4788; 040.1490; 110.2970; 110.3080

1 引言

现有的对地观测光电侦察系统主要是基于卫星平台和飞机平台进行设计,两种搭载平台的特性决定了相应光电侦察系统的功能特点:基于卫星平台光电侦察系统在体积、重量及功耗等方面受到严格限制,性能方面具有全球覆盖等优点,但在空间分辨率和时间分辨率方面相对较差;基于飞机平台的光电侦察系统在体积、重量及功耗等方面同样要受到限制,性能方面具有分辨率高、灵活机动等优点,但一般只适用于局域观测,观测区域相对较小^[1-12]。

基于平流层飞艇平台的光电侦察系统可以弥补卫星平台和飞机平台光电侦察系统的不足,能够实现广域观测侦察,具有高空间、高光谱、高时间分辨率的定点观测和对特定目标的实时跟踪能力,具有极高的应用价值。

平流层飞艇运行在距地面 20 km 左右的高度范围,该空间环境温度为 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-60\text{ }^{\circ}\text{C}$,没有强烈的空气对流运动,没有雨、雪、雷、电等气象现象,主要为臭氧集中层,空气中水气、尘埃等非常少,平流层大气流场平稳,风场为均匀风,风速一般 10~30 m/s,风向为东风或西风,环境较为稳定^[9]。

平流层飞艇依靠空气静浮力驻空,具有长期定点驻空和机动巡航功能。平流层飞艇采用太阳能电池作为动力能源,可以实现长达半年以上的驻空时间,并且有效载荷承载能力大,易于部署,可重复使用,在区域防灾减灾、环境监测、城市安全监控、高分辨率实时区域监视、预警和导弹防御、区域通信等方面具有重要的

收稿日期: 2013-07-09; 收到修改稿日期: 2013-09-24; 网络出版日期: 2014-01-20

作者简介: 李福东(1978—),男,高级工程师,主要从事光学遥感器总体设计方面的研究。E-mail: fudg_li@163.com

用途,具有重要的应用前景^[12]。目前美国、欧洲各国、日本、韩国已经开展了大量平流层飞艇平台的试验验证工作,有望在近几年内投入实用。

本文结合国外平流层飞艇平台光电侦察系统现状,介绍了此类系统的组成和工作原理,并对其未来发展的关键技术做了探讨,以为未来平流层光电侦察系统的设计提供参考。

2 平流层光电侦察系统优势分析

光电侦察系统的基本要求包括分辨率高、作用距离远、成像效率高,其中作用距离是衡量光电侦察系统综合性能最重要的一个指标,作用距离的远近决定着系统的目标探测能力。而无论是可见光相机还是红外(IR)相机,其探测距离不仅与相机的光学系统和探测器的性能参数有关,而且还与目标大小、反射率、辐射特性、大气环境有关。在光电侦察系统与目标特点相同的条件下,可见光探测距离 R_{vis} 和红外探测距离 R_{IR} 计算公式分别为

$$R_{vis} = \left[L_T A_T \pi D_0^2 \tau(\lambda) \tau_0 D^* \sqrt{2\tau_d} f \left(4 \sqrt{A_d} \frac{V_s}{V_n} \right)^{-1/2} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

$$R_{IR} = \left\{ \frac{A_d [L_i(\lambda) - L_b(\lambda)] [D_0^2 \tau_0 \tau(\lambda)] f^2}{4 R_{SN}^2 (2-c)^2 e^2 f^2 \Delta f^2 - A_d L_b(\lambda) [D_0^2 \tau_0 \tau(\lambda)]} \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

式中 $\tau(\lambda)$ 为大气透射率, V_n 为探测器的噪声电压, D^* 为探测器的探测率, A_d 为探测器的面积, L_T 为目标的辐射亮度, A_T 为目标的面积, D_0 为光学系统的入射孔径, τ_d 为探测器的驻留时间, τ_0 为光学透射率, $L_i(\lambda)$ 为不同波长的目标辐射亮度, f 为成像系统焦距, $L_b(\lambda)$ 为不同波长的背景辐射亮度, $\Delta f = 1/2\tau$ 为等效噪声带宽。可以看出,系统探测距离与大气透射率平方根成正比关系。

采用MODTRAN辐射分析软件分别对航高20 km和航高6 km,探测距离100 km条件下可见近红外波段和中波红外波段的大气透射率进行了分析,透射率曲线如图1所示。从图中可以看出,可见近红外波段在航高20 km时的平均大气透射率为0.1625,约为6 km航高时平均大气透射率0.0064的25.4倍;中波红外波段在航高20 km时的平均大气透射率0.1615,约为6 km航高时平均大气透射率0.0282的5.8倍。由此可以得出,平流层光电侦察系统与中低空光电侦察系统相比,可以实现更远的目标探测距离,从而大大提高系统的对地观测效率^[13-15]。

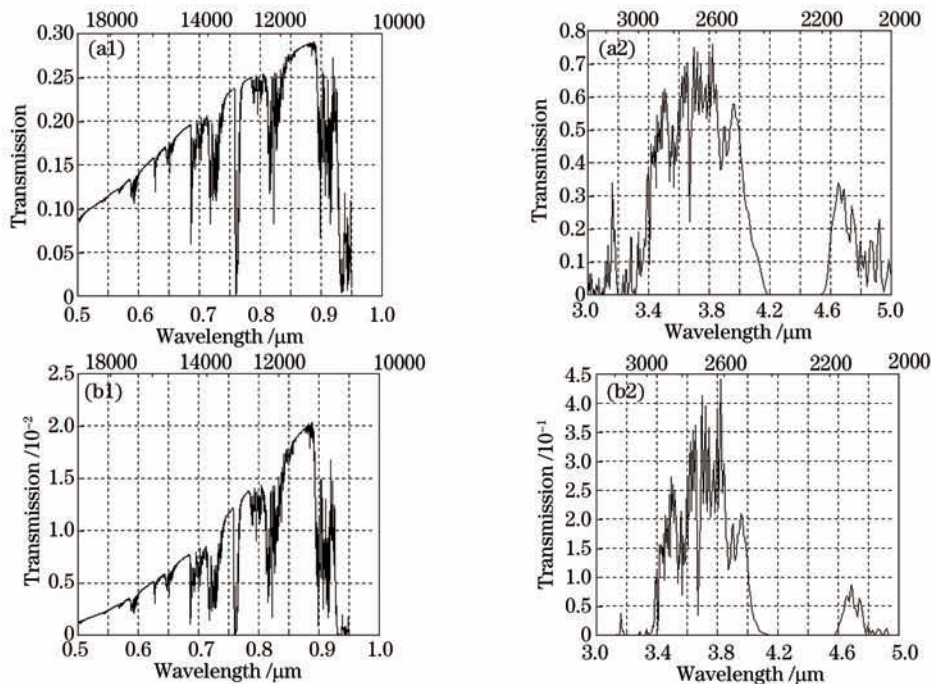


图1 航高(a1),(a2)20 km和(b1),(b2)6 km,斜距100 km时的大气透射率曲线

Fig.1 Atmospheric transmission curves for (a1), (a2) 20 km and (b1), (b2) 6 km altitude and 100 km oblique range

3 国外典型光电侦察系统产品现状

3.1 典型光电系统成像方式

随着数字成像技术的发展,目前美国、英国、德国、俄罗斯、以色列等国家均研制并装备了可见和红外双波段一体的高分辨率昼夜侦察型光电系统。由于受到探测器研制水平的限制,为了能够获得较高的侦察效率,现有的高空光电侦察系统均采取了扫描成像模式。根据系统选用的探测器类型的不同,可以将光电系统分成线阵探测器连续扫描成像型光电系统和面阵探测器步进凝视成像型系统。连续扫描成像型系统按照设定的速度匀速扫描,实现对扫描区域的连续成像;步进扫描凝视成像型系统采取步进的方式,系统转动指定的角度并保持稳定后开始曝光成像,获得一幅目标区域图像,曝光完成后,系统继续转动指定角度并保持稳定曝光成像,即采取前进一步曝光一次的成像方式^[2-7]。两种成像方式的示意图如图2所示。

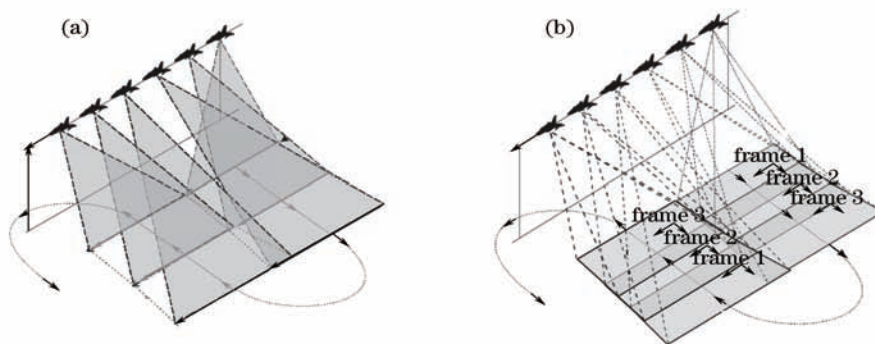


图2 (a) 连续扫描成像示意图; (b) 步进扫描凝视成像示意图

Fig.2 Sketch maps of (a) imaging on continuously scanning and (b) imaging on step scanning and staring

3.2 典型光电侦察系统产品现状

步进凝视成像典型产品主要有美国 Goodrich ISR Systems[Recon/Optical Inc. (ROI)]公司的 CA-295 光电侦察系统,以色列 Elbit Systems Electro-Optics Elop Ltd 公司的 LOROP 光电侦察系统和美国 RAY-THEON 公司的全球鹰光电侦察系统,如图3所示。每个侦察系统都具有可见光和红外两个波段,探测器采用了面阵探测器,可见光和红外共用同一主光学镜头,可以实现精确配合,光学系统安装在两轴稳定框架的内环中,通过两轴稳定框架配合实现步进扫描以及稳定成像模式^[2-7]。

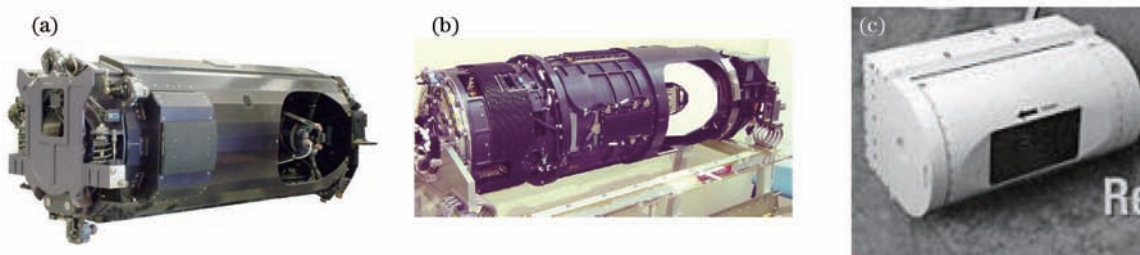


图3 (a) CA-295相机; (b) LOROP相机; (c) 全球鹰相机

Fig.3 Pictures of (a) CA-295 camera; (b) LOROP camera and (c) Global Hawk camera

连续扫描成像典型产品主要有美国 Goodrich ISR Systems[Recon/Optical Inc. (ROI)]公司的 DB-110 光电侦察系统和英国 BAE Systems 公司的 F-9120 光电侦察系统,这两种系统是目前世界上分辨率最高的昼夜战术侦察系统,具有可见光和红外两个波段、探测器选择线阵时间延迟积分(TDI)探测器(DB110红外波段采取面阵探测器加回扫镜的成像方式),双波段共用主光学镜头,在成像时以摆扫全景成像的方式工作。

典型的数字双波段光电侦察系统相关参数如表1所示。

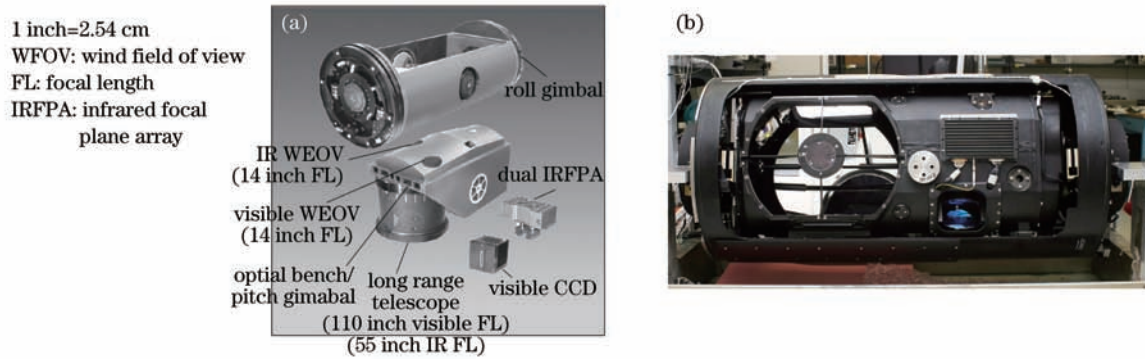


图4 (a) DB-110航空相机; (b) F-9120相机

Fig.4 Pictures of (a) DB110 camera and (b) F-9120 camera

表1 国外典型光电系统主要性能参数汇总表

Table 1 Main parameters of overseas typical photoelectric system

| Typical system | CA-295 | DB110 | ELOP Lorop | Global Hawk | F-9120 sensor |
|----------------------------|------------------------|-----------|------------|-------------|---------------|
| Wavelength / μm | 0.5 ~ 0.9 | 3.0 ~ 5.0 | 0.4~1.0 | 3.0~5.0 | 0.55~0.95 |
| Focal length / mm | 1270 ~ 2540 | 1270 | 2794 | 1397 | 1200 |
| $F\#$ | 4 ~ 8 | 4 | 10 | 5 | 4.8 |
| Sensor size / pixel | 5k×5k | 2k×2k | 6144×128 | 640 ×512 | 3k×1k |
| FOV / (°) | 2.27×2.27 | 2.27×2.27 | 1.1 | 0.63×0.51 | 1.8×0.45 |
| Resolution / (m/100 km) | 0.39 | 1.97 | 0.31 | 1.72 | 1 |
| Image stabilization | 2 axes, roll and pitch | | | | |

4 平流层飞艇光电侦察系统设计关键技术

4.1 总体方案设计技术

光电系统总体方案设计关键是选择适当的探测器器件,明确系统侦察能力,确定光学系统及整机结构形式,确定系统成像方式,最后确定整机构型。

平流层飞艇具备巡航和悬停两种工作模式,为了能够实现大范围的侦察监视成像,光电侦察系统必须具备扫描成像的功能,同时为了克服平台的扰动,应具备像稳定功能。

在成像方式上,采用线阵TDI探测器连续扫描成像模式与面阵成像方式相比较,一方面具有较高的扫描成像效率,可以在短时间内实现较大目标探测范围;另一方面采取TDI的成像方式,能够增强图像质量,提升远距离弱信号的探测能力。

在侦察能力要求方面,目前光电系统能够实现在100 km探测距离上,达到美国国家图像解译度分极标准(NIIRS)五级到六级的侦察能力,如表2所示(表中GSD表示地面采样距离)。因此,需要采用长焦距光学系统来实现高分辨率探测。

在波段设置上,采用可见近红外和中波红外双波段的成像系统,可以满足昼夜成像监视的需要。

表2 侦察能力与分辨率对应表

Table 2 Reconnaissance ability and resolution

| NIIRS | Resolution (GSD) /m |
|----------|---------------------|
| V grade | 0.375~0.6 |
| VI grade | 0.2~0.375 |

4.2 光学系统设计技术

光学系统设计要实现小体积、长焦距,具备可见近红外与中波红外双波段光学系统。典型平流层飞艇

光电系统的双波段望远光学系统如图5所示,采用卡塞格林望远系统来实现较长的焦距,具有体积小、结构紧凑的优势,采用了双曲面的设计以降低主次镜加工难度。采用分光镜实现可见近红外和中波红外两个波段分光^[8,10-11]。



图5 光学系统布局

Fig.5 Layout of optical system

4.3 扫描稳像机构设计技术

扫描稳像机构主要由横滚轴系和俯仰轴系组成^[2-5],结构外形如图6所示。

俯仰部件主要功能是补偿由于飞行方向的平台运动引起的像移和飞艇平台振动在俯仰方向上产生的像移。俯仰部件包括力矩电机、旋变、轴承、俯仰轴、限位装置和锁紧装置、俯仰陀螺等。

横滚部件主要功能是实现相机沿垂直线阵方向的匀速扫描成像,并且补偿飞艇平台振动引起的横滚方向上的像移。横滚部件包括固定支架、力矩电机、旋变、轴承、横滚轴、限位装置和锁紧装置、俯仰/偏航陀螺等。

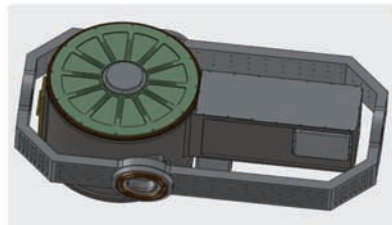


图6 扫描稳像机构结构形式

Fig.6 Configuration of scan and stabilization system

扫描伺服控制系统采用了速率环加位置环的双闭环控制方式,采用数字信号处理(DSP)芯片 DSP2812 作为主控芯片,分别采用陀螺和旋转变压器来实现速度反馈和位置反馈,采用力矩电机直接驱动的控制方式,系统结构简单,摩擦阻力小,不存在齿隙。这对改善系统低速控制的平滑性十分有利。伺服控制回路原理框图如图7所示。

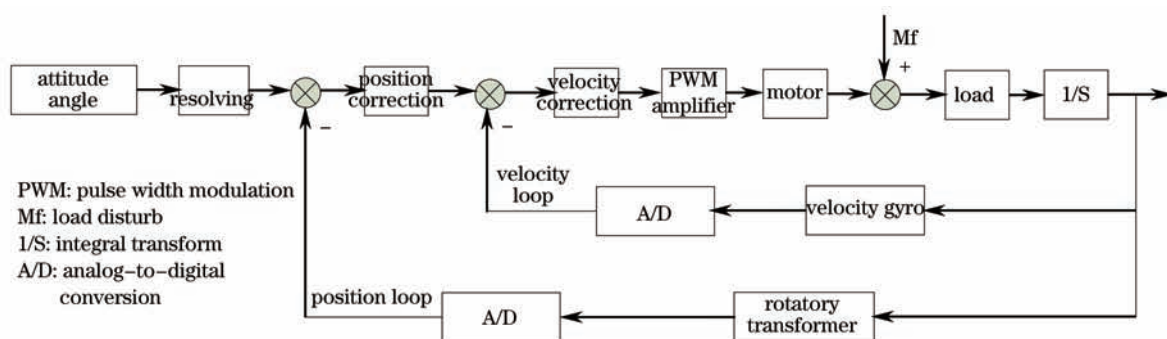


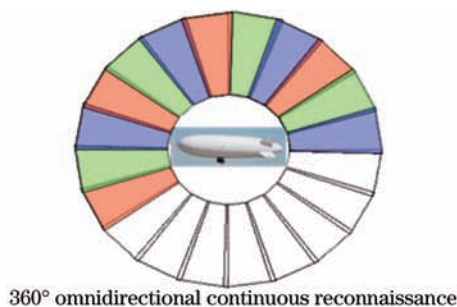
图7 扫描稳像伺服回路原理框图

Fig.7 Block diagram of scan and stabilization servo system

4.4 系统工作模式设计

4.4.1 悬停工作模式

在飞艇悬停侦察模式中,扫描机构按照如图8所示的时序进行扫描成像,对应的角度、速度数据均为相对惯性空间角度,其中横滚匀速转速数值和方位步进角度数据可以根据需要人工设定。



360° omnidirectional continuous reconnaissance

图8 悬停工作示意图

Fig.8 Sketch map of imaging on hovering

4.4.2 巡航工作模式

在巡航侦察模式下,俯仰控制模式按照图中时序,方位保持锁定在航向垂直的角度进行惯性稳定,对应的角度、速度数据均为相对惯性空间数据。其中横滚匀速转速数值和方位保持角度数据可以根据需要人工设定,如图9所示。

4.4.3 跟踪、立体成像工作模式

在跟踪模式下,根据目标在图像中的位置,结合姿态辅助数据及相机参数,计算出目标的位置信息,反馈至扫描控制电路。扫描控制电路结合当前的姿态位置信息以及被跟踪目标的位置信息,推算出横滚、俯仰、方位中心角度值,控制相机扫描成像,实现目标的跟踪成像。

立体成像模式主要是针对岛屿、机场、典型建筑物等目标,在确定目标的地理坐标后,结合侦察航线,计算出对应的成像角度,实现目标的正视、前视及后视图像的获取,最终获取目标的立体图像信息,如图10所示。

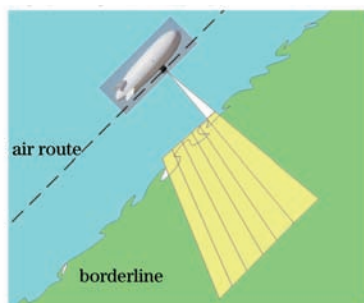


图9 巡航工作示意图

Fig.9 Sketch map of imaging on cruise

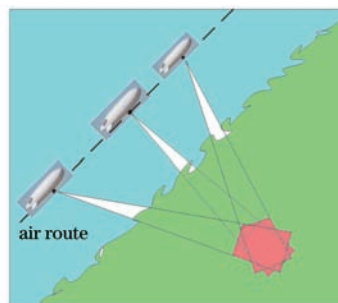


图10 跟踪立体成像示意图

Fig.10 Sketch map of imaging on stereo

5 结束语

现有光电侦察系统以可见近红外和中波红外双波段成像为基础。随着探测器技术、精确控制技术和图像处理技术的快速发展,在现有产品的基础上,更换更小像元尺寸的探测器即可以实现更高的分辨率,更换成多光谱探测器,即可以实现多光谱成像。

平流层光电系统能够实现远距离、大范围的侦察监视成像,能够服务于我国军事侦察与监视、海洋、国土资源、环境监测、灾害监测等领域,未来有较大的发展空间。

参考文献

- 1 Russo M J, LoBiondo S, Coon B, *et al.*. Beryllium optics and beryllium-aluminum structures for reconnaissance applications[C]. SPIE, 2007, 6666: 6666027.
- 2 Riehl K. RAPTOR (DB-110) reconnaissance system: in operation[C]. SPIE, 2002, 4824: 1-12.
- 3 J Topaz, D Freiman, I Porat. Dual-wavelength camera for long-range reconnaissance platforms[C]. SPIE, 2002, 4820: 728-735.
- 4 Lange D, Abrams W, Iyengar M A, *et al.*. Goodrich DB-110 system: multi-band operation today and tomorrow[C]. SPIE, 2003, 5109: 22-36.

- 5 Petrushevsky V. High-resolution long-range oblique IR imaging from an airborne platform[C]. SPIE, 2006, 6395: 63950O.
- 6 Henry D J. Advanced airborne ISR demonstration system (USA)[C]. SPIE, 2005, 5787: 38-47.
- 7 Lareau A G, Partynski A J. Dual-band framing cameras: technology and status[C]. SPIE, 2000, 4127: 148-156.
- 8 Wei Xiaoxiao, Xu Feng, Yu Jianjun. Design of space coaxial field-bias three-mirror optical system with high resolution [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0416002.
韦晓孝, 许峰, 余建军. 高分辨率空间同轴偏视场三反光学系统设计[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416002.
- 9 Deng Li. Environment control for stratospheric airship[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2006, 27(3): 51-56.
邓黎. 平流层飞艇的环境控制[J]. 航天返回与遥感, 2006, 27(3): 51-56.
- 10 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen, *et al.*. Optical system design of space camera with large F number and long focal length [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2093-2097.
李旭阳, 李英才, 马臻, 等. 大F数长焦距空间相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2093-2097.
- 11 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen, *et al.*. Optical system design of space camera with long focal length and correction of image distortion[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2657-2661.
李旭阳, 李英才, 马臻, 等. 消畸变、长焦距空间相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2657-2661.
- 12 Hu Wenlin, Cong Litian. Technologies progress and applied expectation of stratosphere airship[J]. Modern Radar, 2011, 33(1): 5-7.
胡文琳, 丛力田. 平流层飞艇预警探测技术进展及应用展望[J]. 现代雷达, 2011, 33(1): 5-7.
- 13 Chen Yuru, Hu Yihua, Rui Jian. Operating range prediction of high resolution visible camera[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2006, 4(3): 40-42.
陈玉茹, 胡以华, 芮键. 高分辨率可见光相机作用距离的估算[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(3): 40-42.
- 14 Zhang Jingxian. Low-Light-Level and Infrared Imaging Technologies[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995. 226-258.
张敬贤. 微光与红外成像技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995. 226-258.
- 15 Song Fenghua. Modern Space Photoelectric Systems and Their Applications[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004. 214-296.
宋丰华. 现代空间光电系统及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. 214-296.