

文章编号 1004-924X(2003)01-0082-07

航空光电侦察平台关键技术及其发展

贾平, 张葆

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要:介绍了国内外航空光电侦察平台的技术发展概况,并针对航空光电侦察平台的关键技术问题进行了全面分析与研究。单元优化与系统集成技术:光电侦察平台框架数目的选择、平台框架结构形式的选材、有效载荷的配置和选择、环境适应性设计;提高成像质量的控制技术:惯性稳定控制技术、被动减振与阻尼技术、电子稳像技术;图象跟踪与处理技术;动态检测技术。依据作者的工作体会,论述了航空光电侦察平台的未来发展趋势。

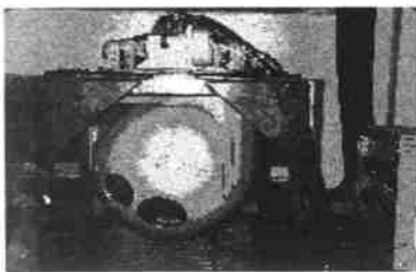
关键词:光电侦察平台;惯性稳定;电子稳像;动态检测

中图分类号:TH745 **文献标识码:**A

1 引言

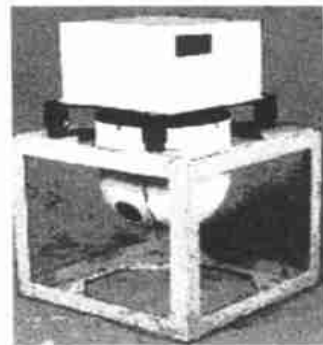
航空侦察是军队为获取敌情、地形和有关作战情报而采取的行动,是实施正确指挥的前提,是取得作战胜利的重要保证。因此有人称它为战场力量的倍增器。在不同的历史条件下,尽管获取情报的技术手段不断发展变化,但是航空侦察在军事上的重要地位从未削弱。

由于航空侦察具有时效性强、准确度高、侦察范围宽广深远、机动灵活、针对性强的特点,既可克服地面侦察受地球曲率和地形障碍物对视线的限制和较强的危险性,又可弥补卫星侦察的细节和时效不足,所以目前它仍是获取战术情报的基本和有效手段。近年来,在商用救助、灾情防救、边防稽私等也有其重要应用^[1-4]。



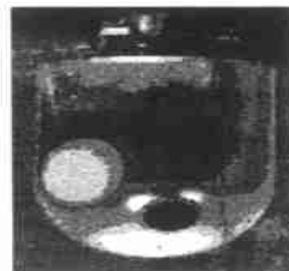
(a) 机载摄像平台

(a) Airborne opto-electronic video platform



(b) 无人机小型电视侦察平台

(b) Unmanned vehicle mini TV reconnaissance platform



(c) 以色列 toplite 侦察平台

(c) Israel toplite reconnaissance platform

图1 三种光电侦察平台

Fig. 1 Three kinds of opto-electronic reconnaissance platforms.

航空侦察以光电设备为主,如合成孔径雷达、各种胶片相机、实时传输相机,可见与红外相机等。在此仅对光电侦察平台与有效载荷的相关技术及其发展进行讨论。由于市场的牵引,国外近年在光电侦察平台与有效载荷等技术发展很快,向着平台质量更轻、传感器更多更小、稳定精度更高的方向发展。表 1 列出了国外航空光电侦察平台的研制情况。

从表 1 可以看出,平台的有效载荷一般都有可见和红外探测器,以保证全天时工作。配上电视跟踪器和激光测距仪,又可实现目标跟踪和定位的功能。平台的框架形式二框架二轴稳定、三框架三轴稳定、四框架两轴稳定等,依据稳定精度、搜索范围的要求而定^[1]。为了保证良好的飞

机气动特性,造型多为球柱,外形美观、质量轻、功能全、结构紧凑、布局合理、通用性强、稳定精度高。

近年来,国内航空光电侦察平台也有较大发展,无论在平台质量,还是有效载荷、稳定精度方面都取得较大进步。国内航空光电侦察平台的研制情况如表 2 所示。

从表 1 和表 2 可以看出,国内在航空光电侦察平台研制方面与国外相比还有较大差距,尤其在体积和质量方面,其原因主要在于框架形式及其材料,以及光学结构的小型化设计和制造技术水平。图 1 示出了长春光机所和以色列研制的三种光电侦察平台。

表 1 国外航空光电侦察平台的参数

Table 1 Parameters of foreign airborne opto-electronic reconnaissance platforms

| 结构形式 | 四框架二轴稳定 | 三轴稳定 | 四框架二轴稳定 | 二轴稳定 | 四框架二轴稳定 | 二轴稳定 | 四框架二轴稳定 | 二轴稳定 |
|---------------|--|--|--|--|---|--|---|-----------------------------|
| 稳定精度 | 25 μrad | 35 μrad | 25 μrad | 25 μrad | 35 μrad | 25 mrad | 100 μrad | 50 μrad |
| 有效载荷 | 可见:焦距: 20~240 mm 红外视场(8~12 μ、3~5 μ 两种) 18 ×24° 3.9°×5.1° 1.3°×1.7° 激光测距(1.54 μ) 20 km ±5 m 激光点跟踪 距离:15 km 精度:4 mrad | 可见:焦距: 16~160 mm 红外视场 23°×17° 2.3°×1.7° 激光测距 10 km | 可见:焦距 16~240 mm 红外: 256 × 256 insb 激光测距 20 km | 可见:焦距 20~280 mm 红外视场 7.5°×9.7° 2.25°×2.9° 激光测距 10 km | 可见视场 24 ×16° 5°×3.3° 红外视场 24 ×18° 3°×2.2° 激光测距: 10 km | 红外视场 8~12 μ 4°×2.7° 16 ×10.7° 可见:10 倍 | 红外视场 8~12 μ 3.6°×4.8° 29 ×38° (连续变焦) | 载有可见 红外激光 等传感器 |
| | 工作范围 | 方位: 360° 俯仰: +40~ - 85° | 方位: 360° 俯仰: +90~120° | 方位: 360° 俯仰: +15~120° | 方位: ±170° 俯仰: +30~ - 75° | 方位: 360° 俯仰: +15~ - 105° | 方位: 340° 俯仰: +30~ - 75° | 方位: ±140° 俯仰: +70~ - 40° |
| 体积 (d × h) mm | 406 ×662 | 356 ×548 | 350 ×500 | 384 ×596 ×390 | 356 ×548 | 380 ×596 | 360 ×445 | 340 ×552 |
| 质量 | 53 kg | 30 kg | 60 kg | 32 kg | 35 kg | 30 kg | 28 kg (传感器) | 57.5 kg |
| 厂家型号 | TOPLITE 以色列 | Wescam 加拿大 | Goshawk 南非 | Westing House 美国 | Scarnoff 法国 | Astro 意大利 | ISOS2000 德国 | GS-2 俄罗斯 |

表 2 国内航空光电侦察平台的参数

Table 2 Parameters of domestic airborne opto-electronic reconnaissance platforms

| 结构形式 | 四框架二轴稳定 | 四框架二轴稳定 | 二轴稳定 | 四框架二轴稳定 | 二轴稳定 |
|------------------------|--|--|--|--|--|
| 稳定精度 | 25 μ rad | 40 μ rad | 100 μ rad(静态) | 20 μ rad | 100 μ rad |
| 有效载荷 | 可见: 焦距: 20 ~ 500 mm 靶面 1/3 红外视场 8 ~ 12 μ 14.4°×10.8° 2.4°×1.8° 激光测距(1.54 μ) 20 km \pm 5 m | 可见: 焦距: 15 ~ 300 mm 靶面 1/3 彩色、高分辨力两种 红外视场 8 ~ 12 μ 、 24°×18° 3°×2.2° | 可见: 焦距: 10 ~ 150 mm 靶面 1/2 分彩色、高分辨力、低照度三种 | 可见: 焦距: 240 ~ 1000 mm 靶面 1/3 红外视场 3-5 μ 3°×2.25° 内外框架完全隔离 | 可见: 焦距: 5.4-72 mm 靶面 1/4 彩色、 高分辨力两种 |
| 工作范围 | 方位: 360° 俯仰: +10° ~ -75° | 方位: 360° 俯仰: +10° ~ -110° | 方位: \pm 240° 俯仰: \pm 75° | 方位: 360° 俯仰: -20° ~ -60° | 方位: \pm 110° 俯仰: +60° ~ -60° |
| 体积 ($d \times h$) mm | 490 ×650 | 358 ×508 | 280 ×455 | 600 ×850 | 260 ×420 |
| 质量 | 80 kg | 35 kg | 25 kg | 200 kg | 10 kg |
| 使用场合 | 无人机 | 无人机 | 无人机 | 民用 737 | 无人机 |
| 厂家或型号 | 长光所 | 014 | 618 所 | 长光所 | 长光所 |

2 航空光电侦察平台关键技术

2.1 单元优化与系统集成技术

由于航空技术对体积和重量的特殊要求,其减少就意味着飞行速度、飞行距离的增加,因此各单元优化集成的优劣决定了飞行器的飞行距离、飞行速度。在满足侦察要求的前提下,进行系统优化和一体化设计十分必要;在经济成本允许的条件下,优选比强度、比刚度好的材料(如玻璃钢、钛合金、碳纤维等等),在图 2 所示的无人机电视侦察平台中外壳体采用了玻璃钢材料,其总质量为 10.8 Kg;对有效载荷的传感器进行小型化设计;在 CAD \ CAE 等支持下,进行结构力学设计、环境分析(热学、电磁干扰)及系统仿真;采用积木式设计、最大限度采用通用的、标准的部件和零件。

2.1.1 光电侦察平台结构框架数目的选择

双轴二环架结构是航空侦察平台中使用最多的一种,是较为成熟的技术。在未来系统中,由红外、激光、电视等组成的负荷,其稳定负载较重,会导致增加很多各种干扰力矩,以往二环架平台系统的设计和工艺技术要使稳定精度达到微弧级是

十分困难的。

采用四环架二轴结构,可以克服二环架的缺点:因内二环始终互相垂直,减小了几何约束耦合,处于更良好的稳定环境,从而对干扰运动起到更佳的隔离作用,易于提高系统的稳定精度;内外环控制回路相互独立,互不影响,可以消除大角度运动的环架自锁;四环架稳定系统使用的内二环、外二环的电机力矩较同等的二环系统减小,如果合理安排被稳定的光电传感器,按精度要求分布在内、外环上,甚至可使内二环的负载非常小,有利于系统带宽的增加^[1]。

2.1.2 平台框架结构形式和选材

平台框架是支承台体的受力件,其结构形式和选材直接影响框架的刚度和质量,通常可分为方形和球形框架,其中以球形框架受力情况最佳。采用薄壁体结构——加强筋、变截面、E 形结构形式的框架。

材料使用镀合金和铝合金,其中镀合金材料的性能最佳,但由于它的高成本及特殊的工艺条件的限制,通常选用锻铝和铸铝铝合金作为框架的结构材料。锻铝的结晶组织稳定,比刚度和比

强度较高,并且具有优良的力学性能;铸铝框架机械加工量较小,但铸造的热应力及气孔、疏松、砂眼等缺陷影响框架质量,甚至造成框架断裂,可靠性较差,所以平台框架通常选用锻铝 LY12。

2.1.3 有效载荷的配置和选择

在光电侦察平台中,根据使用需求,配置各种类别和性能的可见光电视、红外热成像、激光测距或它们之间的组合。

可见光电视技术相对比较成熟,但在光学系统的设计、加工和材料方面仍需进行深入研究,如二元光学和非球面的应用、高折射率材料的制备、小型化光学结构的设计等。

在红外热成像技术方面,由于我国在探测器的研制上与国外尚存在相当大的差距,因此发展相对受限制。尽管国内已通过进口国外探测器,研制出多种航空红外热成像系统,如图 1 机载摄像平台中的焦距为 180 mm、波长为 3~5 μm 的透射式红外焦平面成像系统等,但是对于红外在大气中的传播、成像机理、制冷技术、信号处理及光学设计、材料、加工、检测、装校等方面仍需做深入的研究工作。

激光测距机多采用半导体激光器,国内研制的尚需在缩小体积和重量、提高发射功率、重复频率和寿命等方面做深入的研究工作。

2.1.4 环境适应性设计

对航空光电产品的环境适应性要求很高,力学、热学、电磁兼容等,在总体集成设计中给予充分考虑方能达到较好的效果。

在保证仪器性能、重量、体积的前提下,并在经济成本允许的条件下,优选比强度、比刚度好的材料和结构形式,以满足力学环境的要求。

作为航空产品大都工作在高空环境下,随高度的变化,温度与气压逐渐降低,为克服这种动态变化对光学成像的影响,必须采取必要的环控措施。

电磁兼容性设计是保证飞行安全和设备性能的基本要求,在设计中要给予高度重视。

2.2 提高光学成像质量控制技术

航空光电平台在使用过程中是建立在动基座的基础上,载体的振动、姿态变化和相对目标的位移都将对成像质量造成影响,因此,适宜的控制技术是提高成像系统的图像质量和侦察能力的关键。

2.2.1 惯性稳定控制技术

惯性稳定控制使视轴稳定在固定的惯性空间方向,以克服动基座角姿态变化和低频角振动对光学成像系统的影响。摩擦干扰力矩、质量不均衡、空气阻力、轴间耦合和传感器噪声等都是影响惯性稳定控制的因素,需采取有效的控制方法,才能达到较高的稳定精度。最优控制、变结构控制、神经网络以及模糊控制等都已应用于航空光电平台的惯性稳定控制中,针对具体的问题,人们使用了各种自适应控制技术,如增益自适应调整、变带宽、模型参考自适应、自校正控制等^[1,8,25]。

2.2.2 被动减振与阻尼技术

光电平台与航空载体相联各点的振动相位与振幅不一致时,光学视轴发生角位移,对光学成像质量会造成影响。因此,在进行系统设计时尽可能地控制载体传来的角位移,并应排除平台座架基体的线振动转为角位移的可能性。

合理采取减振措施,可以消除载体 10 Hz 以上高频振动扰动,而且可靠、无能源、结构简单、经济实用。在设计减振器时要保证弹性轴对称且相互平行、线性度好、其刚度中心与平台重心重合、固有频率与伺服系统带宽相匹配,最大限度地减少各种工作频率的振动传递率。合理选择减振器的固有频率、阻尼参数,使减振系统能减小高频振动,又不发生共振^[5]。

减振就是动能转化为热能(材料内部分子的摩擦)的过程,因此被动减振装置要尽量设计成无角位移的结构形式,如平行四边形、三向等刚度平移等形式,这样既耗能又不产生有害的角运动。图 2 示出了一种直线无角位移减振器,通过对振动所引起的角位移进行运动分解,在三个运动方向上用导柱将角位移转换成线位移,起到无角位移减振的作用^[5,14,15,17]。

2.2.3 电子稳像技术^[21-24]

电子稳像技术近几年才达到实用化程度,它受益于半导体技术的飞速发展,高速运算芯片的出现使得利用软件图像处理算法实现稳像成为可能。有两种电子稳像的方法,一种是帧内稳像(in-frame),如可以用维纳滤波或逆滤波等方法复原线运动形成的模糊图像;另一种是帧间稳像(per-frame),解算出运动矢量的参数去控制 CCD 输出像元各行列的起始读取位置,从而达到图像补偿稳定的目的^[6-10]。

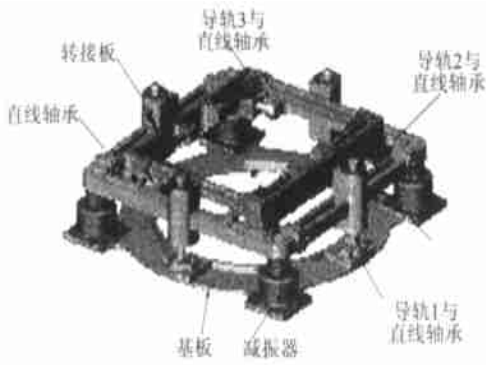


图 2 直线无角位移减振器

Fig. 2 Rectilinear irrotational isolator

电子学稳像系统一般包括三个主要的功能模块,即运动矢量的检测模块,补偿量输出模块和图像补偿模块,其系统框图如图 3 所示。

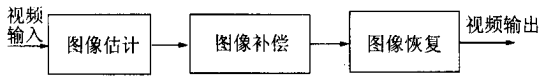


图 3 电子稳像

Fig. 3 Electronic image stabilization.

电子稳像是应用图像处理的方法来直接确定像偏移并进行补偿的技术。与传统的光学稳像、机电结合的稳像方法相比,电子稳像具有易于操作,更精确,更灵活,体积小以及价格低,能耗小等特点,同时由于大规模集成电路技术的不断提高,又便于实现设备的小型化。可见电子稳像方法将是观瞄或摄像系统中的更新换代的稳像方法^[11-16]。

2.3 电视跟踪与图像处理技术

目前,图像处理技术已经在许多不同的应用领域受到重视并取得了重大开拓性的成就,航空光电平台工作在动态飞行过程中,为精确瞄准、观测或测量某一特定目标,需保证视轴一直指向目标,除惯性稳定控制外,采用图像跟踪与处理技术,计算出脱靶量,反馈给伺服控制系统,驱动平台框架旋转、跟踪目标。

空对地电视跟踪与图像处理技术的关键仍是自动目标识别和跟踪算法,这是一项集人工智能、模式识别、计算机视觉、人工神经网络等学科理论于一体的算法研究。根据视场中的运动目标的分

类及运动状态也可实现多目标跟踪;利用控制理论中的估值理论,可以给出目标参数的当前最佳估值即滤波估值,还可以给出未来时刻的目标状态的预测估值,从而实现对目标的记忆跟踪。在实际应用中,使用最多的是以重心、形心、边缘提取和相关跟踪为主体,再根据具体情况和目标特性融进其它处理算法,目前国内已经能做到目标与背景对比度 4 % 的情况进行捕获和有效跟踪。

2.4 动态检测技术

由于航空光电平台^[17-20,25-26]是在动基座上成像与测量,性能的优劣主要取决于动态使用精度,因此在地面进行系统全面的动态特性模拟和检测是十分必要的,能够分析和解决在航空试验中许多难以解决的问题,也可大大降低校飞试验成本。

在动态特性模拟和检测试验中,主要考核和检测在不同频率的角扰动、角加速度、角速度下平台的动态稳定精度、电视捕获和跟踪能力等。为此我所自行研制了两轴摇摆台,其最大角速度为 $110^\circ/\text{s}$,最大角加速度为 $100^\circ/\text{s}^2$,可承载体积小于 $600\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ 、重量小于 200 kg 的平台做试验。同时配以动态靶标,可提供可见和红外点目标,用以对双探测器跟踪和捕获的模拟和检测使用。图 4 所示的是机载监视测量平台进行动态模拟和检测的情形。

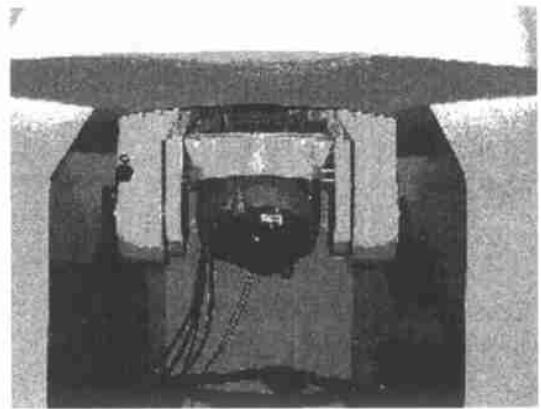


图 4 动态检测

Fig. 4 Moving measurement

3 航空光电侦察平台发展趋势

根据现代战争的特点和发展趋势,航空侦察的发展势头强劲,朝着空间的立体化、情报信息的

实时化、手段的多样化、侦察与打击一体化、提高装备生存能力方向发展。因此要求侦察装备技术先进、手段多样、空间广延、时间连续、信息传递快速。

因此,航空光电侦察平台需要向以下几个方面发展:

(1)使用新型光学和结构材料,缩小光学系统和结构框架的体积,减轻重量。

(2)多探测器并用。一方面保证全天时、全天候工作;另一方面不仅限于对目标外形和轮廓的

侦察,同时获取目标特性,并可进行测量、定位和防伪识别等。

(3)全数字化方式工作,提高信息获取和处理能力。包括数字化图像采集、捕获、识别和跟踪、数字电控、数字信息传输和显示等等。

(4)稳像技术向着更精确、更灵活、体积小以及价格低、能耗小、易于操作的方向发展。

(5)动态性能测量方法仍需进一步规范化和标准化,可靠性研究尚需加强^[21-26]。

参考文献:

- [1] 成刚. 光电稳定跟踪的机械结构分析与研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2000.
CHENG G. *Analysis and research on mechanical structure for electro-optical stabilizing and tracking* [D]. Xi'an:Xi'an University of Electronic science and technology, 2000. (in Chinese)
- [2] 曾华锋. 现代侦察监视技术[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
ZENG H F. *Modern Reconnaissance and monitor technology* [M]. Beijing:Defence Industry Press, 1999. (in Chinese)
- [3] 邹丕盛. 现代科学技术与军事[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
ZHOU P Sh. *Modern scientific technology and military affairs* [M]. Beijing: Defence Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [4] 岳长胜,王太鑫. 美国武器装备透视[M]. 北京:国防工业出版社,2002. 1-378.
YUE Ch Sh, WANG T X. *America weapon equipment perspective* [M]. Defence Industry Press, 2002. 1-378. (in Chinese)
- [5] 方同,薛璞. 振动理论与应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,2000. 1-362
FANG T, XUE P. *Vibration Theory and Applications* [M]. Xi'an: North-west Industry University press, 2000:1-362. (in Chinese)
- [6] 谷口庆治. 数字图像处理[M]. 北京:科学出版社,2002.
TANIGUCHI k. *Digital Image Processing* [M]. Beijing:Science Press, 2002. (in Chinese)
- [7] 李智勇. 动态图像分析[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
LI Zh Y. *Moving Image Analysis* [M]. Beijing: Defence Industry Press, 1999. (in Chinese)
- [8] 沈宏海,刘晶红,贾平. 摄像稳定技术[J]. 光学精密工程,2001,9(2):115-120.
SHEN H H, JIA P, LIU J H. Overview of image stabilization[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(2):115-120. (in Chinese)
- [9] 赵红颖,金宏,熊经武. 电子稳像技术[J]. 光学精密工程,2001,9(4):353-359.
ZHAO H Y, JIN H, XIONG J W. Overview of the electronic image stabilization technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(4) 353-359. (in Chinese)
- [10] YAO Y S. Electronic image stabilization using multiple visual cues[J]. *IEEE IcIP*, 1995, (1):191-194.
- [11] DANIEL L C. A stabilization system for a large aperture reconnaissance camera[J]. *SPIE*, 1989, 1156:266-271.
- [12] GERALD C H. CCD Arrays[M]. *Cameras and Displays*, 2000. 1-370.
- [13] DONNELL E O. Image Steadiness: a critical factor in system performance[J]. *SPIE*, 1987, 762:51-56.
- [14] HADAR O. Image resolution limit resulting from mechanical vibrations[J]. *Optical Engineerings*, 1992, 31(3): 581-589.
- [15] HEILAND K P. Recent advancements in passive and active vibration control system[J]. *SPIE*, 1991, 1619:22-33.
- [16] RICHARD P. A wide-look-angle gimbals for an airborne electro-optical system[J]. *SPIE*, 1993, 1998:104-111.
- [17] STOCKUM L A, CARROLL G R. Precision stabilized platforms for shipboard electro-optical systems[J]. *SPIE* 1984, 493:414 - 425.

- [18] COLLET C, FABLET R. Motion estimation on infrareded image sequences[J]. *SPIE*, 1999, 3699:67-77.
- [19] CINDY e. Daniell Artificial neural networks for automatic target recognition[J]. *Opt Eng*, 1992, 12(31):2521-2531.
- [20] BROWNIE R S, VINTEN W. Ltd introduction into service of mature pushbroom electro-optic sensors[J]. *SPIE*, 2000, 4127:12-23.
- [21] WALDEMARK J, LJUNGGREN L, HOLMQVIST A. Reconnaissance management systems for the next millennium [J]. *SPIE*, 1999, 3751:159-169.
- [22] ANDERSON E H, HOUGHTON B. ELITE-3 active vibration isolation workstatin[J]. *SPIE*, 2001, 4332:183-196.
- [23] KHORRAMI F, RASTEGAR J R, ERWIN R S. A three degrees-of-freedom adaptive-passive isolator for launch vehicle paloads[J]. *SPIE*, 2000, 3991:164-175.
- [24] SCIULLI D, GRIFFIN S F. Hybrid launch isolation system[J]. *SPIE*, 1999, 3674:352-359.
- [25] DOWNS J, SMITH S, SCHWICKERT J, *et al.* High performance gimbal control for self-protection weapon systems[J]. *SPIE*, 1998, 3365:77-86.
- [26] SARUSI G, ZIV N, OINI O, *et al.* Lerner TADIR-production version: El-Op 's high resolution 480 ×4 TDI thermal imaging system[J]. *SPIE*, 1999, 3698:427-434.

Critical technologies and their development for airborne opto-electronic reconnaissance platforms

JIA Ping, ZHANG Bao

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China*)

Abstract: The domestic and international development of airborne opto-electronic reconnaissance platforms and their existing problems are analyzed and studied. Unit optimization and system integration involve selection of gimbal number for opto-electronic reconnaissance platforms, selection of platform gimbal and material, arrangement and selection of payload, design of environment adaptation. Improvement of image quality deals with inertia stability control technology, passive isolation and damping technology, electronic image stabilization. In addition, image track and processing and moving measurement and the development trend of airborne opto-electronic reconnaissance platforms are discussed.

Key words: opto-electronic reconnaissance platforms; inertia stability; electronic image stabilization; moving measurement

作者简介: 贾平(1964-),男,吉林省延吉人,中国科学院长春光机所研究员,博士生,主要从事航空成像与测量仪器研究。