

文章编号 1674-2915(2010)06-0546-08

临近空间平台光电探测系统在空间 态势感知中的应用

徐蓉, 门涛, 张荣之

(中国西安卫星测控中心 宇航动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710043)

摘要: 介绍了空间态势感知的概念, 以及地基、天基光电探测系统和临近空间平台的特点及研究现状, 对不同平台光电探测系统的性能与特点进行了分析。分析表明, 地基光电探测系统的观测质量受地球大气湍流和大气吸收的影响, 有其极限探测能力, 且大部分大气扰动发生在大气最底层的对流层; 天基光电探测系统虽然可不受大气湍流的扰动, 但光电探测平台的探测时间只有地基望远镜的 1/3, 且耗资巨大; 临近空间平流层平台(飞艇)光电探测系统不受对流层大气扰动的影响, 其分辨力可显著提高, 并且具有灵活布站等优势。基于临近平台光电探测系统的优势, 综述了发展临近平台空间光电探测系统的可行性, 归纳总结了将其应用于空间态势感知的技术要求, 涉及材料、控制、能源和高能物理等。

关键词: 临近空间; 空间态势感知; 光电探测; 平流层飞艇

中图分类号: V11 文献标识码: A

Application of near space platform based photoelectric detecting system to space situation awareness

XU Rong, MEN Tao, ZHANG Rong-zhi

(State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi an Satellite Control Center, Xi an 710043, China)

Abstract: The concept of space situation awareness is introduced and the present situations of photoelectric detecting systems on earth, in space and near space platforms are described. Then the performance and the characteristics of photoelectric detecting systems on earth, in space and near space platforms are analyzed. Analysis results indicate that the image quality of photoelectric detecting system on earth platform is limited by the atmospheric turbulence and atmospheric absorption, and most turbulence occurs in the troposphere and the lowest section of atmosphere. The photoelectric detecting system on the space platform can not be effected by atmospheric turbulence, but its detecting time is only 1/3 that of the ground telescoping. However, the photoelectric detecting system on the near space platform can not be disturbed by atmospheric troposphere, and its angular resolution could be greatly improved. On the basis of the advantages of the near space platform, the feasibility of developing the detecting system on near space platform is reviewed and the key technologies of the photoelectric detecting system based on the near space platform including materials, control technology, energy

sources and high-energy physics are summarized in detail.

Key words: near space; space situation awareness; photoelectric detecting; stratospheric airship

1 引言

态势感知是指对在一定空间和时间范围内的外部客观条件的状态及其变化趋势的观察、认知和利用。空间态势是指影响空间系统和任务的外部客观条件,即距地球表面 20 km 以上广大区域的各种空间目标的状态和变化趋势。空间态势感知就是对上述状态和变化趋势信息的探测和识别。

空间态势感知研究的对象主要是空间目标和空间环境^[1]。空间目标包括轨道目标、弹道目标和机动目标,轨道目标包括侦察监视情报卫星、预警探测卫星、导航定位卫星、通信卫星、气象卫星及有潜在军事用途的其它航天器、空间碎片等;弹道目标包括战略导弹、反导导弹等战略攻防武器系统;机动目标包括高速、低速临近空间飞行器等。空间环境是指空间中各种自然和人造的物质及其变化,包括中性大气、等离子体、电磁场和粒子等。

随着现代科技的迅猛发展,对于空间目标

(如卫星、空间碎片、宇宙星体等)的研究,包括空间目标识别、轨道确定以及位置估计等变得越来越重要,它是进入空间、了解空间以及控制空间的基础,是空间攻防必不可少的环节。空间目标识别是空间攻防对抗的技术支持,空间目标的形态特性是空间目标的重要特征之一。目前,除了轨道识别和无线电信号特征外,获取空间目标的几何形态及其纹理特征对于空间目标的识别、轨道估计、卫星姿态及工作状态的判断等具有十分重要的意义。

空间目标探测识别系统的主要设备包括雷达探测系统、光电探测系统和无线电监视系统等。

2 地基平台光电探测系统的特点及研究现状

美国空间目标监视系统的主要作用是高分辨率成像(雷达成像、自适应光电成像、红外成像)和辐射特性测量等。美国空间目标监视系统的主要设备如图 1 所示。

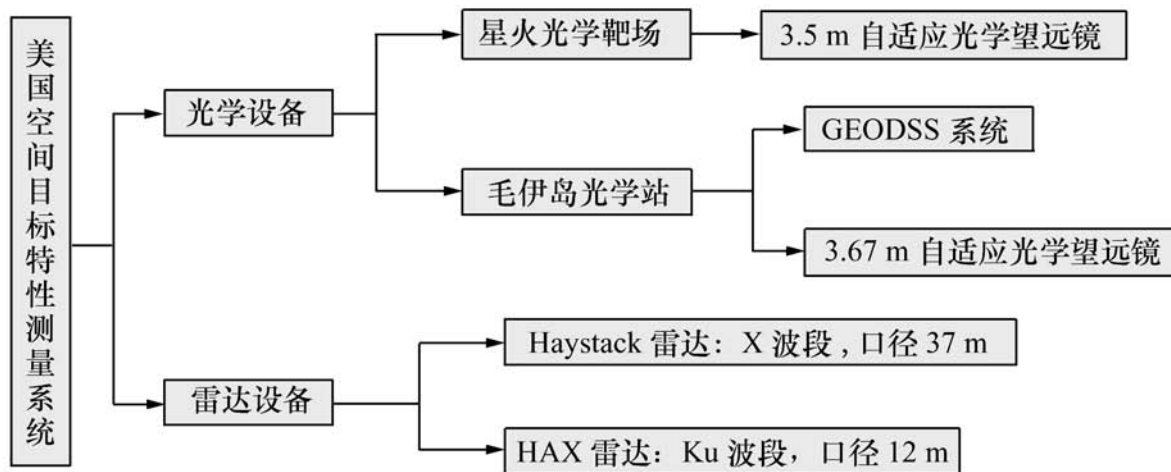


图 1 美国空间目标监视系统主要设备

Fig. 1 Equipment of surveillance system to space targets of USA

星火光学靶场的 3.5 m 望远镜于 1995 年装备了带有激光导引星的自适应光学系统,能对亮于 7 ~8 星等的低轨卫星目标进行跟踪和高分辨力成像,据称该望远镜可以分辨 1 600 km 远处一个篮球尺度的细节。星火靶场的 3.5 m 自适应光电望远镜对卫星的成像如图 2 所示^[2],其中左图

为未校正像,右图为经 941 单元自适应光学系统校正后的图像,图像非常清晰,卫星上天线等部件都清晰可见。

美国空军毛伊岛光学站(AMOS)是美国空军检测网中的主要光学站,其任务是获取前苏联航天器的情报图像和美国卫星的工作数据。3.67 m

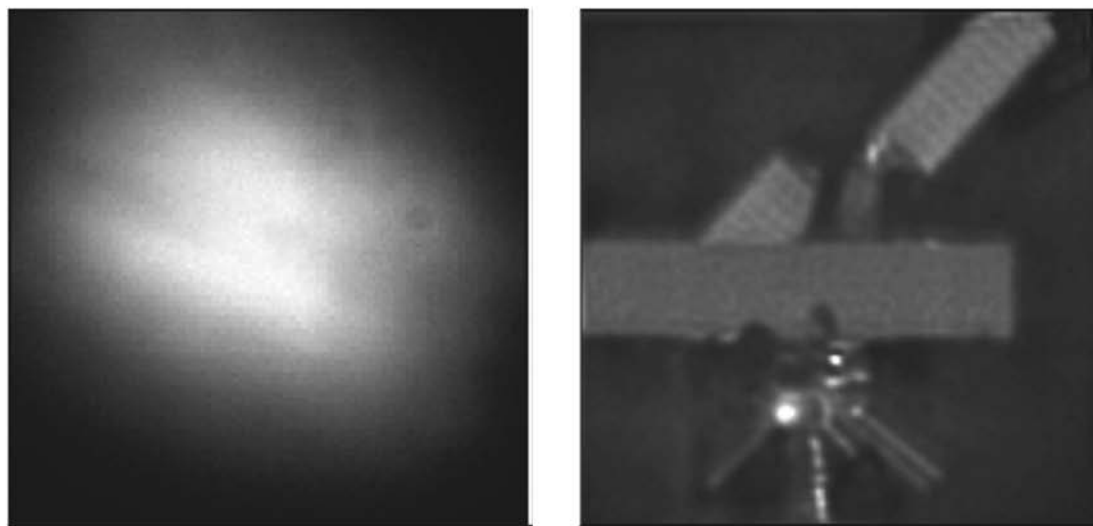


图2 3.5 m自适应光电望远镜对 Seasat 卫星成像

Fig. 2 Imaging of satellite Seasat using AO corrected SOR 3.5 m telescope

口径先进光学望远镜于1997年开始建设,可用多种手段支持空间目标识别。通过采用一套941单元自适应光学系统,可获得 $0.7 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 波段接近衍射极限分辨力的图像,实现对空间目标的高分辨力图像形态特征识别。

毛伊岛AMOS的1.2, 1.6及3.6 m口径光学望远镜上均安装有光度测量设备和红外辐射/光谱测量设备,用于测量空间目标的光度、辐射强度以及光谱信息,进行空间目标散射/辐射特性研究,支持空间目标识别和载荷评估。

但地基光电探测平台也有其显著的缺点。自17世纪伽利略发明天文望远镜以后,为提高其观测能力,望远镜口径在不断增大;然而望远镜口径越大,制造工艺越复杂,并且大气湍流的动态干扰对光学测量有影响。无论多大口径的光学望远镜通过地球大气进行观察时,受限于大气湍流,其分辨力均低于 $0.1 \sim 0.2 \text{ m}$ 的望远镜^[3],因此地基望远镜有其极限探测能力。

地球大气对天文观测的影响主要有三个方面。第一,大气对光有衍射效应,一个点光源经过大气以后会变成一个衍射斑,大气衍射效应大大降低了地面望远镜的分辨能力。第二,由于温度、压力和其他扰动等造成产生大气密度的随机变化将导致大气折射率的随机变化,这些变化的累积效应导致大气折射率的明显不均匀性,从而使在湍流大气中传输的光束波前也做随机起伏,由此引起光束抖动、强度起伏、光束扩展和像点抖动等一系列光传输的大气湍流效应;大气湍流使光的球面波前发生变化,波前的一些部分不同程度地

被减慢了,从而使像发生畸变。第三,地球大气中的臭氧对紫外辐射有强烈的吸收作用,大气中的水汽又能吸收大部分红外辐射,因此地面光学望远镜的观测波段受到很大限制^[4,5]。

为了克服地球大气对天文观测的影响,人们研制了自适应光学系统,其目的是通过恢复波前的球面形状来消除大气湍流影响,从而极大地提高了望远镜的分辨力。但自适应光学也有一些难以克服的困难,如改正图像的光学系统很复杂,镜面越大,越复杂,越难做,同时亦会损失部分望远镜捕获来的光。自适应光学的另一个限制是能做改正的视场较小,而且分辨率越好,自适应光学工作的范围就越小。另外,自适应光学系统无法完全消除地球大气湍流的影响,其观测受到光污染、云团、阴霾、恶劣天气的影响,观测时间很有限。

3 天基平台光电探测系统的特点及研究现状

空间目标天基观测系统的研究同样令人关注。美国已经发射了中段空间试验(Midcourse Space Experiments, MSX)卫星,用作导弹跟踪和空间监视的试验验证,目前正在积极研制部署空间跟踪与监视系统(STSS)等。

MSX卫星^[6,7]于1996年发射,目的是对星载探测器进行试验,改进自由滑行阶段导弹侦查和跟踪模式。星上装载了3台光学遥感器,其工作波段从紫外到热红外。其中天基可见光(SBV)的主要任务就是空间监视,包括从空间监视地球同

步卫星带,从而提升了美国对深空的监视能力。空间红外成像望远镜(SPIRIT)则包含1个6波段高空间分辨力红外辐射计和1个6通道高光谱分辨率 Michelson 干涉光谱仪。利用 SPIRIT III 进行了空间常驻目标(RSO)编目试验,其最终目的是确定红外观测在空间目标识别和空间态势感知的作用。

天基红外系统(SBIRS)^[8-10]是美国空军研制的下一代天基红外监视系统,也是美国国家导弹防御系统的一个组成部分,它由高轨道卫星、低轨道卫星和地面设施组成。其中低轨道星座命名为“空间跟踪与监视系统”(STSS)。STSS计划由21~28颗小型卫星组成,部署在1600 km高的3~4个大倾角的低地球轨道面上,卫星将使用可见光和短波、中波、长波红外探测器跟踪弹道导弹的各飞行阶段并从所有目标中识别弹头。

1990年4月24日,主镜口径为2.4 m的哈勃望远镜由“发现者”号航天飞机送上了距离地面600 km的太空轨道,填补了地面观测的缺口,已经成为天文史上最重要的仪器。哈勃望远镜的位置在地球大气层之上,因此获得了地基望远镜所没有的优势—影像不会受到大气湍流的扰动,视宁度绝佳又没有大气散射造成的背景光,还能观测会被臭氧层吸收的紫外线^[11]。

天基光电探测系统最大的缺点是价格昂贵,从设计到发射至太空耗资巨大。其次,光学系统在太空受太阳直射和处在阴影中造成的冷热交替的环境,易使镜面变形,降低了图像质量。400~600 km的低轨空间中存在的剩余气体分子和尘埃对太阳光也会造成衍射,在地球阴影处也会受到月光的影响。光学系统由于距离地球较近,使观测视场受到限制。最后,天基光电探测平台与空间碎片碰撞的几率每年都在增加。综合以上因素,天基光电探测平台的观测时间只有地基望远镜的1/3。

4 近空间平台光电探测系统的研究现状与分析

4.1 气球平台光电探测系统

氦气球是一个稳定的、无振动的光电试验平

台,可在高空停留数天,没有发动机和复杂的结构,可以无人值守,价格相对便宜。

1996年,Air Force Phillips Laboratory在体积为800 000 m³的气球下悬挂了一台重2 t、口径为80 cm的太阳望远镜,从南极洲起飞,爬行高度达到38 000 m,在高空中停留了两周时间^[11]。

2000年1月,一个80 cm口径F数为1.5的Ritchey-Chretien太阳望远镜悬挂在南极洲上空同温层中的一个气球上飞行了17 d。目的是获取太阳光球和色球高空间分辨率图像和矢量磁力图的长期序列,飞行完全在地球大气的湍流层上,望远镜将能接近其0.2 rad/s的衍射分辨率工作,同时提供小型太阳特性的高分辨率观察。当吊舱在地面站瞄准线内时,通讯通过传送指令和接收遥测数据的低速无线电路以及接收图像的高速下行线路得到保证,望远镜操作由气球载自主式计算机控制^[12]。

气球光电试验平台的最大的缺点是随着其爬行高度的增大,受风的影响增大,着陆时最大可偏离预定着陆地点百公里以上,望远镜伺服系统的控制难度较大。

4.2 机载平台光电探测系统

1974年,NASA的Kupier Airborne Observatory(KAO)使用C-141A货机装载一台口径为91.5 cm的卡塞格林望远镜进行了首次机载望远镜红外观测,飞行高度为12 km,此飞行高度在85%的大气分子之上,不受天气影响,避开了99%的能吸收红外辐射的水分子。飞机以800 km/h的速度飞行,飞行时间6.5 h。飞机通过压缩空气轴承和磁场导引系统最大限度地消除机身振动的影响,但由于受到机身观察窗口的限制,望远镜观察视场受到极大限制^[11]。

红外天文学的同温层观测站工程(Stratospheric Observatory for Far-Infrared Astronomy, SOFIA)是由NASA和德国联合研制的一项机载望远镜的国际性工程,1991年该工程使用波音747飞机转载一台重8 t、短焦距、2.5 m口径的望远镜进行了观测试验。总耗资为1.8亿美元,其中飞机试验平台耗费1.2亿美元。NASA计划该试验持续到2000年,每年飞行约160次,每次飞行时间为5 h^[13]。

第二期的 SOFIA 工程于 2010 年开始进行光学观测试验,如图 3 所示,并将持续 20 年时间,到 2030 年结束。SOFIA 的飞行高度可达 13.7 km,此高度不受 99.8% 吸收红外辐射的水分子的影响,并且大气透过率达 80%。由于配置了先进的场成像远红外线光谱仪(FIFI LS)、亚毫米外差式

光谱仪(CASIMIR)、远红外摄像机(HAWC)、中红外光栅摄谱仪(EXES)、近红外摄像机(FLITE-CAM)、高速隐蔽光度计和成像仪(HOPI)、太赫兹阵列接收器(STAR)等科研仪器,SOFIA 的观测范围包含 28 ~1 200 μm 的光谱波段,可进行远红外及亚毫米量级的天文观测^[14~16]。

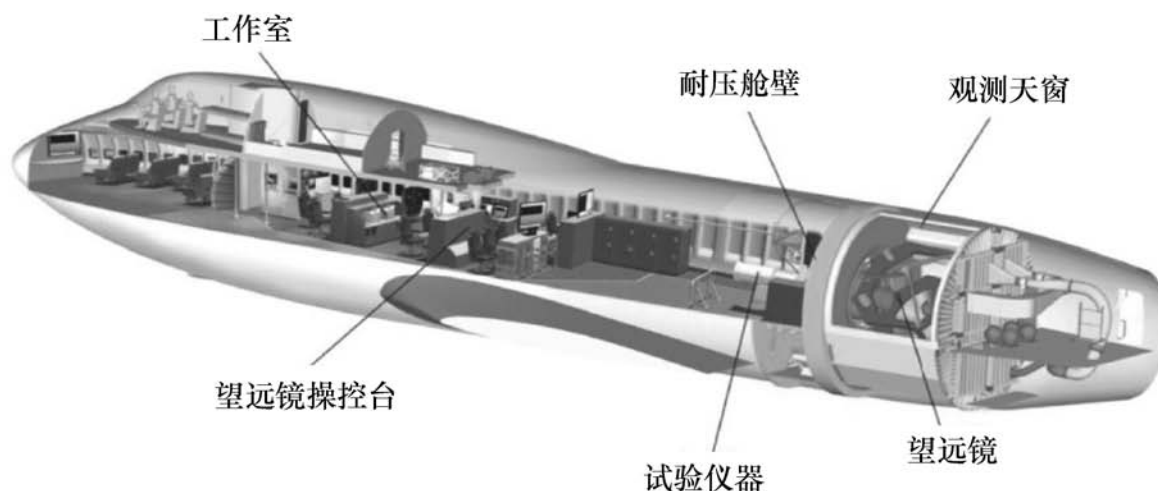


图 3 SOFIA 的机载望远镜试验系统结构图

Fig. 3 Cutaway view of airborne telescope system in SOFIA

SOFIA 的优势在于:飞行高度高,具有良好的近似于太空的大气透过率观测环境;载重能力强,运输机可转载大口径的天文望远镜;机动性强,可从世界范围内任何一个机场起飞对重大的天文事件进行观测,不像地面观测站一样受固定的地理位置限制。但也有许多缺点,如:高速飞行加剧了飞机周围的大气湍流效应,引起气流漩涡,同时引起较大的机械扭矩,并且飞机观测窗口周围噪音巨大,这都将对光学系统产生影响,降低分辨率;飞机发动机产生的热量会影响红外测量结果;续航能力差,价格昂贵。

5 发展临近平台空间光电探测系统的优势

根据大气的温度、密度及运动特征可将大气层分为 5 层,从海平面依次向上分为对流层、平流层、中间层、热层、外层。对流层是大气的最底层,其厚度随着纬度与季节等因素而变化。顶层在赤道附近为 16 ~18 km,南北极附近为 6 ~8 km。由对流层顶端到海平面以上 50 km 处之间为平流层,其特点是空气没有对流运动,平流运动占显著优势,水汽、尘埃含量甚微,能见度很高,便

于光电侦察。这一层最大的特点是气温随高度上升,大气上暖下凉,以平流运动为主,飞行器在其中受力比较稳定,便于姿态控制和驾驶。

临近空间指海拔 20 ~100 km 的大气圈,该区域没有大气的上下对流,只有水平方向的流动,故又称平流层。平流层处于现有航空飞行器的上限和在轨航天飞行器的最低轨道高度之间,这一区域既不属于航空范畴,也不属于航天范畴,但对于情报收集、侦察监视、通信保障以及对空对地观测等都有利用前景。

现代平流层飞艇的概念最早是由美国海军于 1982 年的 High-Altitude Surveillance Platform for Over-the-horizon Targeting(HI-SPOT) 项目中提出的。该飞艇由 4 个氢燃料发动机驱动,可装载 100 ~500 kg 的设备飞行至 10 km 高度,飞行时间持续 5 个月^[11],见图 4。

平流层飞艇具有同步卫星、低地球轨道卫星、高空长航时无人机所没有的优良特性,它既可固定在对地同步位置上,亦可根据即时的需要自动地从一个地区转移到另外一个地区。如今的卫星和无人机都不能携带超过 2 t 重的载荷,无人机也不能停留在单一的地点上;然而平流层飞艇却具有灵活性,可昼夜 24 h 工作,持续工作时长



图4 美国军方的飞艇示意图^[17]

Fig.4 Stratospheric airship illustrated picture of U. S. army^[17]

达数年。

空间目标地基光电成像系统分辨率受限的主要因素是大气湍流,大气湍流主要产生在大气最底层的对流层,设想利用临近空间平流层平台(飞艇)来搭载光电探测系统,就不会受对流层大气扰动的影响,其成像分辨力可显著提高。

对地基和天基光电探测平台的优缺点进行对比分析表明,随着我国飞艇研制技术的高速发展,在发展大口径地基自适应成像望远镜的同时,平流层飞艇平台望远镜具有诱人的发展潜力,分析其优点如下:

(1) 相对地基成像分辨率高

平流层高度为距离地面 20 ~100 km,而在 10 km 高度以上,大气湍流对自适应成像望远镜的影响可以忽略不计,因此飞艇平台望远镜分辨率可大大提高。

(2) 相对地基观测时间大大延长

地面光学布站受地理位置、环境、天气、灯光污染等因素影响,观测时间受限,而飞艇平台望远镜机动性强,不受以上因素影响,大大延长了观测时间(平流层不存在恶劣天气)。

地基自适应光电望远镜受天光地影条件限制,即要求望远镜所在地区的天光足够黑暗,只有卫星飞临上空(满足高度约束条件),且又具有足够亮度(卫星为太阳所照亮),才可以很好地进行观测,因此地基自适应光电望远镜的观测时间受限(基本在晨昏时间段)。而飞艇平台望远镜可随晨昏线飞行,满足天光地影条件,可长时间观测。

(3) 相对地基布站灵活,可及时反应重大事件和任务

由于地基成像望远镜的选址对环境要求苛刻,需要用半年时间持续对近地面大气湍流强度、常规气象参数、视宁度、整层大气透过率、夜天光背景、高空风和高空光学湍流强度廓线进行测量。受选址条件限制,目前国内自适应成像光电望远镜布站均处于视宁度较好的西南部区域,这些观测站点受地理位置、天光地影条件所限,对于某些重大事件和任务的光学可观测期具有局限性,如高纬度发射的空间目标特定时间段无法观测等等。平流层飞艇平台光电望远镜可灵活布站,对于重大突发大事件可及时跟踪观测,并且可以针对极地轨道目标在南北极进行观测。相对天基,可定期观测飞临其上空的全部目标。

(4) 相对天基容积装载量大

飞艇容积大,可运载大口径光电望远镜,便于望远镜方位、俯仰轴转动以进行全方位观测。并且自给能力强,装载大量装备和物资,其载重量一般是直升机的 3 倍以上。

(5) 相对飞机稳定性强,安全性高

飞艇采用倾斜旋翼推进及稳性加强系统,稳定性强,即使在强风中也能平稳悬停,便于保持望远镜光路系统的稳定,防止图像抖动,观测效率高。当遭遇突发事件时,飞艇的气囊不会立即产生影响,其余完好的隔舱中的气囊产生的静升力可继续维持飞行,有些破损的洞甚至还能在飞行中及时得到修补。另外,飞艇起飞并不需要机场,可在许多野外环境下垂直起降。

6 临近空间平台光电探测系统应用于空间态势感知的技术要求

临近空间平台平流层飞艇光电探测系统与低空飞艇不同,该平台的研制被认为是本世纪的技术难题。只有在材料、结构、动力、导航和控制等领域提出创造性的技术解决方案,才能为人们提供长期、稳定的服务。

(1) 图像消旋及稳定性研究

当临近空间平台光电探测系统进行观测任务时,通过伺服系统的控制来带动望远镜光学系统

完成跟踪任务,这一过程会造成望远镜视轴相对于飞艇平台的转动,使得稳定的图像又叠加了额外的旋转,这部分旋转量会对空间目标的轨道定位与识别带来不便甚至错误的判断,所以这部分图像旋转量是必须进行合理补偿的。同时,望远镜在飞行苛刻环境条件下工作,像移动会使图像模糊,并可能引起科学仪器中的信号损失和噪声增强。因此,必须在设计过程中预测图像稳定性,需要建立包括光学设计、结构动力学和控制环路的一种综合数学模拟模型,研究出姿态控制和结构稳定性对图像移动影响的补偿控制方法。

(2) CCD 温度控制

平流层昼夜温差大,大气压的变化也较大。另外,太阳辐照的不同谱段对飞艇有不同的影响,而飞艇主要吸收红外与可见光辐射,这部分能量是飞艇热量的主要来源,也是影响飞艇温度的主要因素。分析表明,由于太阳能电池吸收效率低,与太阳能电池接触的一面温度起伏在 $70 \sim 100$ 与 $-70 \sim -100$ 之间^[18],温差造成的艇体内部气体温度和压力变化会影响飞艇的外形和浮力,造成飞艇的高度漂移、姿态变化和抗风能力下降等。此外,平流层的温差变化,以及飞艇自身发动机的散热对艇内温度的影响,也会对望远镜的长波红外探测系统产生干扰,而望远镜镜面面型、CCD 等电子元器件对工作环境的温度变化范围都有一定的要求。目前,望远镜常用 CCD 的工作温度是 $0 \sim 30$,存放温度是 $-25 \sim 55$;工作温度在 27 以上时,温度越高,CCD 噪声越大,从而影响测量精度。因此,飞艇内的温度起伏范围会对 CCD 的寿命及测量精度产生影响,工程设计时需对飞艇温度控制进行研究。

(3) 跟踪瞄准和轨道预报

和地基平台相比,临近空间平台的高动态性使观测目标跟踪瞄准和轨道预报具有特殊性。临近空间观测平台的位置不一定是固定的,其与观测目标之间存在着较大的运动速度、以及较大的角速度和角加速度,与光学观测所要求的窄视场的捕获与跟踪相矛盾。平台的姿态调整,跟踪状态下引入的平台姿态变化和平台随机振动等都会影响视场的稳定跟瞄,故须进一步研究飞艇在高

速飞行和定点控制过程中的实时空间目标轨道预报技术。

(4) 定位精度及望远镜实时校正

定位精度是指在长期驻空过程中,飞艇需在指定的范围内保持相对地面静止。飞艇所处的平流层环境很不稳定,经常受热气流、昼夜温差和风等各种扰动影响而偏离原来的位置,这些扰动会引起飞艇内部结构参数的变化。定位精度是指保持水平面内飞艇质心位置不变,它主要通过动力控制系统的推进,抵抗各种扰动,这需要获得风向、风速、飞艇姿态和动力系统 parameters。平流层飞艇在深空,回收过程中经过对流层,对流层气压高,空气密度大,温度随高度的增加而降低,气流具有强烈的对流、湍流运动,这些致使飞艇产生强烈的振动,引起望远镜反射镜抖动,内部光路产生偏移。因此,有必要研究固定望远镜光路、实时调整反射镜位置、并对光路系统进行校正的工程技术。

(5) 光电子系统的防护

在平流层高度,介子、电子、光子、中子、质子等高能粒子的辐射强度较地面大大增加,它们会对望远镜的工作带来不利的影 响,其中对电子器件构成威胁的最主要因素是大气中子。现代电子器件加工工艺的不断发展,器件单元尺寸不断减小,工作电压不断降低,使得器件抵御单粒子效应的能力不断下降。此外,水蒸汽会凝结在望远镜镜片和制冷部件上,长期累积也会影响光学仪器性能。这些都对光电子系统的防护功能提出了更高的要求

7 结束语

临近空间是区别于航天和航空领域的一个全新领域,是一个包含多种交叉学科的高、精、尖技术项目,特别是在空间态势感知领域具有广阔的发展前景。临近空间平台光电探测系统具有地基和天基平台无法比拟的优点,发展临近空间平台光电探测试验将对我国国家安全与国民经济建设具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 高琳,刘贺军,宋耀东.美国空间攻防装备发展现状和趋势[J].电光系统,2009(2):43-46.
GAO L, LIU H J, SONG Y D. Present status and development trends of space attack and defense equipment of USA[J]. *Electronic and Electro-optical Systems*, 2009(2): 43-46. (in Chinese)
- [2] FUGATE R Q. The starfire optical range 3.5-m adaptive optical telescope[J]. *SPIE*, 2003, 4837: 934-943.
- [3] 姜文汉.自适应光学技术[J].自然杂志,2006(1):7-13.
JIANG W H. Adaptive optical technology[J]. *Chinese J. Nature*, 2006(1): 7-13. (in Chinese)
- [4] 吴鑫基,温学诗.现代天文学十五讲[M].北京:北京大学出版社,2005.
WU X J, WEN X SH. *Fifteen Prelection of Modern Astronomy*[M]. Beijing: Peking University Press, 2005. (in Chinese)
- [5] 张逸新,迟泽英.光波在大气中的传输与成像[M].北京:国防工业出版社,2005.
ZHANG Y X, CHI Z Y. *The Transmission of Light in the Atmosphere and Imaging*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [6] HARRISON D C, CHOW J C. Space-based visible sensor on MSX satellite[J]. *SPIE*, 1994, 2217: 377-387.
- [7] STOKES G H, von BRAUN C, STRIDHARAN R. The space-based visible program[J]. *Lincoln Laboratory J.*, 1998, 11: 205-238.
- [8] ANDREAS J E. Space-based Infrared System(SBIRS) system of systems[J]. *IEEE*, 1997, 5: 429-438.
- [9] WU A. SBIRS high payload LOS attitude determination and calibration[J]. *IEEE*, 1998, 5: 243-253.
- [10] SLATTERY J E, COOLEY P R. Space-based Infrared Satellite System(SBIRS) requirements management[J]. *IEEE*, 1998, 5: 223-232.
- [11] GARNHOLZ D B. A proposal for a large-aperture, airship-mounted, stratospheric telescope[C]. 12th Lighter-Than-Air Systems Technology Conference. San Francisco, USA, June 1997: 1-11.
- [12] BERNASCONI P N, RUST D M, EATON H A, *et al.* A ballon-borne telescope for high resolution solar imaging and polarimetry[J]. *SPIE*, 2000, 4014: 214-225.
- [13] JONATHAN McD. Mission update[J]. *Sky & Telescope*, 1999, 98(4): 16-24.
- [14] BECKLIN E E, GEHRZ R D. Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy(SOFIA) [J]. *SPIE*, 2009, 7453: 1-12.
- [15] GULL G E, SAVAGE M L. An introduction to airworthiness for science instruments onboard SOFIA[J]. *SPIE*, 2000, 4014: 183-194.
- [16] ERDMANN M, BITTNER H, HABERLER P. Development and construction of the optical system for the airborne observatory SOFIA[J]. *SPIE*, 2000, 4014: 306-318.
- [17] LEE M, SMITH S, ANDROULAKAKIS S. The high altitude Lighter Than Air Airship Efforts at the US Army Space and missile defense command/army force strategic command[C]. 18th AIAA Lighter-Than-Air Systems Technology Conference, Seattle, USA, 4-7 May 2009: 1-26.
- [18] ONDA M. Design considerations on stratospheric long endurance LTA platform[R]. 13th AIAA, Lighter-Than-Air Systems Technology Conference, June 1999: 204-209.

作者简介:徐 蓉(1973—),陕西西安人,高级工程师,主要从事光学工程方面的研究。E-mail: xscxurong@yahoo.cn