

文章编号 1674-2915(2010)06-0519-15

# 现代航天光学成像遥感器的应用与发展

胡君, 王栋, 孙天宇

(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:** 概述了当前航天光学成像遥感器在对地、对天观测的多个领域的应用现状, 给出了国外著名高分辨率商业卫星的性能指标, 归纳了在轨和即将发射的太空望远镜的工作参数, 展望了以更高的地面分辨率、更宽的地面覆盖和更高成像质量为目标的高性能光学遥感器的发展方向。依托大型光学成像平台的模块化技术和天地一体化设计为代表的综合性光学遥感器, 阐述了实现自动识别和在轨参数自动调整的智能型光学成像遥感器的可行性、环境条件和技术要求。总结了目前在航天光学成像遥感器设计中大口径、主动光学波前探测和在轨智能处理等方面的关键技术和实现难题, 提出了可实现的研究思路和未来的发展前景。

**关键词:** 光学成像遥感器; 自动识别; 自动参数调整; 智能型; 大口径反射镜

中图分类号: TP73; V447 文献标识码: A

## Application and development of recent space optical imaging remote sensors

HU Jun, WANG Dong, SUN Tian-Yu

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

**Abstract:** Recent development status of space optical remote sensors in both earth and space detection fields is described. The specifications of several kinds of high resolution commercial satellites are given and the working properties of space telescopes on orbits and launching are summarized. Then, the developing trends of the high performance optical sensors with high resolution, wider fields of view and higher imaging quality are presented. According to the modeling of the large optical imaging platforms and the incorporating of earth and space optical sensors, it demonstrates the feasibility of intelligent optical imaging sensors based on the automatic target recognition and automatic parameter adjustment and gives working environments and technological demands of the sensors. Finally, it proposes the key techniques of space optical remote sensors in future, such as large aperture mirrors, active optical wavefront sensing and intelligent data processing on orbits.

**Key words:** optical imaging remote sensor; automatic recognition; adaptive parameter adjustment; intelligence; large aperture mirror

# 1 引言

随着现代科学技术的高速发展,各国充分利用太空对地、对天观测没有国界的条件,发展航天光学成像遥感器。航天光学成像遥感器是利用记录图像信息的成像传感器系统来实现目标探测的,按仪器类型通常可分为3类,成像相机、光谱仪和辐射计。成像相机包括画幅相机(在曝光时间内把胶片或面阵 CCD 沿着轨道方向按像移速度移动,使像和探测器相对静止)、成像全景相机(相机的瞬时视场平行于飞行方向的一条像面前的狭缝,相机沿垂直于航线方向摆动,扫描沿穿轨方向的地物,形成很宽的地面覆盖区)、推扫成像相机(镜头直接对地,在镜头的像面上放置线阵 CCD 或 TDI CCD 探测器,线阵的方向垂直于飞行方向);光谱仪包括滤光片分光仪、光栅光谱仪、干涉光谱仪、成像光谱仪,是成像相机和光谱仪相机结合的遥感仪器;辐射计是用于探测各种空间辐射源辐射功率的光电探测器,常见辐射计多用绝对黑体构成,通过测量全光谱波段的光波能量,检测太阳辐射照度。航天光学成像遥感器的地面分辨率依据不同相机种类和在轨高度而不尽相同,目前相机对地分辨率为 0.1 ~5 m,从发展趋势看,不同谱段、不同轨道高度的光学成像遥感器分辨率还在逐年大幅度提高。

光学成像遥感器作为飞行器上对目标遥感观测和探测的重要载荷,通常搭载在航天飞机、人造卫星、宇宙飞船和空间站等太空飞行器上,在轨高度为 150 ~1 600 000 km,常用的有:(a) 地球同步轨道卫星,这种轨道的倾角为零,在地球赤道上空 35 786 km,即卫星在地球赤道上空以圆形轨道绕地球与地球自转同速旋转,实现对地球表面一个区域的连续监测;(b) 极轨轨道卫星,此类卫星绕地球或其它天体卫星的南北极飞行,极地轨道是倾角为 90° 的轨道,在这条轨道上运行的卫星每圈都要经过地球两极上空,可以俯视整个地球表面,主要用于气象和资源观测,借用地球自转的特点,对全球感兴趣的目標进行各种波段的探测;(c) 太阳同步轨道卫星,这种飞行器的轨道平面

和太阳始终保持相对固定的取向,其轨道平面绕地球自转轴旋转,方向与地球公转方向相同,旋转角速度等于地球公转的平均角速度,轨道倾角接近 90°;因为卫星要在两极附近通过,又称之为近极地太阳同步卫星轨道。这种轨道能保持太阳与轨道构成的角度一定,能有效地使用太阳能电池帆板。

由于航天光学成像遥感器应用领域和应用目的不同,所需的搭载飞行平台也不同,而不同的搭载平台环境差别很大,对航天光学成像遥感器的性能、功能和寿命的影响也很大。在空间飞行的飞行器又称为航天器,包括卫星、宇宙飞船、空间站和航天飞机。其中:(a) 卫星是指围绕一颗行星轨道并按闭合轨道做周期性运行的天然天体,人造卫星是发射到太空中,搭载航天光学成像遥感器像天然卫星一样环绕地球或其它行星运行的太空飞行载具,如火箭、航天飞机等。(b) 宇宙飞船是一种运送航天员、货物到达太空,并安全返回的一次性使用的航天器,它能基本保证航天员在太空短期生活,并进行一定的工作,航天光学成像遥感器通常搭载在留轨舱内。(c) 空间站又称航天站、太空站、轨道站,是一种在近地轨道长时间运行,可供多名航天员巡访、长期工作和生活的载人航天器。(d) 航天飞机(又称为太空梭或太空穿梭机)是可重复使用的、往返于太空和地面之间的航天器;结合了飞机与航天器的性质,它既能代表运载火箭把人造卫星等航天器送入太空,又能像载人飞船那样在轨道上运行,还能像飞机那样在大气层中滑翔着陆。

近几年来,光学成像遥感器的应用能力、应用水平与飞行器的设计非常密切,如空间站的结构特点是体积比较大,在轨道飞行时间较长,有多种功能,能开展的太空科研项目多而广。空间站的基本组成是以载人密封生活舱为主体,辅以工作实验舱、科学仪器舱等。当空间站发生故障时可以在太空中维修、换件,延长航天器的寿命。因为空间站能长期(数十年)飞行,可保证太空科研工作的连续性和深入性,对提高科研质量和延长光学成像遥感器的工作寿命有重要作用。

随着航天技术的高速发展,现代的光学成像

传感器从单一功能、单一波(光谱)段和单一种类发展为较小型光学成像传感器,又演变成为星载一体化的小型光学成像传感器;较大型光学成像传感器则发展为多光谱、多种类、全光谱谱段的对天、地大型光学成像传感器,通常搭载在空间站、宇宙飞船等大型飞行器上。目前这两类光学成像传感器已经成为现代光学成像传感器的主流和发展趋势。性能上逐步向大口径、宽覆盖、高分辨率、智能化和自动识别等方向发展,功能上则逐步走向多功能、多种类和多谱段的发展方向。由于科学技术的高速发展和实现手段的不断更新,光学成像传感器发展速度非常快,应用前景非常广,已经成为各国高科技发展的主流和主要方向。

## 2 光学成像传感器的应用

### 2.1 对地观测成像

#### (1) 军事侦察

航天光学传感器起源于军事应用,侦察相机的研制水平代表了航天光学遥感载荷的最高水平。1960年,美国的锁眼1(KH-1)普查型侦察卫星成功发射,标志着这一技术在军事领域应用的开始,开创了航天光学遥感事业。在侦察相机领域,美国的技术水平最好,此外俄罗斯、法国、以色列也具有相当的水平,我国通过积极投入也已经大大缩短了与国际先进水平的差距。

美国侦察相机从KH-1发展到了KH-12,目前在轨服役侦察相机主要是搭载于KH-12侦察卫星上的相机。KH-12卫星(见图1)直径为3.8 m,长为15 m,重约10 t(燃料约为5~7 t),单星造价约10亿美元,从1992年起累计发射5颗。KH-12侦察相机的可见光分辨率为0.1~0.15 m,红外分辨率为0.6~1 m。1 d可飞越目标区域2次,具有侧摆成像功能,能对飞行轨迹东西两侧区域成像<sup>[1]</sup>。另外其多颗卫星处于互补的轨道上,地面重复周期为4 d。由于卫星是成对运行,可运行在昼夜轨道平面、晨昏轨道平面和这两者之间的57°倾角轨道,所以实际的重复周期为2 d<sup>[2]</sup>。利用多个轨道平面的卫星互相配合,不但可实现立体成像,还能在给定的天数内扩大侦察目标的数目,并可利用互补性,在某一目标遇

到直射光反射时保证目标的成像质量。

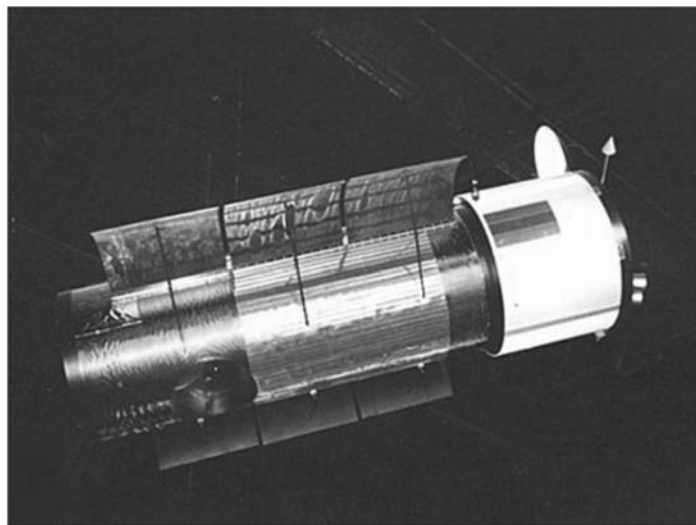


图1 美国KH-12型锁眼侦察卫星

Fig.1 KH-12 reconnaissance satellite model from U. S.

在KH-12基础上,美国陆续提出了下一代成像侦察系统KH-13。KH-13又称为8X卫星,质量为20 t,分辨率为0.1~0.15 m,幅宽为50 km,是KH-12视场宽度的8倍,同时携带光学侦察设备和合成孔径雷达,在保证成像分辨率的同时提高了地面的覆盖宽度<sup>[3]</sup>。

#### (2) 立体测绘

测绘相机主要是为绘制地图服务的,通常是由一台或多台CCD相机组成。测绘对卫星的几何特性要求高,对辐射特性要求低。卫星的几何特性主要表现为地面分辨率和地面定位。地面分辨率主要决定于相机,地面定位精度则取决于轨道控制与测定、姿态精度与稳定度以及相机的观测模式等<sup>[4]</sup>。

测绘相机按照相机组合方式及摄影测量原理不同,可分为3类立体测量相机<sup>[5]</sup>。

第1类为单线阵相机工作模式。其典型代表为法国SPOT1-4系列星上的相机,它是通过相邻接轨道倾斜观测形成重叠立体对来实现立体测绘制图取得三维数据的。德国和以色列小卫星的线阵式推扫式相机则以沿飞行方向的前后摆动来形成重叠立体对,在两个重叠图像的形成周期上优于前者。另外,高分辨率遥感卫星,例如美国的Ikonos, Quickbird和OrbView卫星,以色列的EROS-B卫星以及韩国的Kompsat卫星等,均采用单线阵相机做前、后或左、右摇摆来获取立体影像。

第2类为星载双线阵测量相机工作模式。它由两个具有一定交会角的线阵式相机组成,其优点是获取立体对时不需要卫星指向摆动。如SPOT-5卫星,提高了立体影像获取效率,可沿轨道实时获取立体影像,地面分辨率为5 m,地面覆盖宽度达到120 km,其测量的相对平面精度为10~15 m,高程精度为10 m。

第3类为星载三线阵相机,其构成与前2类不同,它具有从摄取的图像出发重构外方位元素的特点<sup>[6]</sup>。代表性有效载荷或卫星主要包括:德国在航天飞机、空间站和火星探测中采用的MOMS系列三线阵测绘相机。1993年,德国发射的MOMS-2卫星搭载三线阵CCD相机,从理论上解决了摄站外方位元素的重构问题,大大提高了线阵扫描摄影测量的精度。日本为绘制1:25 000比例尺地图,研制并发射了先进陆地观测卫星(ALOS),该卫星配备了目前世界上公开报道的最先进的三线阵CCD立体测绘相机(PRISM),可以实现全球无控制测图。

### (3) 资源探测

国外的资源探测主要采用各种高分辨率的商业卫星完成。1999年9月24日成功发射的

Ikonos-2卫星,是第1颗1 m分辨率的民用对地成像卫星。Ikonos-2的整星重量只有817 kg,而星下点的全色分辨率为0.82 m,成像幅宽为11 km,俯仰、侧摆姿态机动幅度为 $\pm 50^\circ$ ,最大回转速度为4(r/s),重访周期 $< 3$  d。Ikonos-2特有的轴对称、刚性化结构设计,较好地支持了整星机动、敏捷的成像能力,支持立体成像,借助姿态机动能力,采用单颗卫星即可实现短至1 d的重返周期。

Pleiades-1是欧洲第1颗1 m分辨率的商用光学遥感卫星,整星结构采用了与Ikonos类似的刚性化结构,但在设计中引入了更多的最新技术,如采用“光纤陀螺+星敏感器”的控制系统方案,使控制力矩陀螺支持达到更加快捷的姿态机动能力;采用DORIS接收机,提供较高精度的定轨与测姿数据。Pleiades-1作为与Ikonos-2同一级别的卫星,其全色分辨率达到了0.7 m,成像幅宽达到20 km;整星能以 $\pm 40^\circ$ 倾角前、后视成像,具有三维立体成像的能力,重访周期 $< 1$  d;利用地面控制点,能够获得1 m的定位精度。表1列举了目前国外著名的高分辨率商业卫星的部分性能<sup>[7]</sup>。

表1 国外著名的高分辨率商业卫星的性能指标

Tab. 1 Specifications of overseas high resolution commercial satellites

名称	QuickBird-2	WorldView-2	OrbView-3	Pleiades-1	Ikonos-2	GeoEye-1
发射时间	2001	2009	2003	2009	1999	2008
载荷重量/kg	380			295	171	300
分辨率/m	全色:0.61~0.72 多光谱:2.44~2.88	全色:0.46 多光谱:1.8	全色:1 多光谱:4	全色:0.7 多光谱:2.8	全色:0.82 多光谱:3.2	全色:0.27/0.41 多光谱:1.08/1.64
光谱类型/nm	蓝:450~520 绿:520~600 红:630~690 近红外: 760~900	全色+8光谱: (red, blue, green, IR1, red2, edge, coastal, yellow, IR2)	蓝:450~520 绿:520~600 红:625~695 近红外: 760~900	蓝:430~550 绿:490~610 红:600~720 近红外: 750~950	蓝:450~520 绿:520~600 红:630~690 近红外: 760~900	蓝:450~520 绿:520~600 红:625~695 近红外: 760~900
覆盖宽度/km	16.5	16.4	8	20	11.3	9.35/15.2
轨道高度/km	450	770	470	694	680	684/450
存储能力/Gbit	128	2 199	32	750	64	1 200
图像量化/bit	11	11	8/11	8~12	11	11
设计寿命/a	7	7.25	5	5~8	5	5~8

中国第一颗资源卫星—中巴资源1号卫星于1999年发射,2000年~2004年间陆续发射了资源2号01~03星,这些卫星已广泛用于农业、林业、水利、海洋、环保、国土资源、城市规划及灾害监测等领域。到2007年7月,资源1号的数据已经超过了100多万景,相当于覆盖了中国全部领土100多遍,根据这些数据编制了1 500 000西南天山地区遥感地质图和遥感找矿预测图,在西南天山地区预测了4处金、铜矿的找矿靶区,并在吉根找矿区内找到了5条金、铜矿化体。另外还编制了1 250 000塔里木河流域浅层地下水分布遥感解译图和生态地质环境遥感解译图<sup>[8,9]</sup>。

#### (4) 预警相机

预警相机主要有红外和紫外预警两大类。红外预警的特点是<sup>[10]</sup>:采用被动工作方式,即只通过接受目标发出的红外辐射来探测和跟踪目标,抗电子干扰能力强,作用距离远,可在地球同步轨道上有效探测地球表面的导弹和火箭发射活动;工作于超真空、深低温环境的系统,温度灵敏性比其他红外系统更高。以美国两颗太空跟踪与监视系统(STSS)卫星为例,这两颗卫星运行在地球上空1 350 km的近地轨道,用以跟踪和监视全球发射的导弹,能够及时发现导弹发射活动,然后在飞行的助推阶段、中段和末段跟踪导弹及其弹头<sup>[11]</sup>。

同红外预警相比,紫外预警具有虚警率低、不需低温冷却、不扫描、预警器体积小且重量轻等特点。紫外型导弹临近预警系统经历了概略式和成像式两代革新,成像式系统在国外已占据主导。20世纪80年代末,美国推出世界上第一台紫外型导弹临近预警系统AAR-47后,德国、法国、俄罗斯、以色列和南非等国也纷纷投入到这一研究领域。至今国外已推出了10多种型号,其中美国的AAR-54系统由凝视型、大视场、高分辨率的紫外探测器和先进的航空电子电路构成,具有水平360°、俯仰70°的视场范围,角分辨率为1°;目标截获时间约为2 s<sup>[12]</sup>。

#### (5) 气象探测

气象卫星通过多通道高分辨率扫描辐射计、红外光谱仪和微波辐射计等观测地球,获取气象资料,遥感和监测地球环境,其可分为极轨气象卫

星和静止轨道气象卫星两种,可不受地理条件、自然环境及国家区域行政疆界的限制,实现快速、长期、连续、全球、全天候、全天时和多方位的观测<sup>[13,14]</sup>。

国际上气象探测卫星以美国、欧洲、俄罗斯为代表,如美国的国家极轨环境探测卫星系列(NPOESS)、地球静止环境业务卫星系列(GOES);欧洲的Meteosat气象卫星、Metop气象卫星、Envisat环境卫星;俄罗斯的流星(Meteor)极轨气象卫星系列、电子-L(Elektron-L)静止轨道气象卫星等。

还有一些专项的大气探测应用卫星<sup>[15]</sup>,如NASA的高层大气研究卫星(UARS)是第一颗专门用于研究大气平流层的卫星,它提供了关于上层大气能量输入、风及化学组成的完整观测数据,使人类对高层大气的能量、化学过程及动力学过程有了深入了解。1997年,NASA发射的“热带雨量监测”(TRMM)卫星,主要用于热带地区降雨量的测量。

从20世纪70年代起,中国开始研制气象卫星。1988年9月7日成功发射了中国第一颗极轨气象卫星风云1号A星,它采用三轴稳定方式,是中国第一颗传输型遥感卫星。该卫星装有2台5通道可见光和红外扫描辐射仪,扫描宽度达3 000 km。在太空获得了高质量云图照片,捕捉到锋面云系、冷涡云系、温带气旋、暴雨云团、赤道辐射带、热带云图和台风等天气系统的图像。2008年5月,中国第二代首颗极轨气象卫星风云3号A星上天,携带了8类11台共计90多种探测通道的探测仪器,测试谱段从紫外线、可见光、红外线一直到微波频段,在功能和技术上比第一代极轨气象卫星风云1号向前跨进了一大步。

## 2.2 天文遥感成像

### (1) 太空望远镜

太空望远镜由于运行于地球大气层之上,可以获得地基望远镜所无法比拟的优势—成像不受大气湍流的扰动影响,视相度绝佳,无大气散射造成的背景光,因此为高分辨率地观测其他行星、恒星打开了一扇新的窗口。

太空望远镜中首屈一指的当属Hubble望远镜。1990年,NASA和ESA合作通过航天飞机将

Hubble 望远镜送入距地面 569 km 的轨道,在近 20 年的服役过程中拍摄回了大量珍贵的照片,同时也为其它天基观测设备的研制奠定了基础。Hubble 望远镜采用模块化设计,装备了相机、光谱仪和精密制导传感器等多种设备,并且实现了多次的在轨更新维护。其镜片表面镀纯铝(厚 0.076  $\mu\text{m}$ )和镁氟化物(厚 0.025  $\mu\text{m}$ ),可以有效地反射可见光、红外光、紫外光,使得观测谱段从紫外波段一直延伸到红外波段。

詹姆斯-韦布空间望远镜(JWST)作为 Hubble 太空望远镜的后续机,计划于 2014 年发射,是位于拉格朗日第二点的红外线空间望远镜,距离地球背向太阳  $1.5 \times 10^9$  m 处的空间。JWST 采用主

镜轻量化设计,主反射镜由铍制成,口径达到 6.5 m,面积为 Hubble 太空望远镜的 5 倍以上,而质量为 6.2 t,约为 Hubble 空间望远镜的二分之一。其光谱谱段以红外为主,波长 600 ~ 5 000 nm,装备了 3 个光学探测载荷:中红外摄像机和光谱仪 MIRI、近红外摄相机 NIRCам 以及近红外光谱仪 NIRSpec。JWST 另外一个关键技术是空间可展开技术,因为它的主镜的直径比发射它用的火箭更大,为便于发射,主镜被分割成 18 块六角形的镜片,发射时折叠放置,发射后在高精度的微型电机和波前传感器的控制下展开。

表 2 列出了目前在轨运行和即将发射的太空望远镜的基本参数。

表 2 在轨和即将发射的太空望远镜参数

Tab. 2 Specifications of space telescopes on orbits and launching

望远镜名称	发射时间	轨道高度/km	质量/kg	主镜口径/m	搭载观测设备	探测谱段/nm
Hubble 望远镜	1990 年	589	11 000	2.4	先进巡天相机 ACS 第三代广域相机 WFC3 太空成像谱仪 STIS 近红外相机 NICMOS 宇宙起源谱仪 COS 成像光谱与测光仪: SPIRE	紫外线、可见光、近红外线 紫外线和可见光通道 (200 ~1 000) 近红外通道(850 ~1700) 115 ~1 000 近红外: 800 ~2500 深紫外 FUV: 115 ~205 近紫外 NUV: 170 ~320 远红外谱段到 亚毫米谱段
“赫歇尔”远红外空间望远镜	2009 年	1 600 000		3.5	光电阵列和摄谱仪: PACS 远红外外差接收机: HIFI 中红外摄像机和光谱仪: MIRI	光电阵列和摄谱仪 远红外 中波红外: 5 000 ~29 000
JWST 望远镜	2014 年	1 500 000	6 200	6.5	近红外光谱仪: NIRSpec 近红外摄像机: NIRCам	近红外光谱探测 近红外: 600 ~5 000
日冕仪 TPF-C	2016 年	1 500 000	6 400	6	可见光相机	可见光: 500 ~1 100
干涉仪 TPF-I	2019 年	1 500 000		3 ~4	多个独立望远镜组合	中红外: 6 500 ~18 000

## (2) 外太空探测相机

根据 2000 年发布的《中国的航天》白皮书中的定义,国内目前将对地球以外天体开展的空间探测活动称为深空探测。

从 1958 年 8 月 17 日美国发射第一个月球探测器先驱者 0 号开始,人类迈向太阳系的深空探测活动已有近 50 年的历史了。据统计,人类已发射过的向月球以远的太阳系天体开展的深空探测

活动超过200次。在深空探测任务中,以探测月球为主任务的次数最多,超过探测任务的一半,其次是金星和火星<sup>[16]</sup>。

已发射的国内外的绕月探测卫星<sup>[17]</sup>,如美国于1994年发射了Clementine绕月探测卫星,它的相机地元分辨率为108 m,获得了极区图像。欧洲于2003年9月发射Smart-I探月卫星。日本于2007年7月15日发射“月亮女神”探月卫星(KaGuYa)<sup>[18]</sup>,搭载了14种科学设备,包括地形摄像机、X射线荧光光谱仪,月球磁强计、光谱廓线仪、多波段成像仪、高清晰电视摄像机、激光测高仪、月球雷达探测器等;目前“月亮女神”已经拍摄到高清晰的“地出地落”照片,并将有关数据制作成了月球立体动画,用雷达声纳成功地对月球层进行了探测。印度于2008年10月22日发射了“月球一号”探月卫星,其主要目标在可见光、近红外、低能X射线和高能X射线范围内对月球进行高分辨率遥感观测,制作了分辨率为5~10 m的高清晰三维月球表面地形图。中国于2007年10月24日发射嫦娥一号卫星,搭载探测载荷包括CCD立体相机、激光高度计、成像光谱仪、X/γ谱仪、高能粒子探测器、太阳风粒子探测器、微波雷达等。

### 3 光学成像传感器的发展

#### 3.1 高性能的光学传感器

航天侦察相机的主要性能指标是相机的地面像元分辨率、地面摄像的覆盖宽度和光学系统的质量,即光学调制传递函数(MTF)的质量。在不影响飞行器在轨高度的情况下,提高地面像元分辨率、增大地面摄像的覆盖宽度和提高MTF的质量,是目前及未来研究的主要课题和航天光学传感器研究的发展方向。

##### (1) 地面像元分辨率

现代高分辨率地球成像商业卫星,如美国的Digital Globe公司和GeoEye公司研发的相机拍摄的地球表面图像的地面分辨率均优于1 m,最高达到了0.41 m,目前正在研发0.25 m地面分辨率的地球成像商业卫星。而美国KH-12侦察相机的可见光分辨率更是高达0.1~0.15 m,红外

分辨率达0.6~1 m的水平。当今世界,科技发展日新月异,平均3~5年就更新一代卫星,每一颗新一代卫星就比前一代卫星在技术性能指标上有明显的提高并有较好的继承性。

空间航天相机分辨力用地面摄像像元分辨率表达,如当地面分辨率为1 m时,航天CCD相机一个像元尺寸对应地面宽度应为1 m,通常要分辨黑白等间隔的1 p1,需要两个像元分别对应一黑一白线,即航天CCD相机地面像元分辨率相当于胶片相机地面照相分辨力的二分之一。航天CCD相机达到规定的地面像元分辨率,要求航天CCD相机地面采样间隔距离满足规定值要求。地面采样距离 $G$ 与轨道高度、CCD像元尺寸和相机焦距见下式<sup>[21,22]</sup>:

$$G = \frac{Ha}{f}, \quad (1)$$

式中 $H$ 为轨道高度, $f$ 为相机焦距, $a$ 为CCD相机的像元尺寸。由式(1)可知,轨道高度越低并且CCD像元越小,尺寸越小,地面采样距离越小。当轨道高度 $H$ 和CCD像元尺寸 $a$ 确定后,焦距 $f$ 越长,相机瞬时视场越小,地面采样距离越小,分辨力越高。除此以外,地面采样距离 $G$ 的大小和好坏,还涉及到CCD相机MTF、信噪比(SNR)和相机的结构等。综上所述,高性能的光学传感器与这3个参数( $H, a, f$ )直接相关,这3个参数与CCD性能、相机光学系统、电子学控制、机械结构和飞行器的姿态等相关。当然,地面分辨率代表了航天光学传感器的总体性能,如何提高这3个参数的性能指标,是提高航天光学传感器的总体性能的关键技术。

##### (2) 地面覆盖面宽

航天相机地面覆盖宽度越宽,地面采样间距越小,相机成像所得到的信息量越大,地面覆盖面的指标越好。美国KH-13又称为8X卫星,分辨率为0.1~0.15 m,但幅宽达到50 km,是KH-12视场宽度的8倍。在无反射镜偏摆扫描的航天相机中,航天相机CCD相机地面覆盖宽度等于CCD拼接后总的长度对应的地面覆盖宽度,CCD拼接后总的长度与地面覆盖宽度的比例关系与 $H$ 有直接的关系。 $H$ 越高地面覆盖宽度越宽,依据式(1), $H$ 越高越易损失航天相机地面分辨力。显然,根据应用目标和任务需要,在设计航天光学遥

传感器的过程中,需要解决好 CCD 相机地面覆盖宽度与较高的地面分辨率之间的矛盾,尽量在不影响地面分辨率的同时,提高地面覆盖宽度。因此,在航天光学遥感器设计方案中,为提高 CCD 相机地面覆盖宽度,应增加偏摆扫描的功能,使地面覆盖度等于反射镜偏摆角度所对应的地面覆盖宽度。如美国 1992 年以后发射的 KH-12 侦察相机就具有侧摆成像功能,能对飞行轨迹东西两侧区域成像<sup>[19]</sup>。这种设计方法,由于需要增加结构设计运动件,使用 CCD 推扫积分实时变换等相关技术、像移补偿实时计算方法和复杂的光学系统设计,会使航天光学遥感器系统总体复杂度加大,可能引起相机寿命缩短和总体可靠度下降。解决好这些矛盾是发展航天光学遥感器关键性技术问题,也是航天光学遥感器未来发展需要研究的主要议题。

### (3) 较高成像质量

航天相机的性能好坏,很重要的一点取决于相机的光学系统成像质量。成像质量主要与系统的像差大小有关<sup>[20]</sup>,可以利用空间几何的方法,通过大量的光路追迹计算来评价,如绘制点列图或各种像差特征曲线等。由于衍射现象的存在,还可以采取基于衍射理论评价方法,绘制实际成像波面或光学传递函数曲线等。这些方法在实践过程中均存在有优缺点,往往需要综合多种评价方法。与其它方法比较,利用光学传递函数来评价光学系统的成像质量是一种比较好的方法,该方法把物体看作由各种频率的谱组成,即把物体的光场分布函数展开成傅里叶基数或傅里叶积分的形式。由于光学传递函数与光学系统的像差有关,又与光学系统衍射效果有关,用光学传递函数评价光学系统的质量,既可以取得可靠的效果,又可以客观地给出光学成像质量。

光学传递函数反映光学系统对物体不同频率成分的传递能力。通常利用调制传递函数(MTF)曲线的积分值来评价成像质量,在理论上,像点的中心点亮度值等于 MTF 曲线所围的面积,MTF 所围的面积越大,表明光学系统传递的信息量越多,光学系统的成像质量越好,图像越清晰<sup>[17]</sup>。对于航天相机,通常采用 MTF 或对比传递函数 CTF 来表征相机空间频率的响应函数,

MTF 表示对正弦波的响应,CTF 表示对方波的响应<sup>[19]</sup>。航天相机在不同环境下的 MTF 分析方法如下:

(1) 航天相机在实验室的静态传递函数<sup>[19]</sup>主要由光学系统的 MTF 和 CCD 几何尺寸决定的 MTF 乘积确定。MTF 光学由光学设计的 MTF 设计和加工装调引起的 MTF 加工乘积确定;(2) 航天相机的动态传递函数是指相机在轨摄像时的传递函数,主要由相机静态传递函数、TDI CCD 推扫成像传递函数及环境条件的传递函数等确定;(3) TDI CCD 推扫成像传递函数分为沿飞行方向的传递函数(CCD 积分时,CCD 接收器引起的 MTF 和 TDI 时间延迟积分与像移)和沿垂直飞行方向的传递函数(偏流角误差引起);(4) 环境条件对相机动态传递函数的影响因素主要有大气 MTF、温度 MTF 和震动 MTF,大气 MTF 影响是由大气向上散射的背景产生,大气抖动的影响可以忽略不计;(5) 针对不同的目标对应不同的像的调制度分析。

总之,航天相机要达到规定的光学设计的传递函数,需要充分利用 MTF 曲线、MTF 曲线的积分值及在不同环境下的 MTF 分析方法进行系统的分析和成像质量评价,克服在各种环境下对成像效果的影响,不断提高光学系统的成像质量。同时必须在设计中对光学系统留有足够大的相对孔径,使得光学系统的衍射极限的传递函数达到要求的值。

## 3.2 综合光学成像遥感器

随着航天技术的高速发展,航天光学成像遥感器的发展已经超出人们预想范畴,平均 2~3 年就会有一次创新结构和设计推出。近几年,在卫星与载荷(航天光学成像遥感器等)一体化、全光谱段航天光学成像遥感器和对天对地一体化结构等综合光学成像遥感器方面均有较大发展,特别是多光谱谱段的光学成像遥感器已经取得了长足的进步,当前,在轨运行的光学成像遥感器中属于这类光学成像遥感器的已经占有较大比例。

### (1) 模块化多光谱谱段

随着航天技术特别是载人航天技术的高速发展,为了在太空做更多科学试验、更方便更有效地探索宇宙空间秘密和探测地球物理科学,各国的



科技人员不断研究更加先进的、满足在太空工作和生活需要的综合光学成像传感器,以探索天地间的奥秘。多(全)光谱段航天光学成像传感器是目前的主要发展方向。美国、欧洲等发达国家及地区,在该项领域已经取得了较大的科学进展。如:哈勃空间望远镜(Hubble Space Telescope),它是一个典型模块化结构天文望远镜,涵盖紫外线、可见光、近红外线等谱段(115 ~2 500 nm),属于多光谱段航天天文光学成像传感器,用于对天文的科学研究。该望远镜成功地弥补了天文观测、天文物理探索的不足,解决了天文学家在地面无

表3 Hubble空间望远镜主要参数

Tab.3 Primary parameters of Hubble space telescope

波段	可见光, 紫外线, 近红外线
在轨高度	589 km
飞行周期	96 ~97 min
飞行速度	7 500 m/s
发射日期	1990年4月24日
望远镜质量	11 000 kg
任务时间	20年
光学口径	2.4 m
光学焦距	57.6 m
望远镜尺寸	长: 13.2 m; 直径: 4.2 m

法解决的许多天文学的基本问题,帮助人类对天文物理有更多的认识。哈勃望远镜的主要参数见表3,当前包括的光学成像传感器和探测仪器有ACS, STIS, FGS, NICMOS, WFC3和COS。其中ACS(Advanced Camera for Surveys)是先进的测量照相机,波长范围从紫外线到可见光到近红外线,视场角是WFPC2的2倍,由3个子仪器组成;WFC(Wide Field Camera)为可见光和近红外线相机;HRC(High Resolution Camera)为高档相机,可拍摄由银河系中央发出并穿过黑洞的光线照片;另外还包括一个日冕观测仪。STIS为照相机/摄谱仪(Space Telescope Imaging Spectrograph),波长范围从近红外线到紫外线;FGS为精密导向传感器(Fine Guidance Sensor)是哈勃空间望远镜的导引系统,它的3个精细导星传感器主要用于保持望远镜指向的准确性,但也能用于天体的准确测量,测量精度为0.000 3;NICMOS为近红外照相机/多目标分光计(Near Infrared Camera and Multi-object Spectrometer);COS为天文光谱仪(Cosmic Origins Spectrograph),包括一个深紫外线通道(FUV),一个近红外线通道(NIR);WFC3是广角照相机,包括一个紫外线和可见光通道(UVIS),一个近红外线通道(NIR)。详见表4。

表4 哈勃望远镜上的光学成像传感器

Tab.4 Optical image remote sensors in Hubble space telescope

仪器类型	照相机/摄谱仪 (STIS)	近红外相机 (NICMOS)	天文光谱仪 (cos FUV)	天文光谱仪 (cos NUV)	广角照相机 (WFC3 UVIS)	广角照相机 (WFC3 NIR)
质量/kg	318	370	/	/	/	/
几何尺寸/m	2.2 ×0.9 ×0.9	2.2 ×0.89 ×0.89	/	/	/	/
像面尺寸/pixel	/	/	32 768 ×1 024	1 024 ×1 024	4 096 ×4 096	1 024 ×1 024
视场/(°)	MAMA-25 ×25 CCD-50 ×50	低分辨 51.5 ×51.5 中分辨 17.5 ×17.5 高分辨 17.5 ×17.5	/	/	160 ×160	123 ×137
波段/nm	115 ~1 000	800 ~2 500	115 ~205	170 ~320	200 ~1 000	850 ~1 700

由6台光学仪器组成的Hubble空间望远镜,除主光学系统外,还包括光学成像传感器设备和对天各种光谱探测仪器,这些设备可随时由宇航员更换,形成了模块化结构,延长了服务周期,可不断地提高空间望远镜技术性能和功能。Hubble

空间望远镜虽然仅作为天文望远镜,但仍然涵盖了较宽的光谱谱段。

在国内,中国嫦娥一号卫星虽然是一台CCD立体相机,但包含了激光高度计和成像光谱仪等多台仪器,构成了嫦娥一号立体相机系统。

对地的综合光学遥感器研究内容包括紫外成像、超高分辨率可见光成像、甚高分辨率红外成像、甚高可见光-红外超光谱成像、激光雷达回波探测和 THz 大气谱线观测等综合多光谱光学遥感器,目前这些空间成像仪、光谱仪和探测仪已经成为各国的主要研究内容。

## (2) 天地一体结构

空间现代光学遥感器已经成为地球物理研究、空间科学研究及银河系研究的重要辅助手段,同时通过卫星等各种载体,已经广泛应用在海洋监测、气象预报、地矿探测和军事侦察等方面。近几年,国内把天地一体化结构的综合光学遥感器研究列入议事日程,这种结构组成的系统,由于其功能强大、光机结构复杂、几乎全光学谱段范围、搭载的仪器设备种类较多,形成了光学成像遥感系统综合平台。通常该平台需要搭载在大型卫星或飞行器上,如空间站和航天飞机等。这种主光学系统共享结构,可以考虑两种方案:一种是对天、对地通过的光机结构直接分离;另一种是通过二维转动结构,实现对天、对地转换。由于该平台需要在统一的主光学系统下进行分光,可分割出 10 多个光学通道(如对天、对地的紫外成像、可见光成像、红外成像、可见光-红外超光谱成像、激光雷达回波探测和 THz 大气谱线观测等),覆盖了几乎所有光谱谱段,实现起来非常困难。这种系统,目前国内外仍处于研究阶段,其优点在于:(a) 利于目标自动识别技术和参数自动调整技术的应用研究和开展,利于应用不同的光谱谱段成像仪器和探测系统索取所需的信息和数据,进行自动分析、自动图像数据处理和识别,达到光学遥感器工作的参数自动调整的目标;(b) 便于航天员有选择地使用仪器设备和拍摄时机,对感兴趣的目标采用最佳通道仪器或多个通道进行并行工作,达到快捷、准确获取信息和目标;(c) 有利于探索空间对地、对天观测一些共性技术问题;(d) 有利于大型光学望远镜的模块化设计、系统集成和精确指向等技术问题。其缺点是,由于结构庞大,可搭载的航天器受限制,不利于大面积推广。

## 3.3 智能型光学成像遥感器

智能型光学成像遥感器主要包括自动识别技术和参数自适应调整技术。自动识别技术包括地

面景物识别、相机工作条件认证和拍摄环境的确认。自动识别技术涉及人工智能理论、控制理论和图像学多个研究领域,涵盖多光谱成像、分布式成像、图像处理、模式识别、光谱分析和成像分辨率等多项技术,融入了进化计算、神经网络及多种智能处理方法。在实现目标自动识别过程中,需要依据地面目标、空间环境和工作条件等不同情况,给出理论模型或算法,可以自动识别出地物、空中浮遮物及它们所处的地点和类别,并能实时对其进行存储和转移。参数调整自适应技术包括适应外部光照条件,自动完成调整调光参数;根据图像内容,结合图像的清晰度评价,自适应调整焦面位置;根据外部条件变化重新实现在轨的参数标定。

### (1) 在轨目标自动识别技术

随着遥感图像的精度提高,其数据量不断增加,有限的存储空间和卫星传输带宽与大量遥感图像数据存储和处理间的矛盾日益突出。发展在轨目标自动识别技术是缓解该矛盾的重要手段。

对于不同的使用者,在海量的遥感图像中,并不是所有数据都含有需要的信息量,即数据量不等同于信息量,因此可根据不同的实际应用目的识别出有价值的数据子集,即感兴趣区域,对其进行不同的处理后,提供给不同的使用者。

感兴趣区在轨目标自动识别技术是一个综合性、智能化、多学科交叉的研究领域,该技术涉及目标自动识别、多光谱成像、红外成像、激光雷达、分布式成像和图像处理等多项技术。

从第一颗卫星发射成功起,人们就开始利用计算机进行卫星遥感图像的识别研究。最初是利用人机交互方式从遥感图像中获取有关地学信息。这种方法的实质仍然是遥感图像目视判读,它依赖于图像解译人员的解译经验与水平。20世纪80年代,主要是利用统计模式识别方法进行遥感图像识别。20世纪90年代提出了利用专家知识进行图像分析。21世纪初,越来越多的数据处理方法被综合应用到遥感图像识别中,融入了进化计算、神经网络、模糊聚类和容差粗糙集等多种智能处理方法。虽然利用计算机进行自动识别难度较大,但是随着科学技术的发展,借助图像处理、模式识别和其他相关领域知识的不断推陈出



图 2 IKONOS 卫星识别铁矿的图像

Fig. 2 Recognition of iron ore using IKONOS satellite

新, 该领域得到了长足的发展。图 2 为融合后的 IKONOS 卫星识别的铁矿图像。

目前大多数空间相机是多光谱的, 同一片 CCD 上含有多个波段, 多个波段可以同步采集图像, 形成的多光谱图像比单一波段或全色谱段图像更有价值。

多光谱可以有效地提高空间相机全天候观测能力, 而且, 由于不同类型的地物对光谱反射和吸收特性不同, 通过多光谱空间相机可以更好地对地物进行识别。可见光、近红外和短波红外谱段 (0.4 ~3 μm) 的遥感器测量的是地面和大气及云反射或发射的辐射量。中波红外谱段 (3 ~ 5 μm) 是太阳反射到热辐射的过渡区, 大于 5 μm 时, 地球自身发射热辐射占主导, 由于不直接依赖太阳源, 长波红外、微波谱段 (> 5 μm) 遥感器不仅可以在夜间采集图像, 也可以在白天采集图像。

多分辨率成像技术如图 3 所示, 为一个分布式的多分辨率成像系统。当无目标时, 成像系统用多台相机组合(低分辨率状态) 普查观测场景; 当发现感兴趣目标时, 成像系统调整成用一台或多台适用当时环境的高分辨率详查相机(同时) 观测场景。这种分布式综合结构通过普查和详查相结合的方式, 大大提高了成像系统对目标, 特别是感兴趣区目标的自动识别能力。

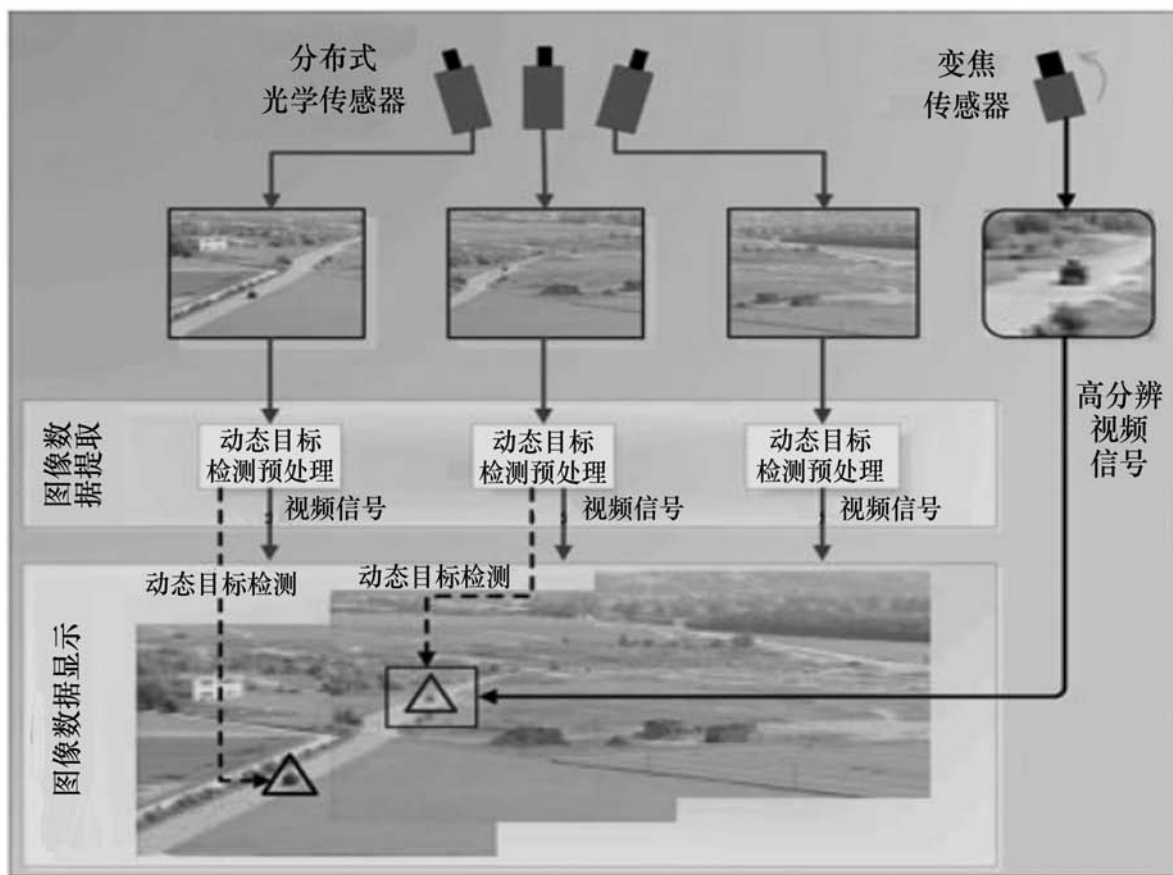


图 3 多分辨率成像系统示意图

Fig. 3 Sketch of multi-resolution image system

目前, 1 颗卫星或飞行器也可以搭载多台、多功能相机, 比如三线阵相机就是由正视相机、前视相机和后视相机组成的。正视相机的视轴垂直于地面, 前视、后视相机的视轴与正视相机的视轴之

间成一定夹角, 3 个相机的线阵 CCD 的方向互相平行, 并垂直于飞行方向。通过图像配准、拼接和融合技术可以形成大视场角的遥感图像, 用类似于图 3 分布式成像系统普查和详查相结合的方式

式,可以更有效地实现空间相机对感兴趣区目标的自动识别。

### (2) 在轨自动参数调整技术

自动参数调整技术是空间相机研制的关键技术之一,包括自动调焦、自动调偏流和自动调光等,目前在轨实时调偏流与调光理论上在国内已有所进展,而在轨的自动调焦技术是自适应参数调整的难点,目前尚未突破。

调焦系统是空间相机的重要组成部分,是决定空间相机成像质量好坏的关键组件。空间相机所处的运载和运行环境(如冲击、过载、振动、压力及温度等)非常复杂,对环境变化和温度波动的影响比较敏感。由于环境的变化,相机焦面将产生不同程度的离焦,为保证相机在比较复杂的环境下的成像质量,需对相机变化的像面加以校正,因此设计自动调焦系统是十分必要的。我国航天相机研究起步较晚,早期的相机功能结构简单,多数相机不具备自动调焦功能。近年来,国内在实验室成功实现了在轨地面注入调焦,同时在地面应用长焦距相机动态照相分辨力检测目标发生器、计算机网络系统、飞行器模拟装置、平行光管和图像高速采集及存储系统,实现了准(非全部性能)动态调焦,标志着我国空间相机在轨调焦技术进入了实际应用阶段。近年来出现了许多调焦机构和调焦方法,主要分为主动式和被动式两种,主动式如三角测距、红外测距和超声测距;被动式主要依靠图像分析的办法。然而,多数自动调整方法并不适合于航天相机线阵、高速和场景时变的特点,目前在实际中使用的方法仍然是反复地地面人工判读和重复地注入干预,调整的时效性较差,随着探测分辨率的不断提升,相机的焦距越来越长,整机结构受外部环境影响越来越敏感,焦面位置的一个微小变化可能造成成像质量的迅速减低,即便此变化未出焦深范围,但传递函数已经降低很多了,因此非实时性调整可能越来越不能满足任务的要求,自动、精准的自动调焦技术成为一种重要的研究方向。

## 4 现代光学成像遥感器系统的关键技术

### (1) 反射镜结构的轻量化设计

目前国外的地基大口径设计最大已达到10 m,国内也成功实现了6 m量级(LAMOST);国外的天基的大口径仅实现6 m量级,可见天基大口径设计更为困难。在天基条件下,飞行器所能承载的设备重量是有限的,这就要求在不影响性能的前提下,一方面寻找更为合理的新型高分子碳纤维复合材料,如CFRC材料等,另一方面对镜体结构设计进行更为严格的轻量化。传统型设计采用蜂窝夹心结构<sup>[23]</sup>,蜂窝单元几何形状对反射镜刚度和减重率的影响的研究吸引了许多研究人员,但是目前尚无统一的结论。

### (2) 主动光学波前探测技术

随着探测口径进一步的增大,天基条件下更为轻薄的主镜设计以及空间可展开设计使得采用主动光学技术成为趋势和必然,比如主镜6.5 m的JWST使用了主动光学技术以保证高精度的面型。主动光学的难点是波前探测技术,比如经典的干涉测量技术和比较前沿的图像处理技术(如PR和PD技术)<sup>[24]</sup>,但这些检测手段的输入对象均为星点目标,使用范围比较受限,对地观测时,自然景物输入下的检测技术尚不成熟,需要研究人员进一步探索。

### (3) THz—新的光谱探测范围的挑战

为了获取更多的目标景物有用信息,除了需要遥感系统有更高的空间分辨率外,更宽谱段范围、更高光谱分辨率、辐射分辨率越来越被关注,从多角度、多侧面的获得信息成为航天遥感器探测技术的另一个发展着眼点。

航天遥感器的工作谱段虽然覆盖了从微波到射线几乎整个电磁波谱段范围,但目前的应用主要还集中在红外、可见到紫外探测这一个波段,从远红外到亚毫米波这一波段的开发由于技术原因基本上处于空白,这一波段被称为THz波段。THz卫星太空成像和在天文方面的应用刚刚起步,通过连续波THz成像技术,利用THz波的穿透特性,建立THz连续波成像系统,可实现与光学成像技术有一定互补性的THz成像技术。

随着THz应用的广泛开展,对THz波探测器的灵敏度和频率分辨率等性能也提出了越来越高的要求,而THz辐射源的低输出功率和THz频率范围内较高的热辐射背景噪声等因素对探测造成

较大的影响,另外 THz 技术由实验室向航天工程探测方向的转化也存在诸多的难题<sup>[25]</sup>,等待着研究人员去解决。

#### (4) 高精度控制技术

为了实现天基遥感器的跟踪和凝视性能,要求空间相机具有极高的指向精度和控制精度,以 Hubble 望远镜为例,其控制指向精度达到了 0.01,24 h 凝视时间内的稳定度达到 0.007,超过了许多地基设备的性能,因此对于控制手段和控制策略提出了更高的要求,其中复合轴控制技术和精确导星技术是实现的关键。

#### (5) 在轨智能处理技术

最主要的一个前沿技术是自动目标识别技术。该技术通过模拟人对遥感图像的生理视觉逻辑心理等多层次的认知过程,探求其内在规律和认知模型,以空间信息认知理论和空间要素关系模型为基础,分析目标图像的颜色、形状、纹理和光谱等特征,实现图像的智能解译和自动识别。智能处理是综合了智能计算理论、知识工程、专家系统等多学科交叉知识共性的关键技术。

## 5 结束语

航天光学成像遥感器包括了军事侦察相机,立体测绘相机,气象、海洋观测相机,陆地资源勘测相机,空间天文和深空目标探测相机等空间光学遥感器,目前美国在该领域领先于其它国家和地区,代表了空间探测技术应用的最高水平。围绕如何利用好无国籍的太空,各国纷纷加大投资力度,特别是科学技术较发达的国家和地区,对现代航天光学成像遥感器的研制、发展提出了更高的目标。本文通过对国内外飞行器、光学成像遥感器和探测器应用情况的描述和分析,提出地面目标自动识别技术、多光谱多分辨率设计技术、智能控制技术、天地一体化结构设计技术、高分辨率宽覆盖高图像质量技术和大口径的工艺处理技术是空间探测技术未来主要应用与研究方向。列举了大口径设计、新型 THz 波段探测、高精度控制和智能处理等几项关键技术的要求,意在为航天光学成像遥感器的研究和应用提供技术支持和引导。

### 参考文献:

- [1] 徐鹏. 美军成像侦察卫星的未来发展[J]. 现代军事, 2009, (10): 52-55.  
XU P. Future development of U. S military reconnaissance satellite[J]. *Modern Military Affairs*, 2009, (10): 201-208. (in Chinese)
- [2] 徐俊, 姚行中, 乔哲. 美国 KH-12 照相侦察卫星及其情报处理体系研究[J]. 中国水运, 2008, 6(1): 212-213.  
XU J, YAO X ZH, QIAO ZH. Research of KH-12 reconnaissance satellite and its information disposing system[J]. *China Water Transport*, 2008, 6(1): 212-213. (in Chinese)
- [3] 邹振宁, 周芸. 美国卫星发展战略探要[J]. 飞航导弹, 2005, (4): 17-22.  
ZOU ZH N, ZHOU Y. Probing in strategy of american satellite development[J]. *Winged Missile*, 2005, (4): 17-22. (in Chinese)
- [4] 吴培中. 星载陆地光学观测器的类别与特性[J]. 国际太空, 2002, (9): 8-12.  
WU P ZH. Types and characteristics of earth optics observation equipment in satellite[J]. *Space International*, 2005, (9): 8-12. (in Chinese)
- [5] 王金堂, 乌崇德. 国外几种星载光学遥感器的发展情况简介[J]. 航天返回与遥感, 2002, 23(2): 15-20.  
WANG J T, WU CH D. Introduction of some foreign spaceborne optical remote sensors[J]. *Spacecraft Recovery Remote Sensing*, 2002, 23(2): 15-20. (in Chinese)
- [6] 周胜利. 三线阵 TDICCD 在测图卫星中的应用分析[J]. 航天器工程, 2007, 16(4): 19-22.  
ZHOU SH L. Analysis of three-linear TDICCD array application in cartography satellite[J]. *Spacecraft Eng.*, 2002, 16(4): 19-22. (in Chinese)
- [7] 郭今昌. 商用高分辨光学遥感卫星及平台技术分析[J]. 航天器工程, 2009, 18(2): 83-89.  
GUO J CH. Technical analysis of high resolution commercial optical remote sensing satellite[J]. *Spacecraft Eng.*, 2009, 18

- (2) :83-89. ( in Chinese)
- [8] 中国的资源探测卫星(上) [ J ]. 中国航天, 2008, ( 12 ) : 15-17.  
China earth resources satellite( 1 ) [ J ]. *Aerospace China*, 2008, ( 12 ) :15-17. ( in Chinese)
- [9] 中国的资源探测卫星(下) [ J ]. 中国航天, 2009, ( 1 ) : 11-12.  
China earth resources satellite( 2 ) [ J ]. *Aerospace China*, 2009, ( 1 ) : 11-12. ( in Chinese)
- [10] 邴启军, 冯书兴. 星载红外预警探测器工作机制和对抗方式[ J ]. 科技导报, 2009, 27( 21 ) :111-115.  
BING Q J, FENG SH X. Working mechanism of spacebased infrared detector for early warning and its combat modes[ J ]. *Sci. Technol. Rev.*, 2009, 27( 21 ) : 111-115. ( in Chinese)
- [11] 黄剑炜. 导弹防御: 美要监视全球所有导弹[ N ]. 中国国防报, 2009-11-03( 5 ).  
HUANG J W. Missile defense: U. S. will monitor global missiles[ N ]. *China Defense*, 2009-11-03( 5 ). ( in Chinese)
- [12] 李喜来, 徐军, 曹付允, 等. 导弹紫外预警技术研究[ J ]. 战术导弹技术, 2008, ( 3 ) : 70-72.  
LI X L, XU J, CAO F Y, *et al.* . Research on ultraviolet warning technology of missile[ J ]. *Tactical Missile Technol.*, 2008, ( 3 ) : 70-72. ( in Chinese)
- [13] 中国的气象卫星(上) [ J ]. 中国航天, 2009, ( 2 ) : 10-11.  
China meteorological satellite( 1 ) [ J ]. *Aerospace China*, 2009, ( 2 ) : 10-11. ( in Chinese)
- [14] 中国的气象卫星(下) [ J ]. 中国航天, 2009, ( 3 ) : 9-12.  
China meteorological satellite( 2 ) [ J ]. *Aerospace China*, 2009, ( 3 ) : 9-12. ( in Chinese)
- [15] 高洪涛, 陈虎, 刘晖, 等. 国外对地观测卫星技术发展[ J ]. 航天器工程, 2009, 18( 3 ) : 84-91.  
GAO H T, CHENG H, LIU H, *et al.* . Development of overseas earth-observing satellite technology[ J ]. *Spacecraft Eng.*, 2009, 18( 3 ) : 84-91. ( in Chinese)
- [16] 叶培建, 彭兢. 深空探测与我国深空探测展望[ J ]. 中国工程科学, 2006, 8( 10 ) : 13-18.  
YE P J, PENG J. Deep space exploration and its prospect in China[ J ]. *Eng. Sci.*, 2006, 8( 10 ) : 13-18. ( in Chinese)
- [17] 何绍改. 近年来全球探月活动扫描[ J ]. 科苑, 2008, ( 11 ) : 56-59.  
HE SH G. Scanning lunar exploratio matter in the world recently[ J ]. *Sci. Garden*, 2008, ( 11 ) : 56-59. ( in Chinese)
- [18] 赵葆常, 杨健峰, 贺应红, 等. 探月光学[ J ]. 光子学报, 2009, 38( 3 ) : 461-467.  
ZHAO B CH, YANG J F, HE Y H, *et al.* . Lunar exploration optics[ J ]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38( 3 ) : 461-467. ( in Chinese)
- [19] 韩昌元. 光学与光学工程[ M ]. 北京: 科学出版社, 2005: 230-241.  
HAN CH Y. *Study on Optical Engineering*[ M ]. Beijing: Science Press, 2005: 230-241. ( in Chinese)
- [20] 郁道银, 谈恒英. 工程光学基础教程[ M ]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 171-180  
YU D Y, DAN H Y. *Basic Tutorial with Optical Engineering*[ M ]. Beijing: Machine and Industry Press, 2007: 171-180. ( in Chinese)
- [21] 韩昌元. 近代高分辨地球成像商业卫星[ J ]. 中国光学与应用光学, 2010, 3( 10 ) : 201-208.  
HAN CH Y. Recent earth imaging commercial satellites with high resolution[ J ]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2010, 3( 3 ) : 201-208. ( in Chinese)
- [22] 韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统[ J ]. 光学精密工程, 2008, 16( 11 ) : 2164-2172.  
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera[ J ]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16( 11 ) : 2164-2172. ( in Chinese)
- [23] 续强, 王延凤, 周虎, 等. 空间光学遥感器主反射镜轻量化及支撑设计[ J ]. 应用光学, 2007, 28( 1 ) : 43-46.  
XU Q, WANG Y F, ZHOU H, *et al.* . Design and analysis of lightweight structure and support for primary mirror of space optic remote sensor[ J ]. *J. Appl. Opt.*, 2007, 28( 1 ) : 43-46. ( in Chinese)
- [24] 韩昌元. 空间光学的发展与波前传感技术[ J ]. 中国光学与应用光学, 2008, 1( 1 ) : 13-24.  
HAN CH Y. Progress in space optics and wave front sensing technique[ J ]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2008, 1( 1 ) : 13-24. ( in Chinese)

[25] 杜艳丽,段智勇,弓巧侠,等.太赫兹波探测器的研究进展[J].半导体光电,2009,30(4):481-491.

DU Y L, DUAN ZH Y, GONG Q X, *et al.* . Research progresses on terahertz detectors[J]. *Semi Photoelectricity*, 2009, 30 (4) : 481-491. ( in Chinese)

作者简介:胡 君(1952—),男,吉林蛟河人,研究员,硕士研究生导师,主要从事智能控制与信息处理、空间光学遥感器仿真测试技术方面的研究。E-mail: huj@ciomp.ac.cn

王 栋(1979—),男,山西阳泉人,博士,副研究员,主要从事空间相机的地面测试技术、数字图像处理技术方面的研究。E-mail: wangdong983232@yahoo.com.cn

孙天宇(1975—)。男,内蒙古通辽人,工程师,主要从事智能控制与信息处理技术方面的研究。

E-mail: suntianyu@163.com