

# 我国遥感卫星系统发展进阶路径探讨

梁晓珩, 梁秀娟, 柯蓓

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

**摘要:** 文章回顾了作为人造地球卫星重要分支的遥感卫星及其相关的遥感技术和遥感产业的国内外发展历程, 结合未来技术发展趋势和我国新时代发展需求, 分别针对高端卫星和商业卫星, 探讨我国卫星遥感系统发展进阶路径, 提出值得关注的重大技术方向, 旨在为卫星系统规划、遥感载荷部署、卫星应用拓展等提供借鉴。

**关键词:** 遥感卫星; 遥感技术; 遥感产业; 高端卫星; 商业卫星; 系统发展

中图分类号: V474.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2021)01-0100-06

DOI: [10.12126/see.2021.01.016](https://doi.org/10.12126/see.2021.01.016)

## The development path of remote sensing satellite system in China

LIANG Xiaoheng, LIANG Xiujuan, KE Bei

(Beijing Institute of Spacecraft Systems Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** This paper reviews the development of remote sensing satellites as an important part of man-made Earth satellites, including related technologies and industrial applications. Based on the development trend of the future technology and the new demands in the new era in China, the development path of satellite remote sensing system in China is discussed, and some noteworthy technical directions are put forward in the lines of high-end satellite and commercial satellite, respectively, in view of the system planning of satellites, the deployment of remote sensing payloads, and the expansion of satellite application fields.

**Keywords:** remote sensing satellite; remote sensing technologies; remote sensing industry; high-end satellite; commercial satellite; system development

收稿日期: 2012-12-16; 修回日期: 2020-05-14

**引用格式:** 梁晓珩, 梁秀娟, 柯蓓. 我国遥感卫星系统发展进阶路径探讨[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(1): 100-105

LIANG X H, LIANG X J, KE B. The development path of remote sensing satellite system in China[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(1): 100-105

## 0 引言

1957年10月4日,世界上第一颗人造地球卫星Sputnik-1发射入轨,标志着人类航天时代的开始。经过多年的技术演进和发展,人造卫星在导航、通信、气象、遥感等方面的广泛应用,深刻影响了人类文明进步。其中,遥感卫星作为人造卫星的一个重要分支,依靠其携带的相机、光谱仪、合成孔径雷达(SAR)等载荷进行对地观测、感知、探测等。遥感卫星一般运行在300 km以上的轨道,俯瞰地球,能在一定时间内对全球或指定区域进行观测。遥感卫星积累下来的多种类、多谱段、长跨度大数据,为掌握气候变化、地球圈层变化,支撑人类经济社会发展和军事变革提供了重要保障<sup>[1-2]</sup>。

从世界范围来看,遥感卫星经历了胶片成像时代、光电传感时代、高分辨时代和智能处理时代,技术水平越来越高,应用范围不断扩大,提供了诸多遥感影像产品和数据应用服务,极大促进了人类经济发展和生活水平提高。

本文回顾遥感卫星发展历程,结合未来技术发展趋势和我国新时代发展需求,研究探讨我国卫星遥感系统发展进阶路径。

## 1 遥感卫星发展历程

第一代遥感卫星以胶片成像为主要技术特点。图像记录在胶片上,一般在空间拍摄图像,再返回地面冲洗、处理。美国于1958年将Explorer-6卫星发射入轨,该卫星发回了世界上第1张从太空拍摄的地球图像,以全新技术手段和视角开启了人类卫星遥感探测的新一页。随后第2年,美国将Corona卫星发射入轨,其拍摄的图像用于军事侦察目的,卫星携带胶片摄像机,在飞临目标上空时对感兴趣区域成像拍摄,曾在我国核试验4天后拍摄到了爆炸原点。我国于1975年成功发射入轨第1颗返回式遥感卫星,该卫星由中国空间技术研究院研制;后来又相继发射了国土资源普查卫星等多种返回式卫星系统,开创了我国航天遥感时代。第一代遥感卫星以胶片成像、卫星返回地面,并在地面处理图像为特征,受携带胶片数量限制,卫星在轨驻留时间较短。

第二代遥感卫星以光电探测(CCD、CMOS、红

外阵列等)为主要技术特点,探测信息数字化,并通过微波链路将成像数据及时传输到地面,彻底摆脱了胶片限制,留轨时间大大延长,可以达到几年,能够长时间对地成像并感知地球变化。美国于1972年7月发射入轨的“陆地卫星1号”(ERTS-1,又称Landsat-1)是第一颗地球资源卫星,携带摄像机和多光谱扫描仪,地面分辨率达到80 m。Landsat-8卫星于2013年2月发射入轨,其携带的陆地成像仪(OLI)能够获得15 m分辨率的全色数据。我国于1986年启动了“资源”系列遥感卫星的研制,这是中国传输型遥感卫星的起点,多年来共发射了“资源一号”“资源二号”和“资源三号”3个系列,积累了大量航天遥感数据。1999年发射的“资源一号01星”CCD相机空间分辨率19.5 m,幅宽113 km;2012年发射的“资源三号”的正视相机分辨率为2.08 m,幅宽51.1 km<sup>[3]</sup>。

第三代遥感卫星在空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率上获得重大进步,对地成像空间分辨率达到亚米级,时间分辨率达到每天多次重访,光谱分辨率达到nm级。对地成像更为精细,获取的数据量呈爆炸式增长,也可称之为精细观测时代。比较有代表性的第三代遥感卫星系统有:美国DG公司于2014年8月发射入轨的Worldview-3卫星,可见光图像空间分辨率达0.31 m;我国于2014年8月发射入轨的“高分二号”卫星,能够获取全色分辨率0.8 m、多光谱分辨率3.2 m的图像数据;2016年8月发射入轨的“高分三号”卫星,工作于C频段,能够获取1 m分辨率的SAR图像;2019年11月发射入轨的“高分七号”卫星,可以获得亚米级立体影像。

未来的第四代遥感卫星,将以精细观测、智能处理、协同互联、高时效应用为主要特征,具备更高的时效性、精确性和泛在性。随着CPU、存储器、AI芯片、高速通信等技术进步,在轨遥感卫星获得更多发展可能性。将复杂的地面处理设施所承担的功能部分“搬移”到卫星上去,在空间实现数据预处理、特征识别等的技术正在受到越来越多国家的关注,并投入大量资源进行开发研究。也可以说,美、俄、欧洲等关于未来遥感卫星的发展竞争,正在由单纯的追求分辨率、精确性等向追求在轨快速处理、智能处理等方向转变。

## 2 遥感技术发展趋势

遥感器作为遥感卫星的有效载荷,与卫星平台一起构成遥感卫星系统。遥感器通常包括光学遥感器、微波遥感器、激光雷达、太赫兹探测器、量子传感器等。随着光电子器件、集成电路芯片、MEMS等技术的迭代,遥感器已发展成门类较为齐全、功能不断丰富的重要技术领域。近年来,国内外在遥感器技术研发上投入了很多资源,技术发展日新月异。

### 2.1 探测要素、谱段和手段更全面,综合观测能力逐步提升

面向不同目标要素的探测需求,国外光学有效载荷的探测谱段逐渐拓展至紫外到热红外波段,且谱段设置更加合理。光学载荷根据应用需求提升对特殊要素(如雾霾、碳汇/碳源等)的观测能力,如ICESat卫星在轨运行7年,获取的数据可用于绘制全球森林地图,进行森林吸收碳及树木积蓄碳的研究;近期发射的ICESat-2/ATLAS载荷进一步提升了其地面光斑直径和地面采样间距指标。国外海洋观测已形成高低轨道优化配置、不同谱段不同尺度分辨率相结合、高分辨率与大覆盖区域相结合的载荷体系,能够实现对海洋多种要素的观测,并重视卫星系列发展,以保持遥感数据的多样性和连续性,具备对海洋-大气、海洋-陆地等多方面进行综合探测与业务应用的能力<sup>[4]</sup>。

### 2.2 空间分辨率和光谱分辨率持续提升,精细化观测成为热点

各国在研载荷的空间分辨率指标多优于目前在轨载荷。为了获得不同目标要素的精细光谱特征,国外光学有效载荷的光谱分辨率也在不断提高。陆地观测高分辨率载荷从Ikonos-2的0.82 m分辨率到Worldview-3/4的0.31 m分辨率;海洋观测海岸带成像由200~1100 m的分辨率提高到50~100 m,水色观测分辨率由1100 m提高到500 m;大气极轨卫星中,1998年发射的NOAA卫星空间分辨率达到1.1 km,目前在轨的NPP卫星空间分辨率达到0.75 km,欧洲在研的极轨气象载荷METImage空间分辨率达到0.25 km。光谱分辨率普遍达到5 nm水平,有益于利用光谱区分浮游植

物类别,可对水体进行更好的识别及量化遥感;0.1 nm 高光谱分辨率可以对大气辐射中的微弱信号实现有效探测,获取高精度大气成分二维/三维分布专题图<sup>[5-6]</sup>。

### 2.3 遥感器(有效载荷)性能不断提升,量化水平越来越高

国外在大量、长期、持续遥感数据应用经验基础上,通过各种技术手段大幅提升有效载荷的几何定位精度、辐射定标精度、测量精度等指标。如:GeoEye-1、WorldView-1/2/3/4卫星的无控点几何定位精度优于 $\pm 3$  m。OCE卫星系统采用星上内定标、太阳定标、月亮定标、地面辐射校正场定标、交叉定标等多种手段相结合的复合定标方式,提升载荷辐射定标精度至 $\pm 2\%$ 。SeaWiFS、MODIS传感器通过增加光学元件,降低目标固有偏振敏感度,提高海洋水色反演精度;增加谱段通道和精细化光谱采样,提升矿产、油气、水色、海温、大气温/湿度等要素的探测精度。LIST传感器采用大口径接收、多波束等方式,提高激光载荷测高精度,精确量化陆地、植被、冰盖、内陆水体等目标特征,基本实现全球高程三维测绘。

### 2.4 新体制遥感卫星发展迅速,多视角观测能力不断增强

近几年,以Skybox公司的Skybox视频小卫星星座和行星(Planet)公司的“鸽群”(Flock)系列为代表的大规模微纳遥感卫星星座得到快速发展。Skybox视频小卫星星座已部署13颗,Flock系列微纳光学卫星星座已部署近300颗,可提供以高重访、低成本为特点的全球中、高分辨率卫星图像,大大拓展了成像遥感的新用途。轻小型光学载荷可以灵活研制,批量生产,一箭多星、机动发射,组网运行,竞争优势明显,国内外应用前景广阔。同时,采用云服务、专业APP等方式,尝试提高实时响应和定制化服务水平。衍射成像望远镜技术、在轨组装望远镜技术、综合孔径干涉望远镜技术不断走向实用<sup>[7]</sup>;计算成像技术、量子成像技术已经完成理论试验验证;3D打印、自由曲面光学加工等新技术正在走向空间应用。星上数据实时处理、智能处理成为热点,光学图像在轨校正技术、智能云判技术等方

向备受关注。未来随着星上软件重构,大规模运算能力、存储能力的提升,以及多星互联协同技术、微波和光学数据融合技术等不断进步,航天遥感有望实现更多突破。

### 3 遥感产业发展态势

遥感产业包括卫星制造、卫星发射、卫星应用等几方面,其中重点在于卫星应用。据 SIA 统计数据,截止到 2018 年年底,全球在轨业务运行的卫星数量达到 2100 颗,其中有 668 颗是遥感卫星,约占在轨运行卫星总数的 1/3。2018 年全球遥感卫星应用产业收入达到 21 亿美元。随着遥感卫星数量和数据越来越多,高分辨率卫星图像数据应用日益普及,遥感卫星对政府、行业、军事及大众消费的带动作用明显,未来 10 年遥感卫星制造和数据应用市场预计还将保持快速增长。

为实现空间资源规模化、业务化、产业化发展,我国于 2015 年 10 月发布《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025 年)》,将研制建设遥感卫星、通信卫星、导航卫星三大系统及其他附属产品与服务,最终形成达到国际化先进水平的空间基础设施。此《规划》着眼于满足我国经济社会各领域发展需要,并明确提出支持商业化发展,引导遥感卫星成为商业航天投资热点。

21 世纪空间技术应用股份有限公司、长光卫星技术有限公司、中国四维测绘技术有限公司、珠海欧比特宇航科技股份有限公司等企业踊跃参与,逐步发展了“北京”“吉林”“高景”“珠海”等商业遥感卫星星座。新兴公司突破传统产业模式的束缚、利益链条的纠葛,综合运用大数据、云计算等信息技术,在移动互联网时代,面向消费用户提供全球覆盖、近实时响应的定制化服务,正在从“数据仓库”向“数据专家”转变,其颠覆性的商业模式和卫星应用创新,进一步促进了遥感产业的增长。

在国内,随着高分辨率遥感卫星(“高分”)重大科技专项工程的推进,亚米级高分影像数据日益增多,正在打破国外遥感卫星数据垄断。国土、自然资源等传统领域应用不断深化,金融、物流、保险等方面的新兴应用不断涌现,同基于位置的服务融合应用成为遥感应用新的增长点。据统计,优于 2.5 m 分辨率的遥感原始数据直接消费约 5 亿元/年,年平

均增长率达到惊人的 8%。遥感数据深度处理加工应用服务等产业规模年均达到数十亿元,保持快速增长。“一带一路”沿线近 60 个国家遥感应用需求巨大,据估计,到 2025 年,“一带一路”沿线国家的商业遥感市场规模能够达到 60 亿元,若考虑延伸的地理信息系统建设、解决方案等业务,有望突破百亿元规模。

### 4 未来一代卫星遥感系统进阶路径

考虑军、民、商各类遥感用户的数据需要,以及遥感应用产业的蓬勃发展势头,遥感卫星研制也面临新的挑战 and 机遇,遥感卫星大小互补、高端与低端衔接、高中低轨道结合是一条相对合理的体系化发展路径。从卫星重量和尺寸看,可分成大、小卫星 2 类,大卫星一般承载能力强,可以配置多类载荷,起到综合遥感、多手段探测的作用;小卫星一般体积较小,配置单一载荷,成本优势突出,能够大量和快速部署;在行业应用、应急处置或作战体系中,两类卫星可以互补协同,共同完成多类型使命任务。从卫星的价值和重要性看,可分成高端卫星和商业卫星 2 类,高端卫星一般是具有重要价值的高可靠卫星系统,数量不多,一旦损毁会造成地面业务中断等重大影响;与其对应的是商业卫星,一般成本较低、功能够用,数量可以很多,相互协同也能发挥非常大的作用。

#### 4.1 高端卫星发展进阶

未来高端卫星的发展,不能仅关注空间分辨率等指标,重点是要在新体制、新概念、颠覆性等方面发力,着力解决国家重大战略需求,瞄准重大技术突破,以国家投资为主,带动一大批关键技术突破,引领卫星遥感技术、应用体制跨越发展、跨域融合等。高端卫星主要的发展方向有:

##### 4.1.1 充分利用中轨道资源

美国 SpaceX 公司在 2019 年分 2 批将 120 颗“星链”卫星发射入轨。据 SpaceX 公司未来发展规划称,他们将在几年内在低地球轨道发射部署 42 000 颗卫星,以实现全球覆盖。2019 年 9 月 2 日,ESA 的“风神”气象卫星与 StarLink44 产生碰撞风险,ESA 采取紧急变轨措施,避免了一次可能的“太空交通事故”。考虑到所有国家、企业的星座发展计划,未来几年,低地球轨道将变得拥挤不堪,卫星数

量与碎片数量将具有同等规模,发生碰撞的风险进一步加大。因为小卫星成本低,业主往往不在乎损毁,国际上也没有相关法律界定责任,这就给大卫星、高价值卫星带来巨大的在轨生存压力。为此,必须瞄准中轨道资源,积极加大耐辐照宇航芯片、高可靠有效载荷等技术研发,在中轨道部署高端卫星。根据初步仿真结果,若卫星入轨采用 6000~8000 km 轨道高度,平均单次过境时长约 1 h,单星可实现一天 2 次观测,能极大提升光学、红外、SAR 等载荷的观测时效性。

#### 4.1.2 追求性能卓越和领先

高端卫星有责任为地球整体综合观测贡献更多数据,从国家和行业层面推动以全球整体观、系统观和多时空尺度来研究地球、认识地球。结合信息化、网络化、智能化技术进步,高端遥感卫星系统要承担起技术引领进步的重任,在在轨智能任务规划、在轨数据处理、目标识别与自动跟踪等方面不断取得重大突破,在好用性、易用性上凸显价值。这就需要强化多手段技术融合,令大型卫星平台携带多种关联载荷,便于同时获取多源数据并实施星上处理,即可只部署少量卫星占据中高轨宝贵资源,以强时效、近连续观测优势解决地面快速变化状态的监控等问题。

#### 4.1.3 注重跨域融合一体化

为增强对特定区域、特定目标的监视和风险预警能力,需要发挥高轨卫星凝视监测和扫描监测范围广、持续时间长的优势,统筹中高轨区域监视与灾害预警系统建设,提高可见光、红外、SAR 成像分辨率和谱段覆盖,在高轨部署少量卫星实现区域连续、多窗口监视观测。探索遥感、通信一体化技术体制,由 1 颗卫星承载遥感、通信 2 类载荷,以缩短用户获得数据及第一手信息的时间。探索将所有高端卫星有效链接,再配置在轨高端计算节点、存储节点,形成空间云服务能力。推动空间信息常态化进入政府、行业、企业、科研机构等的业务链和价值链,促进高端遥感卫星及应用系统成为国家信息基础设施的重要组成部分和可依赖的信息源。

## 4.2 商业卫星发展进阶

### 4.2.1 推进星座规模化应用

微小卫星以其快速研制、成本低廉、功能适度等优势开辟了人造地球卫星发展的重要方向。这得

益于技术推动与需求牵引 2 方面因素:一方面,以 MEMS 微光机电、高集成度 IC 芯片等技术为代表的部组件小型化、微型化发展迅猛,不断推动卫星向更高功能密度比、更高承载比演化;另一方面,对遥感数据时效性、定制性、低成本获取的需求使得传统大型卫星研制方式显现不足。因此,广受关注的微小卫星发展因势利导,受政府及市场多方支持,技术和应用不断成熟,已然成为空间系统的重要组成部分。

发展日新月异的微小卫星技术热度未减。大力发展分布式、微小、微纳集群卫星遥感技术,是推动卫星遥感低成本、批量化和组网集群应用的重要途径。或者将微小卫星用于专题型、功能简化、特殊遥感,如红外成像、重力场探测、环境要素获取等,以网络化、智能化实现传感、通信和数据融合;或者将微小型编队和大型卫星系统组网应用,有望满足一体化、多层级应用需求,有利于实现一点接入、全网连通,提供数据实时获取、处理和快速下传<sup>[8]</sup>。

### 4.2.2 公益与市场适度平衡

面对气候气象灾害、海洋监测等公益应用,适度补足新型手段。目前,全球长周期、精细化风场测量数据出现新的需求,如热带气旋海面风速测量精度要求达到 0.2 m/s 水平,同时希望大范围准连续观测,故可以考虑采用大规模微纳卫星星座,轨道高度设计在 500~600 km,利用 GNSS 反射信号,免掉大功率微波发射源,可以连续、有效获取风场测量数据,有望提高对大气气旋全寿命周期、高精度监测能力。在运行模式上,可考虑采用国家引导、市场融资模式,获取的数据兼做公益和商用,公益上可以支撑国家应对全球气候变化,助力“一带一路”倡议,提高沿线国家防灾减灾救灾水平等。同时,还可应用于海浪、冻土等要素监测,在海洋动力、农业农村、自然灾害应急管理等领域具有一定前景。

### 4.2.3 找准突破口和持续发展的潜力

围绕成像、普查、详查等多尺度、高重访观测需求,可考虑采用大规模组网方式实现区域或全球成像遥感。在未来一段时间内,针对我国综合探测频段相对匮乏、分辨率与幅宽不能兼顾、复杂场景定量化遥感不足等问题,可以在可见光成像技术基础上,大力发展红外系统和雷达系统。例如,多频、多

极化、多模式 SAR 卫星系统,能够穿透树冠,监测森林生物量,制作全国以及全球覆盖空间连续的森林生物量分布专题图,每年更新 1 次,大幅提升我国对于全球森林资源监测能力。通过体系化设计,多颗 SAR 卫星组网运行,可以在地形测绘、交通、农业、应急管理等方面实现更多应用,并全面提升森林覆盖普查、农业生物量评估、三维形变监测、交通设施探测等能力<sup>[9]</sup>。

## 5 结束语

本文研究探讨了我国卫星遥感系统发展进阶路径,提出了值得关注的重大技术方向,希望为遥感载荷、卫星系统、卫星应用等领域发展提供借鉴。遥感卫星系统的发展以应用需求为起始,以数据应用为归宿。因此向系统要技术,向应用要效益,这两点须平衡发展,有机协调。鉴于卫星遥感数据市场前景广阔,且具有战略价值,建议国家制定鼓励性政策,实现公益和商业互补发展,支持和鼓励社会资本投入高分辨率遥感卫星制造及遥感数据应用产业,发挥社会资本灵活便捷、市场敏锐等优势,补充完善以政府为主导的发展模式;等待条件成熟时,结合“一带一路”倡议,鼓励企业走向国门,将我国卫星制造和卫星应用技术推广到国际市场。

## 参考文献 (References)

- [1] 卞小林. 多源微波遥感数据综合应用系统设计与实现[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2009: 1-5
- [2] 付成龙. 遥感产品并行生产技术的研究及其应用[D]. 郑州: 河南大学, 2014: 1-3
- [3] 李德仁. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星——资源三号测绘卫星[J]. 测绘学报, 2012, 41(3): 317-322  
LI D R. China's first civilian three-line-array stereo mapping satellite: ZY-3[J]. Acta Geodaetica ET Cartographica Sinica, 2012, 41(3): 317-322
- [4] 王涛. 国外海洋卫星应用发展现状及趋势[J]. 太空探索, 2018(11): 16-19
- [5] 李忠宝. 遥感卫星系统及其应用的发展与思考[J]. 卫星应用, 2014(11): 23-28
- [6] 朱珺. 国内外静止气象卫星的发展综述[J]. 中国科技成果, 2018(8): 6-9
- [7] 刘韬. 美国天基微透镜阵列干涉光学成像技术发展初探[J]. 国际太空, 2018(4): 52-54  
LIU T. Preliminary study on the space-based microlens arrays interference optical imaging technologies[J]. Space International, 2018(4): 52-54
- [8] 朱莎莎. 微纳飞行器群姿态智能协同控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015: 1-7
- [9] 刘志勇, 孙伶俐, 申晴蕾. 我国遥感卫星军民融合发展路径研究[C]//第六届高分辨率对地观测学术年会. 成都, 2019

(编辑: 闫德葵)