

# 第一部分

## 对地观测系统的发展综述

自 1957 年第一颗人造卫星发射成功以来，卫星遥感的发展和应用彻底改变了千百年来人类只能从地球表面对天气进行局部观测的历史，开拓了从太空观测全球天气和研究气候变化的新时代。

现在以 TERRA 为标志的国际新一代对地观测卫星在地球系统科学等多学科的研究发展中起到了举足轻重的作用，其极轨和地球静止轨道卫星平台，以及作为国际新一代对地观测系统补充的小卫星平台相辅相成、互为补充，在不同高度获取多谱段、多频次、可覆盖全球的地球表面的大气圈、生物圈、水圈、岩石圈、冰雪圈等各个圈层的信息，为科研、生产及许多社会经济活动服务，发挥了重要作用，是国家经济建设、社会发展不可缺少的重要保障。本部分将简要叙述对地观测系统发展的历程和各个阶段具有代表性的卫星平台及其传感器的特性和应用。



# 第一章 对地观测卫星发展的简要历程

空间对地观测系统和技术是获取空间对地信息、促进地球系统科学和空间信息科学等学科发展的支柱。建立可以随时监测整个地球的观测系统,掌握地球环境与资源的状况及变化,准确地获取地球环境和资源的信息,是解决资源与环境问题的首要步骤。为此,必须解决获取地球环境信息所使用的信息获取与处理技术,即空间对地球观测技术。对地观测技术包括机载对地观测、空间站及卫星系统组成的对地观测平台进行对地观测等等,其中以卫星系统平台为主。

自从卫星发射成功以来,已经过去 50 多年,人造卫星成了最重要的航天器,它的数量占整个航天器数量的 90% 以上,其应用范围涉及政治、经济、社会、科技诸多领域。以卫星观测平台为主的对地观测技术经历几代技术的发展和更新,为人类社会的发展进步作出了巨大的贡献。现在,对地观测技术正向着更为先进、综合、精确、实时监控的方向蓬勃发展。

这一章简要回顾了对地观测系统的发展历程,介绍了美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, 简称为 NASA)的对地观测系统 Earth Observation System 简称为 EOS)计划和地球科学事业(ESE)战略计划的 Earth Science Enterprise Strategy 简称为 ESE 战略计划)发展,然后对作为这些计划核心的国际新一代对地观测系统所发射的卫星及其所搭载的传感器进行了简要的描述和总结。

## § 1.1 EOS 计划开始前对地观测卫星的发展 1960s—1980s)

人类的祖先很早就有遨游太空的美好幻想,当前苏联发射了世界上第一颗人造卫星,幻想才变成了现实。1957 年 10 月 4 日,世界第一颗人造卫星——人造地球卫星 1 号——的升空,标志着人类开拓宇宙的新纪元。人造卫星的出现,彻底改变了千百年来人类只能从地球表面上进行对地球局部观测的历史,开拓了从太空观测全球的新时代。此后相继发展起来的气象卫星、资源卫星、海洋卫星等等,它们的共同特点均是以人造地球卫星为观测平台,以遥感为探测手段,从外部空间对地球大气进行观测,从而获取研究所需的各种空间信息,因而都统称为对地观测卫星。

在经历了“首次”和“从未见过”的新奇和狂热之后,人们开始坐下来冷静地思考和探索,这样观测到地球能有多大的实用价值。最早对地球环境进行系统探测和研究的卫星是气象卫星。1960 年 4 月 1 日,NASA 发射了第一颗试验气象卫星——电视和红外观测卫星(TIROS-1, Television Infrared Observation Satellite),这是气象发展史上的里程碑。自 TIROS 气象卫星系列以后,NASA 接着又发射了 ESSA, Nimbus,ITOS,NOAA 等气象卫星系列,包括极地轨道和静止轨道。这些气象卫星不仅对于地球大气圈的研究起着重大的作用,给人类带来了巨大的利益,如台风预报等;而且在无云的情况下也给大尺度的地球表面现象(如积雪分布、海冰漂流、浅海海水透明度等)的研究提供了大量有益的动态数据。其他的气象业务卫星系统还包括同步气象卫星(Synchronous Meteorological Satellite 简称 SMS)、国防气象卫星 Defense

Meteorological Satellite Program 简称 DMSP 等等。

气象卫星在所有的对地观测卫星中发展得最早，同时卫星遥感系统还向陆地资源卫星、海洋遥感卫星、军事卫星等等不同的应用方向发展。地球资源卫星、海洋卫星等以对地行星尺度观测为目的的卫星，均采用近极地太阳同步轨道。

在人类对于自然资源迫切需求的推动下，陆地资源卫星发展起来，用于拍摄地球表面图像，提取有用信息用于勘查地球资源。美国在 1965 年开始地球资源调查计划，并于 1972 年 7 月成功发射了第一颗地球资源技术卫星（ERTS-1），星上搭载三个 RBV 和多光谱扫描仪 MSS。其中 MSS 有 4 波段 分辨率 79m。ERTS 后改称陆地卫星 Landsat 是全球第一颗民用陆地成像卫星。至 EOS 计划实施前，已经发射了 6 颗 Landsat 卫星。到 Landsat 4 时 星上除了 MSS 外 还增加了主题绘图仪（Thematic Mapper, TM）分辨率提高到了 30m。Landsat 系列卫星现在已经成为研究区域与全球变化的基本工具。

与此同时，美国研制了第一颗专门用于海洋遥感的海洋卫星 SeaSat-A 载有微波辐射计 SMMR、微波高度计 RA、微波散射计 SASS、合成孔径雷达 SAR、可见光红外辐射计 VIRR 等 5 种传感器 用于测量海面起伏、波高、海流、水温和海面风场。SeaSat-A 于 1978 年 6 月 26 日发射 仅运行了 106 天，却圆满地完成了雷达测高计试验（ALT）、扫描式多频道微波辐射计试验（SMMR）、微波风场散射计试验（SASS）、合成孔径图像雷达试验（SAR）、可见光及红外辐射计试验（VIRR）共 5 项海洋动力学测量试验，获得大量海洋信息，被誉为海洋卫星遥感的里程碑。同年发射的 Nimbus-7 上装载了一个专门用于大洋水色研究的观测仪器 CZCS 它一直运行到 1986 年，为全球大洋水色研究提供了大量信息。1985 年美国发射了海洋地形卫星 GeoSat，主要测量有效波高、风速和中尺度海洋特征。多年来，美国在海洋遥感卫星发展方面一直占据着领先地位。

其时对地观测系统也迅速在全世界的范围内推广。前苏联是最先发射人造卫星的国家，曾于 1962—1970 年间发射了 20 个 Cosmos 卫星 其中从 1967 年发射的 Cosmos-184 到 1970 年的 Cosmos-384 是气象卫星。1969 年前苏联发射第一代低轨道气象卫星 Meteor-1，该系列卫星一直延续到 1981 年的 Meteor-31 共 30 颗。Meteor-31 开始以 Meteor-Priroda 系列命名。从 1975 开始，前苏联开始发展第二代低轨道气象卫星 Meteor-2 该系列的第 25 颗星也归属于 Meteor-Priroda 系列。第三代 Meteor-3 于 1984 年发射，一直延续到 1998 年。这些系列的卫星主要用于测量云、冰雪及地表和大气辐射等，共计 50 多颗。用于海洋观测的卫星有 1987 年发射的 Cosmos-1870。1988 年 7 月发射的 Okean-01 用于资源环境遥感，后来则改用 ALMAZ 系列命名。

法国国家空间局 Centre National d'Etudes spatiales 简称为 CNES 于 20 世纪 70 年代末提出了地球观测卫星（SPOT）计划 并于 1986 年 2 月 22 日发射 SPOT-1 卫星。迄今为止，共发射了 4 颗 SPOT 卫星，除了 SPOT-3 失败外，其他的卫星均在轨正常运行。SPOT 系列卫星已运行十余年，在土地利用与管理、土地覆盖、森林覆盖监测、土壤侵蚀和土地沙漠化的监测以及城市规划等研究方面发挥了重要的作用。

欧洲国家通过欧洲空间局（European Space Agency 简称为 ESA）从 1968 年开始发展气象卫星 于 1972 年确立欧洲气象卫星（MeteoSat）计划，并于 1977 年发射成功第一颗卫星 MeteoSat。1981 年欧空局定制了欧洲遥感卫星（ERS）计划，ERS-1 于 1991 年 7 月 17 日入轨运行。

日本空间发展局 (NASDA, National Space Development Agency of Japan) 在 1977 年 7 月 14 日发射第一颗静止地球观测卫星 (GMS), 二十多年来已经发射五颗卫星。1987 年 2 月和 1990 年 2 月, 海洋观测卫星 MOS-1、2 入轨运行, 星上载有高分辨率的可见光与近红外辐射计、微波扫描辐射计、合成孔径雷达和高度计等。

可以说卫星的出现促进了空间遥感科学的发展, 为对地观测获取地表空间信息提供了基本条件。从 20 世纪 60 年代到 80 年代之间, 几个比较重要的气象卫星系列如图 1-1 所示。

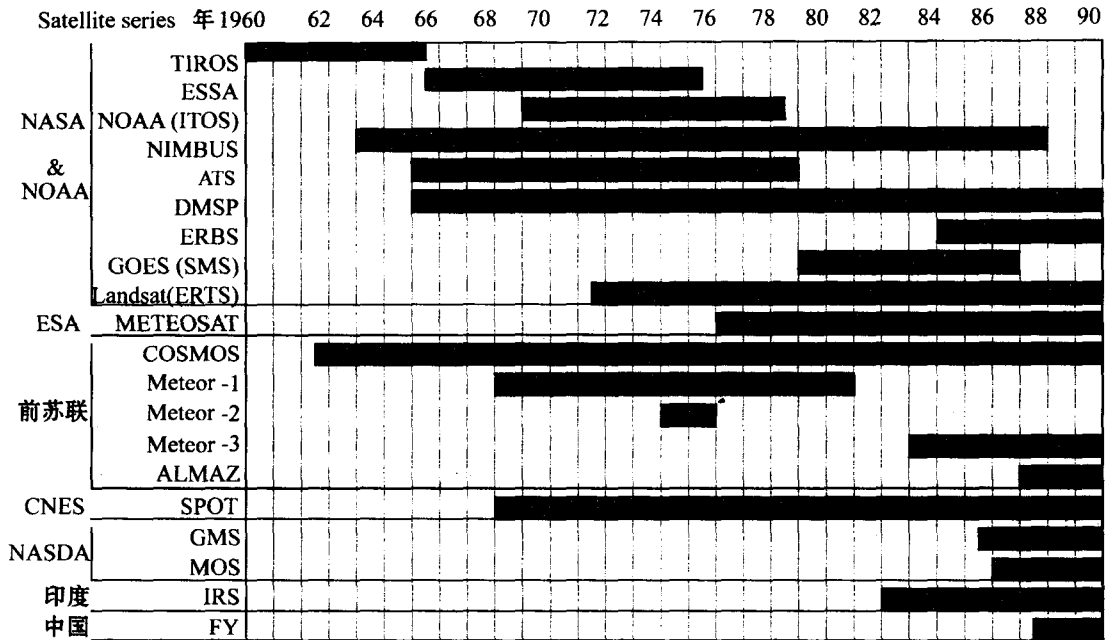


图 1-1 1960s—1980s 发射的卫星概况

经过这一时期的发展, 到 20 世纪 80 年代后期, 在大气、陆地、海洋三大应用领域基本上完成了应用对地观测遥感技术的初步研究工作。

## § 1.2 从 EOS 到 ESE

到了 20 世纪 80 年代, 对地观测遥感技术的发展, 传统地球科学各分支学科的发展成熟, 以及人类活动对生存环境造成日益明显的影响, 这三方面因素迫切要求将地球作为一个整体进行深入研究, 从而促成了地球系统科学 ESS 的提出。

1983 年 NASA 组织成立了 SMRWG (EOS Science and Mission Requirements Working Group) 在 GSFC (Goddard Spaceflight Center) 制定 EOS 计划, 明确提出将地球科学作为各分支相互作用的一个系统来进行研究; 并且就地球科学的发展问题, 提出以地球系统科学作为今后 20 年内的重大科学目标, 发展极地轨道平台作为用于这一科学研究的最主要的地球观测系统 EOS。

EOS 计划是比较全面的, 它指导着当时的科学技术发展。该计划于 20 世纪 90 年代开始

实施，用以观测获得全球系统的定量变化的目标。EOS 计划主要是科学认识全球尺度范围内整个地球系统及其作用机理等，进而预测十年到百年地球系统的变化及其对人类的影响。EOS 计划将全球当做一个完整的系统来进行观测和研究，考虑传统的地球科学各个分支学科之间的相互影响和作用，这就促成了研究和认识地球科学的一个新的科学学科——地球系统科学 Earth System Science 的提出。EOS 包括了陆地覆盖和全球生产力、季节性和年度气候预报、自然灾害、长期气候变化、大气臭氧 5 个领域。同时，这种时间尺度从几十年到上百年、空间尺度覆盖全球或全球大部分区域的全球变化研究，又依赖于对地观测系统的发展。

EOS 计划由三部分组成：

(1)EOS 科学研究计划。科学研究是 EOS 计划的基础，它以美国 NASA 和其他研究机构及其国际合作伙伴的地球科学研究工作为基础，依需要适当进行补充。EOS 计划现阶段主要研究任务是：①现有卫星资料的应用；②EOS 资料应用的预先研究；③发展对现有的和将来的观测资料进行同步分析和判释的数值模式。已取得的研究结果正在推动着 EOS 计划的其他两部分工作。

(2)EOS 数据信息系统 (EOSDIS——EOS Data Information System)。EOS 由众多遥感仪器组成的庞大对地观测系统，所产生的数据数量也是巨大的。这些大量的空间数据都要处理成有用的信息。EOS 计划将专门建立数据和信息系统，除了按常规方法建立数据标准格式的数据库之外，还将研究海量数据的管理方法、所有权、及预订数据等方法。

数据信息系统 (EOSDIS) 的设计宗旨是：有利于 EOS 研究机构对 EOS 资料的充分利用；向用户长期提供的可信度高的观测资料。对于 EOSDIS 的要求是：具有能与轨道上的平均数据速率相适应的能力。在资料处理方面，要求一级产品于 48 小时内完成，二级和三级产品于 96 小时内完成。在历时 15 年的 EOS 任务期间，EOSDIS 具有数据回放、算法更新、产品发布和存档的能力；具有先进的网络设施，友好的用户界面；对观测平台有指挥控制能力。

EOSDIS 的建立采用分阶段、逐步完善的方式。从 1991 年开始，首先使用分散在各地的地球科学和应用资料系统能正常工作，其次是加强对计算设施方面的投资，逐步使众多单一的 EOS 研究活动的计算设施变成 EOSDIS 的分支；最终在第一个 EOS 平台发射之前，对初具规模的试验型 EOSDIS 进行功能测试。EOS 平台发射后，EOSDIS 将在使用中得到发展和功能扩充，在数据系统技术方面更具有先进性。EOSDIS 的用途不仅仅局限于地球科学的调查，它最终将为环境决策、资源管理者、商业公司、科学家以及各级政府提供有用的决策依据。

(3)EOS 观测平台。EOS 观测平台与 EOSDIS 是同步发展。EOS 平台将安装多种多波段的高光谱分辨率、高灵敏度的仪器。仪器频率覆盖宽，同时具有多视角多极化遥感能力。而且主动微波成像仪也将搬上极轨平台。这一新空间计划的实施将会给天气预报、气候预测以及全球生态变化监测等地学和环境科学领域等一系列重大科学问题带来突破性进展。EOS 计划从地球物理、气候过程、生物化学和水文等四大学科，确定了陆地、海洋、气候、大气、生物化学及水循环等六个方面的观测内容。

美国提出 EOS 计划后，得到以欧洲空间局 ESA、日本空间发展局 NASDA 和加拿大政府为代表的各国大力支持。1989 年美国等 24 国提出行星地球计划 MTPE (Mission To Planet Earth)。这项空间计划的研究内容包括了陆地覆盖、短期和长期气候变化、自然灾害研究和大气臭氧五个领域，收集那些在地球环境方面对于国际组织选择正确方法和国家决定正确决策起作用的信息。该计划将费时 20 年、耗资数百亿美元，建立三种对地观测空间平台：极轨平

台地球同步轨道平台以及作为EOS主题补充的一系列小卫星观测平台,装载大量多样化、多波段、高光谱分辨率、高灵敏度的遥感仪器,并坚持长期观测。

继美国提出并实施EOS计划后,为解决一系列当前和未来地球系统科学研究面临的重大科学问题,1991年由NASA发起的一项综合性的计划——地球科学事业(Earth Science Enterprise, 简称为ESE),目的是通过卫星及其他工具对地球进行更深入的研究。ESE计划衔接和包含了EOS计划,是EOS计划的延伸和发展。ESE主要研究领域包括云、海洋、陆表、大气化学、水和能量循环、水和生态系统过程、固体地球等。

2000年11月,NASA公布了以观测、描述、了解进而预测地球系统变化为宗旨的地球科学事业战略计划(ESE Strategy),ESE所需解决的最根本问题是全球如何变化以及全球变化对地球生物造成什么样的影响。在这一整体性目标之下又分出5个问题,在5个问题中又分出23个科学问题,构成具体研究内容(见表1-1)。NASA围绕这一系列的科学问题制定了ESE的战略框架(见表1-2),提出了地球科学研究的重大科学问题及相应的科学目标与应用目标,并制定了保障其战略计划实现的3个从属计划,即2000—2010年研究战略,2002—2012年应用战略和ESE技术战略。

表 1-1 ESE 的目标\*

全球是如何变化?
(1) 地球系统是怎样变化的?
(a) 全球降水、蒸发和水循环如何变化?
(b) 全球海洋循环在几年、几十年和更长周期的尺度上如何变化?
(c) 全球生态系统如何变化?
(d) 在破坏臭氧的化学物质减少,替代品增加的情况下,平流层的臭氧如何变化?
(e) 全球冰川如何变化?
(f) 地球和地球内部如何运动?从地球内部过程能够得到什么信息?
(2) 地球系统的主要驱动力是什么?
(a) 大气组成和太阳辐射变化如何驱动全球气候的变化?
(b) 全球土地利用/土地覆盖如何变化,变化的驱动力是什么?
(c) 地球表面形态如何变化,怎样利用现有的信息预测未来变化?
(3) 地球系统如何响应自然和人为引起的变化?
(a) 云量变化和地表水文过程对地球气候有什么影响?
(b) 生态系统对全球环境变化和碳循环有什么响应与影响?
(c) 气候变化如何引起全球海洋循环的变化?
(d) 平流层的痕量气体对气候和大气组成变化如何响应?
(e) 气候变化如何影响海平面?
(f) 区域空气污染对全球大气有何影响?全球大气化学组成和气候变化对区域空气质量有什么影响?
(4) 地球系统的变化对人类的后果?
(a) 与全球气候变化相关的局地天气、降水和水资源如何变化?
(b) 土地利用/土地覆盖变化对生态系统和经济生产的可持续性有何影响?
(c) 气候和海平面的变化以及沿海地区人类活动的增加造成的结果是什么?
(5) 我们如何预测地球系统未来的变化?

续表

- (a) 如何利用新的空间基础观测技术、数据的计算模拟，延长天气预报的周期和并提高其准确性。
- (b) 如何预测和理解短周期的天气变化？
- (c) 如何评估和预测长周期的气候变化？
- (d) 如何预测未来的大气化学状况对气候和臭氧的影响？
- (e) 如何模拟地球系统碳循环？未来大气中二氧化碳和甲烷预测的可靠性如何？

表 1-2 ESE 战略框架

阶段	1998—2002 年	2003—2010 年	2010 年以后
任务	描述	理解	预测
目标	利用第一部分地球观测卫星提供的数据，进行地球系统相互作用关键领域的调查。	通过关键的地球系统参数的测量。探测未知的地球系统过程，回答地球系统变化原因和响应的核心问题。通过建模和分析，量化地球系统各要素之间的关系。	利用卫星网络和科学的信息结构，使气候和自然灾害的预测成为可能。

ESE 的实施是一个从科学问题的研究到预测能力实现的过程，通过开发先进技术和与其他机构合作，根据不同的科学问题研制不同的卫星和仪器，提高地球科学观测能力。ESE 近期优先实施的任务包括：①继续发展第一个 EOS 系列并选择地球探测任务；②提供一个功能强大的数据和信息系统来支持地球探测任务的数据处理、存档和发送；③实施航空遥感和野外监测活动，即开展太平洋对流层化学、亚马逊流域生态、南非生物量的航空遥感研究；④继续收集和分析现有的 NASA 卫星数据，例如全球热带地区降雨率和海洋浮游生物浓度的数据；与联邦、州和当地其他机构建立联合应用示范项目；⑤与其他机构合作开展地球科学主要问题的研究；⑥支持 USGCRP 目标的发展和完成。从 ESE 近期任务的内容可以看出，EOS 是 ESE 计划的首要任务。

ESE 计划是更庞大的美国国家计划的一部分，是目前正在进行中的多机构参与的美国全球变化研究计划(USGCRP)、世界气候研究计划(WCRP)、国际地圈生物圈计划(IGBP)等国际科学活动的综合。

ESE 计划将在 EOS 基础上完成认识地球系统到预测地球系统未来变化的跨越，从而揭开 21 世纪空间对地观测和地球系统科学研究的新一页。

## § 1.3 EOS 对地观测卫星的发展

### 1.3.1 准备工作阶段(1990—1999 年)

1990—1999 年之间已经发射的卫星主要有用于大气遥感的地球辐射收支卫星 ERBS、高层大气研究卫星 UARS；用于海洋遥感的海洋测高卫星 Topex/Poseidon、ESA 海洋遥感卫星 ERS-1、ERS-2、海洋水色卫星 OrbView-2 和先进地球观测卫星 ADEOS-I 等；用于陆面遥感的有陆地卫星 Landsat 7、日本地球资源卫星 JERS-1 和雷达卫星 Radarsat-1 等 见表 1-3。

表 1-3 1990—1999 年间发射的卫星概况

卫星	发射日期	星载传感器	探测范围
UARS	1991-9-12	HALOE, WIND II, ACRIM II, MLS, SUSIM, CLAES, SOLSTICE, HRDI, PEM, ISAMS	HALOE, MLS, CLAES, ISAMS 测量平流层和 中层大气化学组成, HRDI, WIND II 观测平流层, 中层和热层的风, ACRIM II, SUSIM, SOL- STICE 观测太阳输入能量, PEM 测量大气粒子流
ERS-1	1991-7-17	RA, C-SAR, ATSR, IIS	监测海洋、海面的风速矢量及其变化、大洋环流等
JERS-1	1992-2-3	L-SAR, OPS	地表、地形、环境监测
Topex	1992-8-10	Poseidon-1	海洋循环
ERS-2	1995-4-21	RA, C-SAR, IIS, ATSR, GOME	继续完成 ERS-1 的任务, 臭氧层制图与监测
RadarSat-1	1995-11-4	C-SAR	地表测量
Earth Probe -96	1996-7-2	TOMS	臭氧层制图与监测
ADEOS-I	1996-8-17	OCTS, TOMS, IMG, ILAS, AVNIR, RIS, NSCAT, POLDER	全面观测地球环境和气象变化
OrbView-2	1997-8-1	SeaWiFS	观测海色, 监测海面沉降和监测海洋生物量
TRMM	1997-11-27	PR, TMI, LIS, CERES, VIRS	热带及亚热带降水分布形势、降水结构, 对热带气旋的观测, 可以得到台风眼位置和降水的垂直结构
Landsat 7	1999-4-15	ETM+	高分辨率地表观测与监测
QuikScat	1999-6-19	SeaWinds	全球海洋洋面风速与风向

在这一阶段所发射的对地观测卫星, 与对地观测初期的卫星相比, 除了提高了时间频率和空间分辨率、性能更优越等特点外, 还有几个显著的特点:

(1) 针对地球系统科学的各个分支学科和全球变化关键问题的专题卫星和传感器技术得到极大的发展。最典型的是用于降雨测量的卫星 TRMM 星载降雨雷达 PR 的首次应用解决了大气科学发展中定量降水信息不足造成的限制。UARS 则是第一个完全用于研究平流层和中层动力和化学过程的卫星。

OrbView-2 搭载的 SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) 首次提供光谱覆盖范围广、时间频率高的陆面和海表图像, 这对于在全球范围内监测海洋浮游生物量和海面沉降, 及监测陆面植被状况是非常重要的。还有 Landsat 6 上用以替代 TM (Thematic Mapper) 的 ETM (Enhanced TM), 被称为第三代陆地卫星传感器。其后发射的 Landsat 7 载有与 ETM 类似的 ETM+, 增加了一个空间分辨率为 15m 的全色段 (Pan: pan chromatic photograph), 热红外波段的空间分辨率从 120m 提高到 60m。这样的改进将为全球变化研究提供有效的高分辨率探测数据。

(2) 对地观测的范围更为广泛 覆盖了水与能量循环 陆地 海洋 大气 冰川 和极地冰盖

等多方面。并且通过搭载针对不同内容的观测传感器，不再限于地球系统科学中的某一个子系统，开始向多学科综合的方向发展。例如 ESA 的 ERS-2 在 ERS-1 的基础上增加了 GOME，因而增加了对臭氧的探测功能。还有 ADEOS-I 搭载 8 个传感器，TOMS、IMG、ILAS 用于探测大气臭氧，AVNIR 用于探测空间和地表反射率，POLDER 可用于测量气溶胶粒子分布，OCTS、NSCAT、IMG 可用于研究海气作用和反演高精度的海表温度。另外 OCTS 和 AVNIR 还可研究碳循环等等。

(3) 星载传感器接收的空间光谱信息范围从可见光、红外一直覆盖到微波波段，推广了星载雷达技术和微波遥感技术，实现了三维观测。

海洋卫星搭载的微波传感器能透过云层探测目标，由于水体本身对微波有强烈影响，所以依据微波资料可以清晰显示活动的降雨区，获得全球海洋降雨率，并能清晰地反映飓风区和其他剧烈天气过程引起的详细的降雨结构。从第一颗海洋遥感卫星 SeaSat 的 SASS 发展到 ADEOS-I 的 NSCAT、QuikScat 的 SeaWinds，星载海洋微波遥感仪器有了很大的进步，详见表 1-4。SASS 杆状天线存在 180° 风向的不确定性，NSCAT 改用 6 根杆状天线，可以适当消除风向的不确定性。而 SeaWinds 采用抛物面天线，当天线慢速旋转时，可获取许多个雷达截面样本，可彻底消除风向的不确定性。

表 1-4 微波散射计的性能比较

项目	SASS	NSCAT	SeaWinds
卫星	SeaSat	ADEOS-I	QuikScat
频率	14.6GHz	13.955 GHz	13.4 GHz
极化	V,H	V,H	V,H
天线	4 + 1 (±45°, 0°, ±135°)	6 (±45°, 0°, ±135°, 180°)	1m disc, 18rpm (46°, 40°)
测风精度	2m/s (4~20m/s)	2m/s (3~20m/s)	2m/s (3~20m/s)
	10% (20~26m/s)	10% (20~30m/s)	10% (20~30m/s)
风向	±20°	±20°	±20°
扫描宽度	500km×2	450km×2	900km×2
重复覆盖周期	36 h(90%全球海洋)	48 h(90%全球海洋)	24 h(90%全球海洋)
分辨率	50km(雷达截面)	25km(雷达截面)	25km(雷达截面)
	100km(风矢量)	50km(风矢量)	25km(风矢量)

SAR 系统有多波段、多极化、多视角、多传感器，能够全天时、全天候工作，并且它对地物具有穿透力，具有成像面积大、分辨率高、灵敏度高等特点，因此广泛应用于地学研究各方面。这个阶段所发展的星载 SAR 见表 1-5。

表 1-5 星载合成孔径雷达的性能比较

SAR	C-SAR	L-SAR	C-SAR
卫星	ERS-1 & ERS-2	JERS-1	RadarSat-1
频率	5.3 GHz (C)	1.275 GHz (L)	5.3 GHz (C)
组织单位	ESA	NASDA	Canada

续表

SAR	C-SAR	L-SAR	C-SAR
极化	VV	HH	HH
扫描宽度	100km	75km	50~500km
分辨率	30×30km	18×18km	28×30km
量化	5bits	3bits	4bits

在这一阶段的对地观测卫星在 EOS 的发展历程中起到重要的作用，加强了国际交流合作，不仅为地球系统科学的发展提供了丰富的空间信息，同时也对促进 ESE 战略计划的发展和完善起到了重要的作用。

### 1.3.2 第一阶段 (1999—2004 年)

1999 年 12 月 18 日，国际新一代对地观测卫星系统的第一颗星——TERRA 卫星发射成功，标志着人类对地观测新里程的开始。这一阶段所发射的卫星概况如表 1-6 所示。

表 1-6 在 EOS 第一阶段所发射的卫星

卫星	发射日期	星载传感器	探测任务
TERRA	1999-12-18	MISR, MOPITT, MODIS, CERES, ASTER	云雾辐射平衡、地表特征、碳循环
ACRIM SAT	1999-12-21	ACRIM III	太阳总辐射及对大气的影晌
EO-1	2000-11-21	ALI, Hyperion, Atmospheric, Corrector	大气、水汽、气溶胶,及陆地成像试验
Meteor-3M	2001-12-10	SAGE III	臭氧、水分蒸发、温室气体、温度、气压等、大气气溶胶、大气化学成分
Jason-1	2001-12-7	Poseidon-2, JMR, GPS, DORIS	海洋循环、海平面特征
Envisat	2002-3-1	ASAR, MERIS	监测气候变化、测量海洋水色、监测大气、气溶胶变化、测量太阳辐射
ADEOS-II	2002-12-14	SeaWinds, AMSR, GLI, JLAS-2, POLDER	臭氧、气溶胶、大气温度、风、水分蒸发、SST、能量平衡、云、冰雪、海洋水色与海洋生物
VCL	Cancelled	MBLA, GPS	测量植被冠层的高度
NOAA-M	2002-1-24	POES	气候、臭氧层、自然灾害、林火的监测、动物迁徙模式、以及各种国际救援工作的监测
AQUA	2002-5-4	AIRS, AMSU-A, CERES, MODIS, HSB, AMSR-E	大气温度和湿度、云、降水、和辐射平衡、陆地积雪和海冰、海表温度和海洋产品
GRACE	2002-3-17	HAIRS, SuperStar	地球重力的变化
ICESat	2003-1-13	GLAS	冰盖质量平衡、云高度测量
SORCE	2003-1-25	TIM, SIM, SOLSTICE, XPS	太阳光谱辐照度、太阳辐照度总量

续表

卫星	发射日期	星载传感器	探测任务
AURA	2004-7-15	MLS, TES, HIRDLS, OMI	大气成分、空气质量、大气各层的化学和动力过程、监测气候的长期变化
CALIPSO	2005-4-15	Lidar, ABS, WFC, IIR	云和气溶胶的垂直分布
CloudSat	2005-4-15	PABSI, CPR	进一步了解厚云在地球辐射平衡中的作用
METOP-1	2005	AVHRR-3, IASI, IRS-4, AMSU-A, MHS, ASCAT, GOME, ARGOS, SEM, S&R	大气温度和湿度、海面风速和风向、大气臭氧廓线
ALOS	2006-1-24	PRISM, AVNIR-II, PALSAR	制图、环境监测和自然灾害监测

EOS 对地观测系统发展的准备阶段和第一阶段以 TERRA 为标志划分,但是在 TERRA 之前发射的卫星如 TRMM、Landsat 7 等等,也仍然是第一阶段 EOS 的重要组成部分。这个阶段的对地观测卫星主要有以下几个特点:

(1) EOS-AM 和 EOS-PM 卫星为代表的半日周期全球综合性观测形成数据互补,避免了由于不同的卫星系列和不同的轨道参数造成观测数据无法配合使用的问题。在这些对地观测卫星中 TERRA、EO-1、SAC-C 等为上午星, AQUA、ARUA、CALIPSO、CloudSat、PARASOL 等为下午星。

(2) 以观测大气、陆地、海洋、冰雪和生物圈的综合性卫星,和观测地球系统科学和全球变化关键问题的专题卫星相匹配。例如 TERRA、AQUA 和 AURA 都是综合性观测卫星,而 GRACE 用于研究地球重力场, CALIPSO、CloudSat 用于研究云和气溶胶的性质等等。

(3) 星载传感器具有多样化、多光谱、多角度等特点,并且综合运用合成孔径雷达、微波遥感、光学遥感和红外遥感等技术手段,实现对陆地、海洋和大气的观测。并且通过对不同空间分辨率(从覆盖全球到几米的数量级)和时间频率(从秒到十年以上)的观测配合,以及空间水平和垂直观测的综合,保证了 EOS 科学探测任务的实现。

(4) 国际合作加强 ESE 国际合作概况见表 1-7),多种观测平台的综合运用,实现对全球的实时监测。ESE 计划中除了建立 EOS 极轨平台外,还建立对地观测的地球同步轨道平台,针对专题测量、作为 EOS 主题补充的小卫星观测平台,以及对地观测空间站。如此庞大的对地观测系统,将为获取地球系统信息提供长期连续的地表观测数据。

表 1-7 ESE 的合作内容

合作者	合作类型	计划方案
阿根廷	航天器,计划实施和数据分析	SAC-C
澳大利亚	航天器,发射	FEDSAT
比利时	运载工具	SOLCON

续表

合作者	合作类型	计划方案
巴西	电荷耦合器件摄影仪	CIMEX
	NOAA 航空器飞跃领空支持	LBA
	AQUA 的设备	HSB
加拿大	TERRA 航天器的设备	MOPITT
	设备\航天器	RadarSat-1
	大气化学实验	SciSat
	云的电波探测器组成	CloudSat
	卫星数据收集、工具、航天器	BOREAS
丹麦	地磁制图	SAC-C
	航天器、设备	Oersted
欧洲空间局 ESA	科学数据提供	ERS-1/ERS-2
	科学数据提供	Envisat
法国	遥感平台、部分设备、航空器操作	CALIPSO
	航空器、设备、操作	Jason
	数据收集	Oersted
德国	航空器或发射	CHAMP
	半导体海洋水色传感器	IRS-P3/MOS1996.3
	发射	GRACE
	X 波段合成孔径雷达设备	SRTM
印度	从印度的 INSAT 卫星上存取气象数据	INSAT
意大利	飞行和地面支持设备	
日本	EOS-PM1 上的设备	AMSR-E
	航空器、设备和发射	ADEOS
	航空器、设备和发射	JERS
	TERRA 航空器的设备	ASTER
	发射、气象雷达设备	TRMM
	数据分析	QuikScat
荷兰	EOS AURA 上的设备	OMI
超过 80 个国家	VLBI/SLR/GPS 系统投资和操作	NASA-led Space Geodesy Program
俄罗斯	航空器、发射	SAGE III/Meteor-3M
南非	航空器、设备	SUNSAT
英国	EOS AURA 的子系统设备	HIRDLS

迄今为止以 TERRA 卫星为旗舰的国际新一代对地观测系统已经开始为地球科学的研究提供重要的数据资源，成为军事、经济、社会发展以及科学认识地球演化过程和规律、监测和预测地球未来发展变化的主要信息支柱。

### 1.3.3 后续阶段 (2004—)

ESE 是一个长周期的、需要各方面广泛合作的全球计划。根据美国议会指导方向、外部

评论及适应性的需求，NASA 不断修正这个计划。从 2003 到 2014 年的计划是继续进行第一阶段对地观测卫星的发展，以及发射一系列载有有限个遥感仪器的专题小卫星（包括观察、探测和技术示范任务），来延续第一系列的 EOS 平台的发展（见表 1-8）。

表 1-8 ESE 的卫星计划

研究领域	现在	计划	
大气	温度和湿度	AQUA	METOP, NPP-Bridge(National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System Preparatory Project)
	云性质和结构	TERRA, ICESat	CloudSat, CALIPSO, 未来的气溶胶/云卫星
	气溶胶	TERRA, Glory, SAGE III, EO-1	CALIPSO, 陆地网络, 未来的化学/气候卫星
	水汽	AQUA	NPP-Bridge
	降雨	TRMM	ATMOS-1, GPM(Global Precipitation Measurement)
气候和大气化学	太阳辐射	ACRIMSat, SORCE, Envisat, ATMOS-1	Triana, 业务卫星
	温室气体	AURA, SAGE III, ATMOS-1	NPP-Bridge, Triana, METOP, 未来的化学/气候卫星, 陆地网络, 业务卫星
	平流层臭氧, 痕量气体和水汽	TOMS, AURA, SAGE III	
	对流层臭氧	AURA, suborbital systems	
	CO <sub>2</sub>	AQUA, MODIS, Landsat, EO-1, airborne lidar	OCO (Orbiting Carbon Observatory), Laser sounder
海洋	SST	AQUA	NPP-Bridge
	海洋地形	Jason-1	海洋表面地形卫星
	海洋测风	SeaWinds	Coriolis, 海洋风矢量卫星
	大洋环流	Jason-1	深海大洋环流卫星
	海表盐度		Aquarius
	海洋水色	SeaWiFS, TERRA, AQUA, ADEOS-II	NPP-Bridge; 业务卫星; lidar
冰	海冰	AQUA	后续研究卫星; InSAR 卫星
	冰原质量平衡	ICESat, GRACE	
	雪盖	TERRA, AQUA	NPP-Bridge
陆地、生态系统及土地覆盖	CO <sub>2</sub> 源及沉降	MODIS, Landsat, EO-1	NPP-Bridge, 土壤湿度卫星; 陆地生态系统卫星
	水文产出和蒸散	TERRA, AQUA, Landsat	土壤湿度卫星, 陆地生态系统卫星
	全球植被和全球土地覆盖	TERRA, AQUA, Landsat, ALOS	lidar, radar, 和/或高光谱辐射计

续表

研究领域	现在	计划
地表地形	在选定区域的 GPS 网络	InSAR 卫星
高精度地形	SRTM & ICESat	InSAR 卫星
地球磁场变化	4-6 GPS 卫星星座	多轨道的扩展 GPS 星座
固体地球地球重力场变化，大地水准面	GRACE	先进的重力测量和地球内部成像
地表变化光谱图像	空间连续成像	改进的空间、时间和光谱成像仪
陆地参考框架	VLBI, GPS, SLR networks	增强的地面网络

从 ESE 的发展计划看出，这是一个将航空航天技术、信息科学和技术、地球科学与技术紧密结合的庞大的系统工程。这项工程的完成为地球系统科学和全球变化研究提供丰富的时间和信息，从而促进地球系统科学的发展。

随着 ESE 战略计划的展开和国际合作的加强，EOS 所获得的海量信息将促进空间信息科学的发展，为实现“数字地球”打下坚实的基础。

EOS 的发展是与地球系统科学的提出和发展紧密结合在一起的，对地观测系统的不断发展，将极大地丰富地球系统科学的内容；地球系统科学的发展也必将为 ESE 战略的发展提供理论、方法与技术支持；二者互相促进，必然推动地球科学和信息科学的发展。我国也在推动遥感技术和应用、地球信息科学的发展，加强国际合作来促进“数字地球”发展，因此了解对地观测系统 EOS 的发展历程和一些重要的对地观测系统与技术的发展，对我国的对地观测和遥感领域、以及地球科学的发展有重要的意义。

## 第二章 对地观测初期的遥感卫星

地球是人类赖以生存和居住的星球，人类一直期望着对地球进行全面深入的了解。而地球科学所研究的现象也与其他学科研究的现象不同，其时间尺度长达几十年到几百年，空间尺度从局部区域到覆盖全球，这样的现象大多不能在实验室里重现，因此为了研究地球系统以及地球系统各部分之间的相互作用，尤其是定量地确定这种相互作用的量的关系，就必须建立长期、稳定、可覆盖全球、种类多样的地球物理参数的观测系统。进行地球科学的研究实质就是，建立观测系统采集观测数据，然后对观测资料进行加工、处理、分析和解释，发现新的事实，在掌握事实的基础上提出新的概念和理论，建立数值模式，对模式进行验证，并运用该模式对未来演变趋势作预测。由此可见，全球观测是进行地球系统科学研究的基础和核心。

人造卫星由于具有全球性和周期性的特点，自然很适合对地球的全球性观测。自从 1957 年第一颗人造地球卫星发射成功，以及遥感技术的迅速发展，人们对它的认识无论从广度和深度上都有了突飞猛进。这不仅就是说人们可以从宇宙空间的高度上对全球范围的各种自然现象进行重复性的观测并监视和研究它们的动态变化，而且也把人们的视域从可见光范围扩展到紫外、红外以至微波范围，从而大大丰富了人们对地球的认识。卫星的发射成功和不断发展，为进行全球观测提供了有力的工具。

在 20 世纪，上千颗人造卫星以不同的高度、不同的运行轨道对地球进行观测。对全球观测，其主要目的是要研究地球上的大气、陆地及海洋等部分之间的相互作用，以及与人类生活环境的相互关系。因此，人造卫星包括探测风云变幻的气象卫星，通风报信传递信息的通讯卫星，探索军事目标的侦察卫星，导航定位的全球定位系统卫星，监测地面的遥感卫星等等。从对地观测技术发展的角度来看，20 世纪 60~80 年代的对地观测实验活动是有成效的。通过气象和资源两类应用卫星的实践过程，建立了初步满足实用化要求的信息获取技术。利用光电探测和光—机扫描成像原理的光电遥感仪器技术，被确定为实用化卫星有效载荷技术，推动了对地观测技术及其应用的整体发展。

本章主要介绍了对地观测初期所发射的人造卫星及其搭载的传感器，尽管现在的对地观测卫星的研制和发展方向已经和这个阶段有很大不同，但是这些卫星为人类对全球观测提供了最初的观测平台，为人类初步了解地球做出了巨大贡献，因此，了解对地观测初期的对地观测卫星还是很有意义的。

### § 2.1 气象卫星

早在人造卫星发射之前，世界各国就开始开展卫星搭载对地观测仪器技术的探索和研究工作。第一颗人造卫星发射成功后，1959 年 9 月美国的“先驱者 2 号”探测器拍摄了地球的云图，这使得人们开始进行利用卫星来进行获取地球信息的研究工作。卫星围绕地球飞行，能够在短时间内覆盖全球，这一特点非常符合气象观测的需求，因此，卫星首先得到气象研究工作

者的重视。现在，气象卫星资料主要用于对全球的天气进行监测和中、长、短期天气预报，并且通过搭载具有其他用途的传感器，从而具有农作物估产、监测海面温度及冰雪覆盖等功能。自气象卫星投入运行以来，天气预报的水平就有了很大的提高，热带风暴和寒潮就从未漏报过，这已是众所周知的事实。

### 2.1.1 美国气象卫星

1960年4月1日美国发射第一颗气象卫星 TIROS-1，该卫星采用低轨道技术 LEO(Low Earth Orbit) 自旋稳定姿态 重 122kg，载有高分辨率和低分辨率的电视摄像机。TIROS-1 展示了获取地球大范围云图的能力，预示着气象观测新时代的开始。1960—1965 年之间，美国发射了 10 颗 TIROS 卫星。该系列的后续卫星上改进了搭载的遥感仪器，设计寿命超过了 3 年，主要有电视摄像机、红外五通道扫描仪、热收支仪和离子探头，用于常规天气预报和灾害性天气的预报。

1966年2月3日，世界上第一个业务气象卫星 ESSA-1 发射成功。ESSA 系列卫星总共发射了 9 颗 在高度约 1450km 的轨道上运行，搭载的遥感仪器有光导摄像机、平板辐射计和自动图像传输系统 (APT)。

第二代气象卫星是改进的 TIROS 业务系统卫星 ITOS 系列，ITOS-1 于 1970 年 1 月 23 日发射。ITOS-1 是太阳同步轨道卫星，除了具有 ESSA 系列卫星的功能外，取消了电视摄像机系统而搭载一个两通道扫描辐射仪 (SR)，可提供昼夜辐射资料并在星上暂存。1970 年 12 月第二颗 ITOS 卫星改称为 NOAA-1。到 ITOS-D(NOAA-2,3,4) 时，星上搭载高分辨率扫描辐射仪 (VHRR) 和中分辨率扫描辐射仪 (SR)，可同时获得可见光和红外图像，并且增加了垂直温度廓线辐射仪 (VTPR)，首次进行了大气垂直探测。

第三代业务极轨环境卫星的第一颗星 TIROS-N/NOAA 于 1978 年投入业务运行，星上搭载业务垂直探测器 (TOVS)、甚高分辨扫描辐射仪 (AVHRR) 和数据收集系统 (DCS)。到 1988 年已成功发射了 32 颗 TIROS /ESSA/ITOS/TIROS-N 卫星，还有三颗由于运载火箭失效而未能射入预定轨道。

NASA 于 20 世纪 60 年代初发展雨云技术卫星 (Nimbus) 计划 以满足国家大气和地球科学研究和发展需要。1964 年发射了第一颗雨云系列卫星 Nimbus-1，该卫星首次采用三轴稳定的姿态 载有 23 个光学通道的遥感仪器和 4 个通道的微波遥感仪器。Nimbus 系列试验气象卫星也是太阳同步轨道卫星。

1966 年发射的应用技术卫星 ATS-1 是最早的静止气象卫星。ATS-1 载有一个旋转扫描云摄像机和一个气象数据延迟系统 WEFAX。ATS 发射成功后，NASA 开始发展专门用于气象业务的 GOES 系列业务静止气象卫星。1975 年 10 月 GOES-1 发射成功，星上搭载可见光红外扫描辐射仪 (VISSR)。第二代业务静止气象卫星 GOES-4~7 在 VISSR 上增加了大气探测器进行垂直温度湿度探测，简称 VAS。

美国至 20 世纪 80 年代末期所有发射过的民用气象卫星如表 2-1 所示。