



空间目标激光测距 技术及应用

SPACE OBJECT LASER RANGING
TECHNOLOGY AND ITS APPLICATIONS

赵春梅 桑吉章 瞿 锋 著
郭金运 卫志斌 李语强



科学出版社

空间目标激光测距技术及应用

SPACE OBJECT LASER RANGING
TECHNOLOGY AND ITS APPLICATIONS

赵春梅 桑吉章 瞿 锋 著
郭金运 卫志斌 李语强

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了空间目标激光测距的基本原理、基本技术以及在相关领域的应用成果。内容涉及激光测距的理论基础、测距系统的基本组成、测距数据的采集与处理以及在地学和空间科学等领域的应用。本书首先简要介绍了卫星激光测距技术的产生、发展以及相关的国际组织机构,阐述了常用的坐标系统和时间系统;然后从激光测距的基本理论出发,论述了有关的探测概率,分析了测距过程中的误差源;在介绍测距系统基本组成的基础上,较为详细地介绍了系统中的激光发射技术、光电接收技术、测距控制技术以及数据预处理方法;针对激光测距的应用处理方法,论述了计算模型、解算方法以及在地球动力学等领域的应用成果;最后介绍了激光测距技术在空间碎片观测领域的应用方法与成果。

本书可作为地学、空间科学、工程技术等相关领域的科研人员和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

空间目标激光测距技术及应用/赵春梅等著. —北京:科学出版社, 2016.5
ISBN 978-7-03-048204-4

I. ①空… II. ①赵… III. ①空间测量-激光测距 IV. ①P236②P225.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 093738 号

责任编辑:周 涵 赵彦超/责任校对:钟 洋

责任印制:张 倩/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 5 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 5 月第一次印刷 印张:13 3/4

字数:268 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)技术起始于 20 世纪 60 年代,是一项利用激光脉冲来精密测量地面测站到空间目标距离的观测技术。卫星激光测距技术的发展主要表现在测距精度的不断提高和应用领域的不断拓宽。随着相关科学技术的发展,特别是激光器技术的发展,卫星激光测距的精度从最初的米级精度提高到目前的厘米级乃至毫米级精度。观测数据的应用范围由传统的精密定轨定位、地球重力场确定延伸至导航卫星精密轨道标校、空间碎片测量、时间传递、激光通信以及星际探测等多个领域。

经过 50 多年的发展,SLR 技术已取得了巨大的成绩,展现了其旺盛的科学生命力。SLR 技术与甚长基线干涉测量技术(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)、全球卫星导航技术(Global Navigation Satellite System, GNSS)共同组成了空间大地测量中三大高精度测量技术。

1998 年基于激光测距全球联测、数据共享的需求,国际上成立了国际激光测距服务(International Laser Ranging Service, ILRS)组织,负责全球 SLR 联合观测的协调和国际合作的组织工作,统一指导 SLR 的观测和数据的应用。

本书全面系统地介绍了空间目标激光测距技术的基本原理、激光测距系统的基本组成、激光数据处理以及在不同领域的应用成果。第 1 章论述了空间目标的现状,特别指出随着空间碎片数量的增加、空间资源的不断开发,给人类带来的挑战;介绍了空间目标激光测距的发展现状、相关的服务组织和测距卫星。第 2 章介绍了与激光测距技术应用领域相关的天体测量基本概念、时间系统与坐标系。第 3 章阐述了卫星激光测距系统的基本组成以及测距的工作原理和工作流程;对激光测距雷达方程进行了详细的分析,从雷达方程出发,对测距的成功率、探测概率、虚警概率等进行了较为全面的分析与测算;同时分析了卫星激光测距过程中的误差源与误差量级。第 4 章针对激光测距系统中的关键部分——激光器进行了深入的阐述,给出了激光的理论以及激光器的原理和构成,讨论了激光测距系统中发射光路与激光扩束方法。第 5 章从光电探测理论出发,对光电探测技术进行了较为深入的研究;对测距系统的接收望远镜,包括常用的共光路接收望远镜和分光路接收望远镜都进行了全面的论述;对接收系统中接收终端这一关键部分进行了详细的分析和描述。第 6 章介绍了激光测距的硬件技术和软件技术,其中硬件技术部分涵盖了激光测距系统的主要硬件设备,包括时频基准、精密计时设备、伺服控制等部件;软件技术部分对日常观测使用的工作软件进行了详细的介绍,对数据预处理的方法进行了系统、全面的描述,同时对测距过程中的地

靶标校技术也进行了描述,并给出了相关的检测数据实例。第7章重点讲述了SLR数据的处理方法以及SLR数据的应用成果;对卫星精密定轨与参数解算过程中的卫星运动方程、力学摄动模型、参数解算方法等给出了详细的阐述;同时介绍了SLR数据在卫星精密定轨、地球自转参数解算以及地球重力场等方面的应用成果。第8章主要介绍了激光测距技术在空间碎片领域的最新研究成果;针对利用激光测距技术观测空间碎片与合作目标卫星的不同特点,给出了相应的解决方法;同时介绍了利用辅助的光学观测手段来提高空间碎片激光测距成功率的方法以及空间碎片激光测距数据的应用领域。

本书的部分研究工作得到了国家自然科学基金“基于星地链路和星间链路的导航卫星联合定轨关键算法研究”(项目编号:41274018)、“稀疏数据条件下空间碎片精密轨道确定与预报的有关理论和方法研究”(项目编号:41474024)、科技部科技基础性工作专项“人卫激光测距数据及相关大地基准产品规范”(项目编号:2015FY310200)、国际科技合作计划“中国与阿根廷高精度SLR合作观测与研究”(项目编号:2009DFB00130)及测绘地理信息公益性行业科研专项“中国SLR系统性能提升及关键技术研究”(项目编号:201412001)的资助,在此表示诚挚的感谢。

激光测距技术集光机电于一身,涉及光学、机械学、电子学、自动控制、大地测量学、天文学等多个学科的科研内容。目前国内外尚无一本专门介绍卫星激光测距技术的书籍,本书意在起到抛砖引玉的作用,以方便与此有关的科研人员和对感兴趣的了解激光测距的研究工作。

由于激光测距技术所涉及的研究领域很多,并且作者的水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2016年3月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 空间目标概述	1
1.2 空间目标探测技术	2
1.3 空间目标激光测距技术	4
1.4 空间目标激光测距技术的应用	13
参考文献	15
第 2 章 天体测量基础	17
2.1 天体测量的基本概念	17
2.2 球面三角基本公式	21
2.3 时间系统	23
2.4 坐标系统	27
2.5 坐标系之间的转换	29
参考文献	31
第 3 章 激光测距系统组成及基本原理	32
3.1 系统基本组成	32
3.2 卫星激光测距基本原理	38
3.3 卫星激光测距基本理论	44
3.4 卫星激光测距误差分析	57
参考文献	60
第 4 章 激光测距发射技术	61
4.1 激光器概述	61
4.2 激光测距发射系统	68
4.3 激光能量放大技术	77
4.4 光学准直控制技术	86
参考文献	94
第 5 章 光电接收技术	95
5.1 概述	95
5.2 光子探测原理	96
5.3 光电接收系统	99
5.4 光子探测滤波技术	106
参考文献	113

第 6 章	激光测距控制技术	115
6.1	激光测距硬件技术	115
6.2	激光测距软件技术	126
6.3	地靶标校技术	148
	参考文献	153
第 7 章	SLR 数据处理与应用	154
7.1	概述	154
7.2	观测模型和卫星摄动模型	154
7.3	参数解算方法	164
7.4	SLR 数据质量评估	169
7.5	SLR 的应用	172
	参考文献	185
第 8 章	空间碎片激光数据处理及应用	187
8.1	概述	187
8.2	空间碎片激光观测	188
8.3	空间碎片激光观测数据处理	191
8.4	空间碎片轨道数据的应用	203
	参考文献	210

第 1 章 绪 论

1.1 空间目标概述

1.1.1 空间目标的分类

空间目标一般可分为合作目标和非合作目标两大类。其中空间合作目标泛指可为追踪航天器提供可靠合作信息的空间飞行物体,如航天器、空间轨道舱、参与国际合作的空间站等。而空间非合作目标则不能提供有效的合作信息,如故障或失效卫星、空间碎片以及非合作方航天器等。这类目标的特点是:它相对追踪航天器只是一个黑盒,不能提供任何合作信息,要对其实施跟踪测量任务,必须完全依靠追踪航天器本身的探测能力。

按照空间目标的用途和性质,其可分为在轨航天器和空间碎片。空间碎片是人类遗留在空间的废弃物,包括完成任务的火箭载体和卫星本体、火箭的喷射物、在轨执行航天任务过程中的抛弃物、空间目标碰撞产生的碎片等,空间目标的组成^[1]如图 1.1 所示。

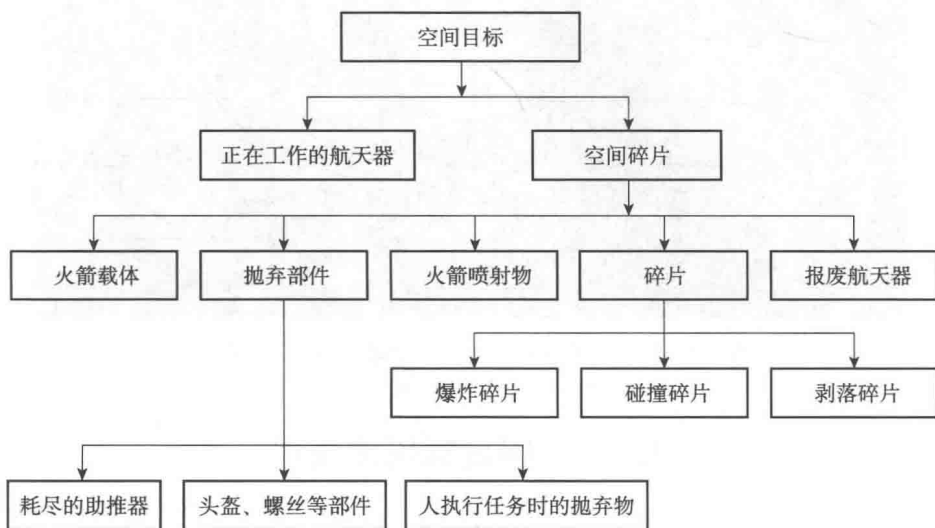


图 1.1 空间目标的组成

1.1.2 空间目标的数量和分布

50 多年来,世界各国进行的空间发射已经超过 4000 次,送入空间并曾经被跟踪观测的目标超过 26000 个,大约还有 1/2 仍遗留在空间沿轨道飞行。截至 2015 年 5 月,美国空间监测网编目的空间目标数量超过了 17000 个,其中在轨航天器达到 4030 个,其余为空间碎片^[2]。由于受到监测网设备探测能力的限制,其中大部分空间目标的直径大于 10cm。尺度小的空间碎片数量则要大得多,据估计直径大于 1cm 的空间碎片数量超过 50 万个。

图 1.2 从地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit,GEO)外以全球视场展示了编目目标的轨道分布^[3]。按轨道范围划分,69.2%的编目目标位于低轨卫星(Low Earth Orbit Satellite,LEO,轨道高度大约在 2000km 以下);9.3%在 GEO 附近;9.7%在大椭圆轨道上(包括地球同步转移轨道);3.9%位于中低轨道(在 LEO 和 GEO 之间);还有大约 7.8%在 GEO 以外;最后还有一小部分,约 150 个目标被发射到了地球逃逸轨道。

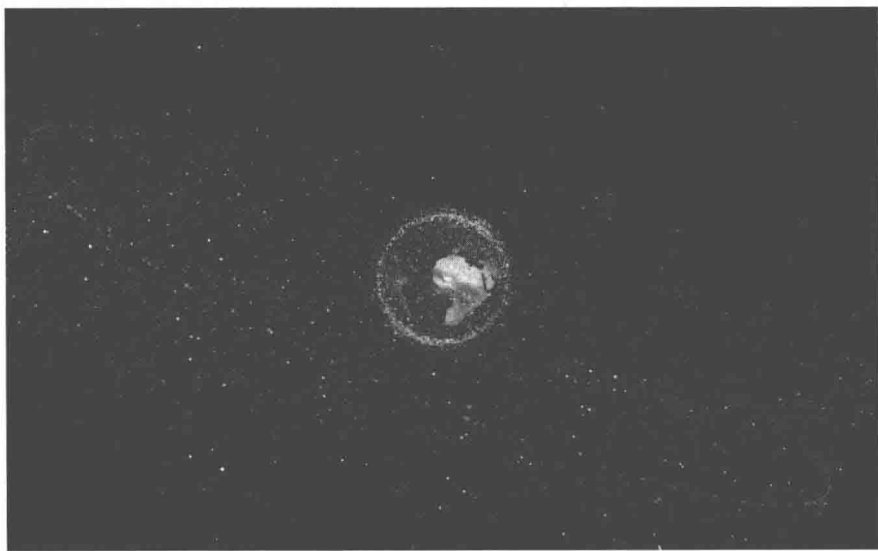


图 1.2 2013 年在轨空间目标的全球分布(来源:ESA)

1.2 空间目标探测技术

空间目标的探测,特别是空间碎片的探测,由于大多数目标是无源的,因此必须采用无源探测设备进行观测。

根据传感器类型划分,雷达和光学传感器是主要的两种空间探测传感器类

型^[4,5]。雷达探测是指雷达发射机主动发射信号,在对接收到的空间目标回波数据进行处理后获取目标相应信息的方法。雷达设备具备全天候全天时工作、多目标主动探测等优点。但是,雷达接收信号的强度与目标距离的四次方成反比,使得其探测距离受限。光学探测指的是利用被动式光学传感器来实现空间目标探测的方法。由于被动式光学传感器接收的是目标反射的太阳光,所以接收信号的强度同目标距离的二次方成反比,因此光学探测系统一般具有很大的作用距离。光学探测的不足在于:仅在天空背景黑暗且目标受阳光照射时可正常工作;云、雾、大气污染等都可能降低光学传感器的探测能力,甚至导致其无法正常工作^[6]。

根据传感器所在位置划分,空间目标探测可以分为地基探测和天基探测两种^[6,7]。

地基探测是利用地面传感器通过地球自转来实现对空间目标轨道的离散观测。地基传感器不受体积和质量等的限制,可采用大孔径天线和大发射功率获得高的角度分辨率和远的探测距离。但地基探测也有不利因素,例如,地基传感器的覆盖范围无法在时间和空间上实现无缝覆盖,建立更多的测站又受到政治和地理因素的制约。现有的针对 LEO 空间目标的监测设备大多是地基监测体制。

天基探测指的是利用天基平台(如卫星、飞船、航天飞机和空间站)上的传感器进行空间目标探测,主要手段包括天基雷达探测、天基光学探测、在轨碰撞检测、航天器表面采样分析等。天基探测可提供地基探测因布站地理位置和传感器探测能力的限制而难以获取的目标数据。由于天基传感器与目标的距离较近,并且不受大气干扰,因此对空间目标的观测具有更高的分辨率,可用于小尺寸目标的探测。天基探测的主要缺点是,传感器受到体积、重量和功率等的限制,成本高昂^[8]。目前国际上对空间目标实行天基探测的设备有:美国在国际空间站上搭载的用于监视空间碎片的雷达、美国搭载在红外天文卫星(Infrared Astronomical Satellite, IRAS)上的光电探测器以及美国中段空间试验(Midcourse Sensor Experiment, MSX)卫星上搭载的天基可见光(Space Based Visible, SBV)望远镜^[9],法国空间局小卫星群上的微波雷达,俄罗斯的毫米波相控阵雷达以及加拿大的空间目标观测雷达等^[7]。

根据观测目的划分,观测设备又可分为精密测量设备和巡天观测设备两类。精密测量设备一般是单目标观测设备,它的任务是观测已知轨道的目标,获取精密数据,为空间目标的精密定轨服务;而巡天观测设备的任务是尽量取得更多目标的数据,发现新目标。显然,这种设备需要大视场,监视尽量大的空域,进行多目标观测^[1]。

地基探测是当前空间目标探测的主要手段,地基空间目标探测技术可分为雷达、光学摄影和激光测距三大类^[10-13]。

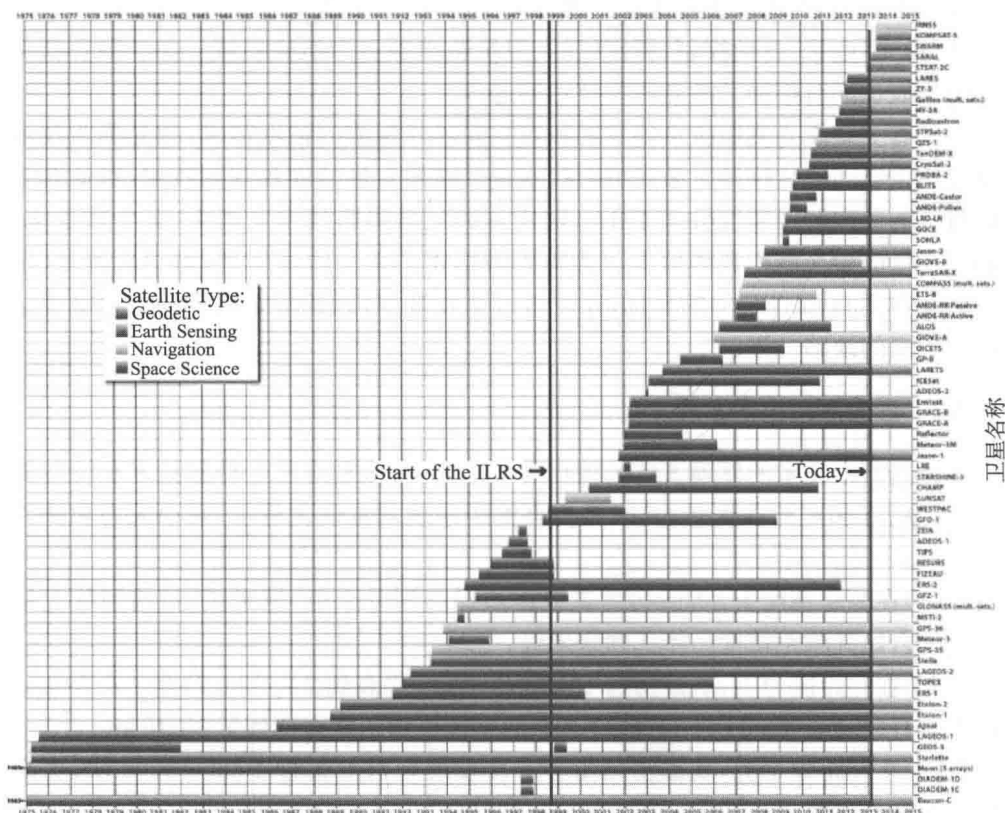


图 1.4 国际激光台站观测的卫星

(1) 激光波束很窄, 方向性极强, 没有地面反射等造成的干扰, 具有特别高的有效功率和光源亮度, 因此即使卫星运行到地影之中, 目视观测不能进行时, 也可以对它进行距离和角度测量。

(2) 激光的波长短, 其测距精度比一般的微波波段雷达高 1~2 个数量级, 因此用激光测距资料计算出的卫星轨道精度比雷达测量结果要高得多。由于激光光束具有高度单色性的特点, 因此, 当天空背景对目视和照相观测来说还是太亮时, 激光测距也能进行观测。用一个带有窄带滤光片的光电探测器, 就可以把激光回波从天空背景的噪声中区分出来, 实现白天测距。

(3) 卫星激光测距的回波信号是通过装在卫星上的一组角反射器反射地面激光器的发射信号而实现的, 它不消耗星上能源。因此, 用于激光测距的卫星可以长期进行工作, 不受星上能源的限制。

(4) 与一般雷达相比, 激光测距系统具有体积小、质量轻、造价低的优点。当然, 同其他光学观测一样, 由于所用激光属于光波波段, 在某些气象条件下 (如多

云和阴雨天气)则不能正常工作。可以说,卫星激光测距是一项综合技术,涵盖了雷达、激光、电子、自动控制、精密机械、卫星轨道等多个学科领域。各学科日新月异的发展也同时推动了激光测距技术的进步。

随着卫星激光测距技术的发展和空间碎片探测的精度需求,激光测距技术也已用于空间碎片探测。激光测距技术是目前最先进的碎片观测技术,对低轨空间目标的单次测距精度可优于 1m,比雷达和光学摄影技术要高 1~2 个数量级,利用少量的激光测距观测值有可能得到较精密的碎片轨道信息,对中高轨道(轨道高度在 2000km 以上)的目标,往往可以整夜观测,因此很好地弥补了地基雷达探测距离的缺陷^[15-21]。

1.3.2 激光测距技术发展

激光测距技术的发展大致表现在两个方面:首先是应用各种新技术和设备提高测距精度和观测数据量;其次是提高测距系统的自动化程度,减小人力和物力的消耗。

(1)在测距精度上,从最初的米级逐步提高到分米级、厘米级,目前国际上最先进的台站其测距精度已能达到毫米级。

(2)在测距能力上,从最初的 1000~2000km 提高到 2 万 km,乃至 3.6 万 km。激光测月(Lunar Laser Ranging, LLR)的实现使测距能力达到了 38 万 km。

(3)在测距频率上,从最初的每秒一次发展到目前每秒 1000~2000 次,更高频率的激光测距(如 10kHz 测距)也在试验中。

(4)在测距波长上,目前普遍采用的仍是单色测距系统,一些台站也在使用双色/多色激光测距系统。双波长激光测距系统不再需要大气物理参数和大气模型的修正,只需测量结果本身即可修正大气延迟,就能达到更好的数据精度。

(5)在自动化程度上,从初期的人工目视跟踪、观测时间局限在黄昏至凌晨卫星被太阳照明的初级时代,发展到今天计算机控制、自动跟踪的新一代全自动激光站,不少测距站还可昼夜工作,所获得的资料数大幅度增加。

(6)在测距站的建设上,早期只有几个固定站,20 世纪 70 年代 NASA 建立了流动站,目前全世界有 50 余个观测站,其中包括约 10 个流动站。这些站分布在地球上除南极洲以外的所有大陆洲。

1.3.3 国际激光测距服务组织

国际激光测距服务(ILRS)组织成立于 1998 年,该组织负责全球 SLR 联合观测的协调和国际合作的组织工作,统一指导 SLR 的观测和数据的应用。ILRS 组织由中央局、执行委员会、分析中心、数据中心、操作中心和观测站网组成,同时下设卫星观测工作组、数据分析工作组、数据格式和观测步骤工作组、观测站网与

工程工作组、应答器工作组等。

ILRS 的组织结构如图 1.5 所示。

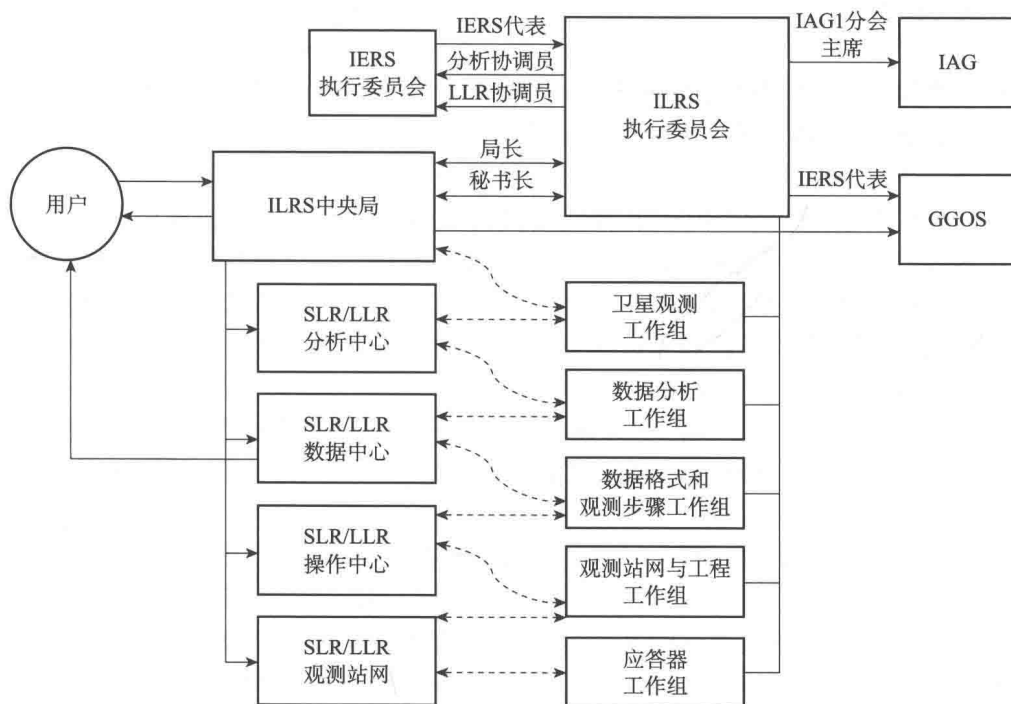


图 1.5 ILRS 组织结构图

在 ILRS 组织中,执行委员会负责制定 ILRS 提供服务的主要内容,确定 ILRS 的正式产品,决定进入观测列表的卫星,批准 ILRS 有关机构起草和提议的标准与操作过程,保持与其他服务和组织的联系。执行委员会对 ILRS 的活动进行日常性的管理,包括对组织机构的修改,以保持机构的工作效率和可靠性,同时充分利用先进的技术和理论。

中央局负责 ILRS 的日常协调和管理,并与执行委员会制定的指令和政策保持一致。中央局的主要作用是促进和保持 ILRS 内部以及 ILRS 与外部学术组织间的信息交流、协调 ILRS 的活动、管理激光卫星的观测列表以及相应的观测优先权、促进 ILRS 观测标准的贯彻执行、监视台站的观测运行和数据质量的保证、维护 ILRS 技术文档和数据库、根据需要产生观测报告、组织工作会议和学术讨论。

ILRS 分析中心包括:分析中心、月球分析中心、分析分中心。分析中心从数据中心获取观测数据,分析、处理并产生 ILRS 数据产品;每周提供地球自转参数数据产品,每月或每季度提供测站坐标数据产品;还通过计算各测站的距离偏差和时间偏差来监视测站的数据质量。月球分析中心处理激光测月站的标准点数

据,生成多种科学数据产品,包括精确的月球历表、天平动、方向参数,测试广义相对论以及太阳系与国际天球参考框架的关系。分析分中心产生一些专门的数据产品,如卫星预报、时间偏差信息、专用卫星的精确轨道、区域性的测站坐标和速度。

数据中心的作用是采集 SLR/LLR 观测数据,分发有关的轨道预报和数据产品。目前 ILRS 的数据中心有两个,一个位于美国 NASA 的 CDDIS 数据中心,另一个位于德国慕尼黑的 EDC 数据中心。

操作中心与区域网中的观测站直接联系。操作中心的主要任务包括观测数据的收集与合并、原始数据的质量检查、数据格式的统一化、数据文件的压缩、数据的归档维护并将数据上传到指定的 ILRS 数据中心。操作中心还可以为观测站提供工程支持、通信链路和其他的技术支持。此外,每个观测站也可以执行部分或所有的操作中心的任务。

观测站网由全球各 SLR 台站构成。全球 SLR 观测台站根据地域以及台站所属的关系分为三个区域性的国际 SLR 网,分别为 NASA 网、欧空局网和西太平洋网。

(1) NASA 网在 20 世纪 70 年代末已有 5 个 MOBLAS 站、McDonald 天文台和夏威夷 Haleakala 站等,80 年代又增加了 4 个小型流动站 TLRS 1~4。这些站分布在美国本土、南太平洋(Tahiti)、南美洲(秘鲁 Arequipa)等地。MOBLAS 系统的望远镜接收口径为 76cm,发射口径为 16cm,采用分光路的发射与接收光学结构。激光器均为 Nd:YAG 主被动锁模激光器,激光器重复频率为 10Hz,能量为 100mJ。MOBLAS-4 位于美国加利福尼亚州,MOBLAS-6 位于南非豪登省,MOBLAS-7 位于美国马里兰州,而 MOBLAS-8 位于法属波利尼西亚塔希提省。TLRS 系统为小型的流动站,位于夏威夷哈雷阿卡拉火山天文台的 TLRS-4 以及位于秘鲁阿雷基帕省的 TLRS-3 都采用共光路方式,望远镜的发射与接收采用同一条光路,口径为 28cm,激光器的发射频率为 10Hz,能量为 100mJ。美国得克萨斯州 McDonald 天文台的激光望远镜也采用口径为 75cm 的共光路系统,激光器发射频率为 10Hz,能量为 150mJ。

(2) 欧洲网(Eurolas)成立于 1989 年,由德国、法国、意大利、英国、荷兰、奥地利、西班牙(与 NASA 合建)、埃及(与捷克合建)、瑞士、芬兰、乌克兰、拉脱维亚、波兰、希腊(与 NASA 合建)等国家的 SLR 站组成,其中最重要的台站是英国 Herstmonceux、奥地利 Graz、法国 Grasse、德国 Wettzell 和 Potsdam、瑞士 Zimmerwald、意大利 Matera 等。英国 Herstmonceux 站系统稳定性好,观测数量多。奥地利 Graz 站硬件比较先进,数据精度高。法国 Grasse 站天气较好,观测数量较多。德国 Wettzell 站历史悠久、设备先进,现拥有一套大型综合测量设备——TI-GO,包括多种测量手段,如 SLR、VLBI、GPS、PRARE 以及重力仪、地震仪、气象

仪器等,其中 SLR 系统采用了最先进的半导体激光器泵浦的钛宝石激光器,可以进行双波长测距。意大利 Matera 站安装了一台十分先进的 SLR 系统,望远镜口径为 1.5m。

(3)西太平洋网(WPLTN)成立于 1994 年,其成员有中国、韩国、日本、澳大利亚、俄罗斯、乌兹别克斯坦、哈萨克斯坦和沙特阿拉伯等,约有 20 多个 SLR 站。中国目前有 7 个固定 SLR 站,包括位于阿根廷的圣胡安站。韩国的 SLR 观测起步较晚,但起点很高,目前 40cm 口径的测距系统已正常运行,1m 口径的 SLR 系统还在研制中。澳大利亚的两个站,即 Yarragadee 站和 Stromlo 站都是国际上先进的观测台站,无论是观测数量还是数据精度都在全球名列前茅。Yarragadee 站的仪器是美国 NASA 的 MOBLAS 5 系统,现已移交 Geoscience Australia 负责运行,Stromlo 站是全球第一个实现全自动观测的 SLR 台站。俄罗斯的 SLR 站很多,目前进行常规观测的台站就有近 10 个,各站观测数据的质量和数量都比以前有明显的提高。

(4)中国 SLR 网目前有北京、上海、长春、昆明、武汉和西安 6 个固定 SLR 站和 1 个流动的 SLR 站,并且与阿根廷合作在南美建了 1 个固定的 SLR 站。其中,北京 SLR 观测站隶属于国家测绘地理信息局;上海、长春、昆明三个 SLR 站均隶属于中国科学院;武汉 SLR 站由中国科学院和中国地震局联合建立。上述五个站中,除了昆明 SLR 站拥有 1.2m 的望远镜接收口径外,其他四个站的接收口径均为 60cm,这五个站均能开展高重复频率的千赫兹激光测距。西安 SLR 站为原流动 SLR 系统固址后由西安测绘研究所负责管理,望远镜的接收口径为 40cm。中国地震局新建了一套 1m 口径的大型流动激光测距系统,也能开展常规的高重复频率激光测距观测。中国科学院国家天文台与阿根廷政府合作,在阿根廷的圣胡安建成一个固定的 SLR 系统,获得了大量的观测数据,改善了全球 SLR 台站的分布状况。

1.3.4 激光测距卫星

1964 年 10 月美国 NASA 发射了第一颗带有后向角反射器的激光卫星,并首次获得了激光测距数据。之后,随着激光测距技术的不断发展,越来越多的卫星通过在星上安装后向角反射器来利用激光测距高精度的优势。这些卫星有的是专门用于激光测距的,有的是利用激光测距技术为其他的科学目标服务。目前在轨观测的激光测距卫星约有 40 多颗,曾经观测过的激光卫星已有 130 多颗。观测时间最长的卫星为 Beacon-C 卫星,发射于 1965 年 4 月 29 日,主要用于地球重力场系数的计算。激光测距卫星按照其应用领域可分成四类^[22]:

第一类是地球动力学(Geodynamics)卫星,主要包括 Lageos-1& 2、Etalon-1& 2、Ajisai、Starlette、Stella 等。这类卫星是 SLR 的主要合作目标,它们通常是实心的球体,表面上布满后向角反射器。这类卫星的面质比较小,受大气阻力摄

动的影响较小,卫星定轨精度高;同时卫星的形状规则、反射均匀,使得对它们的距离测量可以高精度地归算到它们的质心。这类卫星在全球参考框架维护、地球自转参数解算等应用领域发挥了重要的作用。

第二类是地球遥感(Earth Sensing)卫星,包括 ERS、Envisat 卫星,TOPEX / Poseidon、GFO、JASON-1&2 卫星,以及我国的海洋二号卫星(Hy-2A)和资源三号卫星(ZY-3)等。这类卫星通常搭载一些科学仪器,用来研究和监测地球。由于搭载一些设备以及太阳翼板,这类卫星的形状一般是不规则的,所以作用到卫星上的大气阻力和太阳辐射压等都很大。这时 SLR 高精度的观测数据可用于卫星的精密定轨或轨道标校,为雷达高度计观测数据的精密标定、从海洋水准面的角动量变化中提取观测仪器的长期漂移等提供了唯一的手段。

第三类是导航定位(Navigation & Positioning)卫星,包括美国的 GPS 系列、俄罗斯的 GLONASS 系列、欧盟的 GALILEO 系列以及我国的 BDS 系列等导航卫星。这类卫星的轨道很高,都在 2 万 km 以上,我国北斗导航卫星中的 GEO 卫星和 IGSO 卫星位于 3.6 万 km 高的地球同步轨道上。由于我国 BDS 系统尚未实现全球布站,联合 SLR 和 GNSS 观测数据进行北斗导航卫星定轨,可提高导航卫星的定轨精度。

第四类是其他一些科学试验(Science Experiment)卫星。这些卫星大多针对某个特别的科学试验目标进行较为短期的 SLR 观测。例如,美国的 Spinsat 卫星是一颗直径为 22in($1\text{in}=2.54\text{cm}$)、配备了一组电控固体推进器的球形卫星,于 2014 年 11 月 28 日从国际空间站利用一个机械手臂发射出去,用于测试新型电控固体推进器的工作能力。俄罗斯的 Blits 小卫星由两个半球组成,一个是低折射率玻璃半球,另一个是内部有球形透镜的高折射率玻璃半球,玻璃球形卫星的总半径为 85.16mm。卫星发射的目的是对球形玻璃后向反射器概念卫星的试验论证,同时通过毫米级、亚毫米级精度的 SLR 数据来解决地球物理学、地球动力学以及相对论等学科的科学问题。

图 1.6 为主要的几颗地球动力学卫星。图 1.7 为几颗有代表性的地球遥感卫

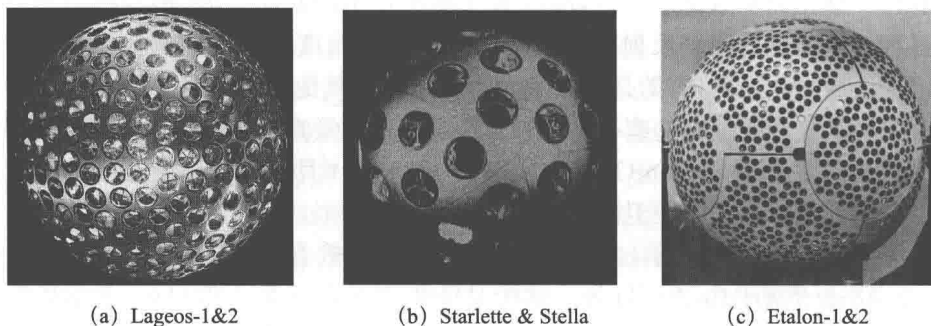


图 1.6 地球动力学卫星