

713825



KDC

# 空间大地测量

沈镜祥 施品浩 刘基余  
何妙福 钱志瀚 等编著

中国地

# 空间大地测量

沈镜祥 施品浩 等 编著  
刘基余 何妙福 钱志瀚

中国地质大学出版社

## 内 容 简 介

本书全面论述了空间大地测量的基本理论, 作业方法和实际应用。内容共分四篇十六章: 第一篇为引论, 包括绪论, 理论基础, 数据处理等三章; 第二篇为卫星多普勒定位技术, 包括子午卫星系统, 多普勒测量的外业, 多普勒测量的数据处理, 误差分析和模型处理, 多普勒定位技术的应用等五章; 第三篇是全书的重点, 为GPS卫星定位系统, 包括GPS卫星全球定位系统概论, 用GPS信号定位的基本方法, GPS测量的外业, GPS测量的数据处理, 误差来源及处理技术, GPS定位技术的应用等六章; 第四篇为卫星激光测距和甚长基线干涉测量技术, 包括卫星激光测距, 甚长基线干涉测量等二章。本书主要供高等学校测量、工程测量、摄影测量与遥感、地图制图、矿产地质、石油地质、煤田地质、地球物理和地球化学勘探、地震预报、钻探、地理、导航、土木建筑、水利电力勘察与设计等专业以及中等专业学校同类专业作教材之用, 并可供教学、科研和生产单位的科技人员参考。

### 空 间 大 地 测 量

沈镜祥 施品浩 等编著  
刘基余 何妙福 钱志瀚  
责任编辑 方 菊

中国地质大学出版社出版、发行

(武汉市喻家山)

石首市第二印刷厂印刷

开本787×1092 1/16 印张19.5 字数 498千字

1990年6月第1版 1990年6月第1次印刷

印数1—2000册

ISBN 7-5625-0396-0/P·113 定价3.95元

## 前 言

空间大地测量是本世纪六十年代形成的一门新兴学科。它的主要内容是利用对人造地球卫星和银河系外射电源的观测资料,以解决大地测量所需解决的问题。如精密测定地面点的位置,基线的长度,地球的形状和大小,地壳和板块的运动,大地水准面的起伏,地面点的相对和绝对垂线偏差以及地极移动等等。这门学科自形成迄今,虽只短短二十余年,但它的发展却非常迅速。直至目前,它不但可以代替大部分经典大地测量,而且能完成经典大地测量难于或不能完成的任务。如建立精密的以地球质心为原点的全球统一的卫星大地网,联测远海岛屿和海上钻井平台,测定相隔数千公里的两点之间的距离与方向等等,其测量精度可以高达厘米或毫米级,作业时间(每点)可以短到数天或数小时,且不受气象、地区等条件的限制。所以,自从这门学科形成以来,许多测量学家都认为空间大地测量的出现,将是大地测量的一次重大革命,其意义远远超出大地测量的范围,而扩展到科学空间技术各个领域。为此,世界各国都争相开发和利用这项技术,以便为各自国家的经济建设、国防建设和科学技术服务。

我国70年代中期,许多单位就已开始研究、引进和利用这项技术,并在不长的时期内,取得十分可喜的成果,推动了我国经济、国防和科学技术的发展。但随着这项技术的不断改进和迅速发展,不仅使用范围越来越广,而且对各项建设的效益也越来越高,因而引起更多人的注意。许多大专院校在积极培养这类技术的高级人才,许多生产和科研单位也在积极研究和应用这项技术,全国正在出现前所未有的学习和引用的热潮。在这时期,编写一本全面反映这门新兴学科的现状及其发展前景的书籍,实属刻不容缓。鉴于这门学科所涉及的面比较宽,加以可供参考的资料比较庞杂分散。所以我们几位从事这门学科教学、科研和生产的同志,发挥各自的专长,合作编写了这本书,以应社会需要。

本书是一本教科书,在编写中,我们力求做到全书内容概念清楚,深度适当,阐述严谨,数据可靠,并避免使用过繁的数学推导和过深的理论引证,使初学者能够利用本书循序渐进地学习,学习以后能达到举一反三,触类旁通的效果。在文字上也力求做到深入浅出,简明扼要,使初学者易于理解和接受。此外,我们还特别注意结合我国实际进行论述,以达到学以致用目的。

本书共分四篇十六章。编写中,除注意全书的前后呼应和有机的结合以外,为便于读者学习和参考,各篇内容也保持有相对的独立性。使之从总体上看全书是系统的犹如一气呵成的一本书,但从每一篇来看又自成一个体系。如第一篇为引论,包括绪论,理论基础和数据处理等三章,综述全书总貌,发展概况,坐标系统,时间系统,三体问题,摄动和数据处理等基础内容,作为学习全书的导引,是全书必读部分。第二篇为卫星多普勒定位技术,包括子午卫星系统,多普勒测量的外业,多普勒测量的数据处理,误差分析和模型处理及多普勒定位技术的应用等五章,比较全面地论述了卫星多普勒定位技术的原理、步骤和方法,观测数据处理的原则和方法,以及实际应用等内容。对以学习多普勒定位技术为主的读者,只须学习一、二两篇,不必再学其它各篇内容。第三篇为GPS卫星定位技术,包括GPS全球定位系统概貌,用GPS信号定位的基本方法,GPS测量的外业,GPS测量数据的处理、误差来源

和处理技术与GPS定位技术的应用等六章,全面地论述了GPS定位技术的原理、步骤和方法,测量数据处理的原则,以及GPS定位技术在各个领域中的应用等。对以学习GPS定位技术为主的读者,可以在学习第一篇后,跳过第二篇直接学习第三篇,以节省学习时间。第四篇为卫星激光测距和甚长基线干涉测量技术,共列两章,概述了这两项技术的发展过程和现状,基本原理和方法,以及在测地工作中的应用等内容。对只需学习这两项技术的读者,可以在学习或参阅第一篇有关内容的基础上,跳过二、三两篇直接学习第四篇。如果希望全面学习空间大地测量的读者,则可根据学习时间的多少和要求的深度,依次全学或选学有关内容。这样安排教材的内容,主要是适应不同要求的读者,以便能用最短的时间以取得最佳的学习效果。

本书内容,大部分是作者根据多年的讲稿,试用教材,科研成果和生产经验等编写而成。书中部分最新(1990)资料,作者也都进行了核实或校正。凡有争议或未经证实的资料,本书均未加采用。但考虑到空间大地测量这一学科目前还正在发展之中,而我国尚处于开始引用阶段,许多必要的资料(如规范细则等)尚不完备或尚未制订。因此,在编写中,作者结合国内外的状况,针对某些比较重要的问题,提出了一些具体的建议,以供读者在实际工作中参考。

本书第一章、第八章、第九章和第十章由刘基余教授编写;第二章,第四章,第五章,第七章和§ 8-3,§ 8-4由沈镜祥教授编写;第三章,第六章,第十一章,第十二章,第十三章,第十四章和附录由施品浩副教授编写;第十五章由何妙福教授和谭德同副研究员(§ 15-2)编写;第十六章由钱志瀚副研究员和韩天芑研究员(§ 16-5)编写;李玉珍工程师提供了多普勒测量的外业资料。全书定稿前,部分作者曾集中武汉对全稿进行会审和修改,最后由主编沈镜祥教授作了全面审阅和订正,并经地质矿产部测量学课程研究委员会审查通过,推荐作为教科书出版。在编写中,西安地质学院测量系,武汉测绘科技大学大地系,中国科学院上海天文台和中国地质大学出版社曾对本书提出许多宝贵的意见,并给予有力的支持;还有许多同志曾协助制图和清缮等工作,在此谨向他们表示深切的谢意。

由于我们水平有限,疏漏谬误之处,在所难免,敬希不吝指正。

# 目 录

## 第一篇 引 论

<b>第一章 绪论</b> .....	( 1 )
§ 1-1 卫星大地测量学的概貌 .....	( 1 )
§ 1-2 卫星激光测距的发展概况 .....	( 5 )
§ 1-3 甚长基线射电干涉测量概述 .....	( 8 )
§ 1-4 空间大地测量学的应用和发展 .....	( 10 )
<b>第二章 理论基础</b> .....	( 14 )
§ 2-1 概述 .....	( 14 )
§ 2-2 坐标系 .....	( 15 )
§ 2-3 时间系统 .....	( 23 )
§ 2-4 岁差、章动和极移 .....	( 28 )
§ 2-5 二体问题 .....	( 34 )
§ 2-6 摄动和投动运动方程 .....	( 43 )
<b>第三章 数据处理</b> .....	( 50 )
§ 3-1 数据通讯 .....	( 50 )
§ 3-2 数据采集和实时处理 .....	( 54 )
§ 3-3 卫星定位数据处理步骤 .....	( 57 )
§ 3-4 卫星网和地面网数据的联合处理 .....	( 60 )
<b>第二篇 卫星多普勒定位技术</b>	
<b>第四章 子午卫星系统</b> .....	( 69 )
§ 4-1 多普勒定位原理 .....	( 70 )
§ 4-2 子午卫星系统的组成 .....	( 76 )
§ 4-3 子午卫星电文格式 .....	( 81 )
§ 4-4 精密星历和广播星历 .....	( 87 )
<b>第五章 多普勒测量的外业</b> .....	( 89 )
§ 5-1 技术设计 .....	( 89 )
§ 5-2 卫星预报 .....	( 95 )
§ 5-3 外业组织 .....	( 98 )
§ 5-4 外业记录 .....	( 100 )
§ 5-5 接收机的操作与维护 .....	( 103 )
<b>第六章 多普勒测量的数据处理</b> .....	( 108 )
§ 6-1 外业数据的粗加工 .....	( 108 )
§ 6-2 多普勒数据的预处理 .....	( 112 )

§ 6-3	平差计算	(121)
§ 6-4	分区成果的整体平差	(129)
<b>第七章</b>	<b>误差分析和模型处理</b>	<b>(132)</b>
§ 7-1	接收机时延	(132)
§ 7-2	电离层折射改正	(136)
§ 7-3	对流层传播延迟改正	(139)
§ 7-4	相对论效应改正	(141)
§ 7-5	地球自转改正	(142)
§ 7-6	星历误差	(143)
<b>第八章</b>	<b>卫星多普勒定位技术的应用</b>	<b>(145)</b>
§ 8-1	用卫星多普勒定位技术建立统一的大地基准	(145)
§ 8-2	卫星多普勒定位技术在我国的应用	(146)
§ 8-3	卫星多普勒定位技术在测图控制方面的应用	(148)
§ 8-4	卫星多普勒定位技术在地质找矿中的应用	(149)

### 第三篇 GPS卫星定位技术

<b>第九章</b>	<b>GPS卫星全球定位系统</b>	<b>(150)</b>
§ 9-1	GPS卫星及其星座	(150)
§ 9-2	GPS卫星的监控系统	(153)
§ 9-3	GPS卫星的导航电文	(155)
§ 9-4	GPS系统的用户设备	(159)
<b>第十章</b>	<b>用GPS信号定位的基本方法</b>	<b>(163)</b>
§ 10-1	GPS卫星射电信号	(163)
§ 10-2	伪噪声码	(166)
§ 10-3	伪距定位法	(172)
§ 10-4	载波相位测量	(175)
<b>第十一章</b>	<b>GPS测量的外业</b>	<b>(180)</b>
§ 11-1	GPS外业的依据	(180)
§ 11-2	技术设计	(182)
§ 11-3	踏勘、选点	(186)
§ 11-4	外业观测	(188)
§ 11-5	外业检验和成果上交	(193)
<b>第十二章</b>	<b>GPS测量数据的处理</b>	<b>(198)</b>
§ 12-1	相位差测量数据处理原理	(198)
§ 12-2	GPS定位数据的处理步骤	(203)
§ 12-3	GPS数据预处理	(210)
§ 12-4	平差计算及成果精度分析	(217)
<b>第十三章</b>	<b>误差来源及处理技术</b>	<b>(222)</b>
§ 13-1	GPS观测值中误差的分类	(222)
§ 13-2	传播误差	(224)

§ 13-3	时钟误差	(228)
§ 13-4	星历误差	(230)
§ 13-5	初始整周待定值和整周跳变	(233)
§ 13-6	多路径和重影	(236)
§ 13-7	相位中心迁移	(238)
§ 13-8	其它误差来源	(239)
<b>第十四章</b>	<b>GPS定位技术的应用</b>	<b>(243)</b>
§ 14-1	GPS在大地测量方面的应用	(243)
§ 14-2	GPS在地球科学研究方面的应用	(245)
§ 14-3	GPS在工程测量方面的应用	(246)
§ 14-4	GPS在动态定位方面的应用	(247)
§ 14-5	GPS在时间传输和飞行器测控方面的应用	(250)
<b>第四篇 卫星激光测距和甚长基线干涉测量技术</b>		
<b>第十五章</b>	<b>卫星激光测距</b>	<b>(254)</b>
§ 15-1	卫星激光测距技术的发展	(254)
§ 15-2	卫星激光测距系统	(255)
§ 15-3	激光卫星主要特征及其历表	(261)
§ 15-4	SLR数据格式	(265)
§ 15-5	SLR数据预处理和各种误差改正	(268)
§ 15-6	卫星激光测距的定位方法	(273)
<b>第十六章</b>	<b>甚长基线射电干涉测量</b>	<b>(283)</b>
§ 16-1	概述	(283)
§ 16-2	VLBI基本原理	(285)
§ 16-3	VLBI系统的主要设备	(289)
§ 16-4	测地VLBI的观测和数据处理	(291)
§ 16-5	恒星光学干涉测量	(297)
<b>附录 A:</b>	<b>岁首儒略日(年积日)查算表</b>	<b>(301)</b>
<b>附录 B:</b>	<b>卫星定位数据标准字符集常用编码表</b>	<b>(302)</b>
<b>主要参考文献</b>		<b>(303)</b>



# 第一篇 引 论

## 第一章 绪 论

1957年10月4日，苏联成功地发射了世界上第一颗人造地球卫星；此后，大地测量学取得了惊人的发展。随着人造地球卫星的不断入轨运行，利用卫星作定位测量已成为现实，从而产生了卫星大地测量学；60年代末期，甚长基线射电干涉测量和用激光脉冲测量地球与月亮之间的距离获得了成功，致使卫星大地测量学发展成为空间大地测量学。随着新型仪器的不断涌现，数据处理技术的不断发展，空间大地测量学展现了更加广泛的应用前景。本章将介绍空间大地测量学的几个基本概念及其应用和发展概况。

### §1-1 卫星大地测量学的概貌

卫星大地测量学是大地测量学的新分支。长期以来，大地测量学家力图推求一个与地球形状和大小最为接近的总地球椭球体，以便归算全球大地测量成果。但因常规大地测量技术的局限性，人们难以在整个地球表面（包括占地球表面71%的海洋面）上布设天文大地控制网和进行重力测量，只能依据局部地区的大地测量，各个国家或地区推求一个接近本地区的参考椭球体，无法实现总地球椭球体的宏愿。卫星大地测量学的问世，不仅能够达到大地测量学家梦寐以求的目标，而且使大地测量拓宽到了地球动力学、地球物理学、天体力学和空间物理学等学科领域；此外，卫星大地测量还能对海洋开发、宇空飞行器的发射和定轨，远程兵器的发射和反击提供精确的定位数据。

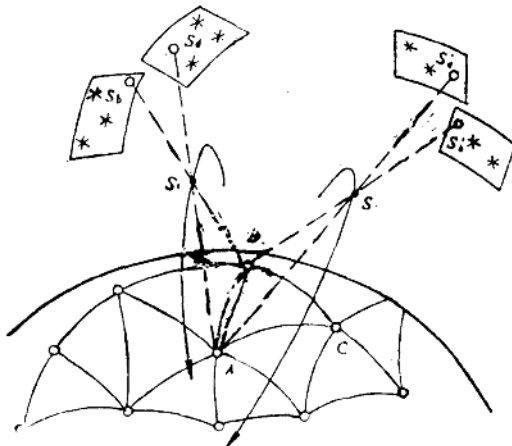


图1-1 卫星三角测量

卫星大地测量学主要是利用人造地球卫星进行测量的，在它问世之初，人造地球卫星仅仅作为一种空间的观测目标，由地面上的测站对它进行摄影观测而测定地面点位，因而称之为卫星三角测量。例如，在相距数千公里的A、B两个测站（如图1-1所示）上，各安设一台卫星摄影机，在晴朗的夜晚，以恒星为背景，A、B两个测站对同一颗人造地球卫星（下文简称为卫星） $S_1$ 进行同步摄影，由此得到的摄影底片，既有卫星 $S_1$ 的影像 $S_{1a}$ 、 $S_{1b}$ ，又有某些恒星的影像，从天文年历中查出有关

的恒星坐标，并在摄影底片上精确量测出卫星坐标，依此推算出 $A$ 、 $B$ 测站至卫星 $S_1$ 的方向， $\vec{as}_1$ ， $\vec{bs}_1$ ，从而获得一个同步平面 $AS_1B$ 。在 $A$ 、 $B$ 测站对另一颗卫星 $S_2$ （或同一颗卫星的另一个位置）再进行一次同步摄影，又可推算出 $A$ 、 $B$ 测站至卫星 $S_2$ 的方向， $\vec{as}_2$ ， $\vec{bs}_2$ ，得到另一个同步平面 $AS_2B$ ，它与 $AS_1B$ 平面的交线，便是连结 $A$ 、 $B$ 测站的弦线 $ab$ 。同理，当 $A$ 、 $C$ 测站进行两次同步摄影时，亦可求得连结 $A$ 、 $C$ 测站的弦线 $ac$ 。若已知 $A$ 、 $C$ 测站的坐标，则可求得待定点 $B$ 的坐标；如果 $A$ 、 $C$ 测站位于陆地上， $B$ 测站处于远海岛屿上，用上述卫星摄影观测的方法，就可以实现大陆和海岛的联测定位；这是常规大地测量技术望尘莫及的。

1966至1972年间，美国国家大地测量局在英国和联邦德国测绘部门的协作下，用上述卫星三角测量方法测设了一个具有45个测站的全球三角网，获得了5m的点位精度。但是，卫星三角测量的观测和成果化算需要耗费大量的时间，定位精度又不甚令人满意，且不能得到点位的地心坐标，而成为一种过时的观测技术。卫星大地测量学亦随之而从低级阶段发展到了高级阶段；高级阶段的基本特点是从量测卫星方向转化到测量地面测站至卫星的距离或距离差，卫星不再作为一种单纯的空间观测目标，而是一种通过其轨道参数介入定位的动态已知点。

1958年12月，美国海军和詹斯·霍普金斯（Johns Hopkins）大学应用物理实验室，为了给北极星核潜艇提供全球性导航，开始研制一种卫星导航系统，称之为美国海军导航卫星系统，简称为NNSS（Navy Navigation Satellite System）系统。1959年9月发射了第一颗试验性卫星，直至1961年11月，先后发射了9颗试验性导航卫星。经过几年的试验研究，解决了导航卫星的许多技术问题，因而于1963年12月起，陆续发射了6颗工作卫星组成子午卫星星座，使在地球表面任何一个测站上，平均每隔2个小时便可观测到其中一颗卫星。这些卫星的轨道经过地球的南北极上空，故称为子午卫星。卫星高度在950-1200km之间，卫星运行周期约为107min，椭圆的偏心率很小，轨道近于圆形。1967年7月29日，美国政府宣布解密子午卫星的部分电文供民间应用。卫星多普勒定位技术便是用子午卫星的射电信号进行定位。

卫星多普勒定位具有经济快速，不受天气和时间限制等优点；只要能见到子午卫星，便可在地球表面的任何地方进行单点定位或联测定位，而获得测站的三维地心坐标。采集2天以上的定位数据，可以达到分米级的定位精度。因此，世界许多国家都采用了卫星多普勒定位技术，多普勒测站遍及全球。例如，在美洲大陆及其附近测设了大约500个多普勒点；西欧各国于1976年5月和1977年4月分别进行了两次多普勒会战（EDOC-1, 2），在16个国家测设了30多个多普勒点，后者参加了欧洲三角网的重新平差；法国地理院不仅在本国建立了多普勒网，而且还为阿尔及利亚、利比亚、圭亚那和加蓬等国家测设了116个多普勒点；素称千岛之国的印度尼西亚，采用卫星多普勒接收机测设了200多个控制点，从而使常规大地测量技术无法统一的国家大地控制网建成了统一的坐标系。在应用卫星多普勒定位技术方面，我国有关测绘和勘察单位也取得令人喜悦的成果，不仅在陆地测设了近百个多普勒点，而且实现了大陆和西（南）沙群岛的联测；还测设了全国性的陆地海洋多普勒网。

卫星多普勒定位较前述的卫星三角测量虽前进了一大步；但是，子午卫星星座的运行轨道较低（约1000km），卫星数量较少（常为6颗），无法进行全球性的实时导航和定位，且其精度也还不够理想导航精度为数十米。在总结了海军导航卫星系统的优劣以后，美国国防部发

展了一种新的卫星导航系统——NAVSTAR GPS\*，我们称之为GPS卫星全球定位系统，简称为GPS系统，在设计之初。美国国防部的主要目的是：GPS系统能够在陆海空三个领域内提供实时、全天候和全球性的导航服务。但是，经过10余年来的应用开发，GPS系统不仅能够完满地完成上述导航任务，而且，用GPS卫星射电信号定位能够达到厘米级、甚至毫米级的相对定位精度。随着GPS卫星射电信号应用的深入开发，GPS系统将被广泛地应用于民用飞机和船舶的导航、高精度的大地测量、精密工程测量、地壳形变监测、地球物理测量、海空搜救、水文测量、近海资源勘探、航天发射及卫星回收等技术领域。

GPS系统诱人的应用前景吸引着众多科学家的关注和研究。苏联和西欧国家不仅积极开发GPS卫星射电信号的广泛应用；而且致力于各自卫星导航系统的建设。自1982年10月开始，苏联不断发射导航卫星，以便组成GLONASS全球卫星导航系统，整个卫星星座为24颗卫星，均匀分布在3个轨道平面内，卫星高度为19100km，卫星倾角为64.8°，卫星运行周期为11小时15分钟，卫星的射电频率 $f_1$ 为1597—1617MHz， $f_2$ 为1240—1260MHz（它们也属于波长为75—15cm的L波段）。GLONASS卫星的导航电文仅仅调制在频率为 $f_1$ 的载波上，频率 $f_2$ 只用于电离层时延改正。自1982年至1987年，苏联虽将27颗GLONASS卫星送入了轨道，但其中某些卫星并不发送导航电文。西欧欧洲空间局(ESA)也在加速建立NAVSAT卫星导航系统，它由6颗地球同步卫星(GEO)和12颗高椭圆轨道卫星(HEO)组成混合卫星星座(图1-2)；它的作用在于民用导航、全球通讯，监测GPS和GLONASS卫星的健康状态。因此，人们期待着NAVSAT系统的早日建成。

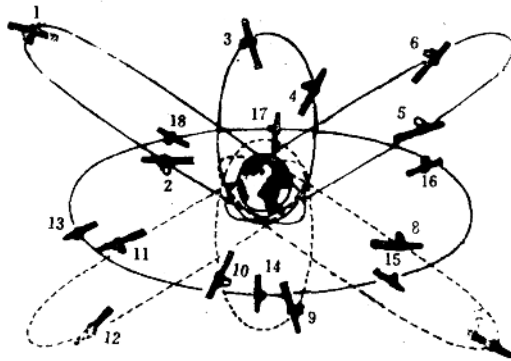


图1-2 NAVSAT系统的混合卫星星座

1~12号为HEO卫星，13~18号为GEO卫星

GPS系统的问世，促使不少国家相继建立各自的卫星导航系统；GPS系统的广泛用途，激励许多科学家的深入研究。1983年3月，在美国测绘学会第43届年会上，加拿大的A. Chrzanowski和D. E. Wells等学者指出，GPS卫星全球定位系统的问世，将导致测绘行业一场技术革命；1983年6月，在国际测量工作者联合会第17届全会上，美国的J. Collins亦提出了相同的见解。面临这场技术革命，我们不仅要努力开发GPS卫星射电信号的应用，而且要积极研究苏联的Glonass卫星射电信号，开拓它的民用途径，探讨具有普遍意义的卫星

\* Navigation Satellite Timing And Ranging (NAVSTAR) Global Positioning System (GPS)的缩写。原意为导航卫星定时和测距全球定位系统。

## 射电信号定位技术。

当利用子午卫星和GPS卫星进行大地定位时,用户接收天线只接收来自卫星的测距信号,测量出用户天线至卫星的距离或距离差。这种发送和接收测距信号分于两处的测距原理,称之为被动测距原理,用它作大地定位,叫做被动定位法。如果发送设备所发射的测距信号经过反射器的反射或转发又返回到发送点,从而测得经反射器或转发器到自身的距离,称之为主动测距原理,用它进行大地定位,叫做主动定位法。例如,用地球同步卫星定位。众所周知,卫星

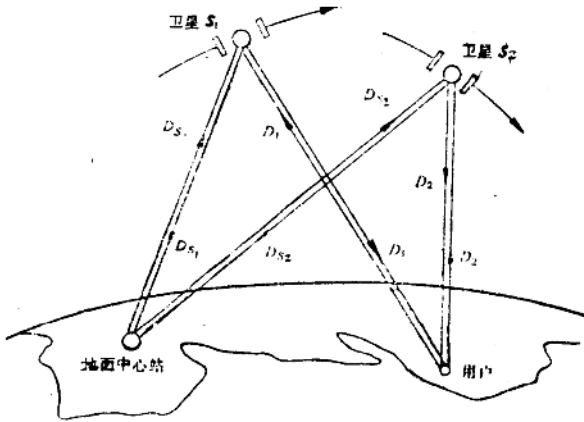


图1-3 主动定位法

通讯主要依靠地球同步卫星,它的运行周期和地球自转周期是同步的,也是24小时,故它相对于地球是静止的,又称之为静止卫星,其高度约为36 000km。美国Geostar等4家公司正在积极研究用静止卫星进行定位和通讯。用静止卫星定位基于主动测距原理,其情况如图1-3所示。地面中心站用L波段向两颗静止卫星 $S_1$ 、 $S_2$ 发送询问信号,卫星 $S_1$ 、 $S_2$ 接收并向用户转发询问信号,用户接收到询问信号后,随即以所谓应答信号的形式通过原来的传播路径将它送回地面中心站,并由后者测得它到用户的双程距离 $2(D_{S_1} + D_1)$ 、 $2(D_{S_2} + D_2)$ 。当已知地面中心站和静止卫星的坐标时,可算得 $D_{S_1}$ 、 $D_{S_2}$ ,进而求得两颗卫星到用户的距离 $D_1$ 、 $D_2$ ;分别以卫星 $S_1$ 、 $S_2$ 为球心,以 $D_1$ 、 $D_2$ 为半径,而得到两个定位球,两者交线为一个圆,用户便位于这个圆上,圆圈与地球椭球体面相交两个点,其一在北半球上,另者在南半球上,根据用户位于南半球,还是北半球,便能单值地确定用户的位置。用静止卫星作主动定位时,所需卫星较少(2、3颗),且用户仅需接收询问信号和发送应答信号,而由位居另一点的地面中心站进行观测和计算,但其定位精度还难以满足大地测量的要求,有待进一步提高。

人造地球卫星不仅可用作定位,而且还可用来确定大地水准面和海洋地形。安设在卫星上的微波测高仪,不断地向海洋面发射窄脉冲,测量脉冲往返于卫星和海面的传播时间,便能测得卫星至海面的垂直距离 $H_s$ 。卫星所发送的脉冲波束具有一定的张角,当它射达海面时,其作用范围不是一个点,而是一个圆面,称之为作用圆,其半径达1.2~5.8km,因此,经海面反射而返回到卫星的脉冲,是来自作用圆的集合,称之为回波,它的形状是海浪起伏的函数,解析回波的形状,可以推算出海浪的高度 $h$ ,如果地面跟踪站测得卫星至椭球面的高程 $H_e$ ,则知大地水准面相对于椭球面的起伏 $N$ 为

$$N = H_e - (H_s + h + \Delta h) \quad (1-1)$$

式中  $\Delta h$  为海面状态和海流等因素所引起的微小改正数。

1975年4月9日，美国宇航局发射了载有微波测高仪的地球动力学实验性海洋卫星 Geos-3；它的高度为845km，倾角为115°，测高精度为30厘米。根据 Geos-3 卫星的测高数据，美国的 R. H. Rapp 教授算得了全球海洋表面上的大地水准面起伏图，从该图可见，在全球范围内，有的地方大地水准面低于椭球体面，东经80°和北纬5°是最低处，其值为106m；有的地方大地水准面高于椭球体面，东经150°和北纬5°是最高处，其值为84m。我国台湾岛东海岸中部高于椭球体面为16m，浙江省沿海高于椭球体面达20m。上述数据的精度远远高于用船舶在海洋上所作重力测量的成果，从而获得了精度为1m左右的大地水准面。

综上所述，卫星大地测量学已从低级阶段的卫星三角测量发展到了高级阶段的被动定位观测；在后者的情况下，用户天线接收卫星所发送的电磁波，用它测量用户至卫星的距离或距离差，借助卫星轨道参数，算得用户的三维地心坐标。用静止卫星定位和卫星测高，也是两种重要的卫星大地测量技术；此外，还有一种专供卫星大地测量之用的卫星，它的表面仅安设了若干块角反射镜（如激光地球动力学卫星 Lageos），作为激光测距的合作目标；但其观测成果，却具有极为重要的科学价值。

## §1-2 卫星激光测距的发展概况

1960年7月，T. H. Maiman 研制成功了世界上第一台激光器。在它问世后不久，美国科学家就进行了地月激光测距试验，他们向月球发射激光脉冲，利用月球表面的漫反射而力图测量地面站和月球之间的距离。这次试验虽未取得令人满意的成果，但为后续的带合作目标的激光测距开辟了思路。1964年10月10日，美国宇航局发射了世界上第一颗带激光反射镜的人造地球卫星——探险者22号 (BE-B)；随后，美国 Goddard 宇航中心用调 Q 红宝石激光器成功地测定了地面站和 BE-B 卫星之间的距离。此后，美国、法国、苏联和日本先后发射了各自的带激光反射镜的人造地球卫星，并称为激光卫星。1976年5月4日，美国宇航局发射了一颗专供激光测距用的高轨道人造地球卫星——激光地球动力学卫星 (LAGEOS)，它是球形卫星，直径为60cm，卫星内有一个长27.5cm和直径为31.78cm的黄铜圆柱芯，后者重达175kg，整个卫星重约407kg；卫星的表面装设了426块角反射镜；卫星的远地点高度为5958km，近地点高度为5858km，运行轨道近于圆形，运行速度为5698m/s。这种高轨道和质量面积比大的球形卫星，受地球引力场的摄动影响较小，轨道稳定，有利于激光测距，因此，LAGEOS 卫星是卫星激光测距的优良合作目标。1975年2月6日，法国发射了用于激光测距的人造地球卫星 (STARLETTE)，它也是球形卫星，其直径为24cm，重达47kg，卫星表面装设了60块角反射镜，卫星高度为957km，倾角为49.8°，运行速度为7400m/s。这种低轨道卫星一次通过的时间短，且易受地球引力场的摄动影响，难以精确定轨，故非激光测距最理想的合作目标。

现代卫星激光测距仪的基本结构，是以电子计算机为主体的跟踪控制系统。根据所输入的卫星方位和出现时间之预报值，自动地照准所升起的激光卫星，同步地跟踪激光卫星的运行。当仪器照准激光卫星后，固体掺钕钇铝石榴石——Nd:YAG 激光器便按预定指令发射激光脉冲，其极少能量为主波取样电路（常用光电二极管）所截获，经光电转换而形成一基准信号，称之为主波，它启开时间计数器，开始计数；激光器所输出的绝大部分能量通过曲折 (Coude) 光路而射达发送光学系统，并射向卫星。照射在星载激光反射镜上的激光脉

冲，沿着入射方向被反射回到位于地面测站上的卫星激光测距仪，为其接收光学系统所接收，经光电倍增管，将这个返回到仪器的激光脉冲转换成电回波脉冲，再经回波放大器放大以后，被送到时间计数器，而中止计数。激光脉冲往返于地面测站和激光卫星之间的传播时间，等于主波启开计数器和回波关闭计数器之时间差，由此算得仪器至卫星的瞬时距离值，而显示在荧光屏上，记录在磁带上。时钟信号源的主要作用是：控制仪器各子系统按预定程序协调工作，显示激光测卫时的相应时刻。

根据上述的基本工作原理，可知卫星激光测距仪所测得的瞬时距离

$$d = \frac{1}{2}ct_d \quad (1-2)$$

式中： $t_d$ 为激光脉冲往返于仪器和激光卫星之间的传播时间；它等于时间计数器所记录的时钟脉冲数 $N$ 和时钟脉冲周期 $T$ 之积，亦即

$$t_d = NT = N/f \quad (1-3)$$

此处 $f$ 是时间计数器的时钟频率。式(1-2)中的 $c$ 为卫星激光测距时激光在大气中的传播速度，它等于真空光速值 $c_0$ 和激光测距时的大气折射率 $n$ 之比，也就是说

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (1-4)$$

由式(1-3)和(1-4)可知：

$$d = \frac{c_0}{2n} \frac{N}{f} + d_0 \quad (1-5)$$

式中： $d_0$ 为附加常数，它包括两部分，其一为仪器的光电中心和机械中心不相重合所产生的等效距离，称之为仪器常数；另者为星载激光反射镜的等效反射面归化到卫星质心的改正，称之为反射常数，对于LAGEOS卫星，反射常数为25.8cm，对于STARLETTE卫星，反射常数为7.5cm。

$$n = 1 + \left[ 80.343f(\lambda) \frac{P}{T} - 11.3 \frac{e}{T} \right] \times 10^{-6} \quad (1-6)$$

此处

$$f(\lambda) = 0.9650 + \frac{0.0164}{\lambda^2} + \frac{0.000228}{\lambda^4}$$

式中： $\lambda$ 为激光脉冲的波长(um)； $P$ 为大气压力，(mbar)； $e$ 为大气温度，(mbar)； $T$ 为大气温度，(K)。

式(1-6)表明，如果测量了气象要素( $P$ ， $e$ ， $T$ )，根据仪器所用的激光波长，便可算得大气折射率。当时间计数器记录了时钟脉冲数 $N$ 时，用已知的真空光速值(299 792 458m/s)、时钟频率 $f$ 和附加常数 $d_0$ ，按式(1-5)可算得观测距离值。

在讨论式(1-5)时，我们假定传播时间 $t_d$ 恰好等于时钟脉冲周期 $T$ 的整倍数，如果 $t_d \neq NT$ ，而 $t_d = NT + \Delta T$ 时，怎样测得不足一个周期的小数部分呢？这是卫星激光测距仪能否达到高精度的关键。现代的卫星激光测距仪一般采用时间扩展测量技术，而精确测得 $\Delta T$ ，其基本原理如图1-4所示。在此情况下，则知传播时间

$$t_d = NT + t_1 - t_2 \quad (1-7)$$

当 $t_1$ 和 $t_2$ 非常短促时,难以精确地进行时间扩展,而将 $t_1$ 和 $t_2$ 分别延伸到主回波后面的第二个钟脉冲,以便提高测时精度。在需要进行内插的时间间隔 $t_1$ 、 $t_2$ 内,以电流 $I_1$ 对电容器充电,直至待内插的时间结束,随即以电流 $I_2$ 放电,且要求 $I_1/I_2 = \text{常数}k$ ;由于电容器的这种充放电作用,便在其上得到一个三角形电压波;对后者鉴零后,经过逻辑处理而得到宽度分别为 $kt_1$ 和 $kt_2$ 的内插脉冲,从而测得后者的宽度

$$kt_1 = N_1 T, \quad kt_2 = N_2 T$$

$$\text{则 } t_d = \left( N + \frac{N_1}{k} - \frac{N_2}{k} \right) T$$

$$= (kN + N_1 - N_2) \frac{1}{kf} \quad (1-8)$$

式中: $N_1$ 、 $N_2$ 分别为所扩展时间 $kt_1$ 和 $kt_2$ 内的时钟脉冲之整周数。

从式(1-8)可知,只要适当选择扩展系数 $k$ ,就能够以较低的时钟频率,精确测得不足一个周期的小数部分,并能获得较高的测时分辨率。例如,选用 $k=1000$ ,时钟频率 $f=15\text{MHz}$ ,则可得到66.7ps(2cm)的时间分辨率。若不采用上述时间扩展测量技术,则需用15GHz的时钟脉冲才能获得同样的分辨率,而15GHz的钟频是难以实现的。

1969年7月21日,阿波罗11号宇航员实现了人类有史以来第一次成功的登月,并在月球表面上安置了一个重达20kg用于测量距离的激光反射镜;同年8月1日,美国加州大学的Lick天文台利用美国第二架最大的3.048m(120in)望远镜和10ns、1J的激光脉冲成功地测量了地球和月亮之间距离,其值为383 911.218km。这种用于测量地球和月亮之间距离的仪器,称之为地月激光测距仪;它的基本工作原理相同于卫星激光测距仪。

在激光测月方面,美国德克萨斯大学的Mc Donald天文台不仅起步较早,而且持续观测时间较长;自1970年9月开始,Mc Donald天文台用口径为2.7178m(107in)的望远镜进行着有规律性的激光测月;仪器不断改进,精度不断提高;80年代初期,激光测月精度便达到了7cm左右。1980年3月,Mc Donald天文台开始研制望远镜口径为76cm的MLRS宇空激光测距仪,其目的不仅用于激光测卫,而且用来作激光测月。

在1979年以前,遍及世界各地的卫星激光测距仪都是安装在各自固定的测站上;这些重以吨计的仪器只能分布在地球表面上很有限的点位上,难以从一个测站迁移到另一个测站。为了有效地测定地球动态参数,必须在更多的测站上安设卫星激光测距仪,这就促使人们研制能够快速迁移的仪器,称之为流动式卫星激光测距仪,简称为流动站。它使用较小口径的望远镜(0.254m~0.762m),低输出能量的激光器(3mJ~100mJ)。但所谓流动式卫星激光测距仪,实际上是固定式仪器分割成几个部分分别安装在几辆运载车内;这些运载车到达测站后,再联合作业。这种车队式流动站,并不能满足人们快速迁站的需要。西德应用测绘研究所、荷兰的Delft大学以及Delft应用物理研究所于80年代初期共同研制成功的MTLRS流动式卫星激光测距仪,则全部安设在长6.5m的运载车厢内,并有必备的办公和生活设备。这种MTLRS仪器是采用口径为40cm的接收和发射激光共用的望远镜,并和转台、激光器及其电源、光电倍增管结合为一个整体,称之为跟踪转台。当激光测距时,重达700kg的跟踪转台可从运载车厢内沿着滑轨迁移出来,安置到测站上;时钟、时间计数器和信息处理机等电子子系统,均安设在一辆四轮运载车厢内。1984年4月,MTLRS仪器成功地在白天和夜晚

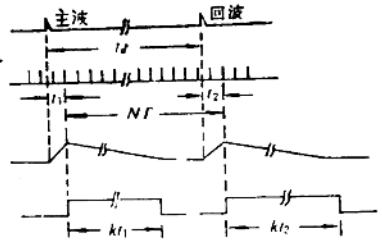


图1-4 传播时间的精确测量

观测到了LAGEOS卫星,其测距误差为 $\pm 4\sim 6\text{cm}$ ,且昼夜的测距精度无显著差别。

在发展流动式卫星激光测距仪的基础上,美国Goddard宇航中心于1980年开始致力于发展一种厘米级精度和多光束的航空激光测距系统(ALRS);它将激光测距仪安设在飞机上,而地面站改为安置激光反射镜。ALRS系统采用5320A、150ps和几个毫焦耳的激光脉冲,并被分离成6束激光,而射向6个独立控制的照准系统。它们按照系统计算机的照准指令,依次照准6个彼此相距7km左右的地面反射镜;当这些激光束从地面返回飞机时,便可同时测得飞机至6个地面反射镜的距离,其测距精度可达 $\pm 1\text{cm}$ ;在几个小时内可以测量 $6\times 10^4\text{km}^2$ 区域内的数百个地面目标,这对地球物理学具有极其重要的实用价值。

1972年,我国将红宝石激光器安装在雷达转台上,成功地进行了卫星激光测距的原理试验。此后,又研制成功了几米级精度的第一代卫星激光测距仪。经过一段时间的使用后,又将两台第一代仪器改进成分米级精度的第二代仪器;目前正在研制厘米级精度的第三代仪器。上海天文台亦于1972年开始了卫星激光测距仪的研制工作,并参加了美国宇航局的全球性激光测距工作。目前,我国已有8、9个单位拥有国产卫星激光测距仪,开展着激光测距工作。

### §1-3 甚长基线射电干涉测量概述\*

在本世纪60年代末期,卫星大地测量学从卫星三角测量的低级阶段发展到了卫星多普勒定位的高级阶段。正当卫星多普勒定位技术日渐成熟,为越来越多的大地测量学家所重视之际,甚长基线射电干涉测量异军突起。引人耳目一新,1969年,H. Jones成功地用VLBI技术进行了大地测量。于是,卫星大地测量学便扩展成为空间大地测量学;后者不仅利用人造的和天然的地球卫星,而且利用河外射电源进行大地测量。

在离地球远达若干亿光年(1光年 $\approx 1\times 10^{13}\text{km}$ )的宇宙空间,有些射电源不断地辐射无规律的电磁波。这些银河系外的射电源与某些恒星状的天体相对应,被称为类星射电源,或者叫做类星体(Quasar)。它的直径达1光年左右,亮度超过一般星系几百倍。如此亮而大的类星体,因距离地球异常遥远,对地面观测者而言,它仍可视作宇宙空间的一种点波源。根据射电天文学的观测资料,剑桥Mullard射电天文台编制了一个3C射电源位置表,以供各界应用。对于空间大地测量而言,目前已采用了45颗类星体作甚长基线射电干涉测量;表1-1列出了常用于VLBI观测的几颗类星体之位置。

甚长基线射电干涉测量是在光波干涉测量的基础上发展而成的。早在本世纪初,迈克尔逊(A. A. Michelson)等学者用光波干涉测量仪成功地测量了猎户座 $\alpha$ 星云\*\*的角直径为0.047s,并算得它的线直径为 $4.1\times 10^8\text{km}$ 。

在光波干涉测量的启迪下,人们设计了用无线电电波进行干涉测量的仪器,经过不断地改进和提高,美国和加拿大的科学家终于在60年代末期分别研制成功了甚

表1-1 几颗类星体的位置

星名	赤经 $\alpha$	赤纬 $\delta$
3C84	$3^{\text{h}}16^{\text{m}}29^{\text{s}}.57$	$41^{\circ}19'52''.1$
3C120	$4^{\text{h}}30^{\text{m}}31^{\text{s}}.60$	$5^{\circ}14'59''.6$
3C273B	$12^{\text{h}}26^{\text{m}}33^{\text{s}}.246$	$2^{\circ}19'43''.38$
3C279	$12^{\text{h}}53^{\text{m}}35^{\text{s}}.82$	$-5^{\circ}31'07''.8$
3C345	$18^{\text{h}}41^{\text{m}}17^{\text{s}}.57$	$39^{\circ}54'10''.6$
3C454.3	$22^{\text{h}}51^{\text{m}}29^{\text{s}}.50$	$15^{\circ}52'53''.7$
3C39.25	$9^{\text{h}}23^{\text{m}}55^{\text{s}}.34$	$39^{\circ}15'24''.4$

\* 它是Very Long Base Line Radio Interferometry的译名,简称VLBI;有的外国文献省略了Radio(射电)。

\*\* 星云是一种形如天空中云雾状的天体,它似圆形的或扁平的发光盘。



长基线射电干涉测量仪。它是在相距甚远（几百公里~几千公里）的两个测站上，各安置一架射电望远镜，同时观测同一颗类星体，分别用磁带记录仪记录类星体所辐射的微波噪声信号，通过测后对两个测站所记录的射电信号进行的互相关处理，而求得同一射电信号波前到达两个测站的传播时间差，进而解算出测站间的距离。实际上，VLBI所用的射电望远镜是一种口径较大（几米~百余米）的抛物面天线。

表1-2是美国和瑞典于1981年公布的VLBI试验成果；表1-3为用重复观测的VLBI成果所

表1-2 美国和瑞典的VLBI试验成果

基线名称	长度(m)	相对精度
Owens Valley (美国)-Onsala(瑞典)	7 914 131.29 ± 0.04	5.05 × 10 <sup>-9</sup>
Green Bank (美国)-Onsala(瑞典)	6 319 317.75 ± 0.03	4.75 × 10 <sup>-9</sup>
Haystack (美国)-Onsala(瑞典)	5 599 714.66 ± 0.03	5.36 × 10 <sup>-9</sup>

表1-3 VLBI站间距离的变化率

基线名称	长度(m)	距离变化率(mm/a)
Haystack-Dss-14	3 899 998.55 ± 0.05	+ 52 ± 33
Haystack-Green Bank	845 129.80 ± 0.02	0 ± 7
Haystack-Owens Valley	3 028 881.65 ± 0.04	+ 17 ± 19
Green Bank-Owens Valley	3 324 244.19 ± 0.05	+ 4 ± 28

算得的站间距离变化率。从表列数据可见，VLBI的站间距离已达几千公里，相对精度高于 $1 \times 10^{-8}$ ；这是常规大地测量技术望尘莫及的。但是，射电望远镜的口径均在20m以上，例如，美国加州欧文斯(Owens)射电天文台用了口径为40m的抛物面天线；加州深空跟踪站(Dss-14)用了口径为64m的抛物面天线。几十米的射电望远镜不仅造价昂贵，而且不易搬迁；正如前述的卫星激光测距仪一样，人们希望能缩小抛物面天线的口径，研制能快速迁移的流动式甚长基线射电干涉测量仪，称为VLBI流动站。70年代中期，美国宇航局的喷气推进实验室(JPL)研制成功了一种天线口径仅9m的VLBI流动站，且命名为天体射电干涉测地系统，简称ARIES系统\*。在100~1000km的基线上所作的试验表明，ARIES系统和大口径天线固定站配合作VLBI观测时，测站的三维坐标能够达到几厘米的精度。此后，他们又研制成功了天线口径为4m的车载式VLBI流动站。美国国家大地测量局与有关单位合作，正用这种VLBI流动站和固定站，建立一个由50个测站组成的国家地壳运动网，用以测量地壳形变和板块运动。

从目前的试验结果看来，甚长基线射电干涉测量已成为大地测量、天体测量、地球物理和地球动力学的一种精密观测新技术。例如，VLBI能以 $1 \times 10^{-8}$ 的精度测量数千公里的站间距离，且其方向精度可达 $0.05 \text{ rad} \cdot \text{s}$ ；VLBI能以 $0.01''$ 的精度测量射电源的位置，预计，射电源的位置精度将提高到 $0.001''$ 。但是，VLBI是观测离地球若干亿光年的类星体，而要求较

\* ARIES是Astronomical Radio Interferometric Earth Surveying的简称。