

GEO-SPATIAL INFORMATION SCIENCE

● 高等学校测绘工程系列教材

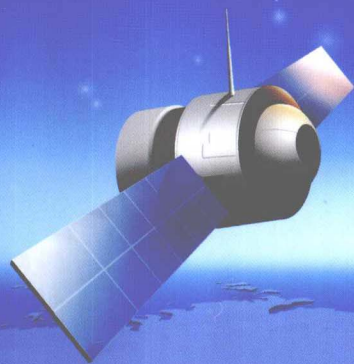


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

空间大地测量学

Space Geodesy

李征航 魏二虎 王正涛 彭碧波 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等学校测绘工程系列教材

空间大地测量学

Space Geodesy

李征航 魏二虎 王正涛 彭碧波 编著

1386428



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

空间大地测量学/李征航,魏二虎,王正涛,彭碧波编著. —武汉:武汉大学出版社,2010.3

高等学校测绘工程系列教材

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-307-07574-0

I. 空… II. ①李… ②魏… ③王… ④彭… III. 大地测量—高等学校—教材 IV. P22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 006654 号

责任编辑:任翔 责任校对:刘欣 版式设计:支笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北睿智印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:19.75 字数:487千字

版次:2010年3月第1版 2010年3月第1次印刷

ISBN 978-7-307-07574-0/P·167 定价:30.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

空间大地测量学是整个大地测量学中最活跃、发展最为迅速的一个分支。利用空间大地测量方法所求得的点位精度、地球定向参数(极移、日长变化等)的精度以及地球重力场模型的分辨率和精度都比以前有了极大的提高,有的提高幅度达几个数量级,而且还具有测站间无需保持通视,可同时精确确定三维坐标等优点,从而导致大地测量学经历了一场划时代的革命性的变革。目前,空间大地测量已成为建立和维持国际天球参考框架、国际地球参考框架以及测定它们之间的转换参数、确定地球重力场的主要方法,已成为研究地壳形变和各种地球动力学现象、监测地质灾害的主要手段之一,从而使大地测量处于各种地球科学分支学科的交汇处,成为推动地球科学发展的一个前沿学科,加强了大地测量学在地球科学中的战略地位。

本教材可同时供本科生和研究生使用,任课教师可根据具体情况(如各校的培养目标、教学大纲、学时数及课程的衔接情况等)从中选取合适的部分使用。全书共分8章,第1章介绍了传统大地测量的局限性以及空间大地测量产生的必要性和可能性。第2章介绍了一些常用的时间系统,如世界时、历书时、原子时和协调世界时以及将来可能使用的精度更高的脉冲星时,对原子钟的工作原理、特性、现状和发展趋势也作了简要介绍。本章还对空间大地测量中经常涉及的地球动力学时 TDT(地球时 TT)、太阳系质心动力学时 TDB、地心坐标时 TCG 和质心坐标时 TCB 以及它们之间的转换关系作了介绍。第3章在介绍岁差、章动、极移等现象的基础上,对空间大地测量中经常涉及的天球坐标系(CRS)和地球坐标系(TRS)以及相应的参考框架进行了较为全面的阐述,并对 GCRS 和 ITRS 之间的坐标转换方法作了介绍和说明。第4章和第5章分别介绍了甚长基线干涉测量(VLBI)以及激光测卫(SLR)和激光测月(LLR)的基本原理、数学模型、发展现状和趋势,以及它们在建立和维持全球和区域性的坐标框架,确定地球定向参数、地球重力场的低阶项及万有引力常数与地球质量的乘积等方面的应用状况。第6章和第7章则对利用卫星测高、卫星跟踪卫星、卫星梯度测量和卫星轨道摄动等卫星重力学方法来反演地球重力场的基本原理、数学模型、观测数据的精化以及当前进行的 CHAMP、GRACE、GOCE 计划作了较全面的阐述。此外还对上述方法在大地测量、地球物理、海洋学研究、地震研究和预报、大气探测和研究等方面的应用状况作了简要介绍。第8章简要介绍了子午卫星系统、全球定位系统和 DORIS 系统等卫星导航定位定轨系统的原理、特点、现状、发展趋势以及应用状况;还对正在研究中的脉冲星导航技术作了简要介绍。

本书第1、2、3、8章由李征航教授编写,第4章由魏二虎教授编写,第5章由中国科学院测量与地球物理研究所的彭碧波研究员和魏二虎教授共同完成,第6、7章由王正涛副教授编写,最后由李征航教授负责统稿。

由于学科的迅速发展,目前同类教材已无法满足教学需要,考虑到空间大地测量在地质研究中的重要作用,本科教学和研究生教学中都亟需有一本比较完整的能反映学科最新发

展状况的教材,因此,我们于2005年底提出了编写出版本教材的申请和计划,并被列为国家“十一五”规划教材。由于教材涉及天文学和地学两大领域,在编写过程中,我们尽量联合各方力量,希望本教材能反映学科的最新进展,但受各种因素的限制,未必如愿,在此真诚希望广大读者批评指正,以便再版时修改补充。

笔 者

2009年9月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 传统大地测量的局限性	1
1.1.1 定位时要求测站间保持通视	1
1.1.2 无法同时精确测定点的三维坐标	2
1.1.3 观测受气象条件的限制	2
1.1.4 难以避免某些系统误差的影响	2
1.1.5 难以建立地心坐标系	2
1.2 空间大地测量的产生	3
1.2.1 时代对大地测量提出的新要求	3
1.2.2 空间大地测量产生的可能性	4
1.3 空间大地测量的定义、任务及几种主要技术	5
1.3.1 什么是空间大地测量	5
1.3.2 空间大地测量的主要任务	5
1.3.3 几种主要的空间大地测量技术	7
第2章 时间系统	13
2.1 相关的预备知识	13
2.1.1 有关时间的一些基本概念	13
2.1.2 天球的基本概念	14
2.1.3 时钟的主要技术指标	15
2.2 恒星时和太阳时	16
2.2.1 恒星时(Sidereal Time,ST)	16
2.2.2 太阳时(Solar Time,ST)	17
2.3 历书时(Ephemeris Time,ET)	19
2.4 原子时(Atomic Time,AT)	20
2.5 原子钟	25
2.5.1 发展历史	25
2.5.2 原子钟的基本工作原理	25
2.5.3 原子钟的分类	26
2.5.4 原子钟的发展现状及趋势	27
2.6 脉冲星时	29
2.6.1 脉冲星	29
2.6.2 脉冲星时	29

2.7	相对论框架下的时间系统	31
2.8	时间传递	37
2.8.1	短波无线电时号	37
2.8.2	长波无线电时号	38
2.8.3	电视比对	39
2.8.4	搬运钟法	39
2.8.5	利用卫星进行时间比对	40
2.8.6	电话和计算机授时	41
2.8.7	网络时间戳服务(Time Stamp)	41
2.9	空间大地测量中用到的一些长时间计时方法	41
2.9.1	历法(Calendar)	41
2.9.2	儒略日与简化儒略日	43
第3章	坐标系统	46
3.1	岁差	46
3.1.1	赤道岁差	46
3.1.2	黄道岁差	47
3.1.3	总岁差和岁差模型	48
3.1.4	岁差改正	49
3.2	章动	52
3.2.1	章动的基本概念	52
3.2.2	黄经章动和交角章动	54
3.3	极移	62
3.3.1	极移的发现	62
3.3.2	平均纬度、平均极和极坐标	62
3.3.3	极移的测定	63
3.3.4	极移的成分	66
3.4	天球坐标系	67
3.4.1	基本概念	67
3.4.2	瞬时天球赤道坐标系	68
3.4.3	平天球赤道坐标系	68
3.4.4	协议天球坐标系	68
3.4.5	国际天球参考框架(International Celestial Reference Frame, ICRF)	69
3.5	站心天球坐标系	71
3.5.1	归心改正	71
3.5.2	坐标转换	72
3.6	地球坐标系	76
3.6.1	参心坐标系和地心坐标系	76
3.6.2	地球坐标系的两种常用形式	77
3.6.3	协议地球坐标(参考)系和协议地球坐标(参考)框架	78

3.6.4	国际地球参考系和国际地球参考框架	79
3.6.5	1984 年世界大地坐标系	83
3.6.6	2000 中国大地坐标系	84
3.7	国际地球参考系与地心天球参考系间的坐标转换	85
3.7.1	前言	85
3.7.2	天球中间极和无旋转原点	86
3.7.3	基于无旋转原点 NRO 的坐标转换新方法	89
3.7.4	基于春分点的经典坐标转换方法	98
3.7.5	计算软件及计算步骤	100
第 4 章	VLBI 原理及应用	104
4.1	射电天文学的诞生	104
4.1.1	大气窗口	104
4.1.2	射电天文学的诞生	105
4.2	射电干涉测量技术	106
4.2.1	联线干涉测量技术	107
4.2.2	甚长基线干涉测量技术(VLBI)	108
4.2.3	空间甚长基线干涉测量技术(SVLBI)	108
4.2.4	实时 VLBI(Real-time VLBI)	111
4.3	VLBI 系统组成	111
4.3.1	天线系统	112
4.3.2	接收机	114
4.3.3	数据记录终端	115
4.3.4	氢原子钟和时间同步	116
4.3.5	VLBI 相关处理系统	117
4.4	VLBI 测量原理及实施过程	118
4.4.1	VLBI 测量原理	118
4.4.2	观测准备和实施	121
4.4.3	VLBI 数据处理的基本过程	125
4.5	数学物理模型	126
4.5.1	时间延迟和延迟率计算模型	126
4.5.2	台站坐标和延迟观测量改正模型	131
4.5.3	延迟和延迟率相对于参数的偏导数	144
4.5.4	卡尔曼滤波在 VLBI 参数解算中的应用	151
4.6	VLBI 技术的应用	154
第 5 章	激光测卫和激光测月	160
5.1	引言	160
5.1.1	激光测距原理	160
5.1.2	激光测距系统	161

5.1.3	激光测距定轨原理	163
5.2	激光测卫	165
5.2.1	激光测卫中的观测模型及其偏导数计算	167
5.2.2	激光测卫中的动力学模型及其偏导数计算	171
5.2.3	运动方程的积分	174
5.2.4	动力学偏导数	175
5.2.5	人卫激光测距技术的应用	178
5.3	激光测月	182
5.3.1	激光测月简介	182
5.3.2	激光测月观测方程	182
5.3.3	与月球相关的改正	183
5.3.4	激光测月技术的应用	184
第6章	卫星测高	187
6.1	引言	187
6.2	卫星测高基本原理	188
6.3	卫星测高误差分析	189
6.3.1	卫星轨道误差	190
6.3.2	环境误差	191
6.3.3	仪器误差	193
6.3.4	卫星测高误差改正公式	193
6.4	测高卫星与数据预处理	194
6.4.1	GEOSAT	194
6.4.2	ERS1/2	196
6.4.3	Topex/Poseidon	198
6.4.4	GFO	199
6.4.5	JASON-1	199
6.4.6	ENVISAT-1	200
6.4.7	ICESat	202
6.5	卫星测高数据的基准统一与平差	203
6.5.1	测高数据的基准统一	203
6.5.2	测高数据的平差方法	205
6.6	卫星测高技术的应用	208
6.6.1	大地测量学	208
6.6.2	地球物理学	215
6.6.3	海洋学	216
6.6.4	全球环境变化与监测	216
6.7	卫星测高技术的最新发展	217
6.7.1	卫星测高后续计划	217
6.7.2	卫星测高概念计划	219

6.7.3	卫星测高波形重构技术	222
第7章	重力卫星测量	227
7.1	引言	227
7.2	卫星重力测量原理	228
7.2.1	卫星轨道摄动	231
7.2.2	卫星能量守恒	234
7.2.3	卫星重力梯度	244
7.3	重力卫星与观测数据精化技术	249
7.3.1	CHAMP	250
7.3.2	GRACE	254
7.3.3	GOCE	257
7.3.4	卫星重力观测数据处理方法	259
7.4	卫星重力测量的应用	262
7.4.1	大地测量学	262
7.4.2	地震学	264
7.4.3	海洋学	264
7.4.4	地球物理学	265
第8章	卫星导航定位及脉冲星导航定位	271
8.1	多普勒测量与子午卫星系统	271
8.1.1	多普勒效应	271
8.1.2	多普勒测量原理	273
8.1.3	多普勒定位	274
8.1.4	子午卫星系统	277
8.1.5	现状与应用	280
8.1.6	子午卫星系统的局限性	280
8.2	DORIS 系统及其应用	282
8.2.1	前言	282
8.2.2	DORIS 的地面跟踪网	283
8.2.3	利用 DORIS 系统进行卫星定轨	284
8.2.4	DORIS 在空间大地测量方面的应用	285
8.2.5	大气探测及研究	287
8.2.6	结论与展望	287
8.3	以 GPS 为代表的第二代卫星导航定位系统	288
8.3.1	二代系统与一代系统间的主要差别	288
8.3.2	第二代卫星导航定位系统的现状	290
8.3.3	国际 GNSS 服务 IGS	296
8.4	脉冲星导航定位	297
8.4.1	前言	297

8.4.2	必要的准备工作·····	298
8.4.3	脉冲星导航的基本原理·····	300
8.4.4	主要的误差改正项及观测方程·····	301
8.4.5	整周模糊度的确定·····	303

第1章 绪 论

半个世纪以来,大地测量学经历了一场划时代的革命性的变革,克服了传统的经典大地测量学的时空局限,进入了以空间大地测量为主的现代大地测量的新阶段。空间大地测量所求得的点位精度、地球定向参数(极移、日长变化等)的精度、地球重力场模型的精度和分辨率比以前都有了极大的提高(有的甚至达好几个数量级)。空间大地测量已成为建立和维持地球参考框架、测定地球定向参数、研究地壳形变与各种地球动力学现象、监测地质灾害的主要手段之一,并渗透到人类的生产、生活、科研和各种经济活动中,从而使大地测量处于地球科学多种分支学科的交汇边缘,成为推动地球科学发展的前沿学科之一,加强了大地测量学在地球科学中的战略地位。

1.1 传统大地测量的局限性

1.1.1 定位时要求测站间保持通视

用传统大地测量技术来布设平面控制网时,需要从一个控制点上用经纬仪(测距仪)对相邻的控制点进行方向观测(距离观测)。观测时,要求观测仪器与照准目标间保持通视。上述基本要求会引发如下的一系列问题:

(1) 需要花费大量的人力物力来修建觐标

由于受到地球曲率的影响以及地形、建筑物、树木等障碍物的影响,在很多场合只有建造觐标才能保持通视。在平原地区,当边长为 25km 时,即使中间无任何障碍物,在两端也需分别建造 20m 高的觐标方能保持通视。造标是一项费时、费力、费钱的工作,还需占用土地,此外还有维护保养等问题。

(2) 边长受限制

由于测站间需保持通视,因而在传统大地测量中边长会受到限制,一般的边长都会被控制在 25 ~ 30km 以内。在我国的天文大地网中,最长的一条边是横跨渤海湾的一个大地四边形中的一条对角线,其边长也只有 113km。边长受限制会产生下列问题:

①大陆与大陆之间、大陆与远距离的海岛之间无法进行联测,从而在全球形成了上百个独立的大地坐标系,但却无法建立起全球统一的坐标系。有的国家在国内不得不采用多个坐标系。

②由于无法进行大陆间的联测,因此数百年来,大地测量学家只能利用相当有限的一个局部区域中的大地测量资料来推求地球的形状和大小,这就使得所推算出来的地球椭球与实际情况之间存在较大的差异,使此项工作进展缓慢。

③由于边长受限制,因此布设首级控制网时,推进速度也很缓慢,无法在短时间内建立起统一的坐标框架。

(3) 迁站困难

为了保持通视,在山区布网时,就不得不把控制点选在山头上,交通不便,迁站时费时费力,从而大大增加了作业的难度,降低了作业效率。

1.1.2 无法同时精确测定点的三维坐标

采用传统的经典大地测量方法进行定位时,点的平面位置是以椭球面作为基准面通过三角测量、导线测量、插网、插点等方法求得的;而点的高程则是以大地水准面或似大地水准面作为基准面通过水准测量的方法而求得的。水准测量路线通常是沿着道路、河流等来布设的,水准点上并没有精确的平面坐标,通常仅在地形图上标注出。而平面控制点则通常位于山头上,难以进行水准测量,其高程大多是采用三角高程测量方法来测定的,精度不高。经典大地测量的定位方法不仅增加了工作量,而且也导致控制点通常不具备精确的三维坐标。此外,由于经典大地测量难以提供精确的大地水准面差距 N 或高程异常 ζ ,从而也导致平面控制和高程控制的成果难以通过转换而精确地归算至同一个基准面上。

1.1.3 观测受气象条件的限制

用传统的经典大地测量方法进行定位时,观测工作并不是全天候都能进行,在大雾、大雪、大风中,观测都难以正常进行。这不仅会极大地影响作业效率,给制定作业计划带来许多不确定因素,而且还可能使该项技术在防汛抗洪、地质灾害监测(如滑坡、泥石流等)的关键时刻失去应有的作用。

1.1.4 难以避免某些系统误差的影响

地球是一个赤道上微微隆起的椭球,长半轴 a 与短半轴 b 之差约为 21.4km。从整体上讲,地球引力是从两极逐渐向赤道减小的,所以大气密度也是从两极逐渐向赤道地区减小的,于是沿平行圈布设的三角锁和导线等沿东西向进行方向观测时,由于视线北侧的大气密度总体上讲总是比视线南侧的大气密度大,所以视线将产生弯曲,我们将这种现象称为地球旁折光。此外,沿海岸线布设的三角锁和导线、沿大沙漠和戈壁滩边缘布设的三角锁和导线也会由于两侧的地貌和植被等条件的迥然不同而使大气分布状态产生明显的差异而最终产生地区性的旁折光。分析我国的天文大地网资料后不难发现,这些地方的拉普拉斯方位角的闭合差都会出现系统偏差。利用传统的经典大地测量技术进行定位时,将无法克服这些系统误差的影响,即使采用日、夜对称观测的措施也无法解决上述问题。系统误差的存在将极大地损害定位精度,并使测量平差中所估计的精度过于乐观,与实际精度不符。

1.1.5 难以建立地心坐标系

由于占地球总面积约 70% 的海洋上无法用经典的大地测量方法来布设大地控制网,而仅占地球表面约 30% 的大陆又被海洋分隔,难以进行大地联测,所以在进行椭球定位时,我们实际上只能根据很有限的区域内的大地测量资料在该区域的(似)大地水准面与椭球面吻合得最好的条件下来确定地球的形状、大小,并进行椭球定位。这种不是在保证全球(似)大地水准面和椭球面最为吻合的条件下进行的椭球定位一般无法使参考椭球体的中心与地球质心重合,两者之差可达数十米至数百米。

重力测量也是确定大地水准面、建立地球重力场模型的一种重要方法。地面重力测量

虽然可以达到很高的精度,但由于自然条件和地理条件的限制,陆地上的重力测量资料仍存在不少空白区(如原始森林、大沙漠、大戈壁滩、交通极其困难的山区等)。此外,由于政治军事方面的原因,不少国家对重力测量资料是加以保密的,从而使资料的数量和范围都受到限制。

海洋重力测量和航空重力测量的观测值由于受到许多干扰力的影响(如观测平台的水平加速度和垂直加速度、旋转等),其精度较差。此外,由于作业量太大,所需费用庞大,所以其资料的数量和范围实际上也很有限。

上述问题依靠传统的经典大地测量本身是无法解决的。

1.2 空间大地测量的产生

1.2.1 时代对大地测量提出的新要求

20世纪50年代,随着生产力的迅猛发展、科学技术水平的不断提高,有不少部门和领域对大地测量学提出了一些新的要求,大地测量又面临着巨大的挑战和新的发展机遇。

1. 要求提供更精确的地心坐标

此前,国民经济建设的各个部门,如水利、交通、地质、矿山以及城市规划建设等部门和军事部门、科研机构等主要关心的是在一个国家或地区内点与点之间的相对关系,参心坐标并不影响这些部门的使用。20世纪50年代,随着空间技术和远程武器的出现和发展,情况就有了很大的变化。我们知道,当人造卫星和弹道导弹入轨自由飞行后,其轨道为一椭圆(或椭圆中的一个弧段),该椭圆轨道的一个焦点位于地球质心上。只有把坐标系的原点移至地心上,使其与椭圆的焦点重合后,我们才能在該坐标系中依据椭圆的几何特性导得一系列计算公式,进行轨道计算。所以,利用卫星跟踪站上的观测值来定轨时,所给定的跟踪站坐标必须是地心坐标。反之,利用卫星导航定位技术所测得的用户坐标自然也属地心坐标。如前所述,用传统的经典大地测量方法来进行弧度测量和椭球定位后,所得到的参考椭球的中心与地心之间通常都会有数十米至数百米的差距,难以满足空间技术的需要。据报道,射程为10 000km的导弹,如发射点的坐标有100m的误差,则落点会有1~2km的误差,所以发射点的坐标也需采用地心坐标而不能直接采用参心坐标。

2. 要求提供全球统一的坐标系

20世纪50年代以前,人们主要关心的是在一个国家或地区内点的精确位置及其相互关系,这些问题可以在一个局部坐标系中加以解决。只有远距离的航空、航海项目才会涉及不同坐标系间存在的差异问题,但由于这些应用项目对精度的要求不高,驾驶人员有足够的时间来予以纠正,所以对建立统一坐标系的要求并不迫切。20世纪50年代后,情况就有了很大的变化,一些长距离高精度的应用项目纷纷出现,迫切要求建立全球统一的坐标系。例如,为了准确确定卫星轨道,要求在全球布设许多卫星跟踪站,这些跟踪站的坐标必须属同一坐标系,其观测资料才能进行统一处理。发射远程弹道导弹时,发射点和弹着点的坐标应属同一坐标系。测定板块运动时,也应该在统一的坐标系中进行。随着信息时代的到来,人与人之间的联系和交往也越来越密切,地球将变得“越来越小”,在全球范围内建立统一坐标系的要求也越来越迫切。

3. 要求在长距离上进行高精度的测量

研究全球性的地质构造运动、建立和维持全球的参考框架等工作都需要在长距离上进行高精度的测量。以监测板块运动、监测海平面上升等应用为例,其边长可达数千公里,所需的精度至少应达到厘米级(相对精度为 10^{-8} 级),希望能达到毫米级(相对精度为 10^{-9} 级)。而传统的经典大地测量的精度为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 级,边长通常也只能达到数十公里,肯定是无法满足要求的。

4. 要求提供精确的(似)大地水准面差距

随着 GNSS 等空间定位技术逐步取代传统的经典大地测量技术成为布设全球性或区域性的大地控制网的主要手段,人们对高精度、高分辨率的大地水准面差距 N 或高程异常 ζ 的要求越来越迫切。因为 GNSS、VLBI、SLR 等空间大地测量技术都是采用几何方法来定位的,与大地水准面这一重力等位面之间并无直接联系,因而只能求得点的大地高,而无法求得点的正常高或正高。为了把大地高转换为正常高或正高就需要知道精确的、高分辨率的大地水准面差距 N 或高程异常 ζ 值。

5. 要求高精度、高分辨率的地球重力场模型

随着空间技术和远程武器的发展,用户对卫星的定轨精度及轨道预报精度也提出了越来越高的要求。精密定轨和轨道预报(尤其是低轨卫星)需要高精度、高分辨率的地球重力场模型来予以支持。

6. 要求出现一种全天候、更为快捷、精确、简便的全新的大地测量方法

长期以来,大地测量的方法、技术和测量仪器虽然也在不断地改进和完善,如用游标和测微器来提高读数精度,用电磁波测距的方法来提高测距的作业效率,用全站仪将方向观测和距离观测的功能集成于一身等,但这些改进措施都没有突破“地面测量”这一老的作业模式,因而也无法从根本上解决大地测量所面临的固有问题。如由于受到地球曲率的影响,“地面测量”无法解决边长受限制的问题;由于信号全程都是在稠密的大气层中传播,因而方向测量和距离测量的精度就将受到大气折射和大气延迟改正的精度限制,如果不能在大气改正精度方面取得突破,那么大地测量的精度也只能被限制在目前大约为 10^{-6} 左右的精度水平上,难以进一步提高。因而大地测量界本身也期望能突破“地面测量”的老的作业模式的限制,能出现一种全天候、更为快捷、精确、简便的全新的大地测量方法和技术。

1.2.2 空间大地测量产生的可能性

20 世纪中叶,生产力和科学技术水平的提高、相关科学的迅猛发展为空间大地测量的诞生奠定了基础。具体表现在下列几个方面:

(1)空间技术的产生和发展使得我们有可能按照不同的需要来设计、制造、发射各种具有不同功能的位于不同轨道上的大地测量卫星(如配备了后向反射棱镜的各种激光测距卫星、海洋测高卫星、导航卫星等),至今为止,其数量已达几百个。我们不但能精确地测定这些卫星的轨道,而且能准确地进行轨道预报,并能对这些卫星的运行姿态和整个工作状态进行监测和控制,从而为空间大地测量的诞生奠定基础。

(2)众所周知,在卫星精密定轨、导航定位、确定地球重力场模型等工作中,需要对海量的测量资料进行极其复杂的数学计算。计算机技术的发展为快速解决上述问题提供了可能。此外,计算机技术的发展还为测量卫星的自动检测、自动控制等工作创造了条件,也为 VLBI、SLR、GNSS 等仪器设备的自动检核和管理,以及实现自动化的数据采集与海量观测数

据的记录、存储和取用提供了可能性。

(3) 现代电子技术的快速发展,特别是超大规模集成电路技术的迅猛发展,使得由成千上万个电子元器件组成的复杂的电子产品有可能浓缩于一块小小的芯片上,从而能制造出体积小、重量轻、能耗低、价格便宜、质量可靠、运算速度快的信号接收机和卫星上的各种组件,为空间大地测量走向实用化创造了条件。

(4) 多路多址技术、编码技术、扩频技术、加密技术、解码技术以及滤波技术等现代化的通信技术为卫星信号的传输和处理奠定了基础;大气科学的发展则为卫星轨道的确定(大气阻力摄动)以及卫星信号的传播延迟改正(电离层延迟改正,对流层延迟改正)提供了必要的基础;天文学、大地测量学、导航学等学科的发展也为空间大地测量的诞生作了理论和方法上的准备,并通过长期的观测资料为空间大地测量提供了必要的初始的参数(极移、日长变化等)和地球重力场模型、跟踪站的坐标等,而空间大地测量的诞生和发展又反过来促进了上述学科的发展。

总之,20世纪中叶,随着生产力和科学技术的发展,各个学科和不同领域都对大地测量学提出了新的要求。这些要求是传统的经典大地测量无法满足的。巨大的社会需求对空间大地测量学的诞生起到了重要的推动作用。而空间技术、计算机技术、电子技术和通信技术等现代科学技术的发展又为空间大地测量的诞生创造了条件。于是,空间大地测量便应运而生,并得到了迅速的发展。

1.3 空间大地测量的定义、任务及几种主要技术

1.3.1 什么是空间大地测量

利用自然天体或人造天体来精确测定点的位置,确定地球的形状、大小、外部重力场,以及它们随时间的变化状况的一整套理论和方法称为空间大地测量学。在这里,自然天体和人造天体既可以作为观测目标(如甚长基线干涉测量中的河外类星体以及激光测距中的激光卫星),也可作为观测平台在上面设置仪器进行对地观测(如卫星测高法中的卫星)。上面所说的“点的位置”,通常是指地面上一些离散的特殊点的位置(如地面控制点、变形监测点等)以及火箭、卫星等飞行器的位置。而测定全球性的或区域性的地表形状、制成地形图或地面数字模型则属于航天遥感的范畴。前者的定位精度较高,如厘米级精度(静态定位),后者的定位精度较低(如10米级的精度)。但随着INSAR技术、星载激光扫描技术的发展,两者间的差异也变得较为模糊。

从上面的讨论可以看出,空间大地测量包含两个要素:一是必须利用空间的自然天体或人造天体所发出的信号来进行观测或将它们作为观测目标;二是所做的工作必须属于大地测量的范畴,如精确测定点的坐标及其变化率;确定地球重力场及其变化;确定地球的运动(如岁差、章动、极移、自转不均匀等)和相关参数(a 、 e 、 GM 等)。如果只利用人造地球卫星来完成上述工作,则称为卫星大地测量。卫星大地测量是空间大地测量的一个重要分支。

1.3.2 空间大地测量的主要任务

空间大地测量要解决的问题和承担的具体任务很多,但归纳起来大体上可分为两类:一类是建立和维持各种坐标框架,另一类是确定地球重力场。

1. 建立和维持各种类型的坐标框架

空间大地测量的一项主要任务是建立和维持各种类型的坐标系统和相应的参考框架。我们知道,坐标系统是由一系列的规定、协议等从理论上加以定义的。这些定义要依靠某些单位通过长期的观测和数据处理后采用一定的形式来加以实现,坐标系统的具体实现称为参考(坐标)框架。这些坐标系统和参考框架既可以是全球性的,也可以是区域性的或局部性的;既包含地球参考框架,也包含天球参考框架。为了实现地球坐标系统和天球坐标系统之间的坐标转换,还必须精确确定地球定向参数。

1) 建立和维持地球参考框架

(1) 建立和维持全球性的地球参考框架

建立和维持全球统一的地球参考框架是空间大地测量的主要任务之一。目前,在大地测量和地球动力学等领域中,被广泛使用的、精度最高、全球性的地球参考框架是国际地球参考框架 ITRF。该框架是由国际地球自转和参考系服务 IERS 利用 VLBI、SLR、GPS、DORIS 等空间大地测量资料以及并址站上的联测资料经统一处理后来建立和维持的。随着观测精度的提高、观测资料的累积及数据处理方法的改进,ITRF 也在不断改善和精化。到目前为止,IERS 已先后给出了 11 个不同版本的 ITRF 框架,它们是 ITRF₈₈、ITRF₈₉、ITRF₉₀、ITRF₉₁、ITRF₉₂、ITRF₉₃、ITRF₉₄、ITRF₉₆、ITRF₉₇、ITRF₂₀₀₀ 和 ITRF₂₀₀₅。此前,ITRF 框架是用组成该框架的各测站的三维坐标以及它们的年变化率的形式来具体实现的。但从 ITRF₂₀₀₅ 开始,框架则是用 VLBI、SLR、GPS、DORIS 等空间大地测量技术所给出的测站坐标及地球定向参数的时间序列经统一处理后来予以实现的。除 ITRF 外,WGS-84 也是一种被广泛采用的全球性的地球参考框架,但主要用于导航领域。多年来,WGS-84 经多次改进和精化后,现在与 ITRF 之间的差异已很微小。

(2) 建立和维持区域性的地球参考框架

由于传统大地测量的局限性,目前,建立和维持区域性的地球参考框架的任务主要是由空间大地测量来承担的。在一个大国或洲的范围内来建立和维持地球参考框架时,可考虑综合利用多种空间大地测量技术来实现,在缺乏长时期的高精度的 VLBI、SLR 等空间大地测量资料的情况下,也可仅用 GNSS 资料来予以实现。在更小的区域中来建立和维持地球参考框架(布设大地控制网),则主要依靠 GNSS 技术来实现。当然在特殊情况下,也不排除用传统大地测量的方法来予以实现的可能性。

2) 建立和维持国际天球参考框架

建立和维持国际天球参考框架是空间大地测量的又一重要任务。目前,国际天球参考框架 ICRF 是由 IERS 利用 VLBI 技术所测定的河外射电源的方向来实现和维持的。由于这些射电源离我们十分遥远(如几十万光年),所以虽然这些天体也可能在快速运动,但我们所看到的这些射电源的方向却是固定不变的。根据坐标原点的不同,国际天球参考框架 ICRF 可分为 BCRF 和 GCRF。前者的坐标原点在太阳系质心,该框架主要用于研究行星的绕日公转运动;后者的坐标原点在地球质心,主要用于研究卫星围绕地球的运动。

3) 测定地球定向参数

由于下列原因:第一,河外射电源等天体在空间的位置(方向)通常是用 ICRS 中的坐标系来表示的;第二,地球坐标系将随着地球自转而不断旋转,所以它不是一个惯性坐标系,牛顿运动定律在这种非惯性坐标系中是不适用的,所以卫星定轨的工作(运动方程的建立和求解)需在 GCRS 中进行;而空间大地测量的最终目的又是为了确定地面测站等在地球坐标