

# 卫星大地测量学

[德] Günter Seeber 著

赖锡安 游新兆 邢灿飞 等译  
王庆庭 徐菊生 等校

# Satellite Geodesy



二

地质出版社



地震科学联合基金资助

登录号	107508
分类号	P228
种次号	002

# 卫星大地测量学

[德] Günter Seeber 著

赖锡安 游新兆 邢灿飞 等译  
王庆庭 徐菊生 等校



石油0107763

5411/12



地震出版社

1998

著作权合同登记 图字：01-97-1601

## *Satellite Geodesy*

Günter Seeber

本书版权归 Walter de Gruyter Co. 所有。

Copyright Walter de Gruyter Co. © 1997.

本书中文版由著作权人授权地震出版社独家出版发行, 1997.

版权所有, 翻印必究。

### 卫星大地测量学

[德] Günter Seeber 著

戴锡安 游新兆 邢灿飞 等译

王庆庭 徐菊生 等校

责任编辑: 张平 吴兵 李玲

\*

地震出版社 出版

北京民族学院南路9号(邮编 100081)

中国地质大学彩印厂印刷

全国各地新华书店经售

\*

787 × 1092 1/16 26.75 印张 685 千字

1998年1月第一版 1998年1月第一次印刷

印数 0001-1000

ISBN 7-5028-1471-X/P·904

(1915) 定价: 50.00 元

## 中文版序

《卫星大地测量学》最初是用德文写成的,并作为 Walter de Gruyter (柏林) 出版社 1989 年出版的测量与大地测量系列丛书之一。1993 年对此书进行了修订,同时完成了英文版仍由该出版社出版。

编写此书的目的是将它写成一本涉及卫星大地测量各个方面的教材和综合性手册,同时也将是卫星技术在测量、航海、大地测量和相关地球科学的实际应用中的一本合格的参考书。因此本书弥补了现有文献在该领域的空白,并荣幸地得到了国际学术界的认可。

当我得知中国国家地震局地震研究所赖锡安教授将把此书译成中文版出版,我感到特别高兴。中国同行们在这个方面的研究工作有很高的水平,我很乐意将《卫星大地测量学》一书介绍给中国的朋友和同行们。

我相信《卫星大地测量学》中文版问世将对科学知识的广泛交流和科学家间的国际合作作出新的贡献。

*John See*

## 前 言

卫星大地测量方法在大地测量、工程测量及其他相关学科的应用越来越广泛,特别是基于精密卫星定位技术正进入地球科学与工程测量的各个领域。但是,缺乏对这一科学的完整的综合性论著:米勒(Mueller)与考拉(Kaula)的基础教材写于25年前,并未能包括20多年来的快速发展状况。许多年来,我感到确实需要一本全新的、系统的、覆盖整个学科,包括基础理论与应用的教科书。本人的想法是通过该书至少在某些方面有助于对目前状况作出补充。

这里的资料部分基于本人自1973年以来在汉诺威大学执教的讲稿,我希望这些资料亦能用于其他大学类似的课程。本书旨在主要用作大地测量、摄影测量、制图学及工程测量专业的高年级大学生、研究生的教材,亦可作为对卫星大地测量方法与结果感兴趣以及希望了解新技术发展的专业人员的参考资料。此外,本书的目的还在于提供给地球学与工程测量相关领域,诸如导航、水道测量、市政工程、交通管理、地理学、地质学与海洋学的有关学生、教师、专业人员与科学家阅读参考。与这些目的一致,该书的特点在某些方面介于教科书与手册之间,阅读本书需要大学水平的数学知识以及基本的数理统计知识。

由于这一领域不断地快速发展,有选择地突出论述重点是必要的。本书着重讲述基础知识与应用,特别是人造卫星应用于精密定位。为方便读者进一步阅读与深入学习,列出了完整的参考文献目录。

本书现在的英文版是根据1989年出版发行的德文版《卫星大地测量》一书翻译的,借翻译之机进行了全面修订,包括直至1993年1月的最新技术发展的内容,增加与更新的内容主要在信号传播(第2章第3节)、全球定位系统(GPS)(第7章)、激光测距(第8章)、卫星测高(第9章)及计划任务与特殊方法(第10章)和应用(第11章)。特别是有关GPS一章完全重写,而且篇幅增加了一倍,连同第2章、第3章及第11章的有关内容,即可作为一本GPS综合指南。同时,更新了参考书目并大大地增加了英文参考文献。

本书中的许多实例是基于 15 年来的野外观测计划以及我的研究生、博士后与汉诺威大学的科学家同事所做的研究工作。我感谢长期合作的同事,我曾与他们进行过许多富有成效的讨论。此外,我还感谢大地测量研究所全体同事的帮助。

我真诚地感谢泰恩河畔纽卡斯尔大学(University of Newcastle)已故的 Paul Sellers 博士校对英文稿,他不久前故去;真诚地感谢伦敦大学(University College London)的 Jonathan Iliffe 博士友好地同意接着完成这项工作。同时我也感谢世界各地对德文版提出修改意见的同仁以及提供插图的组织与个人。

最后,感谢我妻子 Gisela 的理解与连续不断的支持。对出版者在本书出版期间的良好合作表示感谢。

Günter Seeber

1993 年 2 月于汉诺威

# 目 录

第1章 引 论	(1)
1.1 卫星大地测量的目的	(1)
1.2 卫星大地测量的分类与基本概念	(2)
1.3 卫星大地测量的发展史	(4)
1.4 卫星大地测量的应用	(5)
1.5 本书的结构及目的	(7)
第2章 基 础	(8)
2.1 参考坐标系	(8)
2.1.1 笛卡尔坐标系和坐标转换	(8)
2.1.2 卫星大地测量中的参考坐标系	(10)
2.1.3 地球重力场的参考坐标系	(13)
2.1.4 椭球参考坐标系	(15)
2.1.5 椭球、大地水准面和大地测量基准点	(17)
2.2 时 间	(20)
2.2.1 基本考虑	(20)
2.2.2 恒星时和世界时	(21)
2.2.3 动力时	(23)
2.2.4 原子时	(24)
2.2.5 钟和频率标准	(25)
2.3 信号传播	(27)
2.3.1 波传播的一些基础理论	(28)
2.3.2 大气层的结构和分解	(31)
2.3.3 穿过电离层和对流层的信号传播	(34)
第3章 卫星轨道运动	(40)
3.1 天体力学基础——二体问题	(40)
3.1.1 开普勒运动	(41)
3.1.2 牛顿力学,二体问题	(43)
3.1.3 轨道几何与轨道运动	(53)
3.2 卫星摄动运动	(57)
3.2.1 有摄轨道运动的描述	(59)
3.2.2 不规则地球重力场引起的摄动	(61)

3.2.3	其他摄动 .....	(70)
3.2.4	卫星轨道摄动的量级 .....	(76)
3.3	轨道确定 .....	(78)
3.3.1	无摄轨道积分 .....	(78)
3.3.2	有摄轨道的积分 .....	(81)
3.3.3	轨道描述 .....	(85)
3.4	卫星轨道及轨道运动 .....	(89)
<b>第4章</b>	<b>基本观测原理与大地测量卫星 .....</b>	<b>(94)</b>
4.1	卫星大地测量作为一个参数估计的问题 .....	(94)
4.2	可观测量与基本概念 .....	(96)
4.2.1	方向测定 .....	(96)
4.2.2	距离测定 .....	(98)
4.2.3	距离差值的确定(多普勒方法) .....	(99)
4.2.4	卫星测高 .....	(100)
4.2.5	距离与距离变化率的确定 .....	(101)
4.2.6	干涉测量 .....	(101)
4.2.7	未来的观测技术 .....	(102)
4.3	用于大地测量的卫星 .....	(103)
4.3.1	基本要求 .....	(103)
4.3.2	选择卫星 .....	(104)
4.3.3	卫星子系统 .....	(106)
4.3.4	卫星与卫星子系统的设计 .....	(109)
<b>第5章</b>	<b>经典观测技术 .....</b>	<b>(110)</b>
5.1	照相法定向 .....	(110)
5.1.1	用于照相观测的卫星 .....	(110)
5.1.2	卫星照相机 .....	(111)
5.1.3	观测与底片归算处理 .....	(113)
5.1.4	空间三角测量 .....	(118)
5.1.5	结    果 .....	(119)
5.1.6	摄影法确定方向的现代重要性 .....	(121)
5.2	电子测距(SECOR) .....	(122)
5.3	早期的其他观测技术 .....	(122)
<b>第6章</b>	<b>多普勒测量(TRANSIT) .....</b>	<b>(124)</b>
6.1	多普勒效应和基本定位概念 .....	(125)
6.2	海军导航卫星系统(TRANSIT)的状况和进展 .....	(127)
6.3	轨道的确定及描述 .....	(130)



6.3.1	广播星历表 .....	(130)
6.3.2	精密星历表 .....	(134)
6.3.3	多普勒参考系间的关系 .....	(134)
6.4	多普勒接收机 .....	(135)
6.4.1	多普勒接收机的基本概念 .....	(135)
6.4.2	时间测量和多普勒计数 .....	(136)
6.4.3	选定的多普勒测量装置 .....	(138)
6.5	误差估算与改正 .....	(139)
6.5.1	卫星轨道 .....	(139)
6.5.2	电离层和对流层的折射 .....	(140)
6.5.3	接收器系统 .....	(142)
6.5.4	地球自转及相对论效应 .....	(143)
6.5.5	接收机天线的运动 .....	(144)
6.5.6	一次卫星通过的误差预估 .....	(145)
6.6	观测方案和平差模型 .....	(146)
6.6.1	扩展的观测方程 .....	(146)
6.6.2	单台定位 .....	(149)
6.6.3	多台定位 .....	(150)
6.6.4	数据处理软件 .....	(152)
6.7	野外项目的计划和实施 .....	(154)
6.8	应用 .....	(155)
6.8.1	大地测量控制的应用 .....	(155)
6.8.2	控制点和基准点的确定 .....	(159)
6.8.3	海洋和极地大地测量中的应用 .....	(161)
6.8.4	极移的确定 .....	(161)
6.8.5	卫星多普勒观测的今后作用 .....	(161)
<b>第7章</b>	<b>全球定位系统(GPS) .....</b>	<b>(163)</b>
7.1	基本原理 .....	(163)
7.1.1	引言 .....	(163)
7.1.2	空间部分 .....	(165)
7.1.3	控制部分 .....	(167)
7.1.4	观测原理与信号结构 .....	(168)
7.1.5	轨道确定与轨道描述 .....	(171)
7.1.6	系统精度的人为限制 .....	(176)
7.1.7	系统的发展 .....	(177)
7.2	GPS接收机(用户部分) .....	(180)
7.2.1	接收机原理及主要组成部分 .....	(180)
7.2.2	码相关信号处理 .....	(183)

7.2.3	无码信号处理 .....	(184)
7.2.4	GPS 接收机实例 .....	(186)
7.2.5	综述、评价及将来发展 .....	(194)
7.3	GPS 观测量与数据处理 .....	(195)
7.3.1	观测量 .....	(195)
7.3.2	参数估算 .....	(200)
7.3.3	数据编辑整理 .....	(213)
7.3.4	平差计算方法及软件原理 .....	(218)
7.3.5	GPS 快速测量原理 .....	(223)
7.3.6	GPS 导航 .....	(227)
7.4	误差预算与改正 .....	(228)
7.4.1	概 述 .....	(228)
7.4.2	卫星几何图形及精度度量 .....	(231)
7.4.3	轨道误差与钟差 .....	(234)
7.4.4	信号传播误差 .....	(239)
7.4.5	接收系统误差 .....	(245)
7.4.6	总结, 完备性问题 .....	(246)
7.5	GPS 观测的方案设计与实施 .....	(247)
7.5.1	制订观测方案 .....	(247)
7.5.2	野外观测的实施 .....	(251)
7.5.3	观测方法与网形设计 .....	(253)
7.6	GPS 的应用范围及应用实例 .....	(258)
7.6.1	大地控制测量 .....	(258)
7.6.2	地籍测量与地理信息系统 .....	(264)
7.6.3	地球动力学应用 .....	(266)
7.6.4	工程测量与工程监测 .....	(268)
7.6.5	精密导航、海洋大地测量及水道地形测量 .....	(271)
7.6.6	摄影测量与遥感 .....	(274)
7.6.7	GPS 的特殊应用 .....	(278)
7.7	GLONASS 系统 .....	(280)
第 8 章	激光测距 .....	(284)
8.1	引 言 .....	(284)
8.2	带激光反射镜的卫星 .....	(285)
8.3	激光测距系统及组成 .....	(289)
8.3.1	激光振荡器 .....	(289)
8.3.2	系统的其他部件 .....	(290)
8.3.3	现有的激光固定站和流动站 .....	(292)
8.4	改正量、数据处理和精度 .....	(293)

8.4.1	广义测距公式	(293)
8.4.2	数据控制、压缩和标准点	(295)
8.4.3	激光测距仪精度改进	(297)
8.5	卫星激光测距系统的应用	(299)
8.5.1	观测方案的实现	(299)
8.5.2	参数估算	(301)
8.5.3	坐标及坐标的变化	(302)
8.5.4	参考框架,地球自转和极移	(303)
8.5.5	地球重力场	(305)
8.5.6	固体潮和海潮	(306)
8.5.7	其他应用	(306)
8.6	激光测月	(307)
8.7	星载激光测距系统	(310)
<b>第9章</b>	<b>卫星测高</b>	<b>(312)</b>
9.1	基本原理	(312)
9.2	卫星和飞行	(313)
9.3	测量、改正、精度	(317)
9.3.1	测高仪观测的几何学	(317)
9.3.2	数据的形成	(318)
9.3.3	改正及误差预算	(320)
9.4	平均海面的测定	(324)
9.5	卫星测高在大地测量、地球物理学及海洋学中的应用	(325)
9.5.1	大地水准面和重力场的测定	(325)
9.5.2	地球物理解释	(327)
9.5.3	海洋学	(327)
<b>第10章</b>	<b>计划任务与特殊方法</b>	<b>(330)</b>
10.1	绘制高分辨率重力场图的计划任务	(330)
10.1.1	基本原理	(330)
10.1.2	卫星对卫星的跟踪(SST)	(332)
10.1.3	卫星重力梯度测量	(336)
10.2	甚长基线干涉测量	(340)
10.2.1	基本概念与观测方程	(340)
10.2.2	VLBI在大地测量与地球动力学中的应用	(343)
10.2.3	人造卫星 VLBI	(346)
<b>第11章</b>	<b>卫星大地测量方法的应用(述评)</b>	<b>(348)</b>
11.1	定位	(348)

11.1.1	绝对与相对定位概念 .....	(348)
11.1.2	全球网与区域网 .....	(351)
11.1.3	定    位 .....	(352)
11.2	重力场与地球模型 .....	(354)
11.2.1	基本原理 .....	(354)
11.2.2	地球模型 .....	(359)
11.3	导航与海洋大地测量、动态定位 .....	(362)
11.3.1	在海洋定位中的可能应用与精度要求 .....	(362)
11.3.2	TRANSIT 系统的特别应用 .....	(365)
11.3.3	全球定位系统(GPS)的特殊应用 .....	(367)
11.3.4	冰流的测定 .....	(370)
11.4	地球动力学 .....	(372)
11.4.1	现代地壳运动 .....	(372)
11.4.2	参考系、地球自转参数 .....	(374)
缩写词索引 .....		(377)
参考文献 .....		(378)
译后记 .....		(416)

# 第1章 引 论

## 1.1 卫星大地测量的目的

根据 F.R.Helmert(1880)的经典定义,大地测量是对地球表面进行测绘的科学。定义包括地球外部重力场以及海底表面的测定(参见 Torge, 1991)。

卫星大地测量是运用从人造卫星或近地卫星对它们和在它们之间进行精确测量的观测与计算技术,以获得大地测量问题的解。今天谈 Helmert 定义,基本上还是正确的,卫星大地测量的一些目标在目前主要是从实用方式加以考虑,由于观测精度的提高,所以目标中还包含与时间相关的变化(Sigl, 1984 b; NAS, 1978)。

其基本问题有:

(1)全球、区域或局部的三维位置精确定位(例如:大地控制网的建立);

(2)地球重力场及其线性函数的确定(例如:精化大地水准面);

(3)地球动力学现象(例如:极移、地球自转、地壳形变)的量的测定与模拟。

利用人造卫星进行大地测量中,需要广泛的了解认识在各种力的作用下卫星运行状况,以及卫星与地面站在合适的参照系中的位置。因此,从这方面来说,卫星大地测量属于基础科学范畴。从另一方面来说,当卫星观测用来解决各种问题时,卫星大地测量又属于应用科学范畴。故卫星大地测量既属于地球科学,又同属于工程科学。

由于其精度高、数据处理快,卫星大地测量的方法与成果越来越广泛地用于其他科学,如:地球物理、海洋学和导航。

自从第一颗人造地球卫星斯普特尼克1号(SPUTNIK-1)于1957年10月4日发射成功以来,卫星大地测量在大地测量的教学与科研方面已发展成为一个独立的领域,与相邻的边缘学科有着密切关系和相互交叉关系(图1.1),其任务和内容是历史发展的结果。

在大地天文学方面,根据球面天文学的法则,局部重力矢量(地球经度 $\Delta$ 和地球纬度 $\Phi$ )的定向和地面标志的天文方位角 $A$ ,按对自然天体,尤其是对固定的星体的观测结果来确定。而在重力测量学中,我们所指的重力测量(重力强度 $g$ )则是重力加速度矢量 $g$ 的大小(Torge, 1989)。地面大地测量提供了水平角度、距离、天顶角和水准高差参数,并为提供地面点位置服务。总之,卫星大地测量是根据对人造天体的观测,确定地面站与卫星之间以及卫星相互之间的方向、距离和距离变化率。

大地测量——天文或重力观测结果可应用于天文及物理大地测量学领域,以测定地球形状和重力场(Torge, 1991)。在德语中,这种经典的领域被称为 Erdmessung,相当于英语中全球大地测量的概念,主要问题是测定平均地球椭球面和精确大地水准面(参见[2.1.5])。

椭球或三维坐标系中的坐标测定,主要是指根据地面大地测量的量测值,属数学大地测量学范畴。该领域可另外表达为几何大地测量或德语中所指的地面测量(例如 Grobmon, 1976)。

大地测量教学和实践的传统领域曾经把观测技术和计算技术分别进行分类,而在卫星大地测量的相同范围内都不再如此。此处提及的观测、计算及分析,通常是一起处理的。如果涉及到全体问题,卫星大地测量则有助于全球大地测量。而在区域性或局部问题中,卫星大地测

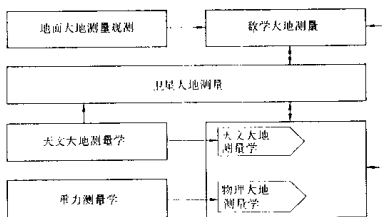


图 1.1 大地测量学科的教学与科研之间主要关系示意图

量则是测量的一部分。相反,数学大地测量学和大地天文学的一些领域则在参照系方面为卫星大地测量提供了重要基础。同样,对天文与物理大地测量领域的作用是,它提供了地球重力场资料。由于这些密切的相互关系,要对大地测量学的各个领域进行准确的划分因而就变得越来越难了。

将全部大地测量观测量以整体概念加以综合考虑,正发展成为整体大地测量学范畴(Hein, 1983; Torge, 1991)。

“卫星大地测量”术语在法语中被称为“特别大地测量”,或更一般化的表达为“空间技术”。后者内容包括月球大地测量观测以及利用行星和太阳系以外的物体如射电干涉测量。应用时使用“全球大地测量”这个名词,其“全球”概念包含全球测量技术和全球性的应用两个方面。

本书中,使用“卫星大地测量”这一术语,因为该术语现在已普遍使用,还因为几乎全部使用人造近地卫星进行的观测,都与应用大地测量有关。如果有需要,还会涉及到其他的空间技术。

## 1.2 卫星大地测量的分类与基本概念

基于下述基本考虑,人造卫星对大地测量的重要性十分明显。

(1)卫星作为一些高轨道目标,远距离可观测到。根据地球—边界三角网的经典概念,卫星可被看成为在大范围内或整个三维网中的固定控制点。若从不同的地面上同时观测卫星,则人造卫星的轨道是否受到重力的影响不是很重要的,而仅仅利用它们是高空目标这一特性。卫星大地测量的几何方法由此得出。图 1.2 表示了这一概念。通过 BC4 全球网,以此最简单单纯的形式得以实现(参见[5.1.5])。

与经典技术相比较而言,卫星方法的主要优点是它能跨越远距离,并因此建立了大陆与海岛之间的大地测量连接。同属于这个网的地面站可以在一个统一的三维全球坐标系中测定,它们由一个围绕地球的多面体组成。

早在 1878 年, H. Bruns 就曾提出这样一个概念,也就是后来众所周知的 Bruns 笼子。Bruns 的目的是将此作为科学大地测量的基本问题之一加以考虑。然而,这种想法并未能以经典的大地测量方法来实现,并且被忽略。

卫星大地测量的几何方法也被称作作为直接方法,因为卫星的具体位置被直接用于解中。

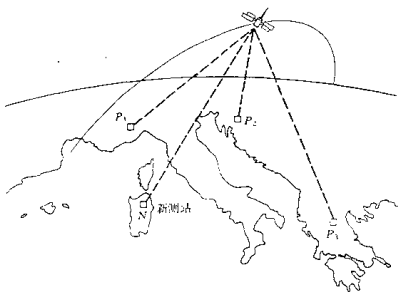


图 1.2 几何方法：卫星是一个高空目标

(2) 卫星可当成地球重力场的探测器或一个传感器。用它对卫星的轨道运动及其参数变化进行观测，以得出其作用力的结论。具体的兴趣是，在于认识地球重力场的特性与它引起真实的卫星轨道相对于未受扰动的开普勒运动的偏离之间的关系([3.1.1])。卫星的基本价值在于它是一个在地球重力场内运动的物体，这种观点导致了卫星大地测量的动力学方法的产生。

与经典的大地测量技术相比较而言，卫星观测的主要优点是，其结果是把地球作为一个整体，因而观测值自然具有全球的特点。数据间隔所引起的作用不大。首次获得的结果就是地球扁率的合理精确值，并且证明了相对于赤道，地球的形状是非对称的(即地球呈梨形形状，参见[11.2])。

在动力卫星大地测量中，应考虑不同长度的轨道弧。当使用从若干分钟到绕地球数圈的弧长时，我们称之为短弧技术；弧长达 30 天以上的，则称之为长弧技术。在一个合适的地心坐标参考系中描述轨道，卫星可被看成为其“本身坐标的载体”。可以根据已知的卫星轨道推求出地面观测站的地心坐标，图 1.3 中表示了这种称之为测定坐标的轨道法。

动力卫星大地测量学范畴内的重力场参数及地心坐标的综合测量，得出了参数测定或参数估算的一般问题，这主要包括地球的自转参数(地球自转、极移)及其地球动力学现象的测定(参见[4.1])。由于所需要的参数是根据卫星的轨道运行状态间接测定的，所以卫星大地测量的动力学方法也具有间接方法特征。

几何学与动力学的区分是卫星大地测量多年来发展的特色。当今多数现代技术都必须考虑上述两种观点的结合。

观测技术进一步分类则与观测平台与目标平台之间的关系有关，分组如下：

(1) 地对空方法：

- 通过望远镜观测引导操纵瞄准；
- 激光测距；
- 多普勒定位(子午卫星)；

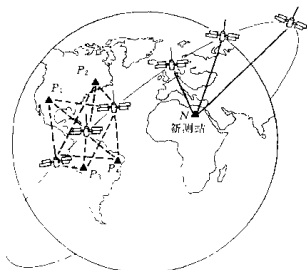


图 1.3 轨道方法示意图:卫星是地球重力场中的一个传感器,而带有其自身的坐标——利用全球定位系统进行的大地测量(GPS 或 GLONASS)。

(2) 空对地方法:

- 雷达测高;
- 星载激光;
- 卫星梯度测量。

(3) 空对空方法:

- 卫星对卫星跟踪(SST)。

地对空方法目前是最先进的,因为它的观测过程更好控制。除雷达测高外,方法(2)和方法(3)中述及的其他方法正在发展中。

### 1.3 卫星大地测量的发展史

卫星大地测量的真正开展始于 1957 年 10 月 4 日第一颗命名为斯普特尼克 1 号(STUTNIK-1)人造卫星的发射。然而,卫星大地测量的开展还可以追溯到更早。如果我们谈及包括对地球的天然卫星——月球以及稍后的动力卫星大地测量的利用,则早在 19 世纪初期就有了。1802 年,拉普拉斯根据月球的交点运动测定地球的扁率  $f = 1/303$ 。其他人得出的解分别有:例如 Hansen(1864)测定的  $f = 1/296$ , Helmert(1884)测定的  $f = 1/297.8$ , Hill(1884)测定的  $f = 1/297.2$ (Wolf, 1985; Torge, 1991)。

卫星大地测量中的几何方法在测月方法中也有先例,自从本世纪初以来它又得到全面发展。在这部分内容中,当几何坐标在轨道理论中已知,月球被看成是一个几何目标靶,观测者与月球之间的方位是根据对附近恒星的相对测量或根据月球的掩星来确定的。因此,地心坐标得到接受。1957~1958 年国际地球物理年的主要工作中,全球计划的第一个成果是用 Morovitz 研制的双速月球摄影机获得的。Berroth 和 Hofmann 在 1960 年就对这种被称为宇宙大地测量的方法作了很详尽的论述,这些内容后来成为 Mueller 经典著作《卫星大地测量学论》(1964)中的重要部分。



1957年以前卫星大地测量的基础是由 Väisälä(1964)、Brouwer(1959)、King-Hele(1958)和 O'Keefe(1959)所做的工作建立的。当然,因为在首次发射火箭和人造地球卫星后使很快获得重要的大地测量成果成为可能。首批卓越成果之一便是,由 O'Keefe(1958)、King-Hele 和 Merson(1958)根据探险者 1 号和斯普特尼克 2 号人造卫星观测资料确定的地球扁率:  $f = 1/298.3$ 。1957 年以来的重大事件如下:

- 1957 年 发射斯普特尼克 1 号卫星;
- 1958 年 根据卫星观测资料确定地球扁率 ( $f = 1/298.3$ ), 发射探险者 1 号卫星;
- 1959 年 发现第三个带状谐函数(地球呈梨形状);
- 1960 年 发射子午 1B 卫星(TRANSIT);  
发射响应者 1 号卫星;  
完成卫星轨道理论研究(Kaula);
- 1962 年 发射安娜 1B 卫星;  
完成法国与阿尔及利亚之间的大地测量联测(简称为 IGN)。

到 1964 年,许多基本的大地测量问题均成功地得到解决,它们是:

- 地球扁率精确数值的确定;
- 全球大地水准面总形状的确定;
- 许多重要大地测量基准资料之间的连接的测定( $\pm 50\text{m}$ )。

纵观卫星大地测量的进展,可以分为如下三个阶段:

(1) 第一阶段从 1958~1970 年,此阶段为卫星观测的基本方法、计算和卫星轨道的开发研究阶段。该阶段以用摄影机进行光学照相测定方位为其特征。其主要成果有:地球位的首项函数系的确定;发表了第一批地球模型——Smithsonian 天文物理现象台的标准地球模型(SAO SE I 至 SAO SE III),和 NASA 戈达德空间飞行中心的戈达德地球模型(GEM);通过用 BC4 摄影机对 PAGEOS 卫星的观测资料,建立了一个纯几何的全球范围卫星观测网。

(2) 第二阶段从 1970~1980 年,该阶段属于科学规划的阶段。研制了新的技术并取得进展,尤其是激光测月及卫星测高;子午卫星系统(TRANSIT)用于大地测量中的多普勒定位;进一步完善了全球大地水准面和坐标的测定,得出改进的地球模型(例如:GEM 10、GRIM);观测精度的提高使对地球动力学现象(地球自转、极移、地壳运动)的测量成为可能;多普勒测量用于全球范围的大地测量控制网的建立和运行(例如 EDOC、DeDOC 和 ADOS)。

(3) 第三阶段从 1980 年以来,为在大地测量、地球动力学测量中卫星技术实际应用阶段。该阶段尤其是在两个方面特别显著。第一个方面是:卫星方法越来越多地被测量界用来取代常规方法,该方面获得的重要成果是 NAVSTAR 全球定位系统(GPS),这一成果开辟了测量与制图全新的前景;第二方面是观测精度提高,成果之一是监测地球极移和地球自转的传统天文技术几乎完全被卫星方法取代,地壳运动测量计划正在全球范围内执行。

## 1.4 卫星大地测量的应用

卫星大地测量方法的应用取决于其满意的精度,必要的人员、设备和计算机,最终取决于观测时间。目前已发展到能提供更精密的星历表和说明,具有实时或准实时精确处理的能力。图 1.4 展示了各种观测技术与它们确定的相对定位精度之间的关系。目前,在将卫星方法用于大地测量的具体任务中的重要性是显而易见的了。