

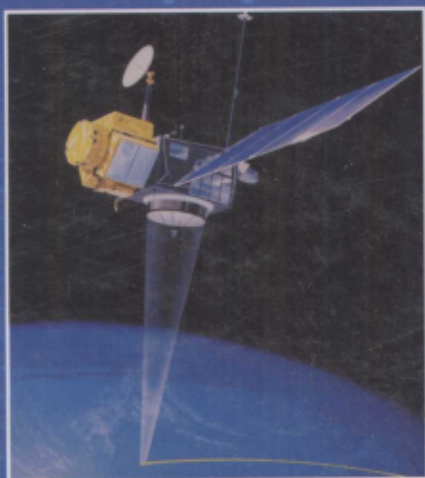
星载 GPS 低轨卫星数据质量控制 及其精密轨道确定理论与方法

■ 郑作亚 卢秀山 著



地震出版社

责任编辑：范静泊
责任校对：郭京平
封面设计：张骥年



ISBN 978-7-5028-3290-2



9 787502 832902 >

定价：28.00 元

星载 GPS 低轨卫星数据质量控制 及其精密轨道确定理论与方法

郑作亚 卢秀山 著

地震出版社

图书在版编目(CIP)数据

星载 GPS 低轨卫星数据质量控制及其精密轨道确定理论与方法/郑作亚 卢秀山 著. —北京:地震出版社, 2008.6

ISBN 978-7-5028-3290-2

I. 星… II. ①郑… ②卢… III. 全球定位系统-低轨道-导航卫星-数据-质量控制-研究

IV. P228 V474.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 069519 号

地震版 XT 200800005

星载 GPS 低轨卫星数据质量控制及其精密轨道确定理论与方法

郑作亚 卢秀山 著

责任编辑:范静泊

责任校对:郭京平

出版发行:地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编:100081

发行部:68423031 68467993

传真:88421706

门市部:68467991

传真:68467991

总编室:68462709 68423029

传真:68467972

E-mail: seie@ht.rol.cn.net

经销:全国各地新华书店

印刷:北京顺义康华福利印刷厂

版(印)次:2008 年 6 月第 1 版 2008 年 6 月第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16

字数:311 千字

印张:13.2

印数:300 册

书号:ISBN 978-7-5028-3290-2/T·29(4037)

定价:28.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)

前言

1957年10月4日,前苏联 Sputnik 卫星成功发射,为人类利用人造卫星进行空间定位/定轨与导航、地球系统研究工作奠定了基础,是人类走向文明、走近科学的一次技术革命。近年来,随着地球人口的膨胀和对地球资源的过度开发,环境和气候的变化,人类赖以生存的地球环境受到越来越严峻的挑战,对地球系统的研究成为全人类共同关注的课题。

今后很长一段时间内,地球空间信息科学的中心任务是对地球进行系统的研究,综合利用空间卫星观测资料、地面观测资料和大气中的观测数据,是观测地球、分析地球与研究地球的有效途径。随着空间科学技术的进步,各国发射越来越多装有 GPS 接收机的低轨道科学研究卫星,利用低轨卫星上的传感器对地球进行观测、探测与研究等科学任务,而卫星精密轨道是卫星顺利完成科学任务的前提。因此,提供有效的星载 GPS 相位观测值,确定低轨卫星精密轨道,为一些科学任务打下基础,这也突出了 GPS 数据质量控制的重要性。同时,精密、可靠的低轨卫星轨道是空基 GPS 气象学研究、大气反演等科学研究的必要前提。卫星精密定轨技术及其相应软件研究的意义引述中国科学院网站上的一段话:“卫星精密定轨是卫星技术发展和应用的基础,没有先进的定轨技术和相应的软件保证获得高精度轨道,就不可能进行精密定位和开拓其它的应用。特别是当前低轨卫星的广泛发展,低轨卫星的精密定轨技术和相应软件的发展显得更加重要。我国卫星定位技术的应用已有 20 多年的历史,但是目前卫星精密定轨、定位软件还是依靠引进的软件,这种依赖国外软件状况很难取得突破性的创新成果。卫星精密定轨、定位软件的开发能力和水平决定了我国在国际卫星技术发展和应用中的发言权。只依靠国外软件已无法满足我国快速发展的卫星计划的实际需要,也不利于国防安全的保障。所以尽快开发我国具有特色和自主产权的卫星精密定轨、定位软件是十分必要的。”

本书是作者参与或主持的中国科学院知识创新工程重要方向项目“空间对地观测与应用研究(KJCX2-SW-T1)”、国家自然科学基金项目“空间大地测量中卫星轨道的精密确定(40174008)”、基础地理信息与数字化技术山东省重点实验室开放项目“星载 GPS 相位非差运动学定轨技术研究(SD060804)”、香港 RGC 项目“Development of GPS Real Time Precise Point Positioning Technique(B-Q934)”和地理空间信息工程国家测绘局重点实验室项目“基于多参考站信息的海岛测图中控制点定位技术研究(200710)”的科研成果阶段性总结。得到了山东省“泰山学者”基金资助。

本书共分十章:第一章为绪论,简要回顾了 GPS 技术、数据质量控制和星载 GPS 精密定轨的发展与应用,介绍了 GPS 数据处理和星载 GPS 定轨的研究现状与研究意义;第二章为 GPS 定位/定轨的时空参考架(时间系统和坐标系统),阐述了卫星定轨中涉及到的世界时、原子时、动力学时、GPS 时、协调世界时以及它们之间的关系。天球坐标系、地球坐标系、轨道坐标系、卫星坐标系、GPS 卫星参考系以及它们之间的转换,简

单介绍了 ITRF 系统;第三章为 GPS 观测方程及其组合,介绍了 GPS 基本观测方程和线性组合,探讨了各种组合的误差影响,给出了 GPS 数据预处理软件 COMPRE 的线性组合类型;第四章为 GPS 数据预处理算法研究,介绍了 GPS 数据预处理基本过程、粗差探测与定位方法、周跳探测与修复及其常用方法、COMPRE 软件周跳探测方案、周跳探测的小波分析法研究和模糊度解算、整周化与有效性检验;第五章为 COMPRE 软件实现与质量评定,分析了 COMPRE 软件的基本结构、功能和特点,编写了 GPS 数据预处理软件——COMPRE,并进行了该软件系统的质量分析;第六章为星载 GPS 低轨卫星定轨基本理论,阐述了精密定轨的基本原理、系统组成及其特点,归纳了目前星载 GPS 定轨的基本方法;第七章为优化几何的 GPS 卫星选择,根据优化几何的四颗 GPS 卫星四面体 GDOP 计算原理,推导了可见卫星的优化几何法计算公式,并进行了算例分析。同时,简单探讨了多星多系统卫星选择问题;第八章为星载 GPS 定轨数学模型与质量控制,给出了星载 GPS 低轨卫星定轨的各种函数模型和随机模型,分析了星载 GPS 数据质量控制的分类与处理方案,探讨了星载 GPS 资料病态性及其处理方法;第九章为星载 GPS 运动学定轨理论,分别讨论了相位历元间差分定轨、相位平滑伪距几何定轨、基于加权的伪距和相位历元间差分联合定轨、相位非差运动学定轨方法,研究了基于 LP 估计的星载 GPS 运动学定轨及其精度评定方法,分析了运动学定轨过程中主要误差来源;第十章为运动学定轨软件实现与精度评定,编写了星载 GPS 运动学定轨软件——SHKINE,根据星载 GPS 运动学定轨理论,利用 COMPRE 软件预处理后的星载 GPS 非差资料对 CHAMP 卫星进行定轨,分析了星载 GPS 数据预处理结果、测码伪距几何定轨精度、各误差项对定轨的影响和相位非差运动学定轨的精度评定。

本书的顺利完成得到了中国科学院上海天文台黄斌研究员、冯初刚研究员和程宗颐副研究员的大力支持和帮助,在此深表敬意和感谢。中国科学院上海天文台叶叔华院士、测量与地球物理研究所许厚泽院士、德国地学中心(GFZ)朱圣源研究员、许国昌研究员、上海天文台朱文耀研究员、吴斌研究员、胡小工研究员、中国测绘科学研究院党亚民研究员、香港理工大学陈永奇教授、丁晓利教授和陈武教授、中国科学院测量与地球物理研究所柳林涛研究员、山东科技大学靳奉祥教授、中国地质大学彭军还教授、武汉大学施闯教授、中国石油大学王振杰教授、山东理工大学曲国庆教授、韩保民教授等提出许多有价值的意见和建议,在此表示诚挚的谢意。

瑞士伯尔尼大学 P. Fridez 博士、U. Hugentobler 博士和 H. Bock 博士,美国缅因州大学 Boonsap Witchayangkoon 博士、荷兰代夫特大学 Peter Joosten 教授、Rloand Klees 教授、德国慕尼黑工业大学的 D. Svehla 博士、意大利佩鲁贾大学电子信息工程学院 Vinia Mattioli 女士在星载 GPS 定轨程序设计中给予了很多帮助,硕士研究生丁凯参与了书稿修改,在此一并表示衷心感谢。

感谢山东科技大学领导、老师和同事的支持和帮助。

本书内容只是作者近年的研究成果阶段性总结,还有待进一步深入研究,加上作者水平有限,经验不足,书中难免有不足和谬误之处,恳请同行专家及广大读者不吝赐教。

著者 于青岛

2008 年 1 月

目 录

第一章 绪 论	1
§1.1 引言	1
§1.2 GPS 技术及其发展	1
§1.3 低轨卫星定轨发展现状	2
§1.4 星载 GPS 精密定轨发展现状	4
§1.5 星载 GPS 数据质量控制	6
§1.6 研究意义	7
§1.7 本书的内容安排	8
第二章 GPS 定位/定轨的时空参考架	11
§2.1 时间系统	11
§2.2 坐标系统	16
第三章 GPS 观测方程及其组合	27
§3.1 基本观测方程	27
§3.2 线性组合	27
§3.3 各种组合的误差影响	31
第四章 GPS 数据预处理算法研究	39
§4.1 概述	39
§4.2 粗差探测与定位	39
§4.3 周跳探测与修复	42
§4.4 周跳探测与修复的常用方法	45
§4.5 COMPRE 软件周跳探测与修复方案	46
§4.6 GPS 周跳探测的小波分析法	50
§4.7 模糊度整周化及其有效性分析	63
第五章 COMPRE 软件实现与质量评定	71
§5.1 程序框架及文档说明	71
§5.2 COMPRE 软件的特点	76
§5.3 COMPRE 软件系统质量分析	77

第六章 星载 GPS 低轨卫星定轨基本理论	105
§6.1 概述	105
§6.2 精密定轨基本原理	105
§6.3 系统的组成及特点	107
§6.4 星载 GPS 定轨基本方法	109
第七章 优化几何的 GPS 卫星选择	117
§7.1 优化几何的 4 颗 GPS 卫星选择	117
§7.2 多星多系统卫星选择问题的提出	126
§7.3 几点讨论	127
第八章 星载 GPS 定轨数学模型与质量控制	129
§8.1 概述	129
§8.2 星载 GPS 低轨卫星定轨的数学模型	129
§8.3 星载 GPS 数据质量控制	136
§8.4 星载 GPS 资料病态性及其处理方法	138
第九章 星载 GPS 运动学定轨理论	145
§9.1 引言	145
§9.2 相位历元间差分定轨	146
§9.3 相位平滑伪距几何定轨	149
§9.4 基于加权的伪距和相位历元间差分联合定轨探讨	150
§9.5 相位非差运动学定轨	154
§9.6 星载 GPS 运动学定轨 LP 估计及其精度评定方法	159
§9.7 误差来源及改正措施	162
第十章 运动学定轨软件实现与精度评定	165
§10.1 概述	165
§10.2 程序流程与实现	166
§10.3 CHAMP 卫星简介	169
§10.4 星载 GPS 数据预处理分析	170
§10.5 测码伪距几何定轨及其精度分析	176
§10.6 各误差项对定轨的影响分析	179
§10.7 相位非差运动学定轨精度评定	187
参考文献	195
参考资料	203

第一章 绪 论

§ 1.1 引 言

利用人造卫星进行定位/定轨和导航的研究工作还在继续着,利用卫星进行定位可以追溯到 Sputnik 卫星(1957 年 10 月 4 日成功发射)。自 20 世纪 80 年代以来, GPS 的用户遍及全球,包括军用的和民用的, GPS 发挥着巨大的潜力。20 世纪 90 年代,俄罗斯的 GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System) 卫星系统同样引起了极大的关注,科学家们开始考虑将两种系统联合起来以弥补各自的不足,从 1998 年初,欧洲空间局 (European Space Agency-ESA) 就开始计划发射一个与上述两套系统相类似的卫星导航系统,称为 GALILEO 导航系统 (Hein, 2000), 该系统的研制与试验正在紧锣密鼓地进行着,计划 2008 年投入运作。我国的“北斗一号”卫星已经上天,二代导航系统和 CAPS (Chinese Astronomical Positioning System) 系统已经在论证和研制中,新一轮的空间“大战”已初见端倪。近年来,空间技术大比拼越来越激烈,载人飞船、登月计划、建立空间站、火星探索、深空探测等等。值得庆贺的是,我国于 2003 年 9 月 15 日成功发射“神舟五号”载人航天飞船并成功返回。并已经着手登月计划的实施,主要分“绕、落、回”三个阶段。至今,世界各国已发射各类航天器近 6000 个。其中,我国共发射约 60 颗不同类型、不同用途的人造卫星,各类航天器的高精度轨道是它们执行任务和科学研究的前提保障。随着 GPS 观测技术的出现,利用星载 GPS 技术进行卫星轨道确定成为卫星精密定轨的主流。下面简单回顾一下 GPS 技术的发展、低轨卫星定轨现状、星载 GPS 精密定轨发展以及星载 GPS 数据质量控制问题。

§ 1.2 GPS 技术及其发展

卫星定位技术,简单地说,就是利用人造卫星 (Man-made Satellite) 进行点位测量的一种现代化高新空间技术。第一颗人造卫星的成功发射,是现代科学技术发展的一个新的里程碑,开创了空间技术发展的新纪元。

1958 年 12 月,美国 Johns Hopkins 大学应用物理实验室在美国海军的资助下,研制了一种卫星导航系统,称为美国海军卫星导航系统 (Navy Navigation Satellite System 简称 NNSS), 又称子午卫星导航系统。该系统卫星轨道低、卫星数目少、地面覆盖面积小、定位所需时间长,并只能提供二维导航解,是一种接收卫星信号而实现的“单星、低轨、测速”体制的“被动式”卫星导航系统 (许其凤, 1989), 这些局限性限制了它在陆地、

空中和高动态环境的应用。俄罗斯的 Tsikada 系统和 NNSS 系统类似 (Elliott D. Kaplan, 2002)。

为了突破子午卫星系统应用的局限性, 1973 年 12 月, 美国国防部批准海、陆、空三军联合研制一种新的军用卫星导航系统——NAVSTAR GPS (Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System), 简称 GPS 系统。GPS 系统采用了“多星、高轨、测距”体制, 实现了“全天候、全球性、高精度”的连续导航与定位。从此, 拉开了 GPS 技术在国防领域的军事用途序幕。但是, 让设计者想象不到的是, GPS 的应用领域和应用潜力远远超出了他们最初的计划。目前, 美国正在开发 IIF 型 GPS 卫星, 将增设第三民用频率 L5 (1176.45MHz), 这样, GPS 接收机在伪距定位或导航时的精度将得到很大提高 (郑作亚, 2007)。

发展趋势表明, GPS 动态定位比静态定位具有更加广阔的应用天地, GPS 动态定位具有用户多样性、速度多异性、定位实时性、数据短时性和精度要求多变性等特点。因而广泛应用于海、陆、空多种运载工具和运动目标的定位与导航 (刘基余, 1993)。基于这些特点, GPS 动态定位对数据处理提出了较之静态定位更高的要求。根据动态用户应用目的和精度要求不同, GPS 定位方式可分为: 单点动态定位、实时差分动态定位和后处理差分动态定位。

GPS 动态定位, 是利用 GPS 信号实时测得运动目标相对于某一参考系统的时间、位置、速度和加速度等状态参数。而 GPS 技术是完成这些空间目标轨道的确定与监测的主要手段之一。随着空间技术的发展, GPS 动态导航和定位具有更为广泛的应用空间。星载 GPS 精密定轨就是 GPS 高精度动态定位的一个有力实例。GPS 从根本上解决了人类在地球及其周围空间的导航和定位问题, 它不仅可以广泛地应用于海上、陆地和空间目标的导航、制导和定位, 而且可为空间飞行器进行精密定轨 (Precise Orbit Determination 简称 POD) (王惠南, 2003)。

§ 1.3 低轨卫星定轨发展现状

近 20 年来, 轨道高度在 1000km 以下的低轨卫星由于特殊的应用和科研的需要得到了迅速的发展, 在很多方面发挥了重大的作用。利用低轨卫星上的星载雷达测高仪, 可以在低轨卫星的轨道坐标精确求定的情况下, 获得精度很高的海平面高度; 用低轨卫星上的星载 GPS 接收机跟踪 GPS 卫星, 借助无线电掩星 (Radio Occultation) 技术 (或称对流层临边探测 (Limb Sounding) 技术) 获取全球的大气探测综合资料, 可以进行短期天气及长期气候研究 (Ware R. et al., 1996; Hoeg P., et al., 1996; Kursinski E.R., 1997); 由于低轨卫星距地面不超过几百公里, 这样对地球重力场的非均匀性, 特别是对地球重力场的中、长波长的感应比较好, 因此利用地面跟踪低轨卫星的观测数据是获得重力场中、低信息的最有效的手段 (沈云中, 2000; 许厚泽, 2001; 陈俊勇, 2004)。另外, 低轨卫星还广泛应用于电离层影响、遥感成像等各方面的科学研究。

低轨卫星的应用与科学试验, 对定轨精度提出了很高的要求, 例如, 现在已经发射

的 CHAMP 和 GRACE 卫星及以后将要发射的 GOCE 三颗低轨卫星的径向定轨精度要求在厘米级。我国的重点航天工程项目宇宙飞船——“神舟”系列离地面高度还不到 400km。而航天器的径向定轨精度也要求达到较高精度。越来越低的轨道高度和越来越高的定轨精度要求,使得低轨卫星精密定轨的难度增大。

国外许多专家学者对此作了大量而系统的工作(Yunck, 1998; Wu, 1995; Ashkenazi, 1997; Robert Schutz, 1999; Bertiger, 1990, 1994, 1999; Svehla, 2001, 2002; Bisnath, 2002)。由于我国航天事业的发展,对低轨卫星定轨方法的研究工作也已取得了一定的成果(胡国荣, 1999, 2000a, 2000b; 欧吉坤, 2000a; 季善标, 2000; 李济生, 1992; 刘林, 1992; 文援兰, 2000, 2001; 韩保民, 2004; 郑作亚, 2005)。所有这些都为低轨卫星的精密定轨打下了坚实的基础。

低轨卫星定轨的手段很多,传统的低轨道卫星定轨手段大多采用动力学方法(Dynamic POD-DPOD)。动力学定轨是一种事后处理方式,这种方法需要同时用到地面或空中跟踪数据、作用在低轨卫星上的力学模型及低轨卫星的物理特性等信息。低轨卫星受到的力主要包括地球引力、大气阻力、太阳辐射压等,根据牛顿第二运动定律,建立低轨卫星运动方程。如果已知低轨卫星的初始历元位置和初始速度,那么任意历元的低轨卫星的轨道可以通过对加速度的二次积分得到,然后由最小二乘估计给出每个历元相对于初始历元状态的改正值。通过不断的调整初始状态向量和力学模型参数,使动力学法获得的轨道解和跟踪数据达到最佳拟合,以获得较为正确的力学模型。原则上在所求出的参考轨道附近的少量观测数据就可以得到较高精度的低轨卫星轨道并可以进行轨道预报。这就是动力学定轨的优点所在。很显然,纯动力学法定轨精度取决于作用在低轨卫星上的各种力学模型、低轨卫星的初始状态及由地面或空中跟踪系统跟踪到的观测值的精度。由于大气阻力摄动等各种力学模型及低轨卫星经过的某些区域的重力场(如海洋)难以用精确的数学模型表达,限制了低轨卫星定轨精度的提高。据资料表明,采用动力学和地面跟踪方法,低轨卫星轨道越低,定轨精度也越低。

在动力学精密定轨软件方面,比较著名的有美国 NASA(National Aeronautics and Space Administration)研制的动力学测地软件“GEODYN”和美国德克萨斯大学空间研究中心研制的卫星精密定轨与动力学测地软件“UTOPIA”,中国科学院上海天文台也建立了卫星精密定轨与动力学测地数据处理系统“SHORDE”。这些定轨软件的编制使得各种动力学定轨方案最终能够得以实现。

近年来,随着 GPS 技术的开发和利用,利用星载 GPS 接收机低轨卫星提供的相对经济、精确、连续观测值进行低轨卫星的自主定轨成为定轨的另一条有效的途径。Yunck 等科学家 1986 年提出了几何法(Geometry POD 简称 GPOD)定轨(Yunck, et al., 1986, 1990, 1991)。但几何法定轨方法也存在对观测值误差及观测到的 GPS 卫星的几何分布情况特别敏感,只能确定观测时刻的轨道,不能对卫星轨道进行预报等缺陷。

为了解决动力学定轨中动力学模型误差及几何法定轨中存在的问题,Yunck 等科学家提出了将动力学法与几何法联合起来的减缩动力学定轨法(Reduced-Dynamic POD 简称 RDPOD)(Yunck, 1986; Wu, 1990, 1991)。该方法充分吸收了 GPS 几何法定轨和动力学法定轨的优点,用卡尔曼滤波形式,同时顾及低轨卫星的动力学状态信息以及 GPS 几何法定轨信息,通过适当调整这两类信息的权,达到改善定轨精度的目的。

近年来,随着精密 GPS 卫星轨道及精密卫星钟改正参数解算精度的提高,人们对仅利用 IGS 所提供的事后精密卫星轨道、精密卫星钟改正信息和星载 GPS 双频观测值进行精密单点定位 PPP (Precise Point Positioning) 的方法对低轨卫星进行自主定轨产生了极大的兴趣。加拿大的 Bisnath 博士用这种方法对 Champ 卫星的定轨,结果表明用 PPP 方案定轨的精度在 20cm 左右(Bisnath, 2002),是一种切实可行的定轨方案。

事实上,随着低轨卫星跟踪手段的不断改进和丰富,低轨卫星定轨方法也在不断发展。任何低轨卫星具体定轨的方案都不是单一和固定的,在实际低轨卫星的定轨中,应根据该卫星上所搭载的仪器及所用到的跟踪手段综合考虑,选择最佳方案,以满足一些特殊应用及科学研究对高精度轨道的需要。

§ 1.4 星载 GPS 精密定轨发展现状

星载 GPS 精密定轨,简单地讲,就是利用高轨道分布较均匀的 GPS 卫星来精密地确定 LEO (Low Earth Orbiter) 卫星轨道的过程。过去十几年里,在众多的 GPS 应用领域中,LEO 卫星的精密定轨是最活跃的发展领域之一,GPS 精密定轨已广泛应用于雷达测高、卫星重力测量和大气探测等领域 (Kwon, J.H., 2002)。

星载 GPS 定轨技术的研究早在 GPS 技术的试验阶段就已开始。1982 年首次将 GPSPAC 导航设备用于地球资源卫星 LANDSAT-4 上,这是第一个利用 NAVSTAR GPS 的星载导航系统。之后,美国海军的 LAHV 卫星两次装载 GPSPAC 导航设备进行飞行,执行秘密任务 (文援兰, 2001)。

NASA (美国航空航天局) 1980 年研制的 TOPEX 卫星对轨道精度要求很高,用传统的无线电跟踪系统或激光测距的方法是无法实现的。为此,在 TOPEX 上装载有一个六通道、双频 GPS 接收机,美国 JPL (喷气推进实验室) 专门研究发展了一种 GPS 测量双差分法,并引入一个虚拟的引力参量以减少重力场模型带来的误差,结果得到了厘米级的定轨精度。

定轨有实时定轨和事后精密定轨之分。实时导航需要直接的定轨结果,在最简单的实时导航系统中,用 4 颗或 4 颗以上的 GPS 卫星的伪距观测值就可以确定低轨飞行器上的 GPS 接收机的三维位置及其钟差,如果同时和地面基准站观测到的伪距进行差分的话,则可能达到 1m 左右的定轨精度 (Bertiger, et al., 1990, 1994),对精化重力场、大气探测、海洋测高等应用低轨卫星来说,虽不需要实时定轨结果,但却需要分米级甚至厘米级的轨道精度才能满足各自的需要。对于精度要求较高的事后定轨来说,可以选择不同的方案进行精密定轨。

利用星载 GPS 定轨最突出的特点是不需要知道低轨卫星的受力状态,也不需要知道卫星质心的准确位置。另外,GPS 观测不受气候条件的影响,因而星载 GPS 接收机可实现全天候、连续观测,且采样率高,观测数据多。

虽然 GPS 几何法确定低轨卫星轨道具有动力学法不及的一些优越性,然而这种方法易受观测到的 GPS 卫星几何图形结构的制约,而这种图形结构又是经常变化的,导致几

何法定轨精度会出现波动。因此,更好的方法就是几种方法的联合定轨。

综合法定轨的困难在于如何选择适当的过程噪声。基本原则是选择的噪声必须真正代表动力法定轨的精度。然而要想正确的选择噪声的大小不是一件很容易的事,因为这个模型误差取决于卫星的受力情况,并且随着时间发生变化。如果方差太大,滤波器就不能充分的利用过去的观测值信息;如果方差太小,由于滤波器的递推性,这个模型误差就会显著的增加,更为严重的是可能导致滤波器的发散。在实际定轨中,常用模拟及自适应滤波器的方法来解决这些问题。

综合法定轨中参数估计通常用以下两种方法来进行:历元状态分批滤波(epoch-state batch filtering)和序贯滤波(sequential filtering)(Tapley, 1973; Gelb, 1974; Bierman, 1974, 1977)。由美国 Texas 大学空间中心研制的著名的 MSODPI 定轨软件用的是历元状态分批滤波方法。其处理的基本观测值是星载 GPS 接收机与地面基准站之间的双差相位观测值(Rim, 1992)。由美国喷气动力实验室 JPL 研制的定轨软件 GIPSY-OASIS II (GPS Inferred Positioning System- Orbit Analysis and Simulation Software)使用的则是分批序贯平方根滤波方法,它处理的是 GPS 双频伪距和双频相位非差观测值,并将星载 GPS 接收机钟差当作白噪声参数进行估计(Lichten, 1990; Webb, 1995; Davis, 1996, 1997a, 1997b)。德国波茨坦地学中心 GFZ 开发出的基于 GPS 非差双频伪距和相位观测值的定轨、定位软件 EPOS (Earth Parameter and Orbit System)与 MSODPI 和 GIPSY 软件稍有不同,EPOS 直接使用最小二乘方法进行参数估计,另外这种软件不固定载波相位的模糊度,而直接使用模糊度的浮动解进行定轨、定位。这 3 种软件都同时和卫星的精密力学模型结合以同时求解低轨卫星及 GPS 卫星的位置、GPS 卫星的接收机钟差等。美国的 Sung H. Byun 博士提出了一种基于双频消电离层组合的三差方法 KODAC (Kinematic Orbit Determination And Comparison)来对低轨卫星进行精密定轨。这种方法利用事后精密求定的 GPS 卫星精密星历、地面基准站坐标及对流层延迟来求得低轨卫星的三维位置(Sung H. Byun, 2003)。

近年来,由于航空、航天、科学研究及大气探测等方面的需要,我国也加快了对星载 GPS 低轨卫星定轨方法的研究。早在 1993 年刘基余教授和王广运研究员就讨论了我国利用星载 GPS 观测值对低轨卫星实时定轨的问题(刘基余, 1993, 1997; 王广运, 1993)之后,胡国荣、欧吉坤、焦文海、文援兰等对星载 GPS 定轨的理论及具体算法作了研究(胡国荣, 1999; 胡国荣, 欧吉坤, 2000, 2001; 焦文海, 1999; 文援兰, 2001),取得了一定的成果。我国自行研制的 GPS 自主定位接收机已在我国 1996 年 10 月 20 日发射的返回式卫星上进行了首次搭载试验,进行了星上自主定轨试验。在 2002 年 12 月 30 日发射的“神舟”四号无人飞船上装载的星载 GPS 接收机,则标志着我国开始正式将星载 GPS 定轨方案作为低轨航天器轨道确定的一种方案。但目前国内星载 GPS 卫星定轨精度与国外所达到的目标还有一定的距离,具体定轨方法及定轨软件还很不完善,为了满足航天工程及科学研究对高精度定轨结果的需要,必须大力研究和建立我国的星载 GPS 定轨系统、理论和方法。

近几年来,美国政府一直在调整其 GPS 政策,这些政策调整有利于提高星载 GPS 低轨卫星定轨的精度,促进 GPS 变化后相应星载 GPS 定轨新方法的研究,昭示了星载 GPS 定轨更广阔、更诱人的发展前景,因此,研究星载 GPS 低轨卫星定轨将具有重大意义。

§ 1.5 星载 GPS 数据质量控制

星载 GPS 数据质量控制主要包括对粗差的探测和修正、周跳探测与修复、模糊度解算与整周化。测量上常说的粗差是指离群的观测值。关于粗差的探测和定位主要有两种不同的处理方法：一种是将粗差用期望漂移模型表示，这是大多数粗差探测技术的出发点。另一种则将粗差用方差膨胀模型表示，这是稳健估计（Robust Estimation）处理粗差的切入点，当粗差被探测出并定位后，经常是将其按一定的原则进行降权处理（柳响林，2002）。基于这两种质量控制理论，各国的大地测量学专家、学者对观测数据的质量控制理论、方法及应用作了大量富有成效的研究，取得了丰硕的成果。其中著名的有 Baarda 基于统计检验理论的数据探测方法（Data Snooping）（Baarda, 1968）、Teunissen 的动态数据 DIA（Detection Identification Adaptation）方法（Teunissen, 1990, 1991b）、由 Huber 提出的抗差估计（Huber, 1981; Caspary, 1987, 1990）、周江文等提出的抗差最小二乘估计（周江文等, 1989, 1999; 杨元喜等, 1994, 1996; 欧吉坤, 1992, 1994, 1996, 1999c, 2001）以及广泛应用于摄影测量平差的误差处理和可靠性理论等（李德仁, 1988）。从理论上讲，这些质量控制方法都能在一定程度上应用于星载 GPS 低轨卫星定轨的数据质量控制中。然而由于低轨卫星的高动态性，很少甚至没有多余观测值，因此星载 GPS 质量控制同静态数据质量控制相比要更困难。

近年来，随着星载 GPS 低轨卫星定轨技术的发展，星载 GPS 数据质量控制理论也得到了较大发展，许多学者提出了很多有效的方法。根据星载 GPS 定轨用到的观测方程、观测值类型及分类标准的不同，可以将星载 GPS 数据质量控制方法分为不同的类型。

从处理的层次方面说，星载 GPS 数据质量控制至少可以分为 3 个层次：基于单接收机的非差观测值的数据质量控制、基于基线的单差或双差观测值的质量控制和基于观测网的网络数据质量控制。其中，基于单接收机非差观测值的数据质量控制最为困难，在这个层次中，一般只能探测到较大的粗差和周跳值，因为在这个层次上的粗差和周跳的探测仅用到双频 P 码和双频载波相位自身的观测信息及各种观测之间的线性组合，各种系统误差没有得到很好的消除，特别是接收机钟差部分随机变化较大，导致去掉检测量序列的系统性变化后剩下的随机变化部分可能大于最小周跳值。较小的粗差和周跳则要根据平差后的残差作进一步的判断。将双差观测值作为检测序列的基线层次上的数据质量控制相对要容易些，因为两接收机的卫星钟差及接收机钟差部分都被消除了，其他共同误差部分也得到较大削弱，因此可以检测出较小的粗差和周跳。

从处理的 GPS 观测值的频率来看，星载 GPS 数据质量控制方法可以分为基于单频观测值的质量控制和基于双频观测值的质量控制。有些方法只适用于双频观测值的情况，如电离层残差法（Goad, 1986, 1995）、伪距相位组合法（Han S., 1996, 1997a）等。有的方法则可以同时适用于单频和双频观测值的情况，如 Kalman 滤波（Lu, 1992; 何海波, 1998）、多普勒频移法、改进的三差法（袁洪等, 1998; 郑作亚, 2003）等。

从具体内容来说，星载 GPS 数据质量控制可借鉴以下提到的诸种方法：多项式拟合

法或高次差法常被用来探测和修复比较大的周跳(魏子卿等, 1998; 刘基余等, 1993; Hofmann-Wellenhof B., et al., 1992); 根据平差后的残差可以发现和修复较小的周跳; 根据双频 P 码伪距组合或根据电离层延迟变化来探测和修复周跳等(魏子卿等, 1998); 利用卡尔曼滤波技术和利用小波变换技术来探测和修复周跳, 也能取得较好的效果(Bastos L., 1988; 黄丁发, 1997; 郑作亚, 2005); Lu Gang 等提出了改进的 DIA 算法, 用卡尔曼滤波二步法确定多个周跳的位置(Lu Gang, 1992); Salzmann 提出了一种检测连续周跳的近似方法(Salzmann, 1995a, 1995b); 韩绍伟博士提出了利用模糊度函数法和卡尔曼滤波方法相结合来探测和修复动态定位的相位观测值周跳的方法(Han S., 1997a, 1997b)。上述方法最初是基于静态 GPS 定位和动态 GPS 动态定位提出的, 但在经过适当的处理后, 也常常被用于星载 GPS 质量控制中。

§ 1.6 研究意义

无论在 GPS 静态定位还是动态定轨中, GPS 数据预处理质量的好坏都直接影响着 GPS 定位/定轨精度。随着科学技术的发展, 对导航、定位或定轨的精度要求越来越高, 且要求快速动态解算, 高精度 GPS 快速动态定位/定轨成为国内外有关学者的一个研究热点。由此而得, GPS 数据质量控制是实现高精度 GPS 快速动态定位/定轨的关键问题。

深入研究 GPS 定位/定轨数据质量控制, 提出合理的周跳探测与修复和模糊度解算方法, 并编制相应的软件, 在测地应用、空间技术发展和智能交通导航等领域具有重要的研究价值和实用意义。

为了提高 GPS 定位/定轨精度, 一方面, 我们从观测量类型和量测精度考虑, 必须采用相位观测值进行定位, 从而引出周跳和模糊度的问题; 另一方面, 可以通过选择所观测 GPS 卫星优化几何分布来提高定位精度。因此, 我们进行了优化几何的 GPS 卫星选择研究。

目前, 随着科学技术的进步, 各国发射越来越多的科学研究卫星, 而卫星精密轨道是卫星顺利完成科学任务的前提。因此, 提供有效的星载 GPS 相位观测值, 确定 LEO 卫星精密轨道, 为一些科学任务打下基础, 这也突出了 GPS 数据质量控制的重要性。同时, 精密、可靠的 LEO 卫星轨道是空基 GPS 气象学研究、大气反演等科学研究的必要前提。卫星精密定轨技术及相应软件的意义引述如下:

“卫星精密定轨是卫星技术发展和应用的基础, 没有先进的定轨技术和相应的软件保证获得高精度轨道, 就不可能进行精密定位和开拓其它的应用。特别是当前低轨卫星的广泛发展, 低轨卫星的精密定轨技术和相应软件的发展显得更加重要。我国卫星定位技术的应用已有 20 多年的历史, 但是目前卫星精密定轨、定位软件还是依靠引进的软件, 这种依赖国外软件状况很难取得突破的创新成果。卫星精密定轨、定位软件的开发能力和水平决定了在国际卫星技术发展和应用中的发言权。只依靠国外软件已无法满足我国快速发展的卫星计划的实际需要, 也不利于国防安全的保障。所以尽快开发我国具有特色和自主产权的卫星精密定轨、定位软件是十分必要的。”(中国科学院网站)

§ 1.7 本书的内容安排

随着 GPS 技术的开发和利用,利用星载 GPS 接收机低轨卫星提供的相对经济、精确、连续观测值进行低轨卫星的自主定轨成为定轨的主流途径。时间和空间参考架是星载 GPS 低轨卫星精密定轨的数学基础和物理基础,本书首先讨论了 GPS 定位/定轨中的各种时间和空间参考系;由于用户对定位精度要求的提高,伪距定位已经不能满足高精度的要求,而需要用观测精度高的相位观测值来定位,但是相位观测值存在周跳和模糊度问题,本书采用优化 Blewitt 方法,进行了 GPS 数据预处理研究。根据周跳特性,在周跳探测与修复的常用方法基础上,进一步提出了利用小波分析进行周跳探测与修复的探讨,通过各种方法比较最后给出了自己的 GPS 数据处理方案;为了提高 GPS 定位/定轨精度,除了与观测值类型、量测精度有关外,还与 GPS 卫星的空间几何分布有关,这就引出优化几何的 GPS 卫星选择的研究;高精度的 GPS 相位观测值为星载 GPS/LEO 卫星的精密定轨打下基础,LEO 卫星的精密轨道是其顺利完成科学任务的前提。因此,星载 GPS 运动学定轨也是本书的一个重要研究内容,探讨了星载 GPS 低轨卫星定轨的基本理论,给出了星载 GPS 定轨的数学模型,并进行星载 GPS 观测资料质量控制研究,着重进行了星载 GPS 运动学定轨理论和算法的研究。

这样,首先在 GPS 数据质量控制研究基础上,讨论了星载 GPS 的时间和空间参考框架,进行 GPS 数据处理研究并编写相应的软件系统——COMPRE 软件,然后进行星载 GPS 运动学定轨研究并编写相应的软件系统——SHKINE 软件,以 CHAMP 卫星的星载 GPS 观测资料为例,将经过 COMPRE 软件处理后的星载 GPS 资料用 SHKINE 软件进行 CHAMP 卫星轨道确定,构成了本书的基本框架。

本书共分十章,主要内容安排如下:

第一章为绪论,简要回顾了 GPS 技术、数据质量控制和星载 GPS 精密定轨的发展与应用,介绍了 GPS 数据处理和星载 GPS 定轨的研究现状以及本课题的研究意义,最后给出了本书的内容安排;

第二章为 GPS 定位/定轨的时空参考架(时间系统和坐标系),阐述了卫星定轨中涉及到的世界时、原子时、动力学时、GPS 时、协调世界时以及它们之间的关系,天球坐标系、地球坐标系、轨道坐标系、卫星坐标系、GPS 卫星参考系以及它们之间的转换,简单介绍了 ITRF 系统;

第三章为 GPS 观测方程及其组合,介绍了 GPS 基本观测方程和线性组合,探讨了各种组合的误差影响,最后给出了影响误差最小的组合方式,为后面的研究作准备;

第四章为 GPS 数据预处理算法研究,介绍了 GPS 数据预处理基本过程、粗差探测与定位方法、周跳探测与修复及其常用方法、COMPRE 软件周跳探测方案、周跳探测的小波分析法研究和模糊度解算、整周化与有效性检验;

第五章为 COMPRE 软件实现与质量评定,分析了 COMPRE 软件的基本结构、功能和特点,编写了 GPS 数据预处理软件——COMPRE,最后进行了该软件系统的质量分析;

第六章为星载 GPS 低轨卫星定轨基本理论,阐述了精密定轨的基本原理、系统组成及其特点,归纳了目前星载 GPS 定轨的基本方法;

第七章为优化几何的 GPS 卫星选择,根据优化几何的四颗 GPS 卫星四面体 GDOP 计算原理,推导了可见卫星的优化几何法计算公式并进行了算例分析,同时,简单探讨了多星多系统卫星选择问题;

第八章为星载 GPS 定轨数学模型与质量控制,给出了星载 GPS 低轨卫星定轨的各种函数模型和随机模型,分析了星载 GPS 数据质量控制的分类与处理方案,探讨了星载 GPS 资料病态性及其处理方法;

第九章为星载 GPS 运动学定轨理论,分别讨论了相位历元间差分定轨、相位平滑伪距几何定轨、基于加权的伪距和相位历元间差分联合定轨和相位非差运动学定轨方法,研究了基于 LP 估计的星载 GPS 运动学定轨及其精度评定方法,分析了运动学定轨过程中主要误差来源。

第十章为运动学定轨软件实现与精度评定,编写了星载 GPS 运动学定轨软件——SHKINE,根据星载 GPS 运动学定轨理论,利用 COMPRE 软件预处理后的星载 GPS 非差资料对 CHAMP 卫星进行定轨,分析了星载 GPS 数据预处理结果、测码伪距几何定轨精度、各误差项对定轨的影响和相位非差运动学定轨的精度评定。