



地球观测与导航技术丛书

GPS 理论、算法与应用

(第3版)

〔德〕Guochang Xu 〔中〕Yan Xu 著
许国昌 许 艳 译



科学出版社

“十三五”国家重点图书出版规划项目

地球观测与导航技术丛书

GPS 理论、算法与应用

(第3版)

[德] Guochang Xu [中] Yan Xu 著

许国昌 许艳 译



科学出版社

北京

图字: 01-2017-6419 号

内 容 简 介

本书介绍全球定位系统(GPS / Glonass / Galileo / Compass)的理论、算法与应用。主要内容来自于在波茨坦 GFZ 开发的 KSGsoft 软件程序的源代码说明书。在新的多功能 GPS/Galileo 软件的开发过程中对理论和算法进行了扩展和验证。除了第一版中介绍的 GPS 数据处理的统一方法、对角化算法、自适应卡尔曼滤波、模糊度的一般搜索准则和变分方程的代数解,第二版中介绍的 GPS 算法的等价性理论、独立参数化方法、另一种太阳光压模型,第三版中补充了 GNSS 系统的现代化、理论和算法的新发展,以及广泛应用的各项研究。本书从概述开始,介绍坐标和时间系统及卫星轨道的基础知识,以及 GPS 观测量,并进行诸如观测误差源、观测方程及其参数化、平差和滤波、模糊度求解、软件开发和数据处理,以及扰动轨道确定的专题研究。

本书适合作为相关专业高年级本科生、研究生,以及科研人员学习研究 GNSS 理论算法应用的教科书和参考用书。

Translation from English language edition:

GPS: Theory, Algorithms and Applications

by Guochang Xu and Yan Xu

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Springer International Publishing AG is a part of Springer Science+Business
Media All Rights Reserved

图书在版编目(CIP)数据

GPS 理论、算法与应用/(德)许国昌,许艳著;许国昌,许艳译.—3 版.
—北京:科学出版社,2017.11
(地球观测与导航技术丛书)
书名原文:GPS—Theory, Algorithms and Applications
ISBN 978-7-03-054611-1

I. ①G… II. ①许… ②许… III. ①全球定位系统—研究 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 238289 号

责任编辑:苗李莉 李 静 / 责任校对:韩 杨
责任印制:肖 兴 / 封面设计:图阅社

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017 年 11 月第一次印刷 印张:21 3/4

字数:515 000

定价:59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《地球观测与导航技术丛书》编委会

顾问专家

徐冠华 龚惠兴 童庆禧 刘经南 王家耀
李小文 叶嘉安

主 编

李德仁

副主编

郭华东 龚健雅 周成虎 周建华

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

鲍虎军	陈 戈	陈晓玲	程鹏飞	房建成
龚建华	顾行发	江碧涛	江 凯	景贵飞
景 宁	李传荣	李加洪	李 京	李 明
李增元	李志林	梁顺林	廖小罕	林 琿
林 鹏	刘耀林	卢乃锰	闫国年	孟 波
秦其明	单 杰	施 闯	史文中	吴一戎
徐祥德	许健民	尤 政	郁文贤	张继贤
张良培	周国清	周启鸣		

《地球观测与导航技术丛书》编写说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段，而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑，地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项；国家有关部门高度重视这一领域的发展，国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展；工业和信息化部、科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范；国家高技术研究发展计划（863 计划）将早期的信息获取与处理技术（308、103）主题，首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前，“十一五”规划正在积极向前推进，“地球观测与导航技术领域”作为 863 计划领域的第一个五年计划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下，把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书，集中发布，以整体面貌推出，当具有重要意义。它既能展示 973 计划和 863 计划主题的丰硕成果，又能促进领域内相关成果传播和交流，并指导未来学科的发展，同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展，科学出版社依托有关的知名专家支持，凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了《地球观测与导航技术丛书》。

从书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验，主持或参加 863 计划地球观测与导航技术领域的项目、973 计划相关项目以及其他国家重大相关项目，或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结，或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信，通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作，将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世，成为我国地球空间信息科学中的一个亮点，以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展！

李德仁

2009 年 10 月

第3版中文版前言

2003年,本书英文版原著 *GPS Theory Algorithms and Applications* 经过两年多的著作出版,之后应 Springer 要求,经过了九个月的进一步研究使成果更新添补,第2版于2007年出版,此书被若干正式发表的书评为原创著作,有些算法也以作者名字命名。之后本书第一作者开始转向卫星轨道和天体力学研究,2008年,著作 *Orbits* 由 Springer 出版,出版后研究持续进行,有若干重要的天体力学文章在 *MNRAS* 上发表,直到2013年, *Orbits* 由 Jia Xu 为第二作者再版,并且在第一作者回国到山东大学任职后其团队成员也参与其研究。2009年,第一作者开始主编 *Sciences of Geodesy* 系列著作,其第一部和第二部已由 Springer 于2010年和2012年出版。2011年, *GPS* 第2版由北京跟踪与通信技术研究所组织翻译并由清华大学出版社出版;由德黑兰大学教授翻译成波斯文,2014年由德黑兰大学出版社出版。2016年, *GPS* 第3版由 Springer 出版,许艳博士做了大量工作成为第二作者。 *GPS* 第3版的中文版主要由许艳副研究员主持翻译,获得了解放军信息工程大学曲云英女士的翻译支持,并参考了部分2011年版的中文版翻译,在内容结构上也对原英文原著略有调整。

卫星导航定位系统经过30多年的发展,已经从GPS系统一枝独秀,形成了多种系统如GLONASS、Galileo、北斗等系统百花盛开的局面,特别是北斗系统已经开始全球系统的布设实施,甚至北斗四代也已经计划立项。卫星导航系统技术从军事应用,逐步发展为大众位置服务应用不可或缺的技术,其市场容量之大不可估量。所以在这个时候,出版这部在世界领域内有重要影响力的著作的最新中文版本,具有重要的意义。但愿此书能为中国的卫星导航定位系统的发展作出其贡献。

本著作的出版,获得了以下单位的大力支持:山东大学空间科学研究院、哈尔滨工业大学深圳空间科学与技术应用研究院、东南大学智慧城市研究院、航天五院及航天钱学森实验室、国家自然科学基金会、科技部国家重点专项办、威海市南海新区管委会及威海五洲公司等。这些支持包括人员、经费、组织、设施、场地、示范和指导等,特别是第一作者及其团队包括第二作者依托上述单位获得的多达30多项的各类项目基金的支持。

本书的出版获得了科学出版社的大力支持,封面素材获得了航天五院车晓玲高工的大力支持,在此一并致谢!

许国昌 许 艳

2017年10月

第3版前言

2003年年底该书首版问世。2006年前后,应 Springer 之邀修订了第2版并于2007年年底出版。该书首版是在 KSGsoft (Xu et al., 1998) 和 KGsoft (Xu, 1999) 软件设计经验基础上,以及在德国和丹麦相关研究及实践基础上创作的。第2版的修订要得益于多功能的 GPS/Galileo 软件设计 (MFGsoft, Xu, 2004)。在 GPS 研究中发现了用于卫星定轨的新的太阳光压模型,促使我们尝试求解卫星的二阶摄动方程,从而产生了 *Orbits* 一书,于2008年年底出版。*Orbits* 的第2版加入了更深入的研究 (Xu et al., 2010a, b, 2011; Xu G and Xu J, 2013a, b) 并于2013年出版。期间,作者在指导博士研究生研究和软件开发中也进一步参与了 GPS 研究活动 (Wang et al., 2010; He et al., 2015)。2011年, *GPS* 一书第2版由北京跟踪与通信技术研究所组织译成中文并由清华大学出版社出版,2015年左右售罄;2014年 *GPS* 一书被译成波斯语,由德黑兰大学 (Dhahran University) 出版。*GPS* 第3版在几年前就与 Springer 签订了合同,但由于 *Orbits* (Xu, 2008; Xu G and Xu J, 2013a, b), *Sciences of Geodesy* (Xu, 2010, 2012) 及其他科研工作的开展而中断。2014年作者的任职单位由德国变更到山东大学 (威海),开辟了导航和遥感,以及天体力学的学科领域。GPS, GLONASS, Galileo 和 BeiDou 系统的快速发展,以及基于网络的多系统实时精密民用 GNSS 应用在德国地球科学研究中心 (GFZ) 和山东大学的实现推动了本书的修订。许艳博士在本书修订中发挥了重要作用,故提请署名第二作者。

集中修订或补充的章节包括第1章概述,第5章 GPS 观测误差源,第8章周跳探测与整周模糊度解算,第9章 GPS 数据处理的参数化和算法。其他部分只是小幅度修订。这些内容是对世界范围内科学家的工作所进行的综述,补充的内容有下面25点。

- (1) GPS 现代化的综述;
- (2) GLONASS 发展综述;
- (3) Galileo 发展综述;
- (4) Compass (BeiDou) 发展综述;
- (5) 评论电离层模型研究进展;
- (6) 评论大气模型研究前沿;
- (7) GPS 钟差研究概论;
- (8) 使用外部参考钟比对的综述;
- (9) GPS 中水汽辐射测量研究介绍;
- (10) 综述 GPS 测高研究进展;
- (11) 述评 GPS 算法等价原理研究;
- (12) 评论模糊度搜索准则研究;
- (13) 自适应滤波研究进展综述;
- (14) GPS 数据联合处理与分别处理的研究;

- (15) GPS 差分算法中变换参考星的研究;
- (16) 机载动态定位的对流层模型研究;
- (17) GPS 差分算法中变换参考站的研究;
- (18) 实数模糊度确定的研究综述;
- (19) 精密单点定位研究概要;
- (20) GPS 软件介绍;
- (21) 卫星轨道理论综述;
- (22) 卫星数值定轨综述;
- (23) 地球同步卫星定轨总结;
- (24) 独立参数化的研究;
- (25) 综述 GPS 研究中仍存在的疑难问题。

通过对内容的深入补充,作者希望本书的最新修订版能够更好的有益于 GNSS 的学习与研究。该书初版的理论贡献或新的研究成果可归纳如下:

- (1) GPS 算法差分与非差的弱等价性;
- (2) GPS 数据处理的统一算法;
- (3) 模糊度的一般搜索准则;
- (4) 模糊度的等价搜索准则;
- (5) 平差滤波中的对角化方法;
- (6) 杨氏滤波——自适应抗差卡尔曼滤波;
- (7) 使用 GPS 进行数值定轨理论;
- (8) 数值定轨中变分方程的代数解;
- (9) 模糊度函数准则数学上的错误。

第 2 版补充的新的研究成果如下:

- (1) GPS 组合与非组合算法的等价性;
- (2) GPS 模型的独立参数化法;
- (3) GPS 数据处理方法的等价性理论;
- (4) 差分 GPS 基线网的优化组构方法;
- (5) 太阳光压摄动的新的平差模型;
- (6) 大气阻力摄动的新的平差模型;

第 3 版的理论创新有以下六个方面:

- (1) 三差等价性的证明;
- (2) 智能卡尔曼滤波的思想;
- (3) 无电离层组合中的浮点模糊度固定;
- (4) 无奇点 Lagrange-Xu 运动方程的数学推导;
- (5) 无奇点 Gauss-Xu 运动方程的数学推导;
- (6) 奇点判据及其几何意义。

其中,第(3)~(6)的相关内容在本中文翻译版中被略去,有兴趣的读者可参阅英文原版。

扩充的内容部分来自发表的国际论文成果，已通过各自的评审。感谢西安测绘研究所的杨元喜院士，台湾台北大学叶大纲 (Ta-Kang Yeh) 教授，香港理工大学陈武教授，同济大学沈云中教授，以及解放军信息工程大学吕志平教授对该书补充内容所提出的宝贵审稿意见。

第一作者对柏林工业大学的 D. Lelgemann 博士教授多年前指导其博士研究生的学习和研究表示由衷的感谢。同时感谢 GFZ 的主任 Christoph Reigber 博士教授、Markus Rothacher 博士教授及 Harald Schuh 博士教授在过去二十多年里的支持和信任，使第一作者能够在 GFZ 自由开展研究活动。感谢中国空间技术研究院 (CAST) 李明教授，他在作者担任 CAST 千人专家时给予的支持让作者毕生难忘。当然还要感谢山东大学 (威海) 使开辟新的学科领域、创建国际团队并获得校内外资金支持成为可能。同时对第二作者承担本版的大部分文本处理工作表示感谢。

感谢山东大学 (威海) 导航遥感团队成员的友情支持。特别感谢德国的千人专家 Hermann Kaufmann 教授，比利时的客座教授 Pierre Rochus，葡萄牙的客座教授 Luisa Bastos，以及瑞典的客座教授 Anna Jensen，科学家 Nina Boesche 及德国的特邀工程师江楠，高级工程师闫文林和孙张振，工程师蒋春华和张方照，博士后杜玉军和高凡，以及博士研究生聂文锋。

许国昌 许 艳

2016 年 1 月

第2版前言

在本书第1版于2003年年底出版后,我很高兴能把写书的艰巨工作搁置脑后,专注于同我的小组一道开发多功能的GPS/Galileo软件(MFGsoft)。把理论和算法应用于高标准的软件的实践经验使我强烈地感觉到有必要修订和补充原作,修改部分内容和报告新的进展与知识。此外,伴随着欧洲伽利略(Galileo)系统的建设和俄罗斯GLONASS系统的发展,应该重新描述全球定位系统(GPS)的理论和算法使其也适用于Galileo和GLONASS系统。因此,感谢本书的所有读者,他们的兴趣使得Springer能够让我完成本书的第2版。

我记得第1版印刷排版样稿的最后检查进行得很匆忙。11.5.1节的变分方程的数值解的叙述是在最后时刻才以有限的一页加到书中的。传统上,定轨(OD)中的变分方程,重力场投影以及OD卡尔曼滤波方程式是通过复杂而计算量大的积分来解的。在OD历史上,此变分方程的解是首次不通过积分而由线性代数方程式得到的。然而,这在前言和这章的开始均没提到。这种代数法的高精度通过数学算例得到了验证。

在第1版12章中讨论的问题大多数已被解决了,现在称之为独立参数化理论。独立参数化理论指出,在非差分和差分算法中,独立的模糊度矢量是双差形式的。应用这种参数化方法,GPS观测方程是正则方程,无需使用任何先验信息即可解。许多结论可由此导出。例如,由于钟差参数和模糊度的线性相关,GPS时钟的同步性不能通过载波相位观测量实现。等价原理扩展为不仅在非差分和差分算法间有效,在非组合和组合算法以及它们的混合算法中也有效,即GPS数据处理算法在观测模型的相同参数化下是等价的。不同的算法有益于不同的数据处理目的。等价性理论的一个结果就是导出了所谓的二级数据处理算法。换句话说,完整的GPS定位问题可以分解为两步处理(首先把数据转换为二级观测量,然后再处理二级观测数据)。等价理论的另一个结果是任何GPS观测方程都可以被分解为两个子方程,这在实践中是很有用的。此外,它表明同独立参数化组合方法相比,传统参数化组合是不准确的。

补充的内容包含更详细的概述,不仅涉及GPS的发展,也涉及欧洲的Galileo系统和俄罗斯的GLONASS系统,以及GPS、GLONASS和Galileo系统的组合。因此本书覆盖了GPS、GLONASS和Galileo系统的理论、方法和应用,详细讨论了GPS数据处理算法的等价性和GPS观测模型的独立参数化。其他的新内容包括组成优化网络的概念、对角化算法的应用、光压和大气阻力的平差模型,以及作者认为的当前关键研究问题的讨论和评注。还简述了这些理论和方法在研制GPS/Galileo软件过程中的应用。关于模糊度搜索的内容被减少了,有关无电离层模糊度固定方面的内

容被删除了，虽然 Lemmens (2004) 认为它是新的。一些小节的内容也被重新排序。通过这样的修改，我希望这一版能被更好地用作 GPS/Galileo 系统研究和应用的参考书和手册。

部分扩展内容是 MFGsoft 研发的结果，已经逐个经过评审。感谢柏林工业大学的 Lelgemann 教授、西安测绘研究所的杨元喜教授、台湾清云大学的叶大纲教授和同济大学的沈云中教授给予的有价值的评阅。感谢武汉大学李建成教授、王正涛博士及波茨坦大学的肖磊浩先生于 2003~2004 年在波茨坦地学研究中心协作开发的软件。

真诚地感谢 Markus Rothacher 教授对我在波茨坦地学研究中心进行研究时给予的支持和信任。感谢柏林中国大使馆教育处的刘京辉博士、中国科学院测量与地球物理研究所的孙和平和欧吉坤教授、长安大学的张勤教授对我在中国进行科研活动时的友好支持。感谢中国科学院的杰出海外中国学者基金。在这个项目中我的一些学生认真地做过几个有趣的专题研究。我衷心地感谢里斯本大学的 Daniela Morujao 女士、柏林工业大学的 Jamila Bouaicha 女士、中国科学院测量与地球物理研究所的郭建峰博士和洪英女士、长安大学的黄观文先生。我也感谢读者及在长安大学和中国科学院测量与地球物理研究所讲学时学生们有价值的反馈。

许国昌

2007 年 6 月

第1版前言

本书的内容涵盖静态和动态 GPS 理论、算法和应用。大部分内容来自之前在波茨坦地学研究中心及欧洲 AGMASCO 项目期间研制的动态 / 静态 GPS 软件 (KSGsoft) 的源代码说明书。书中叙述的原理大部分已经应用于实践并在理论上经过仔细的校订。部分内容作为理论基础提出,并在波茨坦地学研究中心应用于研制准实时的 GPS 定轨软件。

写作本书的最初目的只是给我自己一本 GPS 的参考手册,也给我几个一起在丹麦工作的朋友和学生作为参考书。我受到的数学教育促使我以一种严谨的方式描述本书相关的理论;我的大地测量研究经历使得我对大部分内容的叙述非常精细;而我作为一名软件设计人员的良好习惯使得本书内容非常的完整。

一些在波茨坦地学研究中心获得的研究成果在本书中首次面世。基于消参数等价观测方程的 GPS 数据处理的统一算法就是一个典型的例子。它将零差、单差、双差、三差和用户自定义差分 GPS 数据处理方法统一到一种算法中。这种方法具有非差分和差分方法两者的优点,即原始测量的非相关特性仍然保留,而未知量可大大减少。另一个例子是关于整周模糊度的一般搜索准则和等价准则。采用此准则可以完成模糊度、坐标搜索,并证明了此准则的最优性和单一性。进一步的例子如模糊度搜索问题的对角化算法,用于模糊度和电离层确定的模糊度电离层方程式,以及在卡尔曼滤波中将差分多普勒方程作为系统方程使用等。

本书包括 12 章。在一个简要的概述后,第 2 章描述坐标和时间系统。由于定轨也是本书的重要主题,第 3 章专门介绍开普勒卫星轨道。第 4 章介绍 GPS 观测量,包括伪码测距、载波相位和多普勒观测量。

第 5 章论述所有 GPS 观测量的误差源,包括电离层效应、对流层效应、相对论效应、陆地和海洋潮汐效应、时钟误差、天线质心和相位中心改正、多路径效应、反电子欺骗和曾经的选择可用性,以及硬件延迟偏差。详细介绍了相关理论、模型和算法。

第 6 章首先叙述 GPS 观测方程,如它们的构成、线性化、相关偏导数,以及线性变换和误差传播。然后讨论了有用的数据组合,特别介绍了模糊度-电离层方程概念和相关权矩阵。此方程仅包括模糊度和电离层及设备误差参数,也能在动态应用中独立求解。还详细介绍了传统的 GPS 差分观测方程,包括差分多普勒方程。为统一非差分和差分 GPS 数据处理方法,提出了选择性消参数等价观测方程的方法。

第 7 章介绍了适用于 GPS 数据处理的各种平差和滤波方法。描述的主要平差方法包括经典、序贯、分块以及条件最小二乘平差。讨论的核心滤波方法包括经典和抗差及自适应抗差卡尔曼滤波。除此之外,先验约束、先验基准和拟稳平差法也被

用来处理秩亏问题。详细推导了等价消去方程的理论基础。

第 8 章专门介绍周跳探测和模糊度固定。概要介绍了几种周跳探测方法,重点推导了一种在模糊度、坐标或两者域内联合搜索整周模糊度的一般准则。此准则来自于条件平差,然而,最终却与任何条件都没有关系。也导出了一个等价准则,表明众所周知的最小二乘模糊度搜索准则是等价准则之一。提出了一种用于模糊度搜索的对角化算法。把法方程对角化后,瞬间就能完成搜寻。概述了模糊函数法和浮点模糊度固定法。

第 9 章论述了静态和动态应用的 GPS 数据处理方法以及数据预处理方法。重点是解模糊度-电离层方程和单点定位、相对定位,以及利用伪码、相位和组合数据测速。讨论了等价的非差分和差分数据处理方法。介绍了一种利用速度信息的卡尔曼滤波方法。在本章最后略述了观测几何的精度。

第 10 章介绍了动态定位和飞行状态监测的方法。详细讨论了 IGS 站的用法、多静态参考基准、机场高度信息、动态对流层模型、飞机多天线定长基线,并给出了数学算例。

第 11 章介绍摄动定轨。给出了卫星运动的摄动方程。详细讨论了卫星运动的摄动力,包括地球重力场摄动,地球潮汐和海洋潮汐,太阳、月亮和行星,太阳光压,大气阻力及坐标摄动。基于 C_{20} 摄动项的解析解分析了轨道改进。讨论了精密定轨,包括原理和有关偏导数以及数值积分和插值算法。

最后一章简要讨论了 GPS 的未来,以及对一些现存问题的评述。

本书已经按章、节或根据内容分别进行了评审。感谢柏林工业大学(TU)的 Lelgemann 教授、缅因州大学的 Leick 教授、新南威尔士大学(UNSW)的 Rizos 教授、俄亥俄州立大学的 Grejner-Brzezinska 教授、西安测绘研究所的杨元喜教授、中国科学院测量与地球物理研究所的欧吉坤教授、香港理工大学的陈武教授、武汉大学李建成教授、柏林工业大学的崔春芳博士、得克萨斯大学的康治贵博士、新南威尔士大学的王金岭博士、波茨坦地学研究中心的刘焱雄博士、丹麦 KMS 的 Shfaqat Khan 先生、武汉大学的王正涛先生、马克思普朗克科学数学研究所(德国莱比锡)的陈文艺博士等审阅人。本书由柏林工业大学的 Lelgemann 教授总审。科技英语写作的语法检查由 Springer-Verlag Heidelberg 完成。

我由衷地感谢 Ch. Reigber 教授对我在波茨坦地学研究中心进行科研活动中给予的信任和支持。感谢丹麦 KMS 的 Niels Andersen 博士、Per Knudsen 博士和 Rene Forsberg 博士在本书开始写作时给予的支持。感谢柏林工业大学的 Lelgemann 教授给予的鼓励和帮助。在写作中,同许多专家进行了许多有益的讨论。衷心感谢斯图加特大学的 Grafarend 教授、哥本哈根大学的 Tscherning 教授、波茨坦地学研究中心的 Peter Schwintzer 博士、波尔图大学天文台的 Luisa Bastos 博士、马里兰大学的 Oscar Colombo 博士、慕尼黑德国测地研究所的 Detlef Angermann 博士、波茨坦地学研究中心的朱圣源博士、京都大学的徐培亮博士、中国科学院测量与地球物理研究所的王广运教授、汉诺威大学的 Ludger Timmen 博士、科因巴拉大学的 Daniela Morujao 小姐。感谢波茨坦地学研究中心的 Jürgen Neumeyer 博士和中国科学院测量与地球物理

研究所的孙和平博士的支持。感谢柏林工业大学的 Horst Scholz 硕士重画了部分图形。我也感谢 Springer-Verlag Heidelberg 的 Engel 博士给予的意见。

感谢我妻子、儿子和女儿无私的支持和理解，以及在部分文字处理和图表上给予的帮助。

许国昌

2003 年 3 月

缩写词和常量

缩写词

AF	ambiguity function	模糊度函数
AS	anti spoofing	反电子欺骗
AU	astronomical units	天文单位
C/A	coarse acquisition	粗码
CAS	Chinese Academy of Sciences	中国科学院
CIO	conventional international origin	国际协议原点
CHAMP	challenging mini-satellite payload	小卫星有效载荷, 是一种科学实验卫星
CRF	conventional reference frame	协议参考框架
CTS	conventional terrestrial system	协议地球坐标系
DD	double difference	双差
DGK	Deutsche Geodaische Kommission	德国大地测量协会
DGPS	differential GPS	差分
DOP	dilution of precision	精度因子
ECEF	earth-centred earth-fixed (system)	地心地固坐标系
ECI	earth-centred inertial (system)	地心惯性坐标系
ECSF	earth-centred space-fixed (system)	地心空间坐标系
ESA	European Space Agency	欧洲空间局
EU	European Union	欧盟
Galileo	global navigation satellite system of the EU	欧盟的全球卫星导航系统
GAST	Greenwich apparent sidereal time	格林尼治视恒星时
GDOP	geometric dilution of precision	几何精度因子
GFZ	GeoForschungs Zentrum Potsdam	波茨坦地学研究中心

GIS	geographic information system	地理信息系统
GLONASS	global navigation satellite system of Russia	俄罗斯的全球卫星导航系统
GLOT	GLONASS time	GLONASS 时
GMST	Greenwich mean sidereal time	格林尼治平恒星时
GNSS	global navigation satellite system	全球导航卫星系统
GPS	global positioning system	全球定位系统
GPST	GPS time	GPS 时
GRACE	gravity recovery and climate experiment	重力测量和气候试验双星
GRS	geodetic reference system	大地参考系
GST	Galileo system time	伽利略系统时
HDOP	horizontal dilution of precision	水平精度因子
IAG	International Association of Geodesy	国际大地测量协会
IAT	international atomic time	国际原子时
IAU	International Astronomical Union	国际天文学协会
IERS	international earth rotation service	国际地球自转服务
IGS	international GPS geodynamics service	国际 GPS 服务
INS	inertial navigation system	惯性导航系统
ION	Institute of Navigation (USA)	美国导航学会
ITRF	IERS terrestrial reference frame	地球参考框架
IUGG	International Union for Geodesy and Geophysics	国际大地测量和地球物理学协会
JD	Julian date	儒略日
JPL	Jet Propulsion Laboratory	喷气动力实验室
KMS	National Survey and Cadastre (Denmark)	丹麦国家测量和地籍局
KSGsoft	kinematic/static GPS software	动态 / 静态 GPS 软件
LEO	low earth orbit (satellite)	低地球轨道 (卫星)
LS	least squares (adjustment)	最小二乘 (平差)

LSAS	least squares ambiguity search (criterion)	最小二乘模糊度搜索 (准则)
MEO	medium earth orbit (satellite)	中地球轨道 (卫星)
MFGsoft	multi functional GPS/Galileo software	多功能 GPS/Galileo 软件
MIT	Massachusetts Institute of Technology	麻省理工学院
MJD	modified Julian date	改进儒略日
NASA	National Aeronautics and Space Administration	美国国家航空航天局
NAVSTAR	navigation system with time and ranging	定时和测距导航系统
NGS	national geodetic survey	国家大地测量局
OD	orbits determination	定轨
OTF	on-the-fly	在航
PC	personal computer	个人计算机
PDOP	position dilution of precision	位置精度因子
PRN	pseudorandom noise	伪随机噪声
PZ-90	parameters of the earth year 1990	1990 年地球参数
RINEX	receiver independent exchange (format)	接收机无关数据交换 (格式)
RMS	root mean square	均方根
RTK	real-time kinematic	实时动态定位
SA	selective availability	选择可用性
SC	semicircles	半周
SD	single difference	单差
SINEX	software independent exchange (format)	软件无关交换 (格式)
SLR	satellite laser ranging	卫星激光测距
SNR	signal to noise ratio	信噪比
SST	satellite satellite tracking	卫卫跟踪
SV	space vehicle	航天器
TAI	international atomic time	国际原子时
TD	triple difference	三差