

Springer航天技术译丛

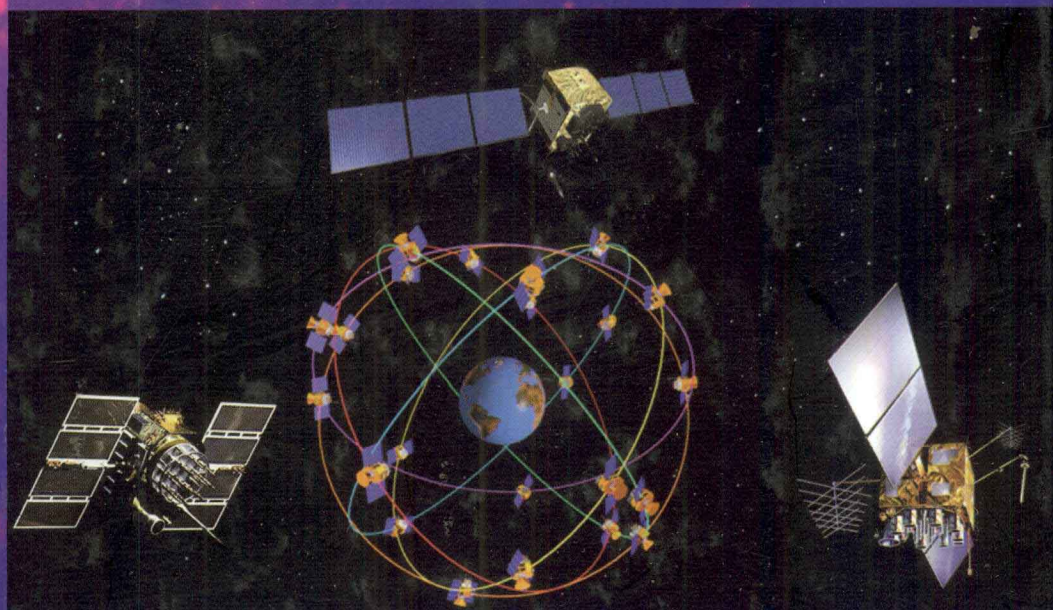
GPS 理论、算法与应用 (第2版)

北京跟踪与通信技术研究so 组织翻译

(德) Guochang Xu 著

李 强 刘广军 于海亮 李 波 罗海英 译

董绪荣 审校



清华大学出版社

Springer航天技术译丛

GPS 理论、算法与应用

(第2版)

北京跟踪与通信技术研究so 组织翻译

(德) Guochang Xu 著

李 强 刘广军 于海亮 李 波 罗海英 译

董绪荣 审校

清华大学出版社

北京

Translation from the English language edition:

GPS Theory, Algorithms and Applications, 2nd Edition by Guochang Xu

ISBN 9783540727149

Copyright © Springer 2007

Springer is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved.

本书中文简体字翻译版由德国施普林格公司授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2010-2105

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

GPS 理论、算法与应用/(德)许国昌著;李强等译.--2 版.--北京:清华大学出版社,2011.12

(Springer 航天技术译丛)

书名原文:GPS Theory, Algorithms and Applications, 2nd Edition

ISBN 978-7-302-27164-2

I. ①G… II. ①许… ②李… 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(2011)第 216338 号

责任编辑:石磊 赵从棉

责任校对:刘玉霞

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮编:100084

社总机:010-62770175

邮购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者:三河市春园印刷有限公司

经销:全国新华书店

开本:153×235 印张:20.75 字数:357 千字

版次:2011 年 12 月第 1 版 印次:2011 年 12 月第 1 次印刷

印数:1~3000

定价:49.00 元

产品编号:034832-01

Springer 航天技术译丛

编译委员会

主 任 钱卫平

委 员 董光亮 朱天林 吴正容

孙 威 李海涛



近年来,空间探索正在成为人类探索自然最为关注的领域之一。随着航天技术的飞速发展,人类探索活动的范围已经从近地球空间延伸到太阳系内广大的行星际空间,并将向更加深远的宇宙空间扩展。中国作为一个已经掌握了载人航天与月球探测技术的航天大国,必将持续不断地开展空间探索和空间应用活动,为拓展人类生存空间,为实现中华民族的伟大复兴不断前行。

在这一领域,世界领先的学术出版公司 Springer 出版了“空间探索丛书”等一大批优秀图书,涵盖了近地空间、地月空间、行星际空间以及载人航天等自人类开展空间探索活动以来的多个领域。内容涉及阿波罗登月任务、载人火星探测任务,以及空间碎片监视等多个方向。这些图书不但总结了人类航天任务中的成功经验,还从理论上系统研究并探索了未来的航天技术,必将会对我国从事航天领域工作的科研和管理人员提供有益的帮助。

北京跟踪与通信技术研究所在我国航天测控领域的技术总体单位,始终致力于开展空间信息技术的研究与应用。这套“Springer 航天技术译丛”,是我所组织相关领域专家,在结合我国未来航天工程发展需求的基础上,主要侧重于空间信息技术领域,仔细甄别精选、精心翻译审校而成的。希望这套丛书的出版能够为我国空间信息技术领域广大科技工作者的科研与工程实践提供参考与指导。

北京跟踪与通信技术研究所在

2011 年 11 月

译者序

随着世界各国卫星导航系统的不断发展和完善,卫星导航定位技术已广泛应用于国民生产和军事领域的各个方面。

本书译自 2007 年由德国波茨坦地学研究中心资深研究员许国昌博士编著的 *GPS Theory, Algorithms and Applications* (第 2 版)。许国昌博士是中国科学院精密导航定位与定时技术重点研究室客座教授。他主要的研究方向为 GPS/Galileo 卫星导航定位的理论、算法与应用,曾先后发表和出版了《全球卫星导航系统原理》和《轨道理论》等论著。许国昌博士具有深厚的理论功底、丰富的工程实践和软件开发经验,使本书理论严谨、内容完整,对卫星导航及相关领域的研究人员和从业人员具有很好的帮助和指导作用。

本书由北京跟踪与通信技术研究所组织翻译。第 1、2 章由李波研究员翻译,第 3、4 章和第 7、8 章由于海亮工程师翻译,第 5、6 章由副研究员李强博士翻译,第 9 章和第 11 章由刘广军博士翻译,第 10 章和第 12 章由罗海英工程师翻译,全书由装备指挥技术学院董绪荣教授审校。

翻译中译者力求忠实于原著,但由于译者水平有限,书中难免存在疏漏和不当之处,恳请广大读者和专家批评指正。

第2版前言

在本书第1版于2003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和知识。此外,伴随着欧洲伽利略(Galileo)系统的建设和俄罗斯格洛纳斯(GLONASS)系统的发展,应该重新描述全球定位系统(GPS)的理论和算法使其对Galileo和GLONASS系统也有效。因此,感谢本书的所有读者,他们的兴趣使得Springer出版社能够让我完成本书的第2版。

我记得第1版版面的最后检查进行得很匆忙。11.5.1节的变量方程的数字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)和重力场映射以及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,此变量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字试验得到了验证。

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差分的二倍。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,由于时钟误差参数和模糊度的线性互相关,GPS时钟同步不能通过载波相位观测量实现。等价原理扩展为不仅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数据处理算法在相同的观测模型参数下是等价的。不同的算法对不同的数据处理目的有用。等价理论的一个结果就是导出了所谓的第二数据处理算法。换句话说,GPS定位问题可以分解为两步处理(首先把数据转换为第二观测量,然后再处理第二观测数据)。等价理论的另一个结果是任何GPS观测方程式都可以被分解为两个子方程式,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精确的。

补充的内容包含更详细的介绍,不仅涉及 GPS,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最佳网络的概念、对角化算法的应用、辐射压力和大气摄动的修正模型,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,有关消电离层模糊度确定方面的内容被删除了,虽然 Lemmens(2004)认为它是新的。通过这样修改,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 公司研发的结果,已经逐个经过审阅。感谢柏林技术大学的 Lelgemann 教授、西安测绘研究所的杨元喜教授、台湾庆云大学的叶泰康教授和同济大学的沈云中教授给予的有价值的评阅。感谢武汉大学的李建成教授、王正涛博士及波茨坦大学的肖霆浩先生 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、武汉大地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学研究时的友好支持。感谢中国科学院的杰出海外中国学者基金。在工作中我的一些学生仔细地探讨过几个有趣的专题。我衷心地感谢里斯本大学的 Daniela Morujao 女士、柏林技术大学的 Jamila Bouaicha 女士、武汉 IGG 的郭江峰博士和洪英女士、长安大学的黄冠文先生。我也感谢读者及在长安大学和大地测量与地球物理研究所教书时学生们有价值的反馈。

许国昌

2007.06

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。大部分内容来自波茨坦地学研究中心在开展欧洲 AGMASCO 计划前及期间研制的动态/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 数据统一处理方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搜索的一般准则和等价准则。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作为系统方程的差分多普勒方程的使用等。

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、载波相位和多普勒测量量。

第 5 章论述所有对 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偏差、多径效应、反电子欺骗和曾经的选择可用性,以及设备偏差。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解出。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 数据处理的各種平差和滤波方法。描述的主要平差方法包括经典的、序贯的和分块的,以及条件最小二乘平差。讨论的核心滤波方法是经典和抗差的及自适应抗差卡尔曼滤波。先验约束法、先验信息法和拟稳平差法也被用来处理秩亏问题。详细推导了等价消参方程的理论基础。

第8章专门介绍周跳探测和模糊度求解。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。也导出了一个等价的准则,表明众所周知的最小二乘模糊度搜索准则就是等价准则之一。提出了一种用于模糊度搜索的对角化算法。把一般方程对角化后,1 s 内就能完成搜寻。略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。简要介绍了数据预处理,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问题。

第10章介绍了动态定位和飞行状态监视的方法。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,并给出了数字算例。

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,太阳辐射压力,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积分和插值算法。

最后一章简要讨论了 GPS 的未来,说明了一些遗留问题。

本书已经按章、节或根据内容分别进行了回顾。感谢柏林技术大学(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、西安测绘所的杨元喜教授、武汉 IGG 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、柏林技术大学的桂春芳博士、得克萨斯大学的康治贵博士、新南威尔士大学的王金林博士、波茨坦地学研究中心的刘衍雄博士、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)的陈文宜博士等审阅人。本书由柏林 TU 的 Lelgemann 教授总审。科技英语写作的文法检查由 Springer-Verlag Heidelberg 出版社完成。

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学研究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 TU 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胜元博士、京都大学的徐沛良博士、武汉 IGG 的王冠云教授、汉诺威大学的 Ludger Timmen 博士、科因巴托尔大学的 Daniela Morujao 小姐。感谢波茨坦地学研究中心的 Jürgen Neumeyer 博士和武汉 IGG 的孙和平博士的支持。感谢柏林 TU Dipl.-Ing 的 Horst Scholz 重画了部分图形。我也感谢 Springer-Verlag Heidelberg 出版社 Engel 博士给予的忠告。

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

2003.03

缩写词

- AF Ambiguity Function 模糊函数
- AS Anti-Spoofing 反电子欺骗
- AU Astronomical Units 天文单位
- BDT Barycentric Dynamic Time 质心力学时
- 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,是一种科学试验卫星
- 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 Geodätsche Kommission 德国大地测量协会
- DGPS Differential GPS 差分 GPS
- 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 EU 欧盟的全球导航卫星系统
- GAST Greenwich Apparent Sidereal Time 格林威治视恒星时
- GDOP Geometric Dilution of Precision 几何精度因子
- GFZ GeoForschungsZentrum 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 俄罗斯的全球导航卫星

系统

GLONASS GLONASS time GLONASS 时
GMST Greenwich Mean Sidereal Time 格林威治平恒星时
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
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 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 喷气推进实验室
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
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
TDB	Barycentric Dynamic Time	质心力学时
TDOP	Time Dilution of Precision	时间精度因子
TDT	Terrestrial Dynamic Time	地球动力学时
TEC	Total Electronic Content	总电子容量
TJD	Time of Julian Date	儒略日时间
TOPEX	(Ocean) Topography Experiment	地形学实验
TOW	Time of Week	周时
TRANSIT	Time Ranging and Sequential	子午时间测距序列
TT	Terrestrial Time	地球时
UT	Universal Time	世界时
UTC	Universal Time Coordinated	协调世界时
UTC _{su}	Moscow time UTC	莫斯科协调世界时
VDOP	Vertical Dilution of Precision	垂直精度因子
WGS	World Geodetic System	世界大地测量坐标系
ZfV	Zeitschrift für Vermessungswesen	测量学、地理情报与土地管理杂志

常量表

符 号	取 值	单 位	说 明	参阅(节)
a_e	6378137	m	WGS-84 系长半轴	2.1
f_e	1/298.2572236		WGS-84 系扁率	2.1
a_p	6378136	m	PZ-90 系长半轴	2.1
f_p	1/298.2578393		PZ-90 系扁率	2.1
a_{el}	6378136.54	m	ITRF-96 系长半轴	2.1
f_{el}	1/298.25645		ITRF-96 系扁率	2.1
ε	84381".412		J2000.0 时的黄赤平交角	2.4
JDGPS	2444244.5	JD	GPS 标准时儒略日(1980 年 1 月 6 日 0 时)	2.6
JD2000.0	2451545.0	JD	2000 年 1 月 1 日 12 时的儒略日	2.6
G	6.67259×10^{-11}	$\text{m}^3/(\text{s}^2 \cdot \text{kg})$	引力常数	3.1
μ_e	$3.986004418 \times 10^{14}$	rad/s	地球引力常数	3.1
ω_e	7.292115×10^{-5}	rad/s	地球平均角速度	3.3
c	299792458	m/s	光速	4.1
μ_s	1.327124×10^{20}	m^3/s^2	日心引力常数	5.4
μ_m	$\mu_e(M_m/M_e)$	m^3/s^2	月球引力常数	5.4
M_m/M_e	0.0123000345		月-地质量比	5.4
h_2, h_3	0.6078, 0.292		Love 数	5.4
l_2	0.0847		Shida 数	5.4
f_0	10.23	MHz	GPS 基频	8.5
f_1	154 f_0	MHz	GPS 第一载频	8.5
λ_1	19.029	cm	f_1 的波长	8.5
f_2	120 f_0	MHz	GPS 第二载频	8.5
λ_2	24.421	cm	f_2 的波长	8.5
f_5	115 f_0	MHz	GPS 第三载频	8.5
λ_5	25.482	cm	f_5 的波长	8.5
p_s	4.5605×10^{-6}	N/m	太阳光照度	11.2
a_s	1.0000002AU	m	太阳轨道半长轴	11.2
AU	149597870691	m	天文单位	11.2
a_m	384401000	m	月球轨道半长轴	11.2
f_{g1}	1602	MHz	GLONASS 第一载波频率	1.2
Δf_{g1}	0.5625	MHz	GLONASS 第一载频间隔	1.2
f_{g2}	1246	MHz	GLONASS 第二载波频率	1.2
Δf_{g2}	0.4375	MHz	GLONASS 第二载频间隔	1.2

目 录

第 1 章	概述	1
1.1	GPS 核心	2
1.2	GLONASS 简述	3
1.3	Galileo 的基本情况	4
1.4	组合的全球导航卫星系统	5
第 2 章	坐标系统和时间系统	6
2.1	地心地固坐标系	6
2.2	坐标系转换	9
2.3	当地坐标系	10
2.4	地心惯性坐标系	12
2.5	地心黄道惯性坐标系	15
2.6	时间系统	16
第 3 章	卫星轨道	19
3.1	开普勒运动	19
3.1.1	轨道平面内的卫星运动	21
3.1.2	开普勒方程	23
3.1.3	卫星的状态矢量	26
3.2	卫星的受摄运动	28
3.3	GPS 广播星历	28
3.4	IGS 精密星历	30
3.5	GLONASS 星历	31
第 4 章	GPS 观测量	32
4.1	伪距	32
4.2	载波相位	34

4.3	多普勒观测测量	35
第5章	GPS 观测误差源	37
5.1	电离层效应	37
5.1.1	码延迟和相位超前	37
5.1.2	电离层误差修正	39
5.1.3	电离层模型	41
5.1.4	映射函数	44
5.2	对流层效应	47
5.2.1	对流层模型	48
5.2.2	映射函数和参数化	51
5.3	相对论效应	53
5.3.1	狭义相对论和广义相对论	53
5.3.2	GPS 的相对论效应	55
5.4	地球潮汐和海水潮汐负荷误差修正	57
5.4.1	GPS 测站的地球潮汐误差	57
5.4.2	地球潮汐误差的简化模型	59
5.4.3	地球潮汐效应的数学例子	60
5.4.4	海水负荷潮汐误差	61
5.4.5	海水负荷潮汐误差的计算	65
5.4.6	海水负荷效应的数字例子	65
5.5	钟差	66
5.6	多径效应	67
5.6.1	GPS 测高,地表反射信号	69
5.6.2	反射点定位	69
5.6.3	像点和反射面求解	71
5.7	AS 和 SA 效应	71
5.8	天线相位中心的误差和变化	72
5.9	设备偏差	75
第6章	GPS 观测方程和等价特性	76
6.1	GPS 观测通用数学模型	76
6.2	观测模型线性化	77
6.3	观测函数的偏导数	79