

卫星导航测量 差分自校准融合技术

Difference Self-Calibration Fusion Techniques
of Navigation Satellite Measurement

刘利生 吴斌 曹坤梅 刘元 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

卫星导航测量 差分自校准融合技术

**Difference Self-Calibration Fusion Techniques
of Navigation Satellite Measurement**

刘利生 吴斌 曹坤梅 刘元 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

卫星导航测量差分自校准融合技术 / 刘利生等著.
北京:国防工业出版社,2007.4
ISBN 978-7-118-04861-2

I. 卫... II. 刘... III. ①卫星导航—导航系统—
数据处理—差分方程②卫星导航—导航系统—数据处理
—自校正控制 IV. TN967.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 134749 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 11½ 字数 290 千字

2007 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 39.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员	刘成海			
副主任委员	王峰	张涵信	程洪彬	
秘书长	程洪彬			
副秘书长	彭华良	蔡镛		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	刘世参
(按姓名笔画排序)	杨星豪	李德毅	吴有生	何新贵
	佟玉民	宋家树	张立同	张鸿元
	陈冀胜	周一宇	赵凤起	侯正明
	常显奇	崔尔杰	韩祖南	傅惠民
	舒长胜			

序

卫星导航系统因其覆盖范围广,可全天时、全天候发布高精度的导航、定位和授时等信息,成为当今国民经济和国防建设不可或缺的重要空间基础设施,世界各军事大国均竞相发展自己的卫星导航系统。多年来,我国极为重视卫星导航系统的建设和发展,努力探索和研究卫星导航系统的应用技术,积极开发和充分利用已有的测量资源,以广泛地服务于我国国民经济、科学研究和军事技术等领域。

由于各种应用服务的需要,尤其是军事技术发展的需要,许多任务已突破了仅利用卫星导航系统进行实时导航定位的概念,提出了更多、更新的任务需求和更高的精度要求。为此,必须提高卫星导航系统测量和数据处理的技术水平,以适应这些新的要求。

卫星导航系统的测量数据处理是卫星导航系统的重要组成部分,开拓和提高测量数据处理技术,是提高卫星导航系统测量精度及提供多样性参数要求的重要技术途径。本书根据卫星导航系统的测量特点,充分利用导航卫星提供的空域和时域数据资源,基于差分自校准融合技术原理,结合数理统计、数字滤波、函数逼近和非线性参数解算等技术,对导航卫星测量数据处理技术进行改进,可显著提高用导航卫星系统确定空间目标轨迹的精度。

本书内容丰富,紧密结合我国航天测控工程实践,是作者多年科研经验的结晶,具有较高学术水平和应用价值,对于提高和改进卫星导航系统测量数据处理技术水平有着积极的作用,对于提高

和改进其他航天系统测量数据处理的技术水平也有启迪和帮助作用。期望该书的出版,能够为从事航天工程测控以及相关领域的科研人员提供有价值的参考,并在科学研究和工程应用中起到很好的借鉴和促进作用。

沈学骏

2006年7月26日

前 言

随着人类的进步和航天技术的发展,各种民用和军用的航天系统应运而生,种类繁多,其中卫星导航系统因可发送高精度、全天时、全天候的导航、定位和授时等信息,成为当今国民经济和国防建设不可缺少的重要空间基础设施。该系统在国民经济众多领域中应用非常广泛,已形成庞大的卫星导航产业;在军事领域是实现武器平台精确导航定位和制导武器远程精确打击的关键支撑,是现代高科技信息化战争的重要保障,对世界新军事变革具有积极的推动作用。世界各个主要国家对卫星导航系统的建设和发展极为重视,美国和俄罗斯相继建成全球卫星导航系统 GPS 和 GLONASS,欧盟计划在 2010 年建成 GALILIEO(伽利略)导航系统。我国已在 2000 年建成了北斗一号区域卫星导航系统,成为世界上第三个拥有自主卫星导航系统的国家。

随着各种应用任务的需要,卫星导航系统将会越来越广泛地服务于人类的各种活动,许多应用任务对其测量与定位的精度要求也越来越高,尤其是军事技术发展的需要。因此,人们要求卫星导航系统不断地提高其测量系统的观测精度和改进测量数据的处理技术,以满足应用系统的要求。

实际上,卫星导航系统的测量与数据处理包含着两个完整过程:一是地面测控网对导航卫星星座轨道的测量与定轨处理,即卫星轨道测量数据处理;二是导航卫星星座对空间或地面目标(用户)的测量和导航定位处理,即目标轨迹测量数据处理。这两部分是完整的统一,只有精确地确定导航卫星的运行轨道,才能精确地提供用户目标的轨迹。因此,要提高卫星导航系统的测量与定位精度,就必须同时改进和提高这两部分的测量与数据处理技术。

在现有测量条件下,如何充分利用卫星导航系统的测量资源和发挥近代数据处理技术的作用,以进一步提高导航卫星轨道精度和导航定位精度,并扩大卫星导航系统的应用范围,这是卫星导航系统测控和应用领域十分关注的问题。

本书是作者根据近几年来工程任务的需要,为提高卫星导航系统轨道确定的精度而开展新方法研究的成果总结,特别是作者紧密地联系应用实际,系统地论述了差分技术、自校准技术及数据融合处理技术确定卫星轨道和用户目标轨迹的理论和方法。在测量数据中含有较大的系统误差成分,它成为影响卫星轨道和用户目标轨迹精度提高的重要因素,而充分地利用多测元信息和长弧段观测数据,并巧妙地应用差分技术与自校准技术相结合的数据融合处理技术,可以有效地消除和自校准测量数据中含有的系统误差,也极大地抑制和滤除测量数据的随机噪声,从而显著地提高测量数据与用户目标轨迹(或轨道)的精度。本书将近代数理论统计、函数逼近、数字滤波、非线性模型解算等理论与差分自校准融合技术密切结合,阐述了改进卫星导航系统轨道和导航定位的确定技术和方法,这与阐述常规的以实时导航定位方法为主的专著有着明显的区别,显得格外新颖,并使卫星导航系统的测量资源和定位方法得到更加充分的利用。另外,它也不同于专门叙述 GPS 卫星导航定位专著,本书的内容包含着卫星导航系统测量与数据处理两部分的方法和技术,保证了航天系统工程的完整性,使读者更全面、完整地了解卫星导航系统。目的是使卫星导航系统能够更好地、更广泛地应用和服务于人类活动的各领域。

全书共分 11 章。第 1 章,绪论;第 2 章,时间与坐标系统;第 3 章,参数估计和数字滤波;第 4 章,卫星导航系统测量原理;第 5 章,卫星导航测量数据预处理;第 6 章,卫星导航系统轨道确定方法;第 7 章,卫星导航定位和测速方法;第 8 章,EMBT 自校准技术定轨方法;第 9 章,约束自校准技术定轨方法;第 10 章,测元差分自校准技术;第 11 章,时序差分自校准技术定轨方法。其中,第 1、4 章由吴斌研究员撰写;第 7 章由吴斌和刘利生研究员共同撰

写;第2、3章和第5、6章由刘利生研究员和曹坤梅、刘元工程师共同撰写;第8~11章由刘利生研究员撰写;全书由刘利生研究员统稿。

本书的编写得到作者所在单位“北京跟踪与通信技术研究所”的全力支持和帮助,于志坚研究员、谢京稳研究员、朱武宣研究员对本书的编写和出版给予极大的关注和支持;吴正容高工和郭军海高工热情地关心和帮助本书编写,还为编者创造了良好的保障条件;王忠贵和王莉研究员给书稿提出了许多宝贵而有益的意见;李国强、马岩、程剑、李琼、刘建等同志为本书编写的组织、打印和外文翻译等做了大量的工作;国防工业出版社刘萍编辑为本书的修改和编辑付出了辛勤的劳动;特别是航天测控专家沈荣骏院士在百忙之中对本书进行了细致和认真的审阅,提出了许多有指导意义的建议,在此,谨对他们表示衷心的感谢。此外,本书的出版得到国防科技图书出版基金的赞助和鼓励,为本书的顺利出版创造了有利条件,为此,谨向国防科技图书出版基金评审委员会和国防工业出版社表示诚挚的感谢。

作者本着专著的特点和要求,对于一些人们熟悉的知识仅作一般或简单的叙述,而突出思想新颖、具有创新性的知识和内容。本书可供从事相关专业领域的研究人员学习和参考,也可供相关专业的高等院校师生阅读和参考。由于作者的理论和学术水平有限,本书难免有不足甚至错误之处,恳请读者批评指正。

编者

2006年7月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 卫星导航系统概述	1
1.1.1 卫星导航系统的发展情况	2
1.1.2 卫星导航系统的组成	4
1.1.3 国外导航卫星系统组成情况	6
1.2 卫星导航系统测量数据处理	10
1.2.1 卫星导航系统测量数据处理的重要地位	10
1.2.2 提高卫星导航测量数据处理技术的途径	13
第 2 章 时间与坐标系统	16
2.1 天体与大地测量基本知识	16
2.1.1 天体知识	16
2.1.2 大地测量知识	19
2.2 时间系统及转换	25
2.2.1 时间系统	25
2.2.2 时间系统转换	29
2.3 坐标系统及转换	31
2.3.1 地球坐标系	31
2.3.2 天球坐标系	35
2.3.3 坐标系转换	37
第 3 章 参数估计和数字滤波	47
3.1 最小二乘估计	47
3.1.1 高斯估计	47
3.1.2 马尔可夫估计	49
3.1.3 递推最小二乘估计	51

3.1.4	逐步回归最小二乘估计	53
3.1.5	线性约束最小二乘估计	56
3.1.6	非线性最小二乘估计	58
3.2	卡尔曼滤波	60
3.2.1	连续型和离散型的状态和观测模型	60
3.2.2	卡尔曼滤波器原理	61
3.2.3	广义卡尔曼滤波	65
第4章	卫星导航系统测量原理	69
4.1	伪码测距原理	69
4.1.1	无线电测量距离原理	69
4.1.2	无线电测量距离方法	70
4.1.3	距离测量的主要误差源	73
4.2	多普勒频率测速原理	74
4.2.1	无线电测量距离变化率原理	74
4.2.2	多普勒频率测速的类型	75
4.2.3	卫星导航系统测速原理	77
4.2.4	多普勒频率的工程测量	78
4.3	载波相位测量原理	79
4.3.1	载波相位测量距离原理	79
4.3.2	重建载波	81
4.3.3	载波相位工程测量	81
4.3.4	周跳的辨认与修复	82
第5章	卫星导航测量数据预处理	84
5.1	测量数据预处理流程	84
5.1.1	数据预处理目的和任务	84
5.1.2	预处理流程	86
5.2	测量数据预处理方法	87
5.2.1	轨道测量数据预处理方法	87
5.2.2	导航测量数据预处理方法	107
第6章	卫星导航系统轨道确定方法	118

6.1	开普勒定律与轨道根数	118
6.1.1	开普勒定律和二体运动	118
6.1.2	轨道要素的确定	120
6.1.3	无摄运动的运动方程和轨道根数	123
6.1.4	二体问题航天器轨道计算	130
6.2	初始轨道确定方法	132
6.2.1	状态向量计算轨道根数的方法	133
6.2.2	近似圆轨道初轨计算方法	134
6.3	精确轨道确定方法	138
6.3.1	二体运动的轨道运动方程	139
6.3.2	非递推处理精轨计算方法	140
6.3.3	递推处理精轨计算方法	142
6.3.4	受摄运动方程	144
6.3.5	轨道摄动模型	146
第7章	卫星导航定位和测速方法	150
7.1	导航定位测速的基本概念	150
7.1.1	绝对定位和相对定位	150
7.1.2	静态定位和动态定位	152
7.1.3	绝对测速和相对测速	152
7.2	静态目标导航定位方法	153
7.2.1	3R 测距定位法	153
7.2.2	重复测量静态定位方法	158
7.2.3	重复测量递推定位方法	160
7.3	伪距测量动态目标定位技术	162
7.3.1	伪距测量绝对定位技术	162
7.3.2	伪距测量相对定位技术	164
7.3.3	伪距测量求差定位技术	165
7.4	载波相位测量动态目标定位技术	170
7.4.1	载波相位测量绝对定位技术	170
7.4.2	载波相位测量相对定位技术	177
7.4.3	载波相位测量求差定位技术	178

7.5	多普勒频率测量动态目标测速技术	184
7.5.1	动态目标绝对测速法	184
7.5.2	动态目标求差测速法	186
第8章	EM BET 自校准技术定轨方法	189
8.1	EM BET 自校准技术原理	190
8.1.1	EM BET 自校准技术的数学原理	190
8.1.2	EM BET 的数学表达式	191
8.1.3	EM BET 自校准技术的使用条件	195
8.2	静态目标自校准定位方法	196
8.2.1	静态目标非递推定位方法	197
8.2.2	静态目标递推定位方法	200
8.3	动态目标自校准定位方法	203
8.3.1	伪距测量自校准定位技术	203
8.3.2	载波相位测量自校准技术	206
8.3.3	伪距和载波相位测量融合的自校准技术	208
8.4	动态目标自校准测速方法	212
8.4.1	多普勒频率测量的自校准求速方法	213
8.4.2	伪距和多普勒频率测量融合的自校准求速方法	215
第9章	约束自校准技术定轨方法	218
9.1	样条约束自校准技术定轨方法	218
9.1.1	样条多项式的描述	219
9.1.2	弹道样条约束自校准定轨方法	222
9.1.3	卫星导航测量的样条约束自校准定轨方法	228
9.2	轨道约束自校准技术定轨方法	233
9.2.1	轨道约束自校准技术的原理	233
9.2.2	受摄运动的轨道约束自校准定轨方法	239
9.2.3	卫星导航测量的轨道约束自校准定轨方法	243
9.2.4	解算轨道根数的轨道约束自校准技术	248
9.3	轨道约束自校准技术递推定轨方法	255

9.3.1	解算轨道状态参数的自校准递推方法	255
9.3.2	解算轨道根数的自校准递推方法	258
第 10 章	测元差分自校准技术	261
10.1	测元差分自校准技术定轨方法	262
10.1.1	测元的差分方程	262
10.1.2	测元差分自校准技术定轨方法	265
10.2	测元差分约束自校准技术定轨方法	269
10.2.1	测元差分样条约束自校准技术定轨方法	269
10.2.2	测元差分轨道约束自校准技术定轨方法	271
10.2.3	解算轨道根数的测元差分轨道约束自校准 技术	274
10.3	测元差分轨道约束自校准技术递推定轨方法	282
10.3.1	解算状态参数的轨道约束自校准技术递推 方法	282
10.3.2	解算轨道根数的轨道约束自校准技术递推 方法	284
第 11 章	时序差分自校准技术定轨方法	290
11.1	观测数据的时序差分方式	290
11.1.1	连续采样差分	291
11.1.2	间断采样差分	293
11.1.3	固定点增长差分	294
11.2	时序差分自校准技术定轨方法	296
11.2.1	连续采样差分的自校准技术定轨方法	297
11.2.2	固定点增长差分自校准技术定轨方法	302
11.3	时序差分样条约束自校准技术定轨方法	306
11.3.1	连续采样差分样条约束自校准技术定轨 方法	307
11.3.2	固定点增长差分样条约束自校准技术定轨 方法	309
11.4	时序差分轨道约束自校准技术定轨方法	310

11.4.1	解算轨道状态参数的自校准技术定轨方法	310
11.4.2	解算开普勒根数的自校准技术	318
11.4.3	解算第一类无奇点根数的自校准技术	323
11.5	时序差分轨道约束自校准技术递推定轨方法	327
11.5.1	轨道状态参数的轨道约束自校准技术递推 解算方法	327
11.5.2	开普勒根数轨道约束自校准技术递推解算 方法	331
11.5.3	第一类无奇点根数自校准技术递推解算 方法	335
参考文献		340

CONTENTS

Chapter 1 Overview	1
1.1 Summary of Navigation Satellite System	1
1.1.1 The Development of NSS	2
1.1.2 The Combination of NSS	4
1.1.3 Foreign Countries' NSS	6
1.2 Data Processing of NSS' Measurement	10
1.2.1 The Functions and the Position in NSS	10
1.2.2 The Improvement of Techniques	13
Chapter 2 Time and Coordinate System	16
2.1 The Base Knowledge of Celestial Bodies and Geodetic Measurement	16
2.1.1 Celestial Bodies	16
2.1.2 Geodetic Measurement	19
2.2 Time System and Its Conversion	25
2.2.1 Time System	25
2.2.2 Conversion of Time System	29
2.3 Coordinate System and Conversion	31
2.3.1 Earth Coordinate System	31
2.3.2 Celestial Sphere Coordinate System	35
2.3.3 Conversion of Coordinate Systems	37
Chapter 3 Estimation of Parameter and Digital Filtering ...	47
3.1 Least Square Estimation	47
3.1.1 Gauss Estimation	47
3.1.2 Markov Estimation	49

3.1.3	Recursive Least Square Estimation	51
3.1.4	Least Square Estimation of Stepwise Regression	53
3.1.5	Linear Restricted Least Square Estimation	56
3.1.6	Nonlinear Least Square Estimation	58
3.2	Kalman Filter	60
3.2.1	Continuous and Discrete State and Observation Model	60
3.2.2	Principle of Kalman Filter	61
3.2.3	Extended Kalman Filter	65
Chapter 4	Measurement Principle	69
4.1	Principle of Pseudo Code Ranging	69
4.1.1	Principle of Radio Ranging	69
4.1.2	Method of Radio Ranging	70
4.1.3	Principal Error Sources of Range Measuring	73
4.2	The Principle of Doppler Range Rate Measuring	74
4.2.1	Principle of Range Rate Measuring Using Radio ..	74
4.2.2	Type of Doppler Range Rate Measuring	75
4.2.3	Principle of Range Rate Measuring Using Navigation Satellite System	77
4.2.4	Engineering-oriented Doppler Frequency Measuring	78
4.3	The Principle of Carrier Wave Phase Measuring	79
4.3.1	Principle of Carrier Wave Phase Ranging	79
4.3.2	Regenerating The Carrier Phase	81
4.3.3	Engineering-oriented Carrier Phase Measuring	81
4.3.4	Identification and Restoration of Cycle Slip	82
Chapter 5	Navigation Satellite Measurement Data	
	Pre-Processing	84
5.1	Measurement Data Pre-Processing Flow	84
5.1.1	Target and Task of Data Pre-Processing	84
5.1.2	Pre-Processing Flow	86