

卫星导航定位新技术及 高精度数据处理方法

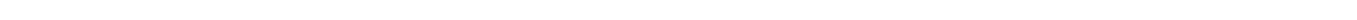
NEW TECHNIQUES AND PRECISE DATA PROCESSING METHODS
OF SATELLITE NAVIGATION AND POSITIONING

李征航 张小红 主编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



图书在版编目(CIP)数据

卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法/李征航,张小红主编. —武汉:武汉大学出版社,2009. 10

ISBN 978-7-307-07296-1

I. 卫… II. ①李… ②张… III. 卫星导航—全球定位系统(GPS)
—数据处理 IV. TN967.1 P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 154707 号

责任编辑:任翔 责任校对:黄添生 版式设计:马佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.whu.edu.cn)

印刷:武汉中远印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:18.75 字数:445千字 插页:1

版次:2009年10月第1版 2009年10月第1次印刷

ISBN 978-7-307-07296-1/P·162 定价:40.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

本书是一本研究生教材，供研究生在已学完“GPS 原理及应用”、“GPS 测量数据处理”等课程的基础上使用。编写本书的主要目的是为了使研究生能尽快了解在 GPS 测量和应用领域中一些热点问题的研究现状、基本原理及方法、发展趋势，以及有待进一步研究和解决的问题，使他们在掌握 GPS 定位基本原理的基础上，能够根据个人的研究方向深入地学习 GPS 的前沿技术和方法，在规定的时间内完成学位论文。

全书共分十章，各章之间较为独立，其顺序也是随机编排的。学生既可按章节依次学习，也可根据需要重点学习其中的部分章节。参加编写的老师均为各研究方向内的专家，对负责编写的内容有全面的了解，并作过较为深入的研究。书中所讨论的热点问题大多是编写者在博士论文中所研究的内容或承担的科研项目中的内容。

本书第一章由张小红教授负责编写，主要介绍了精密单点定位的国内外研究现状、基本原理和方法，详细讨论了精密单点定位中的误差改正模型和参数估计方法等关键技术，并结合实例分析了精密单点定位的精度，指出了有待进一步解决的问题。第二、三章由黄劲松副教授负责编写，周跳的探测与修复、整周模糊度的确定是利用载波相位观测值进行高精度定位的关键问题，希望研究生能在原有的基础上对上述问题有更加深入全面的了解。第四章由张小红教授负责编写，介绍了利用 GNSS 来测定电离层延迟并进而建立电离层延迟模型的相关问题。本章还对利用掩星层析方法来确定电子密度的垂直分布作了较全面的介绍。第五章分为三个部分，第一部分由王甫红副教授负责编写，介绍了以 GNSS 卫星作为动态基准点，利用星载 GNSS 接收机所测定的距离观测值来实时确定低轨卫星的轨道；第二、三部分由李征航教授和刘万科博士负责编写，第二部分介绍了利用星间观测值进行导航卫星的自主定轨问题，详细讨论了导航卫星自主定轨中由于基准缺失而导致的秩亏问题；第三部分介绍了星地联合定轨的问题。第六章由李征航教授负责编写，介绍了一种无需进行周跳探测与修复以及整周模糊度确定的基线向量解算方法。GAMIT 软件和 Bernese 软件是国际上广泛使用的两个高精度 GPS 数据处理软件，为了让从事 GPS 高精度数据的研究生能够熟悉和使用，本书第七章专门进行了介绍。这章由姜卫平教授和朱智勤老师负责编写，分别对这两个软件的特点、结构、使用方法及注意事项等进行了介绍。第八章由徐晓华副教授负责编写，对地基 GPS 气象学和空基 GPS 气象学的原理、方法和应用等问题作了较全面的介绍。第九章由唐卫明博士负责编写，对网络 RTK 技术的原理、方法等内容作了介绍。第十章由姚宜斌教授负责编写，介绍了利用卫星定位技术直接测定海拔高程的技术方法，着重讨论了 1 cm 精度的城市似大地水准面和 5cm 精度的省级似大地水准面的实现方法和关键技术。

全书由李征航教授和张小红教授负责内容的选取、作者的确定以及最后的统稿。但各

章内的技术性问题仍由相应的编写者负责。

本书虽然是作为研究生教材来编写的，但也可作为高等学校相关专业的教师和学生的参考书，还可供测绘、交通、航天、石油、地质、水利、农林等部门的技术人员参考。

虽然我们希望本书能够较全面地反映 GPS 测量与应用中的一些热点问题的研究现状和最新进展，但由于水平有限，未必如愿。谬误不当和疏漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

2009 年 3 月

目 录

第 1 章 精密单点定位技术及其应用	1
1.1 引言	1
1.2 精密单点定位技术的发展现状	2
1.3 精密单点定位的基本原理	3
1.3.1 数据预处理	4
1.3.2 参数估计方法	4
1.4 精密单点定位的主要误差源及其改正模型	6
1.4.1 与接收机和测站有关的误差	6
1.4.2 与卫星有关的误差	9
1.4.3 与信号传播有关的误差.....	12
1.4.4 精密单点定位数据处理策略与 IGS 产品的兼容性.....	15
1.5 精密单点定位的技术优势.....	15
1.6 精密单点定位中的坐标框架.....	16
1.7 精密单点定位软件、应用实例及结果分析.....	17
1.7.1 精密动态单点定位的内符合精度分析.....	19
1.7.2 精密动态单点定位同双差解和已知坐标的比较.....	21
1.8 精密单点定位技术的应用前景.....	23
1.9 精密单点定位技术有待解决的问题.....	24
第 2 章 周跳探测及处理	27
2.1 概述.....	27
2.1.1 载波相位测量.....	27
2.1.2 周跳.....	27
2.1.3 周跳的起因.....	28
2.1.4 周跳的特性.....	28
2.1.5 周跳的探测.....	29
2.1.6 周跳的处理.....	29
2.1.7 载波相位和码伪距观测方程.....	29
2.1.8 接收机钟差对周跳探测的影响.....	30
2.2 基于观测值变化规律的周跳探测.....	32
2.2.1 多项式拟合法.....	32

2.2.2	高次差法	33
2.3	基于多类观测值组合的周跳探测	34
2.3.1	单频码相组合法	34
2.3.2	双频码相组合法	34
2.3.3	电离层残差法	35
2.3.4	多普勒积分法	36
2.4	基于观测值估值残差的周跳探测	36
2.4.1	三差观测值残差法	36
2.4.2	历元间差分法	36
2.5	已知基线法	37
第3章	整周模糊度	39
3.1	概述	39
3.2	消除模糊度参数的方法	39
3.2.1	三差法	39
3.2.2	交换天线法	39
3.3	在坐标域内确定模糊度	40
3.3.1	已知基线法	40
3.3.2	模糊度函数法	40
3.4	在观测值域内确定模糊度	41
3.4.1	双频码相组合确定模糊度	41
3.4.2	三频码相组合确定模糊度	42
3.5	在模糊度域内确定模糊度	43
3.5.1	浮动解和固定解	43
3.5.2	确定固定解的一般过程	44
3.5.3	经典置信区间搜索法	45
3.5.4	最小二乘搜索方法	45
3.5.5	快速模糊度确定方法	46
3.5.6	最小二乘模糊度降相关平差方法	47
3.5.7	Cholesky 分解快速模糊度搜索	48
3.6	与电离层无关组合的模糊度固定	49
第4章	基于 GPS 观测值的电离层电子含量反演及建模	52
4.1	概述	52
4.2	GPS 观测反演电子含量的基本原理	55
4.3	几种典型的电离层单层模型	58
4.3.1	经典电离层模型	58
4.3.2	格网模型	59

4.3.3	多项式函数模型	60
4.3.4	球谐模型	60
4.3.5	全球电离层图 (GIM)	61
4.4	电离层层析成像 (GIT)	63
4.4.1	电离层层析成像技术	63
4.4.2	电离层层析成像基本原理	64
4.4.3	电离层层析建模方法	65
4.5	掩星 GPS 电离层探测	67
4.5.1	掩星 GPS 电离层探测概况	67
4.5.2	GPS 掩星探测电离层 Abel 积分反演原理	69
4.5.3	Abel 积分中的奇点问题	72
第 5 章	利用星间观测值进行卫星的自主定轨	78
5.1	星载 GPS 自主定轨	78
5.1.1	概述	78
5.1.2	卫星自主定轨的滤波算法	81
5.1.3	卫星自主定轨的动力学模型	87
5.1.4	基于星载 GPS 伪距观测值的自主定轨方法	96
5.2	导航卫星的自主定轨	101
5.2.1	前言	101
5.2.2	星间距离观测值的生成	104
5.2.3	数学模型和软件	105
5.2.4	算例	107
5.2.5	结论	113
5.3	导航卫星的星地联合定轨	113
5.3.1	前言	113
5.3.2	数学模型及软件	114
5.3.3	模拟计算的结果和分析	115
5.3.4	结论	121
第 6 章	无整周问题的基线解算新方法	125
6.1	前言	125
6.2	无整周问题的变形监测新模型	126
6.2.1	前言	126
6.2.2	提取变形量的新模型	126
6.2.3	几种特殊情况的处理方法	129
6.2.4	试验与检测结果	129
6.2.5	小结	133

6.3	一种解算 GPS 短基线向量的新方法	134
6.3.1	解算基线向量的新方法	134
6.3.2	实例与分析	136
6.3.3	结论和建议	138
6.4	无整周模糊度的中长基线解算方法	138
6.4.1	电离层延迟改正	138
6.4.2	算例	140
6.4.3	结论	144
第7章	GAMIT/GLOBK 软件和 Bernese 软件简介	146
7.1	GAMIT/GLOBK 软件简介	146
7.1.1	GAMIT/GLOBK 软件的发展历史及现状	146
7.1.2	GAMIT/GLOBK 软件的功能及组成	147
7.1.3	软件安装	154
7.1.4	GAMIT/GLOBK 数据处理流程	162
7.1.5	实例分析	166
7.2	Bernese 软件简介	172
7.2.1	发展历史	172
7.2.2	软件的主要功能和特点	172
7.2.3	程序结构和主要内容	173
7.2.4	软件界面介绍	174
7.2.5	数据处理流程概述	174
7.2.6	BERNESE 软件数据处理	176
第8章	GPS 气象学	202
8.1	研究的目的与意义	202
8.2	利用地基 GPS 观测探测大气水汽分布	203
8.2.1	研究现状	203
8.2.2	基本原理与方法	204
8.2.3	有待解决的问题	211
8.3	利用星载 GPS 掩星观测探测地球大气性质	211
8.3.1	GPS 无线电掩星技术的产生	211
8.3.2	GNSS 掩星任务的发展历史	212
8.3.3	研究现状	216
8.3.4	基本原理与方法	216
8.3.5	GPS 掩星观测数据处理流程	217
8.3.6	有待进一步解决的问题	230
8.4	利用山基与机载 GPS 掩星观测探测大气性质	231

8.4.1	研究现状	231
8.4.2	反演原理	232
第9章	网络 RTK 技术	240
9.1	概述	240
9.1.1	基本概念	240
9.1.2	网络 RTK 的基本思想	242
9.2	网络 RTK 定位中误差处理方法	243
9.3	网络 RTK 关键技术	245
9.3.1	基准站网模糊度确定	245
9.3.2	区域误差模型建立和流动站误差的计算	249
9.3.3	流动站双差模糊度的确定	252
9.3.4	大规模基准站组网	253
9.3.5	网络 RTK 系统完备性监测技术	255
9.4	网络 RTK 系统服务技术	256
9.4.1	虚拟参考站 (VRS) 技术	256
9.4.2	主辅站技术 (MAX)	258
9.4.3	区域改正参数 (FKP) 方法	259
9.4.4	综合误差内插法 (CBI)	259
9.5	网络 RTK 系统	260
9.5.1	系统组成和子系统定义	260
9.5.2	网络 RTK 系统的建设现状	260
9.5.3	基准站子系统	262
9.5.4	系统管理中心	263
9.5.5	用户数据中心子系统	264
9.5.6	数据传输子系统	265
9.5.7	用户应用子系统	266
9.6	网络 RTK 系统管理和定位服务软件	267
9.6.1	功能和组成	267
9.6.2	研究和发展现状	268
9.6.3	MPGPS	268
9.6.4	SPIDER	269
9.6.5	GPSNetwork	270
9.6.6	PowerNetwork	271
9.7	网络 RTK 技术的发展趋势	273
9.8	结语	273
第10章	基于卫星定位技术的现代高程测定	277

10.1	高程基准的定义及其转换	277
10.1.1	高程系统	277
10.1.2	利用 GPS 测定高程的实用方法	278
10.2	建立高精度区域似大地水准面的作用及意义	279
10.3	高精度区域似大地水准面确定的研究现状	281
10.3.1	1cm 精度的城市似大地水准面模型	282
10.3.2	5cm 精度的省级似大地水准面模型	282
10.3.3	跨海厘米级精度的高程基准传递	284
10.4	高精度区域似大地水准面的实现方法和关键技术	284
10.4.1	高精度 GPS/水准控制网的布网方案设计	285
10.4.2	厘米级重力似大地水准面确定	286
10.4.3	重力似大地水准面与 GPS 水准联合解	288
10.4.4	似大地水准面检核	288
10.5	高精度区域似大地水准面的应用及有待进一步解决的问题	289
10.5.1	高精度区域似大地水准面的应用	289
10.5.2	高精度区域似大地水准面的主要应用领域	290
10.5.3	本领域有待进一步解决的问题	291

第 1 章 精密单点定位技术及其应用

1.1 引言

全球卫星定位导航系统的出现不仅是定位、导航技术的巨大革命,也给测绘行业带来了前所未有的技术革新,它的出现推动了当今信息获取技术,特别是地球空间信息技术的革命。GPS 技术的发展已有近 30 年,其应用领域非常广泛,包括海、陆、空、天、地诸多方面。GPS 静态定位的应用已经很成熟,先后出现了 GAMIT、Bernese、GIPSY、EPOS 等几个高精度静态数据处理软件。GPS 静态定位的精度也已接近或达到 10^{-9} 。相比较而言,GPS 动态定位的应用范围更为广泛,有实时的动态定位,也有事后的动态定位;有绝对的动态定位,也有相对的动态定位;有基于纯伪距或相位平滑伪距的动态定位,也有基于相位观测值的动态定位。动态相对定位的作用距离可以从数米至上千公里,其定位的精度也从数十米精度的导航解(SA 关闭后)到厘米级精度的常规 RTK 技术及近些年迅速发展的网络 RTK(VRS)技术等。随着人们对地理空间数据需求的不断增长,航空动态测量技术(包括航空重力测量、航空摄影测量以及航空 LiDAR 和机载 InSAR 等)逐步得到越来越多人的关注,其高效的作业方式是地面常规测量手段无法相比的。在航空动态测量中,GPS 动态定位扮演着关键角色。目前,航空动态测量中的 GPS 定位一般都采用传统的双差模型,基于 OTF 等方法解算双差模糊度,进行动态基线处理。大部分的商用动态处理软件也都采用类似的方法。为了保证动态基线解算的可靠性和精度,进行航空测量时,往往要求地面布设有一定密度(30~50km)的 GPS 基准站,这将大大增加人力、物力和财力的投入。但是对于一些难以到达的地区,根本无法保证足够密度的基准站,甚至找不到近距离的基准站。此时的动态基线长度可能达几百公里,甚至上千公里,OTF 方法不再适用,必须寻求新的解决方法。

传统的标准单点定位(Standard Point Positioning, SPP)尽管只需使用一台 GPS 接收机就可以进行实时的导航定位,且在导航领域具有广泛的应用,但精度低(数米至数十米),满足不了许多高精度定位用户的精度要求;差分 GPS 定位(DGPS)技术虽然精度高,但需要布设至少一个基站,作业时,不仅受作用距离的限制,仪器成本和劳动成本都相应增加不少。精密单点定位技术(Precise Point Positioning, PPP)恰好集成了标准单点定位和差分定位的优点,它的出现改变了以往只能使用双差相位定位模式才能到达较高定位精度的现状,是 GPS 定位技术中继 RTK/网络 RTK 技术后的又一次技术革命。精密单点定位技术的出现为我们进行长距离高精度的事后动态定位提供了新的解决方案。

这里所说的精密单点定位指的是利用全球若干地面跟踪站的 GPS 观测数据计算出的

精密卫星轨道和卫星钟差,对单台 GPS 接收机所采集的相位和伪距观测值进行定位解算,获得高精度的待定点的 ITRF 框架坐标的一种定位方法。

1.2 精密单点定位技术的发展现状

精密单点定位是在 20 世纪 70 年代美国子午卫星时代针对 Doppler 精密单点定位提出的概念。GPS 卫星定位系统开发后,由于 C/A 码或 P 码的单点定位精度不高,80 年代中期就有人探索采用原始相位观测数据进行精密单点定位,即所谓的非差相位单点定位。但是,由于在定位估计模型中需要同时估计每一历元的卫星钟差、接收机钟差、对流层延迟、所见卫星的相位模糊度参数和测站的三维坐标,待估参数太多,估计方程是亏秩的,基本无法提出解决方案,问题的高难度使得这一方法在 80 年代后期暂时搁置了起来。90 年代中期,国际 GPS 地球动力学服务局(IGS)开始向全球提供精密星历和精密卫星钟差产品,之后,还提供精度等级不同的事后、快速和预报 3 类精密星历和相应的 15min、5min 间隔的精密卫星钟差产品,这就为非差相位精密单点定位提供了新的解决思路。1997 年,美国喷气推进实验室(JPL)的研究人员 Zumberge 等提出了利用 GIPSY 软件和 IGS 精密星历,同时利用一个 GPS 跟踪网的数据确定 5s 间隔的卫星钟差,在单站定位方程式中,只估计测站对流层参数、接收机钟差和测站三维坐标的精密单点定位研究思路,并取得了 24h 连续静态定位精度达 1~2cm、事后单历元动态定位精度达 2.3~3.5dm 的试验结果,用实测数据证明了利用非差相位观测值进行精密单点定位是完全可行的(Zumberge, 1997)。NRCan 的 Heroux 等人也研究了非差精密单点定位方法,他们处理长时间静态观测数据的结果精度也达到厘米级(Heroux 等, 2001)。德国科学院地学研究中心(GFZ)和加拿大的大地测量局(GSD)也开发了相应的精密单点定位软件系统,取得了同样精度的静态和动态定位结果。美国 OSU 的 Han 等人也进行过类似的研究,他们在固定卫星精密轨道的基础上,利用 IGS 站的观测资料先估计出 GPS 卫星的钟差,然后再利用估计出的精密钟差及已有的精密卫星轨道求解测站的绝对位置坐标。Calgary 大学的高扬博士先后带领了数名博士和硕士对精密单点定位的理论和算法进行了深入研究,并开发了相应的精密单点定位解算软件。著名的 GPS 数据处理软件 Bernese 4.2 版本中也增加了用非差相位观测值进行精密单点定位处理的功能(Hugentobler 等, 2001)。

在精密单点动态定位研究方面,JPL 的 Muellerschoen 等人提出了全球实时精密单点定位技术。实验结果表明,在全球范围内,可望实现水平方向定位精度为 10~20cm 的实时动态精密单点定位(Muellerschoen 等, 2000)。NavCom 的 Hatch 提出了利用 JPL 实时定轨软件 RTG 实现全球 RTK(GLOBAL RTK)计划,通过因特网和地球静止通信卫星向全球用户发送精密星历和精密卫星钟差修正数据,利用这些修正数据,实现 2~4dm 的实时动态定位精度,事后静态定位精度可达 2~4cm(Hatch, 2001)。2007 年前后,国外已有数家公司推出了精密单点定位的数据处理软件,主要包括:GrafNav7.8 版本在原来差分定位的基础上增加了精密单点定位的解算模块;加拿大 APPLANiX 公司推出的 POSpac AIR 软件也具有精密单点定位的能力;挪威 TerraTec 公司推出的 TerraPOS 软件也是基于精密单点定位模式开发出的动态定位软件;瑞士 Leica 公司也推出了自己的精

密动态单点定位软件 IPAS PPP。

国内 GPS 非差相位精密单点定位的研究起步虽然稍晚,但目前的研究应用却与国际当前水平相当。2000 年,上海天文台在《测绘学报》上发表文章,阐述了他们应用 JPL 的 GIPSY 软件进行类似精密单点定位原理的小区域网站的静态定位试验,数据处理结果表明也可达到 cm 级定位精度。武汉大学的叶世榕博士对非差相位精密单点定位技术进行了较为深入的研究,并以此为主要内容完成其博士论文。随后,武汉大学的张小红教授等经过数年对 GPS 精密单点定位理论与方法的深入研究,在国内率先开发出了高精度的精密单点定位数据处理商业化软件 TriP,软件在算法设计和定位精度方面取得突破, TriP 软件的定位解算精度和可靠性等方面已经和国际同类软件水平相当,是国际上目前为数不多的几个精密单点定位软件之一,已在国内相关部门推广使用,应用于航空动态测量和地面像控静态测量等领域。香港理工大学的陈武博士等也对精密单点定位技术进行了研究,并将其应用于 GPS 浮标来监测海面变化。此外,同济大学、中国科学院测量与地球物理研究所等机构也开展了精密单点定位的研究工作,取得了一定的研究成果。

最近几年,在上述双频精密单点定位研究成果的基础上,已有不少学者开始研究单频精密单点定位的模型、算法,并拓展其应用。加拿大 Calgary 大学的高扬博士对单频精密单点定位进行了一定的研究,取得了一些试验结果;荷兰的 Le 和 Tiberius 利用单频接收机取得了水平 0.5m、高程 1m 精度的单频精密单点定位试验结果(Le 和 Tiberius, 2007);武汉大学的邵贺硕士对单频精密单点定位进行了较为深入的研究,取得了米级精度的事后单频精密单点定位的试验结果(2007)。总体来讲,目前,单频精密单点定位还有若干关键问题没有得到很好的解决,其研究与应用还不太成熟。

本书将主要介绍双频精密单点定位的基本理论和方法,对于单频精密单点定位,除了数据预处理方法和电离层延迟改正处理方法有所不同外,基本上与双频精密单点定位的原理类似,不作专门论述,感兴趣的读者可参阅有关文献。

1.3 精密单点定位的基本原理

GPS 精密单点定位一般是采用单台双频 GPS 接收机,利用 IGS 提供的精密星历和卫星钟差,基于载波相位观测值进行的高精度定位。观测值中的电离层延迟误差通过双频信号组合消除,对流层延迟误差通过引入未知参数进行估计。其观测方程如下:

$$l_p = \rho + c(dt_r - dT^i) + M \cdot zpd + \varepsilon_p \quad (1-1)$$

$$l_\phi = \rho + c(dt_r - dT^i) + a^i + M \cdot zpd + \varepsilon_\phi \quad (1-2)$$

式中, l_p 为无电离层伪距组合观测值; l_ϕ 为无电离层载波相位组合观测值(等效距离); ρ 为测站 (X_r, Y_r, Z_r) 与 GPS 卫星 (X^i, Y^i, Z^i) 间的几何距离; c 为光速; dt_r 为 GPS 接收机钟差; dT^i 为 GPS 卫星 i 的钟差; a^i 为无电离层组合模糊度(等效距离,不具有整数特性); M 为投影函数; zpd 为天顶方向对流层延迟; ε_p 和 ε_ϕ 分别为两种组合观测值的多路径误差和观测噪声。

将 l_p 、 l_ϕ 视为观测值,测站坐标、接收机钟差、无电离层组合模糊度及对流层天顶延迟参数视为未知数 X ,在未知数近似值 X^0 处对式(1-1)和式(1-2)进行级数展开,保留至一次

项,其具体的展开系数的表达式,读者可参阅李征航等编写的《GPS 测量原理与数据处理》,误差方程矩阵形式为:

$$V = Ax - l, \quad P \quad (1-3)$$

式中, V 为观测值残差向量; A 为设计矩阵; x 为未知数增量向量; l 为常数向量; P 为观测值权矩阵。

式(1-3)中, A 和 l 的计算用到的 GPS 卫星钟差和轨道参数需采用 IGS 事后精密钟差和轨道产品内插求得。

精密单点定位计算的主要过程包括:观测数据的预处理;精密星历和精密卫星钟差拟合成轨道多项式(精密单点定位中,要求卫星轨道精度达到 cm 级水平,卫星钟差改正精度达到亚 ns 级水平);各项误差的模型改正及参数估计等。下面简要介绍精密单点定位的数据预处理方法和参数估计方法,各项误差的模型改正将在下一节详细介绍,关于精密卫星轨道及卫星钟差的内插方法,读者可参阅李征航等编写的《GPS 测量原理与数据处理》。

1.3.1 数据预处理

精密单点定位中,数据预处理的好坏直接决定其定位精度及可靠性,而数据预处理的关键就是要准确可靠地探测相位观测值中出现的周跳。非差相位观测值的周跳探测较双差相位观测值的周跳探测难,有些双差模式中使用的周跳探测方法在精密单点定位模式中不再适用。笔者曾测试了不少非差相位数据周跳的探测方法,结果表明 TurboEdit 方法(Blewitt, 1990)比较有效。所以在吸收 TurboEdit 方法的基础上,对算法进行了部分改进,对于 GPS 相位观测数据中出现的小周跳或 L_1 和 L_2 上出现相同周数的周跳的情形,改进的方法也能有效地探测出来。鉴于非差相位数据中周跳的修复比探测更为困难,甚至不可能准确修复,所以数据预处理只探测周跳,而不修复出现的周跳,对于每个出现周跳的地方,增加一个新的模糊度参数。若某卫星相邻两个周跳间的有效弧段小于预先设定的阈值(阈值的大小取决于数据的采样率),则剔除该短弧段的观测数据。

1.3.2 参数估计方法

在静态精密单点定位中,接收机天线的位置固定不变,接收机钟差的每个历元都在变化。因此,除了相位模糊度参数和天顶对流层延迟参数(zpd)外,静态定位中,每个历元还有一个钟差参数必须估计。举例来说,如果某个静态观测时段接收机以 1s 的采样率采集了 1h(共 3600 历元)的 GPS 数据,那么要解求的总未知数个数是:

- a) 3 个坐标参数;
- b) 3600×1 (接收机钟差) = 3600 个钟差参数;
- c) $N(N \geq 4)$ 个模糊度参数;
- d) 至少一个天顶对流层延迟参数。

在动态定位中,接收机天线位置的每个历元都在变化,接收机钟差的每个历元也不一样。因此,除了相位模糊度参数和天顶对流层延迟参数(zpd)外,动态定位中,每个历元还有 4 个必须估计的参数(3 个位置参数和 1 个钟差参数)。举例来说,如果某个动态接收机以 1s 的采样率采集了 1h(共 3600 历元)的动态 GPS 数据,那么要解求的总未知数个数是:

- a) 3600×4 (3 个站坐标 + 1 个接收机钟差) = 14400 个 (站坐标和钟差参数);
- b) N ($N \geq 4$) 个模糊度参数;
- c) 至少一个天顶对流层延迟参数。

目前,精密单点定位的参数估计方法主要有两种:一种是 Kalman 滤波。Kalman 滤波方法在动态定位中的应用较为广泛,计算效率高,但是采用 Kalman 滤波方法,如果先验信息给得不合适,滤波往往容易造成发散,定位结果会严重偏离真值。另一种就是最小二乘法,在最小二乘法中,又有两种估计方法,下面主要介绍最小二乘估计方法。

1. 序贯最小二乘估计方法

设待估参数作为带权观测值,并设其先验权矩阵为 P^0 ,则由式(1-3)按最小二乘平差方法可求解未知数为:

$$x = (P^0 + A^T P A)^{-1} A^T P l \quad (1-4)$$

由此可得到被估参数为:

$$X = X^0 + x \quad (1-5)$$

未知数的协因数阵为:

$$Q_{xx} = (P^0 + A^T P A)^{-1} \quad (1-6)$$

式(1-4)的求解采用的是一种高效序贯滤波算法,在迭代过程中,需要考虑相邻观测历元间的参数在状态空间的变化情况,并用合适的随机过程来自适应地更新参数的权矩阵。若用下标 i 表示历元号,在序贯滤波中,将上一历元参数的估计值作为当前历元的初始值,即 $X_i^0 = X_{i-1}$ 。

设第 i 历元和第 $i-1$ 历元间隔 Δt ,那么第 i 历元参数的先验权矩阵为:

$$P_i^0 = (Q_{xx} + Q_{\Delta t})^{-1} \quad (1-7)$$

式中,

$$Q_{\Delta t} = \begin{bmatrix} q(x)_{\Delta t} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q(y)_{\Delta t} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q(z)_{\Delta t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q(dt)_{\Delta t} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q(z)_{\Delta t} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q(N^j(j=1, \dots, n))_{\Delta t} \end{bmatrix}$$

在没有发生周跳的情况下,模糊度参数是常数,故 $q(N^j(j=1, \dots, n))_{\Delta t} = 0$;对于 $q(x)_{\Delta t}$ 、 $q(y)_{\Delta t}$ 、 $q(z)_{\Delta t}$,应根据测站的运动情况来确定。接收机钟差的过程噪声通常视为白噪声,对流层天顶延迟误差可用随机游走方法进行估计。

2. 最小二乘参数消元法

对上述 1h 的动态 GPS 数据进行精密单点定位解算,待估参数将超过 14400 个。可以想象,使用常规的最小二乘方法,用 PC 机要完成如此大型的法方程组成并求解几乎无能为力。即使我们采用相当优化的矩阵存取和矩阵运算算法,耗时也会相当长,可能是以天来计算。若采用大型工作站计算就另当别论了。但大部分 GPS 用户还是习惯或喜欢使用 PC 机来处理 GPS 数据。而经典最小二乘中的参数消元法可以极大地提高法方程的解算效

率。其核心思想是分类处理不同的参数,在 GPS 精密单点定位的数学模型中有四类参数:测站的位置、接收机钟差、对流层天顶延迟以及组合后的相位模糊度参数。动态定位中,站坐标参数随着时间而发生变化,这主要取决于观测时接收机天线的运动状态,如有些情况下,站坐标变化数米每秒;有些情况,接收机天线位置变化每秒达几公里(如低轨卫星上 GPS 接收机)。接收机钟的漂移主要取决于钟的质量,如石英钟的频率稳定性约为 10^{-10} 。相对来说,天顶对流层延迟参数在短时间内的变化量相对较小,一般为每小时几厘米。而对于组合模糊度参数,若不发生周跳,组合模糊度参数为常数。因此,对于随历元时间变化的参数,可以通过消元的办法将这些参数先从法方程中消去,只计算不随历元时间变化的参数,然后将计算结果回代到原观测方程,再逐历元计算随历元时间变化的参数,这样就大大降低了法矩阵的维数。

1.4 精密单点定位的主要误差源及其改正模型

在精密单点定位中,影响其定位结果的主要误差源可以分为三类:①与接收机和测站有关的误差,主要包括接收机钟差、接收机天线相位中心偏差、地球潮汐、地球自转等;②与卫星有关的误差,主要包括卫星轨道误差、卫星钟误差、卫星天线相位中心偏差、相对论效应、相位缠绕(Phase Wind-up);③与信号传播路径有关的误差,主要包括对流层延迟误差、电离层延迟误差和多路径效应。

GPS 精密单点定位中使用非差观测值,没有组成差分观测值,所以 GPS 定位中的所有误差项都必须考虑。目前主要通过两种途径来解决:

(1)对于能精确模型化的误差,采用模型改正,如卫星天线相位中心的改正、各种潮汐的影响、相对论效应等都可以采用现有的模型精确改正。

(2)对于不能精确模型化的误差,加参数进行估计或使用组合观测值。如对流层天顶湿延迟,目前还难以用模型精确模拟,则加参数对其进行估计;而电离层延迟误差,可采用双频组合观测值来消除低阶项。

1.4.1 与接收机和测站有关的误差

1. 接收机钟差

接收机钟差可定义为 GPS 接收机钟面时与标准 GPS 时之间的差值,主要由接收机内晶体振荡器的频率漂移引起。GPS 接收机一般采用石英钟,其稳定度约为 10^{-9} 。在精密单点定位中,一般不组成差分观测值,而是直接利用非差观测值,所以无法利用星间差分的方法消除接收机钟差的影响。在精密单点定位数据处理中,接收机钟差对定位的影响包括两个方面:①接收机钟差对计算卫星坐标的影响。假设卫星的运动速度为 4km,不同量级的接收机钟差所引起的卫星位置的误差见表 1-1。由表 1-1 可知,只要保证接收机钟差的改正精度优于 $1\mu\text{s}$,在精密单点定位中就可以满足要求。利用标准单点定位计算确定的接收机钟差,精度一般都优于 100ns,因此在精密单点定位解算中,可以先利用标准单点定位求出接收机钟差的概略值,以消除此项影响。②由接收机钟差引起的站星距离观测值(伪距和相位)误差,所引起的误差大小见表 1-2。显然,用标准单点定位解算得到的钟差误差