

山东省中青年科学家奖励基金 ( BS2010SF018 ) 资助

国家自然科学基金 ( 60972052 ) 资助

# GPS

## 快速精密定位数据处理

郭秋英 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

山东省中青年科学家奖励基金(BS2010SF018)资助  
国家自然科学基金(60972052)资助

# GPS 快速精密定位数据处理

郭秋英 著

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书系统分析和总结了 GPS 快速精密定位的研究现状与存在的问题,将小波变换、遗传算法等现代数学知识应用到 GPS 快速精密定位数据处理中。系统总结和研究了 GPS 快速精密定位随机模型的精化方法,研究了适用于 GPS 载波相位双差观测测量的考虑时间相关性的随机模型估计的方法。探讨了 GPS 快速定位载波相位双差观测方程和法方程的病态性特点及其对基线及模糊度浮点解的影响规律;研究了遗传算法在 GPS 快速定位病态方程解算中的应用,包括适应度函数的设计、参数搜索范围的确定以及遗传算法基本运行参数的合理设置;给出了利用遗传算法得到模糊度浮点解,应用有偏估计的均方误差矩阵确定模糊度的搜索范围,结合 LAMBDA 方法快速确定整周模糊度的方法。研究了将小波多分辨率分析用于 GPS 快速精密定位中短基线的数据处理方法,探讨了最优小波基函数的选取及小波分解尺度问题,并给出了计算实例。

本书可供从事测绘科学与技术学科的教学、科研人员以及相关专业的高年级本科生和研究生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

GPS 快速精密定位数据处理/郭秋英著. —徐州:

中国矿业大学出版社,2011.4

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1039 - 5

I. ①G… II. ①郭… III. ①全球定位系统—数据处理—研究 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 068424 号

书 名 GPS 快速精密定位数据处理  
著 者 郭秋英  
责任编辑 褚建萍  
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)  
营销热线 (0516)83885307 83884995  
出版服务 (0516)83885767 83884920  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司  
开 本 787×960 1/16 印张 9.75 字数 192 千字  
版次印次 2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷  
定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

GPS 快速精密定位具有广阔的应用前景,也是当前 GPS 测量中研究的热点问题之一,它涉及 GPS 载波相位观测量的随机模型的精化、GPS 快速定位病态方程的参数估计方法、整周模糊度的搜索、整周模糊度的检验等诸多理论方面的问题,因此对 GPS 快速精密定位数据处理的研究不但具有重要的理论意义,而且具有重要的实用价值。

GPS 快速精密定位数据处理主要是基于整数最小二乘理论,参数估计主要通过 4 个步骤实现:基线及模糊度浮点解、整周模糊度搜索、整周模糊度确认以及坐标参数(基线)固定解。近年来,对 GPS 快速精密及动态精密定位的数据处理的研究,主要针对以下三个方面:一是针对 GPS 快速定位病态方程的有效处理,提高模糊度浮点解的精度;二是针对整周模糊度的有效搜索方法;三是针对整周模糊度的有效检验方法。

本书共分 7 章:第 1 章介绍了 GPS 快速精密定位的研究背景及意义,总结和分析了 GPS 快速精密定位数据处理的研究现状、发展趋势以及不足之处。第 2 章总结了 GPS 快速精密定位数据处理的基本过程;介绍了 GPS 载波相位基本观测量及其线性组合方式;详细分析和归纳了 GPS 快速精密定位的函数模型及随机模型;总结和分析了常用的整周模糊度搜索方法及模糊度检验方法;介绍了 GPS 精密相对定位的误差来源及处理方法。第 3 章介绍了 GPS 精密定位的随机模型研究现状;系统总结了 GPS 精密数据处理中随机模型的精化方法;探讨了最小范数二次无偏估计法及迭代随机模型估计法在 GPS 快速精密定位的随机模型估计中的应用;研究了适用于 GPS 载波相位双差观测量的随机模型估计的新方法。第 4 章分析和总结了目前测量数据处理中常用的几种病态问题的衡量方法;探讨了 GPS 快速定位载波相位双差观测量方程和法方程的病态性特点;研究了不同观测时间的 GPS 快速定位方程的病态性程度,及其对基线及模糊度浮点解的影响规律;同时根据实例分析了两种模糊度检验指标与观测时间的关系。第 5 章系统分析了截断奇异值解的扰动性、岭估计及 TIKHONOV 正则化方法的性质;介绍了岭参数、TIKHONOV 正则化矩阵及正则化参数的确定方法;针对 GPS 快速定位方程的病态性特点,探讨了截断奇异值法、岭估计和 TIKHONOV 正则化方法在仅观测几个历元的 GPS 快速定位病态方程中的应用。第 6 章探讨了遗传算法在 GPS 快速定位病态方程解算中的应用,包括适应度函数的设计和初始种群范围的设定,

以及遗传算法的基本运行参数对 GPS 快速定位病态方程解算精度的影响;提出了利用遗传算法得到模糊度浮点解,应用有偏估计的均方误差矩阵确定模糊度的搜索范围,结合 LAMBDA 方法快速确定整周模糊度的方法。第 7 章探讨了 GPS 载波相位双差观测量的小波分解特点,研究了 GPS 快速精密定位数据处理中小波基函数选取问题;通过研究不同小波基的基本性质,选取了四种常用小波基函数对 GPS 快速定位的实例数据进行了计算,并通过与标准值的对比分析选定了适用于 GPS 数据处理的多尺度分析方法的最优小波基。

在本书的写作和研究过程中,得到了中国矿业大学(北京)胡振琪教授的悉心指导和帮助,在此表示衷心的感谢!同时感谢北京林业大学的冯仲科教授、中国矿业大学(北京)的郭达志教授和崔希民教授、中国地质大学(北京)的付梅臣教授,为本书的撰写提出了宝贵的意见。作者还要感谢中国矿业大学出版社的褚建萍老师对本书进行了认真细致的编辑加工。

希望本书能对从事测绘工程以及相关专业的教学科研人员及工程技术人员有所启发、有所帮助。GPS 精密定位数据处理涉及的理论知识广,难度较大,鉴于作者水平有限,书中不可避免地存在一些不足和错误,恳请读者批评指正,以期今后改正。

著 者

2011 年 1 月

## 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 GPS 快速精密定位研究评述 .....	1
1.2 国内外研究现状及存在的不足 .....	4
<b>2 GPS 快速精密定位的数学模型及误差分析</b> .....	9
2.1 概述 .....	9
2.2 GPS 快速精密定位的数学模型 .....	10
2.3 基线及模糊度浮点解 .....	19
2.4 整周模糊度的搜索 .....	20
2.5 整周模糊度的确认 .....	23
2.6 基线固定解 .....	25
2.7 影响 GPS 精密定位精度的因素及处理方法 .....	25
2.8 本章小节 .....	29
<b>3 GPS 快速精密定位的随机模型的精化</b> .....	31
3.1 引言 .....	31
3.2 GPS 基线解算的标准随机模型 .....	33
3.3 随机模型误差对基线和模糊度浮点解及其精度信息的影响 .....	35
3.4 GPS 基线解算的随机模型的精化 .....	37
3.5 随机模型的最小范数二次无偏估计(MINQUE)法 .....	39
3.6 迭代随机模型估计法 .....	42
3.7 GPS 快速精密定位随机模型估计的新方法 .....	44
3.8 算例及分析 .....	49
3.9 本章小结 .....	54
<b>4 GPS 快速定位方程的病态性及其对基线及模糊度解的影响</b> .....	56
4.1 测量数据处理中的病态性问题 .....	56
4.2 病态问题的衡量方法 .....	57
4.3 GPS 快速定位方程的病态性特点 .....	61

4.4	GPS 快速定位方程的病态性对基线及模糊度解的影响 .....	67
4.5	算例分析 .....	68
4.6	本章小结 .....	75
<b>5</b>	<b>GPS 快速定位病态方程解法研究 .....</b>	<b>77</b>
5.1	引言 .....	77
5.2	病态观测方程的直接解法 .....	78
5.3	岭估计 .....	81
5.4	TIKHONOV 正则化方法 .....	85
5.5	GPS 快速定位病态方程的解算方法研究 .....	86
5.6	本章小节 .....	93
<b>6</b>	<b>基于遗传算法的 GPS 快速定位病态方程的解算 .....</b>	<b>94</b>
6.1	引言 .....	94
6.2	遗传算法简介 .....	95
6.3	遗传算法的基本操作算子 .....	97
6.4	遗传算法的运行参数 .....	99
6.5	基于遗传算法的 GPS 病态方程的解算 .....	100
6.6	算例分析 .....	108
6.7	遗传算法结合 LAMBDA 方法固定模糊度 .....	116
6.8	本章小结 .....	119
<b>7</b>	<b>小波变换在 GPS 快速精密定位数据处理中的应用 .....</b>	<b>120</b>
7.1	引言 .....	120
7.2	小波变换的基本原理 .....	121
7.3	小波分析用于信号降噪处理 .....	125
7.4	基于小波变换的 GPS 快速精密定位数据处理 .....	127
7.5	基于不同小波基和不同分解尺度的算例分析 .....	130
7.6	本章小结 .....	136
	<b>参考文献 .....</b>	<b>137</b>

# 1 绪 论

GPS 自 20 世纪 90 年代初正式投入运行以来, GPS 定位理论和定位技术得到迅猛发展, 应用领域不断扩大, 目前 GPS 已广泛应用于导航与监控、大地测量、工程测量、地形测量、变形监测、航空摄影测量、GIS 数据采集、精细农业、休闲旅游等许多领域<sup>[1-3]</sup>。随着 GPS 现代化进程的加快, GPS 的应用更加广泛, 人们对 GPS 的定位精度和速度也提出了更高的要求。GPS 测量大体沿两个方向发展, 一是以高精度为主要目标; 一是以高效率为主要目标。近年来在高精度方面的发展, 除 GPS 接收机性能和接收天线的改进外, 数据处理方法和软件的改进也起了重要的作用<sup>[1]</sup>。目前, 精密定位技术已经广泛地渗透到了经济建设和科学技术的许多领域, 尤其对经典大地测量学的各个方面产生了极其深刻的影响。

## 1.1 GPS 快速精密定位研究评述

利用 GPS 进行定位的方法有多种; 若按参考点的不同位置分为绝对定位和相对定位; 若按 GPS 接收机在观测中所处的状态又分为静态定位和动态定位。而在绝对定位和相对定位中, 又都包含静态定位和动态定位<sup>[2]</sup>。由于 GPS 绝对定位精度较低, 目前在精密定位中, 主要采用 GPS 静态相对定位。为了提高作业效率, 又发展了一些快速定位方法, 如快速静态相对定位、准动态相对定位等。利用 GPS 定位, 无论采用上述何种定位方法, 都是通过观测 GPS 卫星获得某种观测量, 并根据已知的卫星瞬时坐标来实现定位的。

GPS 卫星信号含有多种定位信息, 根据不同的要求, 可以从中获得不同的观测量, 其中广泛采用的基本观测量主要有两种, 即码相位观测量和载波相位观测量。码相位观测量分为 C/A 码伪距和 P 码伪距, C/A 码是粗码, 测量精度较低, 其观测精度约为 2.9 m, 一般仅用于导航、野外勘察等定位精度要求不高的领域; P 码是精码, 其观测精度约为 0.29 m, 但 P 码是美国军用保密码。载波相位观测, 是测量接收机接收到的 GPS 载波信号, 与接收机产生的参考载波信号之间的相位差, 乘以载波波长, 便得 GPS 卫星至接收机之间的几何距离。GPS 卫星发射两个频率的载波信号  $L_1$  和  $L_2$ , 频率分别为 1 575.42 MHz 和 1 227.60 MHz。由于载波的波长远小于码的波长, 所以载波相位观测量的精度远比码相位观测量的精度高, 例如, 对于载波  $L_1$ , 其波长为 19.03 cm, 其相应的观测误差约为 2.0 mm; 对于



载波  $L_2$ , 其波长为 24.42 cm, 其相应的观测误差约为 2.5 mm。

要获得厘米级甚至更高的精度, 必须采用载波相位观测量。但是 GPS 接收机仅能接收载波相位的小数部分及卫星锁定后的整周计数, 初始载波相位整数部分是一个未知数, 称为整周模糊度 (Ambiguity), 如图 1-1 所示。它是与接收机、卫星和起始观测历元有关的未知量, 具有整数性质。在观测过程中, 只要对卫星的跟踪不中断, 它将保持为常量。一旦整周模糊度正确确定, 载波相位观测值即转变为较精确的距离观测值, 由此可以求出精确的测站坐标。因此, 以载波相位作为观测量进行精密定位, 整周模糊度的确定是关键。一般将整周模糊度作为待定量, 与其他未知参数 (如测站坐标) 在数据处理中一并求解。

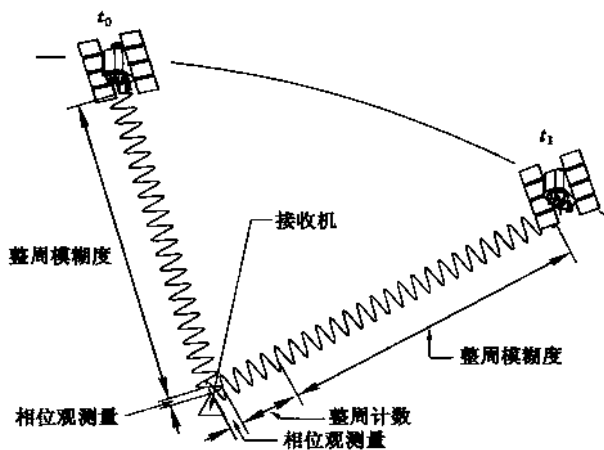


图 1-1 整周模糊度<sup>[3]</sup>

由于载波相位观测量的站星双差模型能消除卫星钟差和接收机钟差的影响, 并能明显减弱诸如卫星轨道误差、大气折射误差等系统性误差的影响, 且双差模糊度表现为整数特性, 因此, 在精密定位中, 一般采用载波相位双差模型来处理。利用双差模型进行精密相对定位, 双差模糊度的确定仍是关键, 双差模糊度一般仍称为整周模糊度。

从理论上讲, 对于 GPS 相对定位的双差模型, 当同步观测的卫星数大于或等于 4 颗时, 用少数几个甚至 2 个观测历元即可进行参数最小二乘估计, 求出双差模糊度及基线向量; 但是在少数观测历元这样短的时间间隔内, 所测卫星的几何分布变化很小, 因而使观测站至卫星间的距离变化也很小, 也就是说同一卫星在不同历元所建立的误差方程的系数和常数项几乎相同, 这样便降低了不同历元观测结果的作用, 造成所得观测量间具有较强的相关性, 用这些观测量进行最小二乘解算的

法方程是严重病态的,法方程的求逆不稳定,对误差的敏感性增强,因此,会影响解的可靠性。

为了可靠地确定双差模糊度,从而得到精度较高的基线向量,最早的解决方法是增加观测时间。根据情况,一般需要长达 1~3 h 的观测时间,使站星几何图形发生较大的变化,观测量间的相关性减小,应用最小二乘原理得到的法方程是良态的,可以得到较可靠的模糊度浮点解,通过简单取整即可得到模糊度整数解,将其作为已知数代入原观测方程,重新解算出其他的未知参数。这种静态 GPS 定位方法虽然精度很高,但是效率较低,显然在 GPS 快速定位和动态定位问题中是不现实的。

为了提高 GPS 载波相位测量速度,近年来发展了基于模糊度快速解算的 GPS 快速静态相对定位、准动态相对定位、动态相对定位、实时动态测量(RTK)等模式,在工程测量、地形图测绘、GIS 数据采集等领域得到了广泛的应用,尤其是 GPS RTK 测量技术,目前应用最为广泛。该技术是以载波相位观测量为基础,根据 GPS 相对定位理论与数据传输技术相结合实时求解移动站相对基准站的位置及其精度信息。

以上 GPS 快速及动态定位模式一般需要 GPS 接收机在初始点上静态观测一段时间,从而正确确定出整周模糊度,该过程称为初始化。然后在保持 GPS 接收机对卫星的连续跟踪,整周模糊度保持不变的条件下,GPS 接收机移动到未知点上只需观测较短的时间即可获得较高的定位精度,从本质上讲仍属于静态相对定位法;如果 GPS 接收机在移动过程中,一旦卫星发生失锁,整周模糊度发生了变化,就需要重新进行初始化,在出现新卫星时也出现了新的模糊度,也需要初始化,这无疑会降低定位速度。因此快速而可靠地确定整周模糊度是 GPS 快速及动态精密定位的关键。整周模糊度解算的效率与可靠性、基线的长度、采用的数学模型及数据处理方法等有关。在观测条件相同的条件下,通过精化基线解算的数学模型、研究有效的数据处理方法以提高数据处理软件的质量,可提高 GPS 快速定位的精度和效率。

目前的发展趋势表明,GPS 快速精密定位和动态精密定位将比 GPS 静态定位具有更加广阔的应用前景。GPS 快速精密定位既能保证测量精度,又能大大提高测量效率,在小地区控制测量、工程测量、变形监测、精密导航、GIS 数据采集、地形地籍测量等领域将具有非常广阔的应用前景。本书内容的研究,对于提高 GPS 快速精密定位的精度和效率以及缩短 RTK 初始化时间,提高 RTK 定位的精度具有一定的理论与实践意义。

## 1.2 国内外研究现状及存在的不足

GPS 快速精密定位具有广阔的应用前景,也是当前 GPS 测量中研究的热点问题之一,它涉及 GPS 载波相位观测量的随机模型的精化、GPS 快速定位病态方程的参数估计方法、整周模糊度的搜索、整周模糊度的检验等诸多理论方面的问题。

### 1.2.1 GPS 精密定位的数学模型

GPS 精密定位的数学模型包括函数模型和随机模型,函数模型描述了观测量与未知参数之间的函数关系,一般用观测方程表示;随机模型则描述了观测量的统计性质,一般用一个合适的方差阵或权阵来表示<sup>[4]</sup>。为获得高精度的解,函数模型和随机模型都必须准确地加以确定。GPS 定位的随机模型要根据函数模型而定,随机模型要反映出未参数化或未模型化误差的噪声特性,与实际情况不相符的随机模型会影响定位精度及可靠性,只有精化平差的随机模型才能获得最好的极限精度<sup>[5]</sup>。GPS 精密数据处理过程的每一步都要涉及随机模型,因此,正确的随机模型是获得高精度 GPS 定位结果的很重要的因素。

长期以来,GPS 精密定位的函数模型受到了广泛的重视,已得到了较深入的研究,而随机模型特别是 GPS 快速定位和动态定位的随机模型的研究尚未受到重视,GPS 商业软件均采用简化的随机模型,认为所有的载波相位观测值具有相同的精度,并且相互独立,也不随时间变化,这与实际不符,从而影响整周模糊度和基线解的精度。

GPS 载波相位双差观测量包含多种误差,如卫星轨道误差、残余的电离层和对流层延迟影响、多路径误差以及观测噪声等,由于这些误差的复杂性,函数模型很难将所有的误差因素都模型化,因此,不能用函数模型描述的误差分量必须通过随机模型(观测量的协方差矩阵)来描述。实际上这些方差和协方差的确定都比较困难,通常都是简单地假设所有的相位观测值间不相关,且具有相同的精度(等方差)。因此,尽管在随机模型中考虑了双差观测量的数学相关性,从整体来看,所用的随机模型是高度简化和过于理想化的,大都忽略了观测量的物理相关性,包括空间相关和时间相关<sup>[6-9]</sup>。

为模型化不同 GPS 原始观测量精度的差异性,许多学者利用卫星高度角、接收机信噪比(SNR)等信息来精化 GPS 基线处理的随机模型<sup>[6,10]</sup>。卫星高度角及信噪比虽然可在一定程度上反映观测量的精度信息,但由于 GPS 观测量受多种不确定误差因素的影响,因此它们不能准确地反映观测量的精度;另外,该方法也无法获得原始观测量间的空间相关和时间相关信息。为了更准确地给出观测量的精度信息,提高平差结果的可靠性,对于 GPS 静态定位,观测值的残差可以获得,基

于这种残差信息利用统计方法可以估计出更现实的方差——协方差矩阵。因此有些学者又提出了采用随机模型的验后估计方法,如 Helmert 法和 MINQUE 法,来精化 GPS 基线解算的随机模型<sup>[7,9,11]</sup>,但是这种方法一般仍然没有考虑观测量间的时间相关性。研究表明,由于所观测的 GPS 卫星高度角不同,各卫星的载波相位观测值精度也不同,而且 GPS 载波相位双差观测值具有较强的空间相关和时间相关性<sup>[9,10,12,13]</sup>,因此如何充分考虑载波相位观测值的精度以及双差观测值的各种相关性,建立合理的、精化的随机模型是一个复杂而又具有挑战性的课题。

### 1.2.2 整周模糊度的解算及其可靠性检验

以载波相位作为观测量进行精密相对定位,整周模糊度的确定是关键,准确而快速地解算整周模糊度,无论是对于保障相位定位的精度、缩短观测时间、提高 GPS 测量效率,还是对于开拓高精度 GPS 动态定位应用的新领域,都是极其重要的。高精度 GPS 快速定位及动态定位一直以来都是国内外 GPS 界的研究重点和热点。因此,对解算整周模糊度方法的研究,尤其是对快速解算整周模糊度方法的研究,得到了广泛重视,发展甚为迅速。

由于 GPS 快速定位的法方程严重病态,从而造成解算出的模糊度浮点解与其真实整数解差距较大,无法采用直接取整法固定整周模糊度。目前在 GPS 快速定位及动态定位中常采用以下方法来处理<sup>[14-18]</sup>:第一步,不考虑模糊度参数的整数特性,用一般的最小二乘原理估计得到模糊度和坐标参数的浮点解或  $\hat{X}_N$ 、 $\hat{X}_0$  及其方差—协方差矩阵;第二步,根据模糊度参数的浮点解及其相应的协方差矩阵,求模糊度固定解  $\check{X}_N$ ,这一步需要整数搜索;第三步,一旦整周模糊度计算出来,它们将被确认是否接受这个整数解,常用的检验方法是 F-ratio 方法;第四步,一旦模糊度整数解得到确认(接受),则根据求出的模糊度固定解  $\check{X}_N$ ,求坐标参数的固定解  $\check{X}_0$ ,即  $\check{X}_0 = \hat{X}_0 - D_{\hat{X}_N}^{-1} D_{\hat{X}_0}^{-1} (\hat{X}_N - \check{X}_N)$ 。该法是基于整数最小二乘理论,参数估计主要通过 4 个步骤实现:浮点解、整周模糊度搜索、整周模糊度确认以及坐标参数(基线)固定解。

从以上 4 个步骤来看,要得到可靠的基线固定解,需要 3 个前提:一是能得到较准确的模糊度浮点解;二是基于模糊度浮点解及其协方差矩阵的高效率搜索方法;三是对固定的模糊度的正确性进行检验<sup>[19]</sup>。

因此,近年来,对 GPS 快速精密及动态精密定位的数据处理的研究,主要针对以下 3 个方面:一是针对 GPS 快速定位病态方程的有效处理,提高模糊度浮点解的精度;二是针对整周模糊度的有效搜索方法;三是针对整周模糊度的有效检验方法。自 GPS 快速定位技术兴起以来,基于最小二乘(Least-Squares,简称 LS)估计,侧重于研究如何寻求高效的整周模糊度的搜索方法研究,有关这方面的文献和

成果也较多,目前该方面的技术理论已趋于成熟。本书的研究则主要侧重于对第一个问题的研究。

基于整数最小二乘理论发展起来很多求解整周模糊度的具体方法,比较著名的有最小二乘搜索法(Hatch,1989)、模糊度快速解算法(FARA—Fast Ambiguity Resolution Approach,Frei 和 Beutler,1990)、模糊度最小二乘降相关法(LAMBDA—Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment,Teunissen,1997)、模糊度协方差优化分解算法等<sup>[3,14,15,20-22]</sup>。不同的搜索法处理过程基本相同,主要的区别在于从浮点解获得整数解的模糊度搜索算法有所不同。以上模糊度搜索方法中,影响较大、应用较为广泛的是 FARA 方法和 LAMBDA 方法,尤其是 LAMBDA 方法以其搜索速度快、效率高而出名,应用最为广泛<sup>[18,23]</sup>。

FARA 方法是瑞典学者 E. Frei 和 G. Beutler 于 1990 年提出的,被认为是最经典的整周模糊度搜索方法。其基本思想是以数理统计的参数估计和假设检验为基础,利用初始平差的模糊度的实数解及其精度信息(协方差矩阵和单位权中误差),确定在某一置信区间,模糊度可能的整数解的组合,然后依次将模糊度的每一组合作为已知值,重复进行平差计算,其中估计的验后方差为最小的一组整数组合,即为所搜索的整周模糊度的最佳估值<sup>[2]</sup>。

LAMBDA 方法是 1993 年 P. J. G. Teunissen 教授提出的,目前被认为是求解整周模糊度最有效的方法,该方法包括两个组成部分,即整数变换和基于目标函数分解的搜索方法。整数变换是对整周模糊度的方差—协方差矩阵实行了整数高斯变换,即 Z 变换,降低模糊度之间的相关性,可大大缩小搜索范围,提高搜索速度;目标函数搜索是求整数空间内的一个最小值,取其中的一个区域缩小范围,在此基础上进行最小值的搜索。

在 GPS 快速定位中,由于观测时间短,模糊度浮点解与其真实整数解差距较大,造成搜索范围很大。因此采用搜索法求解整周模糊度的搜索效率低,甚至无法正确固定模糊度。近年来关于整周模糊度解算方法的研究集中在提高搜索的效率上,提出了采用 Cholesky 逆变换、Gauss 整数变换等降相关技术,以及附加各种几何约束条件等方法,以期达到压缩搜索空间、提高计算效率的目的<sup>[24-25]</sup>。

一旦整周模糊度计算出来,需要对它们进行检验,以确认是否接受这个整数解,模糊度的确认是模糊度解算过程中非常重要的一步<sup>[26,27]</sup>。模糊度的确认有多种方法,比较著名的方法有 F-ratio、Distance Test 和 Projector Test,其中应用最广泛的是 F-ratio 方法<sup>[27-30]</sup>。F-ratio 方法的主要缺点是其概率分布未知,从而排除了利用置信水平评价模糊度有效测试的可能性。为克服应用 F-ratio 值测试模糊度正确性的缺点,Wang et al(1998)<sup>[30]</sup>提出了另外一种模糊度确认测试的方法,它是基于次最小 LS 残差平方和与最小 LS 残差平方和及其标准差的比值,称为

W-ratio 法。Wang et al 通过模糊度验证过程的对比研究表明,基于 F-ratio 和 W-ratio 的模糊度确认测试的成功率很接近,但是当 GPS 原始观测值中含有未探测到的粗差及未模型化的系统残差时,W-ratio 法要优于 F-ratio 法;另外,不同的随机模型以及卫星星座的几何图形也会影响模糊度测试结果<sup>[29]</sup>。目前利用 W-ratio 值检验模糊度的可靠性还没有一个确定的临界值,在实际应用中还很少见。

### 1.2.3 GPS 快速定位病态方程的参数估计

研究表明,对于仅观测少数历元的 GPS 快速定位及动态定位,由于观测时间短,用最小二乘原理进行参数估计的法方程系数阵的条件数可达  $10^7 \sim 10^{10}$  数量级,法方程严重病态,因此法方程的求逆极不稳定,而观测噪声不可避免,导致模糊度浮点解与准确值的差值很大,甚至严重失真,大大增加了模糊度的搜索空间,此外,法方程的病态性会引起模糊度的估计方差剧烈膨胀,而方差膨胀又大大增加了模糊度的搜索空间,这种情况下即使采用效率很高的搜索法也难以求出正确的模糊度。因此,为进一步提高 GPS 快速精密定位的效率和精度,必须充分研究改善模糊度浮点解估计精度的方法,缩小模糊度搜索空间,提高解的可靠性。

为提高 GPS 短时间定位整周模糊度浮点解的精度,国内外一些学者对 GPS 快速定位的病态法方程的处理也做了一些研究,常用的方法有岭估计、TIKHONOV 正则化方法等<sup>[4,19,31]</sup>,以改善法方程的病态性,提高模糊度浮点解的可靠性,然后再用 FARA 或 LAMBDA 等搜索法确定整周模糊度。这些方法从一定程度上可以改善 GPS 快速定位中法方程系数阵的病态性,提高浮点解的精度,从而减小整周模糊度搜索空间,提高了搜索效率。

岭估计和正则化方法虽然能在某种程度上改善最小二乘估计,但它存在两个问题:第一,岭估计和正则化方法改变了方程的等量关系,使得估计结果有偏;第二,岭估计中的岭参数、正则化方法中的正则化参数和正则化矩阵的确定比较困难,且随意性较大。

岭估计和正则化方法主要是针对法方程组的病态解算,由于法方程系数矩阵的条件数等于误差方程系数矩阵条件数的平方,因此与误差方程系数矩阵相比,法矩阵的病态性更严重,从参数估值稳定性的角度看,直接解算病态的观测方程比解算法方程更有利<sup>[4,32]</sup>。因此处理病态问题的多种方法中,基于病态观测方程的直接解算方法引起了越来越多的关注,比较有名的是截断奇异值法(TSVD),但是在单频 GPS 快速定位中,该方法处理效果并不理想<sup>[31]</sup>。

遗传算法(GA)是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法,它不依赖于问题的具体领域,对问题的种类有很强的鲁棒性,所以广泛应用于很多学科,函数优化是遗传算法的经典应用领域。遗传算

法是以目标函数为依据,通过对种群中的所有个体实施选择、交叉、变异遗传操作,实现群体内个体结构重组的迭代过程搜索,逐渐收敛到最优解。从遗传算法运算的过程看,它避免了法方程的求逆运算,当给定一个合适的初始种群时,遗传算法能够得到一个最优解。

因此,一些学者提出利用遗传算法求解病态方程(组)并进行了实例计算<sup>[33-35]</sup>,在处理数学病态方程(组)方面,得到了较好的效果。曾群意(2003)曾将遗传算法应用于 GPS 病态方程的处理中,并通过实例与截断奇异值、岭估计方法进行了比较,也收到了一定的效果<sup>[36]</sup>。但是,遗传算法无法给出参数的统计性质,遗传算法的初始解难以用于 LAMBDA 和 FARA 算法并得出整数固定解,因为 LAMBDA 和 FARA 算法都必须依赖模糊度参数的协方差矩阵,关于这个问题,文献[36]中没有提及。

遗传算法在 GPS 病态方程的处理中的应用研究才刚刚起步,有关的研究文献还不多。另外,应用遗传算法需要根据具体问题预先确定合适的适应度函数、参数的初始范围以及事先设置遗传算法运行的一些控制参数,它们对遗传算法的性能都有很重要的影响。因此,将遗传算法应用于 GPS 病态方程的处理,还有很大的研究空间。

近年来小波分析方法也已被引入 GPS 数据处理的各个环节,如 GPS 信号降噪、粗差探测、周跳检测、系统偏差分离以及基线解算等领域<sup>[37-44]</sup>。F. Collin 和 R. Warnant(1995)首次将小波变换引进 GPS 信号处理,其目的是用于 GPS 周跳修复;Fu & Rizos(1997)也曾做了一些研究,并论述了小波分析在 GPS 数据处理中的应用,根据他们的研究,GPS 偏差如多路径及电离层影响呈现为低频噪声,观测误差则呈现为高频噪声;C. Satirapod(2001)应用小波变换方法将 GPS 双差残差分解成低频偏差部分和高频噪声部分,然后将提取的偏差直接改正 GPS 双差观测量,改正后的 GPS 双差观测量则主要包含 GPS 距离观测量和高频测量噪声,最后应用改正后的 GPS 双差观测量进行 LS 参数估计,并采用 MINQUE 方法来估计随机模型,计算结果表明这种方法能够提高整周模糊度和基线解的精度<sup>[39]</sup>,但是该方法主要是针对 GPS 静态定位的数据处理,计算工作量也较大。

以上关于小波变换在 GPS 数据处理中各环节的应用研究还主要是针对 GPS 静态精密定位,本书在前人研究方法的基础上,进一步研究了小波变换在 GPS 快速精密定位数据处理中的应用。将 GPS 载波相位双差观测量在不同的小波空间和尺度空间进行分解,去除高频测量噪声,利用消噪后的“净化的”载波相位双差观测量进行最小二乘参数估计,以减小测量噪声对 GPS 快速定位中病态方程解的影响,提高模糊度浮点解的精度,缩小模糊度搜索空间。此外,小波变换在实际应用中,一个十分重要的问题就是最优小波基的选择问题,在 GPS 数据处理中,如何选择最优小波基和最佳分解尺度,是一个值得研究的问题。

## 2 GPS 快速精密定位的数学模型及误差分析

### 2.1 概述

在 GPS 精密定位中,一般以载波相位观测量为基本观测量,采用相对定位模式,即利用由两台或两台以上 GPS 接收机所采集的同步观测数据形成的差分观测量,通过参数估计的方法求得两两接收机间的三维坐标差,也称为基线向量。基线向量提供了点与点之间的相对位置关系,如果提供必要的已知点的坐标,便可求得其他待定点的坐标。因此,在 GPS 精密定位中,基线解算是 GPS 数据处理中非常关键的一个环节。

基线解算一般采用单基线解算模式,即在进行基线解算时,一次仅同时提取两台 GPS 接收机的同步观测数据来求解它们之间的基线向量,这种单基线解算模式的优点是:模型简单,一次求解的参数较少,计算量也小。在本章及后面的章节中,一般都是以单基线模型为基础进行研究和讨论的。

GPS 基线根据长度一般可分为长基线和短基线以及介于其中间的中长基线,但是它们之间的界限难以准确的界定,在实际应用中,一般认为小于 15 km 或 20 km 的基线为短基线。

在 GPS 快速精密定位中,基线处理是基于整数最小二乘理论,主要通过以下 4 个步骤实现<sup>[14-18]</sup>:① 浮点解,即不考虑模糊度参数的整数特性,用一般的最小二乘原理得到模糊度和基线的浮点解及其方差-协方差矩阵;② 整周模糊度搜索,根据模糊度参数的浮点解及其相应的方差阵,用某种搜索方法求模糊度固定解;③ 整周模糊度确认,一旦整周模糊度计算出来,它们将被确认是否接受这个整数解;④ 基线固定解,一旦模糊度整数解得到确认,则根据模糊度固定解,求基线固定解。GPS 快速精密定位数据处理基本流程如图 2-1 所示。

从以上数据处理过程看,在 GPS 快速精密定位中,关键的问题是快速准确地确定整周模糊度,一旦模糊度正确固定,就可得到厘米级,甚至是毫米级的定位结果<sup>[19,45]</sup>。而要准确、快速地固定模糊度至少需要 3 个前提:首先,要得到较准确的模糊度浮点解及相应的精度信息,模糊度浮点解的精度决定了模糊度搜索空间的大小,进而影响模糊度的搜索效率和可靠性;其次,要有基于模糊度浮点解及其协方差矩阵的高效率搜索方法;最后,要对固定后模糊度的正确性进行



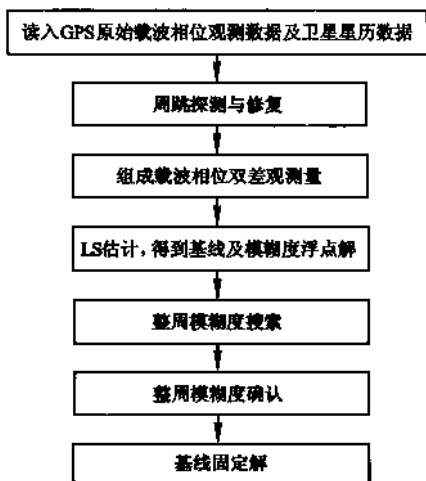


图 2-1 GPS 快速精密定位数据处理流程图

有效的检验<sup>[19]</sup>。

## 2.2 GPS 快速精密定位的数学模型

应用最小二乘原理,首先需要准确地确定基线解算的数学模型。数学模型是测量平差的基础,它是指待求参数和观测量之间的函数关系。由于观测值总是含有误差,因此测量平差中的数学模型一般分为两类:函数模型和随机模型。函数模型是指待估参数与观测值数学期望之间所建立的数学表达式;随机模型是描述观测值的先验精度及观测值之间可能的随机相关性的模型,通常用协方差矩阵表示。应用最小二乘准则进行参数估计,函数模型和随机模型都必须准确地加以确定<sup>[4,5]</sup>。在 GPS 精密定位中,基线解算一般以载波相位观测量为基本观测量,采用站星双差模型,应用最小二乘原理通过平差解算,因此,必须准确地确定 GPS 基线解算的函数模型和随机模型。

### 2.2.1 函数模型

GPS 精密定位的函数模型描述了 GPS 观测量即载波相位观测量,与未知参数即模糊度和坐标参数之间的数学关系。载波相位观测量是接收机和卫星位置的函数,只有确定它们之间的函数关系才能由载波相位观测量求解接收机的位置。

设安置在基线端点的接收机  $T_i (i=1,2)$ , 于历元  $t_1$  和  $t_2$  同步观测了 GPS 卫星  $s^j$  和  $s^k$ , 可以得到如下独立的原始载波相位观测量:  $\varphi_1^j(t_1)$ 、 $\varphi_1^k(t_2)$ 、 $\varphi_2^j(t_1)$ 、 $\varphi_2^k(t_2)$ 、