

分类号:P22

10710-2012226008



长安大学

专业硕士学位论文

几种对流层延迟改正模型对 GPS 精密单点定位
结果的影响

赵志浩

导师姓名职称	王利 副教授		
申请学位级别	专业硕士	专业学位类别 及领域名称	测绘工程
论文提交日期	2014 年 6 月 5 日	论文答辩日期	2014 年 6 月 16 日
学位授予单位	长安大学		

Several Kinds of Troposphere Delay Correction Model Impact on GPS Precise Point Positioning

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

Candidate: Zhao Zhihao

Supervisor: Associate Prof. Wang Li

Chang'an University, Xi'an, China

论文独创性声明

本人声明：本人所呈交的学位论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：赵志浩

2014年6月18日

论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名：赵志浩

2014年6月18日

导师签名：

王利

2014年6月18日

摘 要

GPS 精密单点定位是当前 GPS 应用领域的一个热点问题,影响精密单点定位精度和收敛速度的关键在于对电离层、对流层等误差的处理方式。对于这些误差的处理,尤其是对对流层延迟误差的处理,模型改正法与参数估计法是比较常用的两种方法。针对精密单点定位中对流层延迟误差的影响及其改正问题,本文开展的主要研究工作及取得的成果如下:

(1) 介绍了 GPS 精密单点定位的原理及其常用数学模型,分析了不同定位模型的优缺点。

(2) 介绍了精密单点定位中的各种误差源,给出了相应的处理方法,并重点阐述了对流层误差处理的几种经典模型及其映射函数。

(3) 阐述了对流层延迟的基本原理,对其模型改正法、参数估计法和外部修正法做了详细的分析,比较了不同对流层延迟改正模型的延迟量随高度角变化的情况。

(4) 将所得的对流层误差改正模型,加入到 Gpstools 的精密单点定位模块中进行坐标的解算,并将解算结果与运用高精度 GPS 数据处理软件得到的定位结果进行了比较,经分析可得 EGNOS 模型与 Saastamoinen 模型定位精度相当,优于 Hopfield 模型与 Black 模型的定位结果。

关键词: 精密单点定位, GPS, 对流层延迟改正模型, 映射函数

Abstract

GPS Precise Point Positioning is currently a hot issue in the field of GPS applications, the impact of precise point positioning accuracy and convergence rate is the key to the error ionosphere, troposphere, etc. are handled. For the treatment of these errors, especially tropospheric delay processing error in the current existing algorithms, the model correction method and parameter estimation method is more commonly used in two ways. Correct problems that affect their precise point positioning errors in tropospheric delay, the results of research work carried out in this paper and obtained as follows:

(1) Describes the GPS Precise Point Positioning theory and mathematical models used to analyze the advantages and disadvantages of the different positioning of the model.

(2) Describes the precise point positioning of the various error sources, given the appropriate treatment, and focuses on the classical model and the mapping function of several tropospheric process.

(3) Describes the basic principles of tropospheric delay, its model correction method, parameter estimation and external correction method to do a detailed analysis and comparison of the different tropospheric delays delay correction model with elevation changes.

(4) The resulting tropospheric error correction model, adding to Gpstools the precise point positioning module coordinates the solver and solver results with the use of high-precision GPS positioning data processing software results obtained were compared and analyzed, on the results, the positioning accuracy using EGNOS model and Saastamoinen model are quite superior positioning results Hopfield model and Black models.

Keywords: precise point positioning; GPS; tropospheric delay correction model; the mapping function

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状概述	2
1.2.1 外部修正法概述	3
1.2.2 对流层延迟改正模型研究概述	3
1.2.3 参数估计法概述	5
1.3 本文的主要研究内容与意义	7
第二章 GPS 精密单点定位的基本原理	8
2.1 GPS 精密单点定位的观测模型	8
2.1.1 传统模型	8
2.1.2 UofC 模型	10
2.1.3 无模糊度模型	11
2.2 对三种模型的讨论	11
2.3 本章小结	12
第三章 GPS 精密单点定位误差分析	13
3.1 与卫星有关的误差	13
3.1.1 卫星轨道误差	13
3.1.2 卫星钟差	14
3.1.3 卫星天线相位中心偏差	14
3.2 与信号传播有关的误差	15
3.2.1 对流层延迟误差	15
3.2.2 电离层延迟误差	15
3.2.3 多路径效应	16
3.3 与接收机和测站有关的误差	16
3.3.1 接收机天线相位中心偏差	16
3.3.2 接收机钟差	16
3.3.3 固体潮改正	16
3.3.4 海洋负荷潮汐改正	17
3.3.5 地球自转改正	17
3.4 本章小结	17
第四章 对流层与对流层延迟误差	18
4.1 对流层延迟原理	19
4.2 对流层延迟改正方法	21

4.2.1 经验模型改正法	21
4.2.2 参数估计法	27
4.2.3 外部修正法	28
4.3 Niell 映射函数模型	29
4.4 本章小结	33
第五章 对流层模型对 GPS 精密单点定位影响研究	35
5.1 概述	35
5.2 模型改正后的结果分析	36
5.3 引入参数估计法后的结果分析	38
5.4 本章小结	42
结论与展望	43
结论	43
展望	44
参考文献	45
致 谢	49

第一章 绪论

1.1 引言

全球定位系统（Global Positioning System, GPS）是由美国国防部 1973 年 5 月开始发展的定位系统，初期研发的目的是提供美军全天 24 小时、不受气候影响的高精度三维导航信息。该系统是由分布在 6 个轨道面上的 24 颗卫星组成的，其中有 3 颗备用卫星。卫星轨道面相对于地球赤道面的倾斜角大约为 55 度，卫星的平均高度为 20200km，运行周期为 11 小时 58 分钟^{[1][2]}。上述卫星在空间的分布，可以使我们在地球上任何时刻、任何地点至少可以同时观测到 4 颗卫星，十分有利于定位。随着系统的不断发展和完善，GPS 现在不但可以提供给用户全天候、连续的高精度位置坐标，而且还能测定运动载体的速度、姿态并进行精确授时。继二十世纪九十年代系统正式运行以来，GPS 已经在大地测量、资源环境、气象等诸多领域有了广阔的应用前景^[3]。

由于存在系统性误差的影响，早期传统的单点定位精度不高。美国喷气动力实验室（Jet Propulsion Laboratory, JPL）的 Zumberge 等人于 1997 年提出了精密单点定位（Precise Point Positioning, PPP）的概念并在其开发的高精度数据处理软件 GIPSY 上予以实现^[4]。精密单点定位技术是采用非差载波相位观测数据来进行定位，利用参数估计、数学模型将前述系统误差的影响降至最低（Zumberge et al.,1997）。精密单点定位的解算精度可以达到 cm 级，水平方向和高程方向精密单点定位的精度分别可以达到 1cm 和 2cm。精密单点定位技术与传统单点定位最大的不同为使用了精密星历及精密钟差改正资料^[5]。

GPS 定位精度通常会受到接收机和测站、卫星及信号传播过程中三类误差的影响^{[6][7]}。精密单点定位因为采用 IGS 提供的精密星历进行解算，其星历误差被大大减弱；近年来卫星轨道误差随着 GPS 预报星历精度的不断提高而得到很好地消弱；接收机相关误差随着硬件的不断精化与改进而得到很好地消除；因而在 GPS 穿过大气层时产生的误差成为主要的误差源，测量时利用双频无电离层组合可以减弱其电离层折射误差的影响，而对流层延迟误差无法通过此种方法予以消除或减弱^[8]。GPS 信号在传播路径上产生的折射误差主要发生在对流层，绝大部分大气质量都集中于此层，因其是非色散性介质，故不能用双频观测值来消弱对流层延迟。这使得对流层延迟误差成为影响 GPS 定位精度的关键因素^[9]。

1.2 国内外研究现状概述

Zumbeger 等人首次提出了采用精密星历及精密钟差,使用双频载波相位观测值,应用非差模型进行精密单点定位。OSU 的 Hans 等也提出了与之类似的方法,首先进行 GPS 卫星精密定轨,然后利用全球 IGS 站提供的 GPS 精密卫星钟差来求解测站坐标^[10]。Natural Resource Canada 的 Heroux 等对精密单点定位技术进行了研究,他们通过对较长时间静态 GPS 观测数据进行处理分析,得到了 cm 级精度的定位结果^[11]。卡尔加里大学的 Y.Gao 等人也进行了与精密单点定位技术相关的研究^[12]。瑞士伯尔尼大学天文研究所也将精密单点定位功能加入到其开发的 Bernese 软件中。近年来互联网技术飞速发展,在线精密单点定位技术随之而生,主流的在线精密单点定位系统有美国喷气动力实验室(JPL)开发的 Automatic Precise Positioning Service (APPS)、加拿大自然资源中心研发的 CSRS-PPP 服务系统等,研究表明这些在线精密单点定位系统可达到 mm-cm 级的静态 PPP 定位精度和 cm-dm 级的动态 PPP 定位精度^[13]。

虽然我国研究 GPS 精密单点定位技术的时间比较短,但随着近几年科研人员不断深入的研究,已经得到了很多令人瞩目的成果,并且推广普及到了大地测量、工程测量等实际应用中。应用 GPS 精密单点定位技术不仅降低了作业成本,使数据处理简单化,而且提高了作业效率。总体来说,近年来通过测绘界研究人员的不懈努力,我国目前对精密单点定位的研究水平进一步提高,已经在很大程度上弥补了与世界当前研究水平的差距^[14]。

国内方面,首先对精密单点定位技术进行系统深入研究的是武汉大学的叶世榕,在定位精度方面,叶世榕利用自己改进的模型开发的软件进行解算,得到单天解精度可达 cm 级,动态精密单点定位方面,其单历元解的各方向精度均优于 20cm,80%以上解的精度优于 10cm;以上定位结果与国际上同类的研究成果的精度基本相当^[15]。武汉大学的张小红教授等人经过数年对精密单点定位技术的潜心研究,在国内率先研发出了具有高精度精密单点定位功能的软件 TriP。通过大量的数据处理与分析,张小红等人证明了 TriP 软件的定位精度及质量可靠性方面已达到国际同类软件的水平。

因为通过双频观测值组合可以消除电离层误差的影响,故对流层延迟误差成为大气延迟误差的主要因素^[16]。精密单点定位中对流层延迟改正方法主要有:模型修正法、外部修正法和参数估计法,以下是对上述三种改正方法的详细分析与比较。

1.2.1 外部修正法概述

由于水汽在对流层大气中的变化速率相对较快,再加上其在空间与时间的分布上的不均匀性,这导致了大气中水汽含量因时间与地点的不同而出现巨大差异。因而很难建立一个通用模型来准确描述水汽在大气层中的实际分布,基于上述问题产生了一种对流层延迟修正方法—外部修正法^[17]。它主要利用外部设备提供的数据,通过对测定的实际卫星信息传播路径上水汽造成的信息传播进行分析的方法。目前水汽辐射计测量是较常用的方法。目前存在的微波辐射仪校准也仅能对路径湿分量延迟进行测定,并不能对仪器进行准确的校准,更不能达到高精度测量的要求。**WVR**法的主要特点是稳定性较好,能够在各种环境下都能够进行很好的湿延迟修正^[9]。应用**WVR**法可获得的湿分量延迟能达到5mm,而且此法能够获得不同高度监测区域的气压、气温与湿度。当然,如果是在强对流天气且范围又相对较小的情况下进行测量,采用空间分辨测量能取得相对较好的修正效果。当然能取得相对较高精度的同时,也有它的不足之处。笨重的仪器,不菲的价格、仪器内部温度变化造成的漂移现象及观测条件的限制,使得此种方法的大范围应用受到了一定的限制,不得不只能用于科学研究^{[18][19]}。

1.2.2 对流层延迟改正模型研究概述

对流层在天顶方向的延迟分量包括两部分,一种是流体静力学分量,一个种湿分量。国际上大多数采用的方法是将其各自进行计算,然后相加所得的和即为总延迟。国内外对对流层的研究很多,也得出了不少模型。现在普遍受到认可的模型有:**Black**模型、**Hopfield**模型、**Egnos**模型和**Saastamoinen**模型。这些模型虽然在不同的情况下会产生些小的差异,但共同的特点是精度都很高。以下对这四种模型进行详细分析。

Hopfield通过对全球18个站近1年的高空气象数据进行整理分析,在1969年建立了以自己名字命名的模型;三年后他按单层计算,其中将中性大气温度梯度为一常数,推导出了该改正模型。该模型主要特点简单,在研究大气折射中普遍被采用。**Hopfield**在定义大气模型的折射率 N 时,不仅涉及干分量,还包括湿分量,并表示用地面高度的4次方函数的表示。经过后期其他专家学者的研究证实,此种模型计算天顶方向的延迟度随着跟在高度的升高,精度会变得越来越差。特别是当地面高度超过1000米后,此种模型变得不适用^{[20][21][22]}。

Saastamoinen模型与**Hopfield**模型有所不同,**Saastamoinen**模型中对流层中的气压分别采用恒温垂直梯度代表干气压,等温线表示对流层以上的气压,将气压值进行区

分,可以在高度和精度方面对对流层延迟精度进行提高。Saastamoinen 模型存在一个假设,即假设干大气处于流体力学平衡与状态方程的使用是符合实际要求的,结果不会受到影响,并把用合适的高程表示出重力加速度。Elgered 等给出模型的均方误差估值:把折射误差定为 2.4mm,普适常数的不确定性定和干大气平均摩尔质量的影响均定为 0.1mm^[23]。如果存在的气象条件相对比较准确,那么 Saastamoinen 模型和 Hopfield 模型都可以取得相对较高的精度。然而由于 Saastamoinen 模型不受温度误差的影响,所以相对 Hopfield 模型得到改正结果较好。正因为如此,Gamit 和 Bernese 等高精度的 GPS 数据处理软件均采用此模型。如果能够精确测定与气象相关的参数,对对流层延迟解算来讲无疑可以进一步提高其改正精度^[24]。但由于我国的水汽分布在空间上分布不均匀,时间上变化又较快等因素,以上两种方法很难准确测定对流层湿延迟分量。

通过整理分析全球气象资料,加拿大新布伦斯威克大学的 Rodrigo Leandro 等人于 2004 年,得到了 UNB(University of New Brunswick)模型。此种方法主要运用表格的形式,把温度、气压、相对湿度等参数写成关于纬度和年积日的列表,先求出来海平面的对流层延迟,再求测站处的天顶对流层延^[25]。UNB 的优点是不需要气象实测参数。之后相关的研究表明,将列表中的相对湿度替换成水汽压,能够更好的计算天顶延迟,而且不需要气象参数,也就是后来发展的气象实测参数不影响 UNB 模型的解算^[26]。为了能够更好的计算天顶延迟,而且不需要气象参数,在解算的时候以水汽压替换列表中的相对湿度,也就是后来发展的 EGNOS 模型。此模型与 Saastamoinen 精度相当,很适用于 GNSS 的导航和定位方面的研究应用^{[27][29]}。

此后有了大量的对流层改正模型问世。但也都是在 Hopfield 和 Saastamoinen 模型的基础上得发展而来的。如 1975 年由 H.D.Black 提出的 Black 模型(只需要气象数据,无需测站坐标)。欧吉坤利用不同参数值采用 13 个各不相同的模型,结果表明,除北大西洋组(NATO)的模型差异较大外,大多数的对流层延迟均在 cm 级水平^[28]。

国内也有大量的研究者对大气模型特别是对流层延迟改正模型进行了研究。根据北京、广州和上海的气象观测资料,吴必军等人提出了一种新的基于 Hopfield 模型的适用于我国区域的模型,其解出来的精度有较大的提高,但由于气象观测数据有限,对我国其他地区来说精度结果不是很好^[38]。魏丽和钟强等人借鉴美国大气的形式,根据我国青藏区域 1960~1969 年的高空探测气象资料,建立了青藏高原大气模型^[37]。鉴于我国的特殊气象条件,杨力博士基于我国西南高原及西北地区的气象资料,经过分析研究,建立了一种区域性的大气对流层改正模型^[32]。然而殷海涛博士则以负指数的

形式分析成都地区 2003~2005 年的气象观测数据,建立了折射模型,进而得到了特属成都区域的天顶延迟改正模型。该模型亦存在它的缺点是受高度的限制,即离地越高收到的影响效果越明显。为了减弱影响效果,引入约束气象参数,这样计算出来的结果不具有较大的误差^[33]。香港的刘焱雄等人利用香港天文参 1995 年~2002 年的探空资料,对干分量进行标定,得到香港地区的干分量标定模型,然后再通过计算得到天顶方向的湿分量^[61]。动态差分 GPS 定位中,运用基站到流动站的距离与基站天顶方向的精确延迟估计算出流动站天顶方向上的对流层延迟^[34]。一般通过多个基站对天顶对流层延迟计算出区域的流层延迟模型,再根据流动站的位置内插出对应站天顶方向上的延迟,从而实现实时的 RTK 基线解算。对于较大的地形复杂地区,流动站方向偏差有时候较大,能够到 2cm 左右。我国西南地区整体高差变化较大,地形极其复杂,根据这一特点,西南交通大学地理空间信息工程中心在常规网格内插改正模型的基础上提出了一种新的对流层改正模型—MHDMI 模型。这种模型的优点是借助先验模型,能够自主修正高差与距离相关量。分析单个基准站的对流层变化并不能得出可靠性的结论,因此熊永良等人提出对多个基准站的对流层变化进行分析,发现对流层延迟不仅是平面的函数,也是与高程相关的函数,因此他们提出了的 7 种对流层模型均包含高程因子,实际应用显示该模型对长距离的 RTK 观测对流层延迟改正有一定的作用,缺点是针对何种情况采用何种模型全由经验而定^[33]。

综上所述,基于区域模型测定的和运用全球气象资料测定的天顶方向上的对流动层延迟都会有一定的误差。因此,如果要想取得较好的精度,则可以通过两种方法。一种是建立大范围的区域观测网,再一种就是进行相当可观数目的气象观测。但考虑的经济投入,要在有限的区域内建立很好的区域网形,或者是进行大量的气象观测均是不可行的。因此只有在有条件的地区才能修正或建立区域对流层模型。而且模型在测定天顶延迟湿分量的精度都比较差,因此提高模型精度的关键仍然是如何精确测定湿分量延迟^{[35][36]}。上一小节中提到的外部修正法虽然测定的湿分量延迟精度优于 1cm,但是存在明显的缺陷,因此在实际测量中为了获取高精度的天顶对流层延迟常用参数估计法来代替外部修正法^{[54][59]}。

1.2.3 参数估计法概述

在实际生产实践中,直接精确测定大气的参数是比较困难的,因为大气中的水汽是时刻随时空呈现随机变化的。其次大气改正模型中,还有模型误差、舍入误差等一系

列误差。这些问题直接会导致高程方向解算精度较差或者是模糊度解算失败。因此对流层参数估计法得到广泛应用，该方法主要在进行方程最优估计时把对流层湿分量天顶延迟作为未知参数。参数估计法主要包括单参数法、多参数法、分段线性法以及随机过程法等方法^[40]。

这4种方法都是一阶高斯马尔可夫过程的特殊情况。其中，单参数法不能反映对流层的变化率。多参数法、分段线性法能够明显提高垂直方向上的重复性，这两种方法对参数比较敏感，通常选取2~3个小时附加一个参数，这样既可以保证解和强度，又可以提高计算精度^[41]。最小二乘是随机过程中的一种常用方法，为了用随机过程中模拟对流层折射，葛茂荣和刘经南建立了一种最小二乘递推法。实现了对流层误差的动态模拟，使得目前的几种对流层估计方法得到了统一。

目前，大多数高精度 GPS 数据处理软件都能进行延迟参数估计，特别是大气参数。一般采用的估计的方法有卡尔曼滤波法和最小二乘估计法。前者把 ZTD 作为随机过程量处理。后者在给定的采样间隔里，视 ZTD 为一常数，用每一个测站确定一组大气参数。GAMIT 和 BERNese 都采用后者。这两种方法的共同之处在于，均把 GPS 接上机天线周围的大气看成是各同向性的，通常用 ZTD 减去 ZHD 与 ZWD 的先验值，ZHD 的计算主要是根据残差进行的，在解算过程中主要把残差视为一个随机过程，在得到 ZHD 后估算 ZTD。G.Ruffini 分别用 GIPSY 和 BERNese 对分布于全球的五个 GPS 站数据进行解算，BERNESE 软件采用双差估计得到的 ZTD 精度的 2~3mm。GIPSY 采用 PPP 估计得到的精度约为 5mm^[42]。

经过大量的计算研究分析表明，采用随机过程方法求出的测站天顶方向的湿分量改正与水汽辐射仪观测得到的湿分量延迟结果较接近。因此对流层折射参数估计法是目前最理想的对流层参数估计方法。上述的 GPS 软件所用到的方法均是随机过程法。PPP 需进行卫星时钟改正，而双差相对定位参数可以很好的消除钟差，因此在实际处理中，通常采用双差处理的 BERNese 和 GAMIT 软件，结算的结果精度通常比非差分软件 GIPSY 估算的 ZTD 精度要高 1~2 个数量级。基线过长对流层延迟相关性越明显，限于基线长度的要求，在采用双差估计 ZTD 时，为了不影响估计精度，一般都需要联合距离较远的 IGS 站一并对数据进行处理。

随着科学技术的逐步发展，卫星轨道等的参数的精度及卫星钟差逐渐得到提高，基于参数估计法得到的 ZTD 精度也得到了一定的提高，甚至与外部修正法得到的精度相当，所以参数估计法也将会在未来精确测定对流层延迟的计算中得到更广泛的应

用。

1.3 本文的主要研究内容与意义

本文主要通过对精密单点定位的分析与研究，确定影响其定位精度的因素。剔除各种误差的影响后，集中分析对流层延迟误差的影响。应用不同的对流层延迟改正模型对西安地区的地面沉降监测数据进行处理，比较分析不同模型改正下的定位结果，得出精度较高的对流层延迟改正模型。

第一章主要介绍了精密单点定位及其对流层延迟研究的国内外现状及本文研究的主要内容和意义。

第二章基于 GPS 定位的基本原理和方法，论述 GPS 精密单点定位的原理，并详细介绍了常用的几种数学模型，分析比较了各模型的优缺点。

第三章主要内容涉及 GPS 精密单点定位中的各种误差源的论述，并分析了常用的消除各种误差的方法。

第四章主要针对各种经典的对流层误差模型进行讨论，基于对流层基本概念，并结合对流层延迟误差对 GPS 精密单点定位的影响，重点分析了气象因素对对流层延迟误差的影响。

第五章在 Matlab 平台上，编写了相应的对流层延迟改正程序，并加入到了 Gpsutils 软件中，通过对应用不同对流层延迟改正模型得到的定位结果比较，得到了些有益的结论。

总结和展望部分，通过分析研究，提出了本文的一些结论，并提出了今后研究的设想和展望。

第二章 GPS 精密单点定位的基本原理

精密单点定位(PPP-Precise Point Positioning)是指利用 GPS 载波相位观测值以及 IGS 等组织提供的高精度的卫星星历和卫星钟差等各种产品来进行高精度单点定位的方法。近年来随着 GPS 连续跟踪站的增加,以及卫星数目增加,定位与导航技术也得到了更进一步的发展,特别是精密单点定位技术相关理论和技术方法的研究取得了长足的进步。精密单点定位的原理上依然是距离测量,但不同的是在定位所用的原始数据及处理模型上的差异。

2.1 GPS 精密单点定位的观测模型

观测模型主要是用来描述在基本的平差问题中所得观测值之间,以及所得观测值与要确定的未知参数之间存在的一种数学相关关系。目前, GPS 非差精密单点定位常用的函数模型主要有三种:传统模型, UofC 模型和无模糊度模型^[43]。

2.1.1 传统模型

无论是静态精密单点定位,还是动态精密单点定位,目前传统模型都是应用最广泛的观测模型。在组成模型的观测方程时,主要选取了最常用的 GPS 双频伪距观测值 P1、P2 或者是 GPS 双频载波相位观测值 L1、L2,对上述两种观测值作差,可组成无电离层组合的。上述组合主要消除了近乎米级的电离层延迟影响,因此这种组合模型也常被称之为消电离层组合模型。Zumberge (Zumberge et al., 1997) 以及 Kouba 和 Heroux (Kouba and Heroux, 2001) 等在进行精密单点定位的研究工作时,均采用传统模型即消电离层模型作为其定位的函数模型^{[4][11]}。精密单点定位的非差观测方程表示如下:

$$P(Li) = \rho - cdT + d_{trop} + d_{ion/Li} + d_{int\,freq/P(Li)}^s - d_{r(int\,freq/P(Li))} + dcb_{P(Li)}^s - dcb_{r(P(Li))} + d_{mult/P(Li)} + \varepsilon(P(Li)) \quad (2.1)$$

$$\Phi(Li) = \rho - cdT + d_{trop} - d_{ion/Li} + \lambda_i N_i + \tilde{d}_{int\,freq/\Phi(Li)}^s - \tilde{d}_{r(int\,freq/\Phi(Li))} + \lambda_i (\phi_r(t_0, Li) - \phi^s(t_0, Li)) + dcb_{\Phi(Li)}^s - dcb_{r(\Phi(Li))} + d_{mult/\Phi(Li)} + \varepsilon(\Phi(Li)) \quad (2.2)$$

为了消除电离层一阶项的影响, Zumberge 等人分别应用不同频率的组合观测值进行组合,得到的组合观测值可以表示成如下形式:

$$P_{IF} = \frac{f_1^2 \cdot P(L_1) - f_2^2 \cdot P(L_2)}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.3)$$

$$\Phi_{IF} = \frac{f_1^2 \cdot \Phi(L_1) - f_2^2 \cdot \Phi(L_2)}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.4)$$

将传统模型对应的观测方程式代入到不同频率的组合观测值公式，通过进一步推导可以得到精密单点定位的无电离层组合模型（传统模型）的表达式如下：

$$P_{IF} = \rho - cdT + d_{trop} + dcb_{P(L_1, L_2)}^s - dcb_{r(P(L_1, L_2))} + d_{mult/P(L_1, L_2)} + \varepsilon(P(L_1, L_2)) \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{IF} = & \rho - cdT + d_{trop} + \lambda_{IF} N_{IF} + dcb_{\Phi(L_1, L_2)}^s - dcb_{r(\Phi(L_1, L_2))} \\ & + d_{mult/\Phi(L_1, L_2)} + \varepsilon(\Phi(L_1, L_2)) \end{aligned} \quad (2.6)$$

在上述公式当中， $P(L_i)$ 为载波 L_i 上的伪距观测值；

d_{ion/L_i} 为 L_i 载波的电离层延迟改正； d_{trop} 为 GPS 信号的对流层延迟改正；

ρ ：卫星与测站间几何距离； c 为真空中光速； dT ：接收机钟差；

$\varepsilon(\cdot)$ ：表示观测噪声； P_{IF} ：表示传统模型下的组合观测值；

f_i ：为载波 L_i 的频率； λ_i ：为载波 L_i 的波长； N_i ：载波 L_i 的整周模糊度；

$d_{mult/P(L_i)}$ ：载波 L_i 上的伪距的多路径延迟误差； $\Phi(L_i)$ ：载波 L_i 上的相位观测值；

$d_{mult/\Phi(L_i)}$ ：载波 L_i 上多路径效应误差； $dcb_{P(L_i)}^s$ ：GPS 卫星硬件延迟偏差；

$dcb_{r(P(L_i))}$ ：接收机硬件延迟偏差； $T_{GD,r}$ ：GPS 信号在接收机内部的时间延迟；

$T_{GD,s}$ ：GPS 信号在卫星中的时间延迟； $\phi_r(t_0, L_i)$ ：接收机振荡器的初始相位；

$\phi^s(t_0, L_i)$ ：卫星振荡器的初始相位。

在上述模型中，虽然可以解决电离层延迟的误差，但是产生了两个缺点，第一是由于此模型的整周模糊度是由 $L1$ 与 $L2$ 整周模糊度所组成的非线性未知量，在解算过程中无法保留整周模糊度的特性，仅能得到一个浮点解。第二是其组合后的观测噪声远大于原始观测噪声。而加拿大卡尔加里大学（University of Calgary）的 Gao 和 Shen 在 2001 年提出了另一种模型 Uofc 模型，把测距码的距离观测量平滑化，再将平滑后的伪距及载波相位观测值去平均后，可以有效消除这一缺点。

采用上述的模型后,可以克服传统模型的缺点,组成的无电离层线性观测组合除了降低了观测噪声的等级,也使得解算时未知数减少、保留了整周模糊度的整数特性。此模型经为经过精密星历的卫星轨道改正、卫星钟差改正,且无电离层的线性组合模型。此系统可以进行点位的坐标求解、估计接收机钟差以及计算出 L1、L2 两种频率的载波相位观测量的整周模糊度。

通过上述分析,非差精密单点定位无电离层组合模型的观测方程可简化为:

$$P_{IF} = \rho - cdT + M \times d_{trop} + l_{P_{IF}} \quad (2.7)$$

$$\Phi_{IF} = \rho - cdT + M \times d_{trop} + N_{IF} + l_{\Phi_{IF}} \quad (2.8)$$

通过上述公式可知,误差方程的线性化最初只是保留一次项,这就引起了较大的高阶截断误差偏差,从而对最终结果的定位精度有着非常大的影响。当选取测站的先验坐标与真实坐标的误差较大时,为消除此项误差,必须采用迭代的方法,渐进求解以提高定位的精度。为防止迭代次数过多增加计算量,接收机先验坐标值的误差应小于 100m。

2.1.2 UofC 模型

Uofc 模型与无电离层组合有着共同点就是仍采用组合方程消除电离层延迟的方法,不同点是先计算出载波 L1、L2 上的码观测值和相位观测值的组合观测值,然后求其均值,最后再消除电离层影响。UofC 模型的组合观测方程如下:

$$\begin{aligned} \Phi_{IF} &= \frac{f_1^2 \cdot \Phi(L_1) - f_2^2 \cdot \Phi(L_2)}{f_1^2 - f_2^2} = \rho - cdT + M \times d_{trop} + N_{IF} + l_{\Phi_{IF}} \\ P_{IF,L1} &= \frac{1}{2}(P_{L1} + \Phi_{L1}) = \rho - cdT + M \times d_{trop} + \frac{1}{2}N_1 + l_{P_{IF,L1}} \\ P_{IF,L2} &= \frac{1}{2}(P_{L2} + \Phi_{L2}) = \rho - cdT + M \times d_{trop} + \frac{1}{2}N_2 + l_{P_{IF,L2}} \end{aligned} \quad (2.9)$$

上述公式中, $N_{IF} = \frac{f_1^2 N_1 - f_2^2 N_2}{f_1^2 - f_2^2}$;

Φ_{IF} 为 UofC 模型的组合观测值; $P_{IF,L1}$ 为载波 L1 上的组合观测值;

$P_{IF,L2}$ 为载波 L2 上的组合观测值; N_1 为载波 L1 上的整周模糊度;

N_2 为载波 L2 上的整周模糊度; $l_{\Phi_{IF}}$ 表示 UofC 模型组合观测值误差;

$l_{P_{IF,L1}}$ 、 $l_{P_{IF,L2}}$ 分别表示载波 L1、L2 上相位组合观测值的剩余观测误差。

2.1.3 无模糊度模型

无模糊度模型主要通过对相邻历元间观测值求差，利用消电离层组合载波相位组合观测值和消电离层伪距组合观测值进行组合建模。这种模型的优点在于不必将估计模糊度参数考虑在内，通过对相邻历元之间对相应的载波相位观测值之间求差，这样便可以消去模糊度项。无模糊度模型的观测方程简化形式如下所示：

$$\begin{aligned}
 P_{IF} &= \frac{f_1^2 \cdot P(L_1) - f_2^2 \cdot P(L_2)}{f_1^2 - f_2^2} = \rho - cdT + M \times d_{trop} + l_{P_{IF}} \\
 \Delta\Phi_{IF} &= \Phi_{IF}(i) - \Phi_{IF}(i-1) \\
 &= \rho(i) - \rho(i-1) - cdT(i) + cdT(i-1) + M \times (d_{trop}(i) - d_{trop}(i-1)) + \\
 &\quad N_{IF}(i) - N_{IF}(i-1) + l_{\Delta\Phi_{IF}} \\
 &= \Delta\rho - c\Delta dT + M \times \Delta d_{trop} + l_{\Delta\Phi_{IF}}
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

在上述公式中， $\Delta\Phi_{IF}$ 为相邻历元间通过无电离层载波相位和伪距组合观测值计算出的差值； $\Delta\rho$ 为相邻历元间的卫星与测站几何距离的差值； ΔdT 为相邻历元间的接收机钟差之差； Δd_{trop} 为相邻历元间求得的天顶对流层延迟之间差值； $l_{\Delta\Phi_{IF}}$ 为历元间差分后各种观测噪声及不能被精确模型化的误差。

2.2 对三种模型的讨论

目前，三种定位模型中较为常用的是传统模型（无电离层组合模型），但传统模型也有局限性。首先，无电离层组合不能采用模糊度整数的特性，只能把这一未知参数当实数来估计。其次，因为方程组合的特点，使得观测噪声不能很好的被消去，反而被放大，直接导致收敛所需的时间变长。

与传统模型相比，UofC 模型不仅能够消除电离层高阶项的影响，而且能够降低观测噪声，至少能够使得观测噪声降低到原来水平的一半。未知参数估计收敛的快慢受观测噪声和未被模型化的残余误差的和的影响。UofC 模型可以分别估计 L1 和 L2 载波相位的整周模糊度，从而提高收敛速度。

无模糊度模型采用前后历元间做差达到对初始相位模糊度的消除，其优势在于降低的对计算机的负担。但这样只能求得相对位置，无法解得绝对位置。

历元间相位求差的原理是对同一个颗卫星的两个相位观测值作差。这样就对不同卫星的观测值有了不同程度的忽略，从而造成较低的观测资料利用率。此外，因为历

元间隔一般不会较长，所以常常忽略了这种数学上的相关性。

综上所述，三种精密单点定位模型的主要区别在于如何处理载波相位中的整周模糊度。对于传统模型，通常采用先对模糊度进行组合，再估计的方法来计算并求解；与 UofC 模型，可以分别对两个频率的载波 L1 和 L2 上的模糊度进行估计，然后再固定其模糊度；对于无模糊度模型，由于其本身特点，无需进行模糊度的固定。

2.3 本章小结

本章主要详细介绍了双频 GPS 精密单点定位的基本原理，着重阐述了精密单点定位中常用的三种模型：传统模型、UofC 模型、无模糊度模型，并对三种模型在模糊度的固定、观测噪声的消除等方面的优缺点进行了分析。

第三章 GPS 精密单点定位误差分析

精密单点定位是使用单台接收机的伪距观测量与载波相位观测量, 结合全球若干 IGS 跟踪站算出的精密卫星轨道参数与精密卫星钟差参数等产品, 进行无差分观测量的定位处理^[45]。因为精密单点定位是利用非差观测量进行最终的定位, 无法通过差分的方式消除定位过程中的系统误差, 只能利用数学模型或附加参数一并求解的方式估计, 所以数据的预处理和误差的消除、改正对精密单点定位是相当重要的^[46]。本章针对精密单点定位中的各种误差源及其处理的必要性做更进一步说明。

在采用非差精密单点定位时, 不管是计算还是模型本身, 主要的误差源有两个方面: 一个是来自系统本身的误差, 包括卫星系统上的误差和接收机系统上的一些误差; 另一个是信号在传播路径上产生的误差。像卫星与接收机的天线相位偏差, 卫星轨道的误差, 接收机与卫星的时钟钟差以及时间与 UTC 的时差等均属于前者。像由于卫星和接收机硬件对不同信号传播影响产生的时延差, 大气中电离层对信号的传播产生的迟延, 对流层对信号传播产生的时延、相对论效应等均属于后者。其次还有极移和海潮等带来的一些误差, 这些误差在进行精密单点定位时已经能够得到很好的改正^[42]。

3.1 与卫星有关的误差

3.1.1 卫星轨道误差

卫星轨道误差是指卫星星历中提供的卫星轨道与真实轨道之间的相异量, 依轨道计算的数学模型、定轨软件、采用卫星跟踪站的数量、卫星跟踪站的分布、及跟踪站数据观测时间的长短而定^[45]。目前, 一般使用的广播星历的精度可达到 10m, IGS 等机构所提供的事后精密星历产品的精度可达 3~5cm。在精密单点定位计算中, 无法通过差分的方式消除卫星轨道因素对定位结果的影响, 在计算站星距离时, 卫星轨道误差会对得到的几何距离产生影响, 进而影响定位结果。因此, 广播星历的精度不能满足精密单点定位的需求, 必须使用精密星历进行坐标的解算。目前, IGS 提供的精密轨道产品的发布时间间隔一般为 15min 或 5min, 而通常 GPS 观测数据得采样率要都小于精密轨道产品发布的间隔时间, 比较常用的采样率有 15s 和 30s, 有时甚至可以达到 0.1s, 因而必须需通过内插的方法计算得到每个历元所对应的卫星坐标。内插方法一般采用 8-10 阶拉格朗日多项式或切比雪夫多项式就可以满足精度要求。

3.1.2 卫星钟差

卫星钟虽然安装原子钟，但其时钟频率漂移仍会引起卫星时钟时间与标准 GPS 时产生差异，称为卫星钟差。GPS 系统通过地面监测站对卫星长期监测，确定卫星钟差，使用二项式模拟卫星钟差的变化。在精密单点定位计算中，无法像差分一样消除此误差，故必须仔细考虑此项误差对定位产生的影响。不同卫星的钟差不同，在求解过程中无法像接收机钟差设置未知参数去一并求解，必须事先估计其值，代入前面提及的观测方程加以消除。在精密单点定位中，卫星钟差对定位精度影响很大，必须谨慎处理，若要达到厘米级的定位精度，必须将卫星钟差的精度要求在纳秒级。目前 IGS 提供了 30 秒间隔、5 分钟间隔的后处理卫星钟差资料，而 GPS 观测值的采样间隔一般小于上述值，需要内插计算得到每个历元所对应的卫星钟差。内插的方法一般用低阶多项式就可以满足精度要求。精密单点定位搭配 IGS 产品的定位精度如表 3.1 所示。

表 3.1 PPP 搭配 IGS 产品的精度

Receiver	Observation Processed	PPP Mode	Precision (cm)		
			Latitude	Longitude	Height
Dual Frequency	Code&Carrier	Static	1	1	2
		Kinematic	5	4	40
Single Frequency	Code Only	Static	10	10	100
		Kinematic	50	50	150
Single Frequency	Code&Carrier	Static	2	3	4
		Kinematic	25	25	50

3.1.3 卫星天线相位中心偏差

卫星天线相位中心偏差是由于卫星天线相位中心与其质量中心不一致而产生的误差。较早发射的 GPS 卫星 (Block II/II A) 有此偏差量需要改正，而较晚升空的 GPS 卫星 (Block II R/II F) 则已经将卫星天线相位中心与其质量中心重合，故不需要此改正。描述卫星轨道位置时所使用的轨道模型参数是依据卫星几何中心来定义的，IGS 的精密星历也是几何中心的位置。但使用者的接收机测量时对应于卫星天线相位中心，因此在精密单点定位中就必须将此偏差考虑进去。表 3.2 给出了不同系列卫星在星固系下卫星天线相位中心相对于卫星质心的偏差。

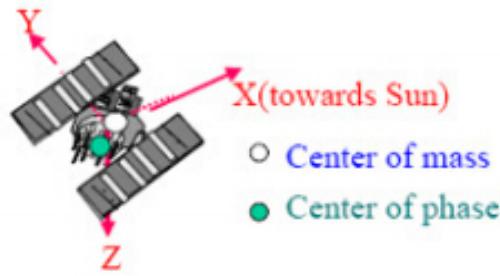


图 3.1 卫星天线相位中心偏差示意图

表 3.2 星固系下卫星天线相位中心的偏差/m

卫星系列	X	Y	Z
Block II / II A	0.278	0.000	1.022
Block II R/ II F	0.000	0.000	0.000

3.2 与信号传播有关的误差

3.2.1 对流层延迟误差

对流层延迟误差主要分为干分量与湿分量，干分量占对流层延迟误差约 90%，与当地大气温度与压力的变化呈现缓慢且可预测的变化；湿分量对于整体延迟量而言影响较小，其值在天顶方向延迟量约为 1~80cm。湿分量的延迟是受到信号传播路径上水蒸气的影响，误差量虽较前者小很多，但由于大气层中水蒸气含量变化剧烈导致湿分量较难由地表的观测量进行估计。不同与相对定位时可以利用差分方法将其消除或大幅降低，精密单点定位中利用数学模型或引入附加参数对它进行估计，故对流层延迟误差对其定位精度有着重大的影响，许多研究将此影响视为重要研究对象。

对流层延迟误差模型主要包含两部分，天顶对流层延迟模型与映射函数。天顶对流层延迟模型有很多种，其中具代表性的为修正的 Hopfield 模型及 Saastamoinen 模型；而在映射函数方面 GMF（Global Mapping Function）、NMF（Niell Mapping Function）具有代表性。因本文研究内容为不同对流层延迟改正模型对 GPS 精密单点定位的影响，故在此不再赘述，后面章节将对其进行详细分析。

3.2.2 电离层延迟误差

高度在 70-1000km 范围的大气层为电离层，此范围内充满性质不稳定的离子化微粒（ionized particals），当电磁波信号通过电离层时会产生极大地折射影响使得传播速度产生变化，影响大小主要取决于电子总量和信号的频率。电离层中电子密度的高低

受到太阳辐射的影响，由于地球自转的关系每天同一地方受太阳照射量大小会随时间而改变。电离层延迟误差引起的卫星至接收机距离误差约 30~150m，由于一阶项电离层延迟误差大小与电磁波频率的平方成反比，故可通过 GPS 双频观测值的线性组合来消除电离层效应一阶项的影响。如果在高精度需求的精密单点定位中，需要用双频观测值来进行此项改正，所剩余高阶项影响量约为 2 到 5 厘米。

3.2.3 多路径效应

接收机天线除接收到来自卫星的正常信号外，还会接收到周围物体（如建筑物的玻璃，近似镜面的柏油路面等）反射所产生的干扰信号，正因为干扰源的多态性，所以无法建立某种很好的或者说是统一改正模型来进行有效的改正。唯一的有效的改正方法是在接收信号时对干扰信号进行硬件处理。如采用相控阵天线、抑制天线等技术。还有一种办法就是采用小波等分析方法进行数据方面的有效改正。

3.3 与接收机和测站有关的误差

3.3.1 接收机天线相位中心偏差

在 GPS 观测时架设接收机天线相位中心与其几何中心一致，然而实际上随着输入的强度及方向不同其相位中心会产生变化。观测时相位中心的瞬时位置与理论上的相位中心有所差异，二者之差可达数厘米到数分米，故在非差精密单点定位解算时必须利用设定的改正值来消除此误差。

3.3.2 接收机钟差

一般接收机内装有高精度石英钟，但振荡器的漂移仍会引起接收机钟面时与 GPS 时产生差异。在精密单点定位数据处理中，接收机钟差对定位的影响包含两个方面，一是接收机钟差对计算卫星坐标的影响，二是由接收机钟差引起的站星距离观测值误差。相较于相对定位中可以利用差分方式消除接收机钟差的影响，非差精密单点定位的数据处理中必须引入一附加参数，与其它参数一并计算，消除其对定位的影响。

3.3.3 固体潮改正

太空中摄动天体（如月球、太阳）对弹性地球的引力作用，会使地球表面产生周期性的涨落现象，称为固体潮现象。在地球地心与摄动天体的连线方向上会被拉长，而连线垂直方向则趋于扁平。此现象对地球表面的影响包含长期性偏移与周期性偏移，前者与纬度有关，后者由日周期和半日周期组成。若静态观测一天，周期性偏移的影

响大部分都会平滑消除；长期性无法短时间观测消除，即使进行长时间观测，残余误差最多仍可达 10cm 左右。在相对定位中，100 公里以内的基线测站的固体潮可视为一致，可通过差分方法消除；对精密单点定位这种直接求解测站绝对坐标的方法而言，必须通过使用改正模型来消除固体潮的影响。

3.3.4 海洋负荷潮汐改正

与固体潮的影响类似，海洋负荷潮产生的原因为潮汐的周期性涨落，主要由日周期和半日周期组成，其影响量比固体潮小。对某一瞬时的观测量而言，其影响量约为 5 厘米左右，对一天的观测而言，其影响为分米级。如同固体潮改正，非差精密单点定位无法通过差分方式消除此影响，故必须通过使用改正模型以消除海洋负荷潮汐的影响。

3.3.5 地球自转改正

由于地心地固坐标系统为非惯性坐标系统，坐标系统随地球自转而不同，因此信号发射时刻与信号接收时刻的地心地固坐标系统是不同的，故计算卫星到接收机的几何距离时不需考虑地球自转效应的影响。对于非差精密单点定位这种直接求解测站绝对坐标的方法而言，必须考虑此影响。

对于精密单点定位的计算而言，目前 IGS 最终产品及快速产品皆符合厘米级精度要求，但这些产品分别有 13 天和 17 小时的延迟时间。对于近实时的应用而言，IGS 提供的超快速产品中的观测部分为经过平差后的产品，符合精密单点定位计算的要求，这项产品有约 3 个小时的时间延迟，而超快速产品中另一个产品为预估值，目前尚不符合厘米级的精密单点定位计算的要求，但其优点为可实时获取。

有鉴于观测技术与预测方法的进步，未来数年内 IGS 超快速产品不管平差后或预估的产品精度皆可能达到目前后处理产品的精度。

3.4 本章小结

本章主要论述了影响精密单点定位的各项误差因素，以及几种主要误差源的影响尺度，同时给出了常用的减弱或消除这些误差影响的方法。

第四章 对流层与对流层延迟误差

我们一般称大气底层受重力影响的部分为对流层，大气总质量的 90% 以上均集中于此层，由于接收地表的辐射热能，对流层拥有旺盛的对流现象，并且遵守温度递减率（Temperature Lapse Rate），平均每升高 1km 降低约 6.5°C ；而在水平方向，每 100km 温差一般不会超过 1°C 。

通常对流层中都存在着微量的带电离子，这些离子对于电磁波的传播的影响很小，所以我们在考虑大气对流层的问题时一般将其当做中性的。比如，频率小于 15GHz 的电磁波，对流层对其而言为非色散介质，则电磁波在对流层中的传播速度与频率无关。GPS 的载波频率分别为 1575.43MHz（L1）及 1227.60MHz（L2），GPS 卫星信号在对流层中的传播速度与频率无关^[55]。

对流层对于 GPS 信号的影响主要是在信号传播的速度比在真空中要慢，以及信号的传播路径是曲线而非直线，此两者是由传播路径上的折射率所引起。前者是由于对流层折射率大于真空折射率，因而造成速度的延迟；后者则是因为大气层各个高度的折射率不同，而使其传播路径形成弯曲的延迟。综合此两项即为一般所称的对流层延迟效应。

我们在卫星导航定位中都会遇到对流层延迟误差问题，一般在高度小于 50km 的高空中，大气成分没有经过电离属于中性，电磁波信号在经过这层大气时所产生的信号延迟就是我们所要处理的主要问题。对于 GPS 卫星信号而言，由于其波长太长，对流层基本不存在色散效应，不能像电离层延迟改正一样利用双频组合观测值予以消除，只能通过求出信号在传播路径上各处的大气折射系数 n ，然后对路径进行积分计算来解决对流层延迟问题^[53]。但是，一般是难以实际测定传播路径上气象元素的，因而应建立相应的改正模型予以改正。

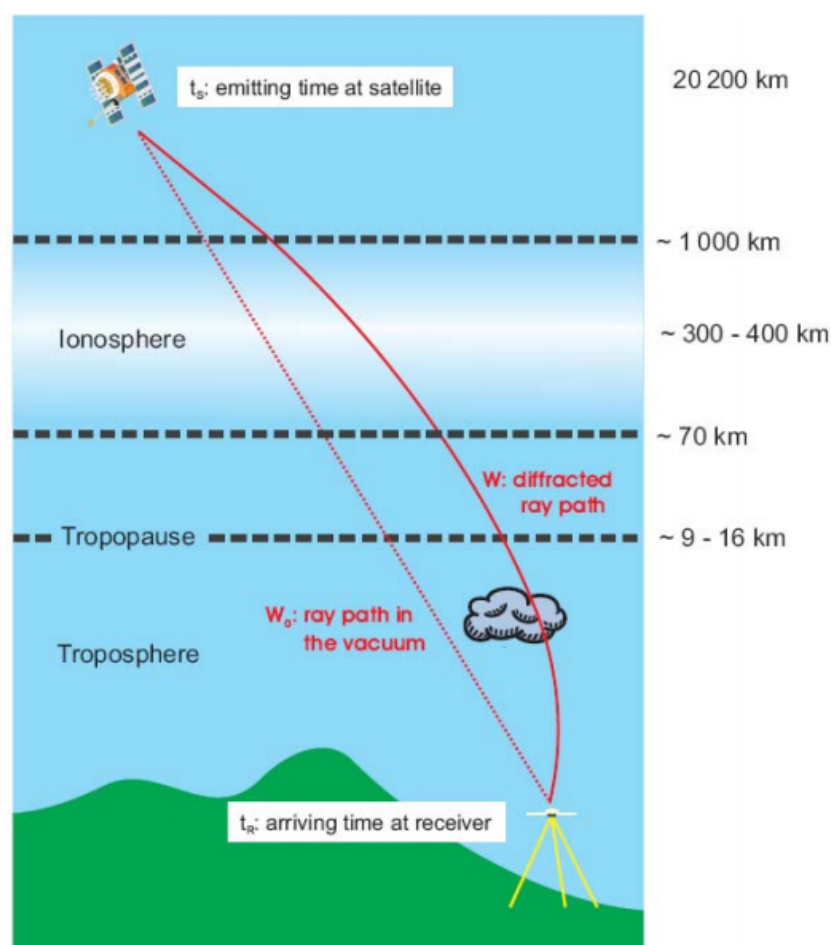


图 4.1 GPS 信号传播路径示意图

4.1 对流层延迟原理

上述原因导致增加接收机信号的时间以等效距离表示，即为对流层的延迟量 ΔL_{trop} ，用公式表示如下：

$$\Delta L_{trop} = C_0(t - t_0) = \int_L n(s)ds - G \quad (4.1)$$

C_0 ：真空中的光速；

t ：信号在大气中的传播时间；

t_0 ：相同路径下，信号在真空中的传播时间；

L ：传播路径；

n ：传播路径上的折射率；

G ：站星间直线距离；

公式 4.1 可改写如下：

$$\Delta L_{trop} = \int_L [n(s) - 1] ds + (S - G) \quad (4.2)$$

上式 $\int_L [n(s) - 1] ds$ 为速度延迟的影响, $(S - G)$ 则为路径弯曲的影响; 其中 $(S - G)$ 通常在仰角大于 15° 时其延迟量不大于 1cm , 故通常可不列入考量。而当信号传播路径沿着天顶方向时为直线传播, 路径弯曲延迟也就消失。故由式 3.2 可得天顶对流层延迟量 (Zenithal Tropospheric Delay, ZTD) 如下:

$$\Delta L_{trop}^z = \int_H^\infty [n(z) - 1] dz = 10^{-6} \int_H^\infty N dz \quad (4.3)$$

H: 测站天线高度, N: 折射度;

折射系数 N 的表示如下:

$$N = (k_1 \frac{P_d}{T}) Z_d^{-1} + (k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2}) Z_w^{-1} \quad (4.4)$$

P_d : 干空气分压; e : 水汽分压; T : 绝对温度; k_1, k_2, k_3 : 常数; Z_d : 干空气压缩因子; Z_w : 水汽压缩因子;

最终, 式 4.4 可推演而得如下式:

$$\Delta L_{trop}^z = 10^{-6} \left\{ \frac{k_1 R}{g_m M_d} P_s + \int_H^\infty [(k_2 - k_1 \frac{M_w}{M_d}) \frac{e}{T}] dz \right\} = D_{trop,h}^z + D_{trop,w}^z \quad (4.5)$$

R : 摩尔气体常数;

g_m : 大气垂直空气质量中心;

M_d : 干空气摩尔质量;

M_w : 水汽摩尔质量;

P_s : 地表总大气压;

在公式 4.5 中, $\frac{k_1 R}{g_m M_d} P_s$ 称为天顶静力学延迟 (Zenithal Hydrostatic Delay, ZHD),

又称为干延迟, 可通过量测地表总大气压而得到。而 $\int_H^\infty [(k_2 - k_1 \frac{M_w}{M_d}) \frac{e}{T}] dz$ 一项称为湿

延迟 (Zenithal Wet Delay, ZWD), 必须知道大气温度及水汽分压的资料方能计算。

k_1, k_2, k_3 相对于微波的波段信号而言是经验常数, 最早是由 Thayer 在 1974 年提出的,

$k_1 = 77.604 \pm 0.014 (K/mbar)$, $k_2 = 64.79 \pm 10 (K/mbar)$, $k_3 = 377600 \pm 3000 (K^2/mbar)$, 其中 k_2 、 k_3 的不确定性取决于观测时的数据。

一般而言, 中性大气在天顶方向所造成的信号延迟量约在 2.3m 左右, 而当信号高度角从 5 度传播进来时, 中性大气所造成的延迟量可达 25m 左右。

4.2 对流层延迟改正方法

截止到现在, 对流层改正常用方法有模型改正、参数估计、外部修正和差分四种方法, 这里本文只介绍与精密单点定位相关的三种改正方法。

4.2.1 经验模型改正法

根据受到地表的影响不同, 对流层可分为两类。第一类是位于 1-2 公里以下, 受到地表强烈的热力作用和机械作用的对流层, 也被称为摩擦层或边界层, 也称低层大气, 该层为排入大气污染物的主要活动层。而我们常见的天气过程如雨、雪、雹的形成在 1-2 公里以上, 此层受地表影响小, 称为自由大气层。由上面的介绍我们可以知道对流层所产生的折射都是非色散性的, 于是对于天顶延迟量而言, 可以使电磁波的传播路径发生 2.3m 左右的误差, 但是当卫星的高度角比较小时, 比如在 5° 左右时其误差最大时甚至可以达到 25m, 所以对流层延迟所造成的误差是不能忽视的, 我们必须建立相应的模型削弱或剔除这些误差^[56]。

迄今为止常用的对流层延迟改正模型有: 霍普菲尔德(Hopfield)模型、萨斯塔莫宁(Saastamoinen)模型、Black 模型和 EGNOS 模型^[57]。

1、霍普菲尔德模型 (Hopfield Model)^[21]

对分布于全球的 18 个台站全年气象平均探测资料进行分析处理得到了 Hopfield 模型的经验参数, 经过不断地改进, Hopfield 给出了沿大气传播方向的干分量和湿分量的延迟改正公式:

$$\Delta D_{trop} = \Delta D_{dry} + \Delta D_{wet} \quad (4.6)$$

式中, 取 $i = dry, wet$, 其干分量与湿分量可用下式表示:

$$\Delta D_i = 10^{-6} N_i \left[\sum_{k=1}^9 \frac{\alpha_{k,i}}{k} r_i^k \right] \quad (4.7)$$

沿传播路径上的折射指数:

$$N_{dry} = 0.776 \times 10^{-4} \frac{P}{T}$$

$$N_{wet} = 0.373 \frac{e}{T^2} \quad (4.8)$$

在上述公式中, T 表示对流层内气温(K)、 P 表示大气压(mbar)、 e 表示对流层水汽压(mbar), r_{dry} , r_{wet} 依次为干延迟与湿延迟折射指数不断逼近零时与测站沿传播路径的边界面交点的距离, 其计算公式为:

$$r_i = \sqrt{(r_0 + h_i)^2 - (r_0 \cos E)^2} - r_0 \sin E \quad (4.9)$$

就对流层延迟中干湿分量的边缘高度而言, Hopfield 模型中采用的是如下值(m):

$$h_{dry} = 40136 + 148.72(T - 273.16)$$

$$h_{wet} = 11000 \quad (4.10)$$

在上述公式中, E 表示卫星的截止高度角, P 为测站大气压(mbar), r_0 为测站到地心距离(m), e 是测站水汽压(mbar), T 为测站所在地区的温度(K)。经研究人员不断论证, 由 Hopfield 模型得到的对流层干延迟改正精度可达到 2cm, 湿延迟可达到 5cm; 此外, 不同的地形条件与天气条件会对模型的改正精度产生影响。

2、萨斯塔莫宁模型 (Saastamoinen Model) ^[31]

Saastamoinen 以 12km 这一高度为界, 将对流层分成上下两层, 其中高度小于 12km 的对流层遵循着温度递减率, 即高度每增加 1km 温度下降 6.5℃; 在高度从 12km 到 50km 左右的平流层顶, 在该层中假定大气温度为常数。对于纬度为 φ , 高度角为 E , 高程为 h , 温度为 T (绝对温度), 气压为 P (单位 mbar), 水汽压为 e 的测站, Saastamoinen 计算公式为:

$$\Delta s = \frac{0.002277}{\sin E} \left[P_s + \left(\frac{1255}{T_s} + 0.05 \right) e_s - \frac{B}{\tan^2 E} \right] W(\varphi \cdot H) + \delta R \quad (4.11)$$

$$\text{式中, } W(\varphi \cdot H) = 1 - 0.0026 \cos 2\varphi + 0.00028 h_s \quad (4.12)$$

B 和 δR 是取决于高程 H 和高度角 Z 的修正项, 系数如表 4.1 和 4.2 所示。

表 4.1 Saastamoinen 模型的改正项 B

高度 (km)	B (mb)	高度 (km)	B (mb)
0.0	1.145	2.5	0.813
0.5	1.059	3.0	0.747
1.0	1.005	4.0	0.514
1.5	0.918	5.0	0.453
2.0	0.844		

表 4.2 Saastamoinen 模型的改正项 δR

天顶角	测站海拔高 (km)							
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0
60	0.002	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002
66	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005	0.005	0.004	0.004
70	0.011	0.010	0.010	0.008	0.007	0.005	0.003	0.003
73	0.021	0.019	0.016	0.014	0.012	0.010	0.008	0.006
75	0.030	0.027	0.024	0.022	0.020	0.016	0.013	0.010
76	0.039	0.035	0.032	0.029	0.026	0.021	0.017	0.014
77	0.050	0.045	0.041	0.036	0.032	0.026	0.21	0.017
78	0.075	0.068	0.062	0.056	0.051	0.042	0.034	0.028
78.5	0.076	0.067	0.061	0.053	0.051	0.043	0.032	0.025
79	0.082	0.071	0.073	0.062	0.054	0.046	0.040	0.033
79.5	0.101	0.097	0.082	0.071	0.072	0.051	0.046	0.039
79.75	0.113	0.105	0.191	0.182	0.176	0.162	0.152	0.142
80	0.121	0.110	0.100	0.090	0.083	0.067	0.055	0.047

经数值拟合后，可以改写为

$$\Delta s = \frac{0.002277}{\sin E'} \left[P_s + \left(\frac{1255}{T_s} + 0.05 \right) e_s - \frac{B}{\tan^2 E'} \right] \quad (4.13)$$

大量学者论证表明，在提供比较准确气象元素的条件下，Saastamoinen 模型及 Hopfield 模型的干延迟改正可达亚毫米级精度，但应用 Saastamoinen 模型得到的定位精度要优于 Hopfield 模型得到的定位精度。

3、Black 模型

Black 模型也是在实际应用中被广泛采用的一种模型。鉴于 Hopfield 模型未将信号沿对流层传播造成的路径弯曲考虑在内，H.D.Black 于 1978 年在 Hopfield 模型的基础上加入了对流层折射时的路径弯曲改正，给出了 Black 模型的表达式：

$$D^s = D_d^z \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\cos E}{1 + l_0 \cdot h_d / R_s} \right)^2} - b(E) \right] + D_w^z \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\cos E}{1 + l_0 \cdot h_w / R_s} \right)^2} - b(E) \right] \quad (4.14)$$

$$D_d^z = 0.002312(T_s - 3.69)P_s / T_s, \quad D_w^z = 0.0746542e_s \cdot h_w / T_s^2$$

上述公式中: $h_d = 148.98(T_s - 3.96)$, $h_w = 11000m$,

$$e_s = E \cdot \exp(-37.2456 + 0.213166T_s - 0.256908T_s^2),$$

D_s 为斜方向上对流层延迟; E 为卫星仰角; R_s 为测站的地心距; T_s 为测站地面温度(K); l_0 和路径弯曲改正 $b(E)$ 可用下式确定:

$$\begin{cases} l_0 = 0.167 + [0.076 + 0.15 \times 10^{-3} \cdot (T_s - 273.16)]^{-0.3E} \\ b(E) = 1.92 / (E^2 + 6) \end{cases} \quad (4.15)$$

4、EGNOS 模型 [27][52][55]

以上几种对流层延迟改正模型在应用时均需要输入地面实测的气象元素, 为了对其进行简化, 欧盟通过欧洲中尺度数值预报中心资料建立了 EGNOS 模型, 该模型在计算对流层天顶延时不需要输入实测气象数据。需要气压、温度、水汽压、温度梯度和水汽梯度这 5 个气象参数来对该模型进行计算。而这些气象参数在平均海平面上的变化值只与测站的纬度和年积日有关, 并且其年变化规律表现为振幅等可由气象资料拟合求得的余弦函数的形式 [27]。

接收机对流层天顶延迟的计算流程: 先运用 5 个气象参数计算相应的平均海平面的天顶延迟, 气象参数接收由机所在的纬度和观测日期 (年积日) 确定; 再根据接收机的高程计算接收机处的对流层天顶延迟。它能较好地描述平均对流层延迟, 模型如下:

$$D_{dry} = D_{dry}^z \left[1 - \frac{\beta H}{T} \right]^{\frac{g}{R_d \beta}}, \quad D_{wet} = D_{wet}^z \left[1 - \frac{\beta H}{T} \right]^{\frac{(\lambda+1)g}{R_d \beta} - 1} \quad (4.16)$$

其中, $g = 9.80665 m/s^2$, $R_d = 287.054 s^2/K$, $\beta = 0.0065 k/m$, D_{dry}^z : 均海面天顶干延迟, D_{wet}^z : 均海面天顶湿延迟, H : 接收机高(m), T : 平均海平面温度 (K)。平均海平面的天顶延迟的计算公式如下:

$$D_{dry}^z = \frac{10^{-6} k_1 R_d p}{g_m}, \quad D_{wet}^z = \frac{10^{-6} k_2 R_d}{g_m (\lambda + 1) - \beta R_d} \times \frac{e}{T} \quad (4.17)$$

其中, $g_m = 9.784 \text{ m/s}^2$, $k_1 = 77.604 \text{ K/mbar}$, $k_2 = 377600 \text{ K}^2/\text{mbar}$, p 是平均海平面的气压 (mbar), e 是平均海平面的水汽压 (mbar)。

平均海平面的气象参数 P, T, e, β, λ 的计算公式:

$$\xi(\phi, D) = \xi_0(\phi) - \Delta\xi_0(\phi) \times \cos\left(\frac{2\pi(D - D_{\min})}{365.25}\right) \quad (4.18)$$

5 个参数只和接收机位置的纬度 ϕ 和观测日期 D (年积日) 有关; D_{\min} 为各气象参数的年变化日期的最小值。表 4.3 和 4.4 分别为 5 个气象参数的年平均值与季节变化值。

表4.3 EGNOS模型中5个气象参数的年平均值

Lat (°)	≤ 15	30	45	60	≥ 75
$P_0(\text{mbar})$	1013.25	1017.25	1015.75	1011.75	1013.00
$T_0(\text{K})$	299.65	294.15	283.15	272.15	263.65
$e_0(\text{mbar})$	26.31	21.79	11.66	6.78	4.11
$\beta_0(\text{K/m}) \times 10^{-3}$	6.3	6.05	5.58	5.39	4.53
λ_0	2.77	3.15	2.57	1.81	1.55

表4.4 EGNOS模型中5个气象参数的季节变化值

Lat (°)	≤ 15	30	45	60	≥ 75
$\Delta P_0(\text{mbar})$	0	-3.75	-2.25	-1.75	-0.5
$\Delta T_0(\text{K})$	0	7.0	11.0	15.0	14.50
$\Delta e_0(\text{mbar})$	0	8.85	7.24	5.36	3.39
$\Delta \beta_0(\text{K/m}) \times 10^{-3}$	0	0.25	0.32	0.81	0.74
$\Delta \lambda_0$	0	0.33	0.46	0.74	0.3

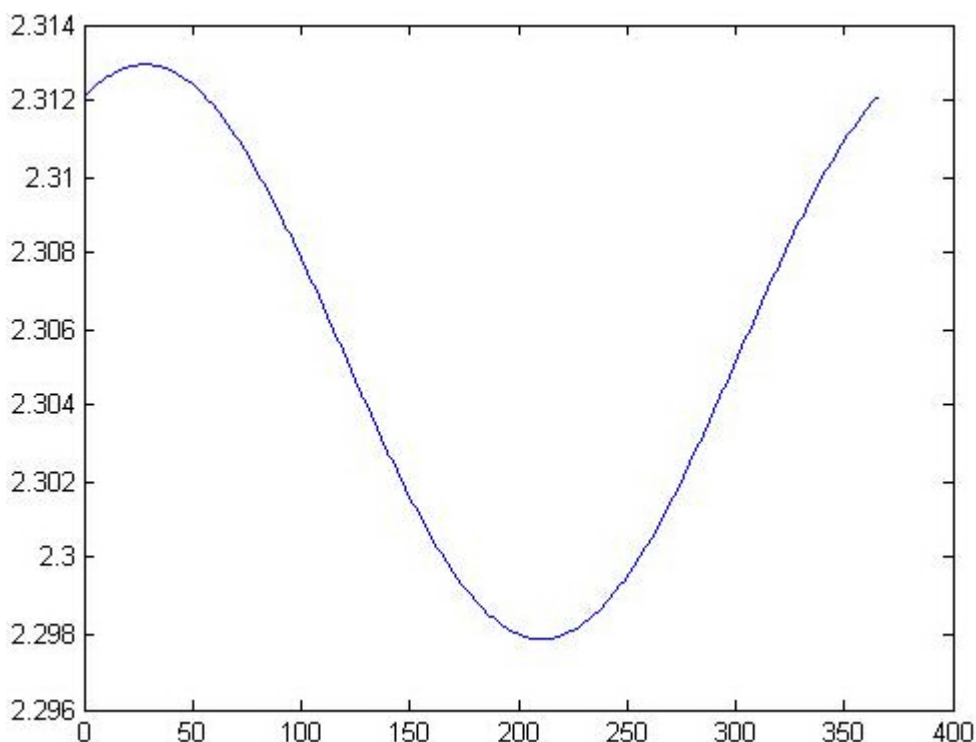


图 4.2 利用标准气象参数得到的 EGNOS 北纬 39°模型求得的年变化对流层延迟

实践证明, EGNOS 的模型精度与需要实测气象参数的 Hopfield 模型、Saastamoinen 模型相当, 并且没有明显的系统偏差, 平均中误差仅为 5cm, 高于标准大气参数的 Hopfield 模型和 Saastamoinen 模型计算的精度^[52]。

利用全球 IGS 站网的 GPS 实测得到的对流层天顶延迟的时间序列, 对不同模型进行对比和分析, 得出以下两点结论^[53]: (1) 利用 Hopfield 模型计算得到的对流层天顶延迟, 其改正精度随着高程的增加而降低, 在海拔 1km 以上的地方, Hopfield 模型改正精度较差, 不在适用于模型改正。(2) EGNOS 模型与 Hopfield 模型和 Saastamoinen 模型计算的天顶延迟精度相当, 并且与 IGS 站实测出的天顶对流层延迟结果相符的很好, 其中 EGNOS 改正模型不仅仅局限于实测气象参数的输入, 而且计算公式简洁易懂, 需要输入的参数较其他模型也相对较少, 在全球平均对流层方面还是可以很好的表现出全球大气变化特征的。相较于其他改正模型, EGNOS 能够达到 GNSS 米级定位精度对流层延迟改正的需要, 可将此模型应用于 GNSS 定位及导航中以提高定位精度。

EGNOS 模型有着诸多的优点, 是一种相对简单、改正精度相对较高的全球性的对流层延迟改正模型。但在小区域范围或地形起伏变化较为剧烈的地区, EGNOS 模型一样会产生比较大的误差, 与 Hopfield 模型、Saastamoinen 模型等改正精度相当, 同样, 会在进行 GPS 大地高测量时对其产生非常明显的影响。

4.2.2 参数估计法

干分量约占整个对流层路径延迟的 90%，是对流层延迟的主要部分。对流层延迟的干分量在时间和空间两方面均处于一种比较稳定的状态，在时间和空间上天顶方向的折射量变化率都较小，约为 2cm/h，因此可以通过模型对干分量部分进行削弱，并得到较好的结果^[54]。虽然水蒸气产生的延迟分量只占整个延迟量的 10%，然而由于其折射的极不稳定性，在时间和空间上天顶方向的折射量变化率比干分量大了 3-4 倍。对于这部分延迟，通过模型改正精度只能达到 80% 左右。而改正模型是基于假设大气层是处于流体静力平衡状态下的理想气体，所以在 GPS 实际的测量中模型改正的精度更差^[60]。另一方面，因为受到大气代表性误差的干扰，传播路径上的气象条件并不能由测站的气象元素来表征，所以，提出在模型改正的基础上，在每个测站上附加对流层时延参数的模拟方法，把这些参数连同其他参数一起参与平差，估计湿分量延迟量，与模型计算出的干分量延迟得到总的对流层天顶延迟量作和。参数估计法有以下几种：单参数法，多参数法，随机过程法。以下对几种参数估计法进行一一介绍。

1、单参数估计法

运用模型改正的对流层延迟，与真实值总存在一定的偏差，设这个偏差 ε 是个常数，则对流层延迟改正可表示为：

$$\Delta L = (D_z + W_z + \varepsilon) \cdot MF(E) \quad (4.19)$$

这个偏差 ε 实际上是观测量的附加参数，可以一起带入方程解算。

2、多参数估计法

为了对对流层大气折射变化的反映更加符合实际，对模型偏差随时间的变化进一步进行模拟，采用时间间隔 ΔT 一定并且设定一个固定的天顶延迟偏差值 $\varepsilon(\Delta T)$ ，这种方法称为多参数估计法。大气具有时空变化的特征，相对来说多参数估计法更符合实际。其表达式如下：

$$\begin{cases} \Delta D_{trop}(t) = (\rho_w + \rho_d + \rho_i)m(E) \\ T_{i-1} < T_i, T_i = T_{i-1} + \Delta T \end{cases} \quad (4.20)$$

如果 ΔT 为观测数据的历元间隔，也就是在每个测站每隔一个历元上都引入一个天顶方向的对流层延迟参数。理论上讲，模型经补偿改正后的误差会随着参数的增加而变小，但与此同时，法方程解的强度却随着估计参数的增加而变得越来越差。因为随着附加参数变多，有很大的可能性导致法方程的病态甚至秩亏。在单参数情况下，由于

参数过少已经反映不出对流层随时间变化的特征,尤其是湿分量的变化,这直接导致了参数估计精度的降低。因此,在进行多参数估计时,如何选取合适的参数数量是值得研究的问题。

3、随机过程法

分析由外部辐射计测得的对流层延迟湿分量,可以很容易发现利用一阶高斯马尔科夫过程可以很好地描述对流层天顶方向的湿延迟变化趋势,其变化公式如下:

$$\frac{d\rho(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_p} \rho(t) + W(t) \quad (4.21)$$

上述公式中, τ_p 为随机过程的相关时间, $W(t)$ 是方差为 σ_w^2 的零均值高斯白噪声。经过进一步分析,可得到随机微分方程的离散解,其表达式如下所示:

$$\begin{cases} \rho(i+1) = m(i)\rho(i) + \bar{W}(i) \\ m(i) = e^{\frac{t_{i+1}-t_i}{\tau_p}} = e^{-\frac{\Delta t}{\tau_p}} = m(\Delta t) \\ \bar{W}(i) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} e^{-\frac{t_{i+1}-\tau}{\tau_p}} W(\tau) d(\tau) \\ \sigma_w^2(i) = \frac{1}{2} \tau_p \sigma_w^2 \{1 - [m(i)]^2\} \end{cases} \quad (4.22)$$

上述公式中,对流层湿延迟待估参数为 $\rho(i)$ (第 i 历元),可以根据经验在参数估计之前给定多应用随机过程的方差 σ_w^2 和相关时间 τ , 应当注意提前选取的先验数值不同会得到不同的估计结果。在实际应用中,常常对参数选择过程进行简化,一般情况下 τ 取区域无穷大即表示随机游走过程, σ_w^2 是与其相一致的连续过程方差。

通常情况下,要将用滤波方法进行参数估计加入到采用随机过程法估计天顶对流层延迟中。实际上随机过程法是目前精度最高的对流层延迟估计方法,此法得到的天顶湿延迟改正与水蒸气辐射仪测量所得差值在 1cm 以内,可以大大增强沿高程方向上的重复性。

4.2.3 外部修正法

利用一定的仪器来精确的测定大气中的水汽对 GPS 信号在传播路径上的影响即为外部修正法,其中,由经验对流层改正模型计算传播路径上的天顶静力学延迟。

水汽微波辐射仪(WVR)是在气象学中被用来观测大气水汽含量的仪器,该技术现在已经发展的相当成熟,因此国际上 WVR 单独在遥测大气水汽的应用相当广泛;但直

到近十年来才有学者将其应用在辅助 GPS 定位，由于该仪器价格相较于 GPS 接收机高出甚多，因此在国际上应用该仪器专门辅助 GPS 定位的案例很少；大部分 WVR 仪器都是配合 VLBI 或天文观测站，部分是单独进行大气水汽观测或进行短时间辅助 GPS 定位观测。

水汽微波辐射仪在测量湿分量延迟时的精度可达 1-3cm，其仪器精度为 1-2mm。Raman 等应用激光雷达等现代测量技术已经证明采用 WVR 技术得到的对流层天顶湿延迟精度可达 5mm。

外部修正法可以得到较高的天顶对流层延迟改正精度，但由于 WVR 设备采购成本较高、不方便使用，故在 GPS 定位中不经常使用。

4.3 Niell 映射函数模型

映射函数（ $MF(Z)$ ，Mapping Function）可视为 GPS 信号分别通过测站的天顶方向与斜方向的路径比值，其可用于将 GPS 信号在各个观测仰角上的倾斜路径延迟投影到天顶方向上的天顶路径延迟（ Δ_0^{PD} ；Path Delay In Zenith Direction）如图 4.3 所示。

$$\Delta^{PD} = MF(Z) \cdot \Delta_0^{PD} \quad (4.23)$$

其中 Z ：天顶距。

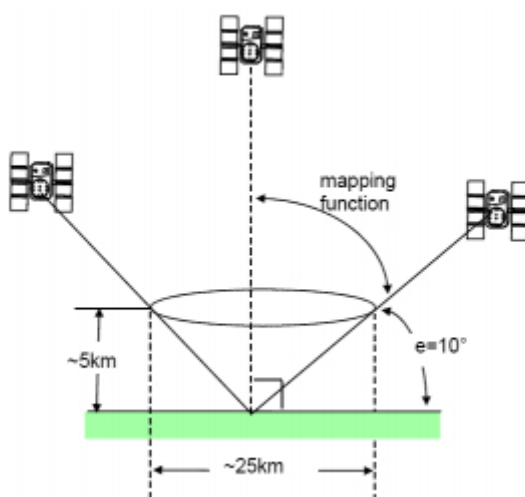


图 4.3 对流层倾斜与天顶路径延迟之间的投影关系

简易映射函数定义如下：

$$MF(Z) = \frac{1}{\cos Z}$$

这种简化的映射函数虽然将大气视为水平分层，并且忽略了地球曲率的影响，其

投影成果的误差也将随天顶距 Z 的增大而提高。近年来在国内外的相关研究上已经发展了许多精密、复杂并具备全球适用性的映射函数，诸如 chao 映射函数模型、ifadis 投影函数模型等。此外，为了贴近真实情况，多数的高精度映射函数也进一步区分为干映射函数和湿映射函数。

NMF 是一个对流层延迟改正的投影函数，该模型由 Niell 于 1996 年发表在 *Journal of Geophysical Research* 杂志上，利用了全球的探空气象站建立了一个全球模型，该模型适应的截止高度角为 3° ，模型在中纬度地区效果很好，当在高纬度地区和赤道地区效果欠佳，在高程方向会引起偏差。由于不包含气象元素且考虑了对流层季节性变化，NMF 模型被广泛地应用于 GNSS 和 VLBI 等领域。Niell 映射函数忽略了气象因素，仅取决于季节、高度角、测站纬度以及测站高程的因素，投影函数包括干分量投影函数和湿分量投影函数两个部分。

对流层延迟为：

$$TD = ZHD \cdot MF(Z)_{DRY} + ZWD \cdot MF(Z)_{wet} \quad (4.24)$$

NMF 干分量投影函数采用连分数的形式，与高度角、测站的纬度有关，计算公式如下：

$$MF(Z)_{DRY} = \frac{\frac{1}{1 + \frac{a_{dry}}{1 + \frac{b_{dry}}{1 + c_{dry}}}}} \frac{1}{\sin Z + \frac{a_{Dry}}{\sin Z \frac{b_{Dry}}{\sin Z + c_{dry}}}} + \left(\frac{1}{\sin Z} - \frac{\frac{1}{1 + \frac{a_{ht}}{1 + \frac{b_{ht}}{1 + c_{ht}}}}} \frac{1}{\sin Z + \frac{a_{ht}}{\sin Z \frac{b_{ht}}{\sin Z + c_{ht}}}} \right) \times \frac{H}{100} \quad (4.25)$$

其中：

$MF(Z)_{DRY}$ ：Niell 干映射函数；

$a_{dry}, b_{dry}, c_{dry}$ ：Niell 干映射函数取决于测站纬度的系数项；

a_{ht}, b_{ht}, c_{ht} ：高程改正系数，其值如表 4.5 所示；

Z ：高度角；

H ：测站高程。

$$a_{dry} = a_{average/dry}(\varphi_i) + a_{amplitudes}(\varphi_i) \cdot \cos(2\pi \frac{t-T_0}{365.25})$$

$$b_{dry} = b_{average/dry}(\varphi_i) + b_{amplitudes}(\varphi_i) \cdot \cos(2\pi \frac{t-T_0}{365.25})$$

$$c_{dry} = c_{average/dry}(\varphi_i) + c_{amplitudes}(\varphi_i) \cdot \cos(2\pi \frac{t-T_0}{365.25})$$

$a_{average/dry}, b_{average/dry}, c_{average/dry}$: 取决于纬度的平均系数项, 其值如表 4.6 所示;

t : 年积日;

T_0 : 取决于测站坐落位置, 北半球设为 28, 南半球设为 211。

$a_{amplitudes}, b_{amplitudes}, c_{amplitudes}$: 取决于纬度的季节变化项系数。

表4.5 Niell干映射函数的高程改正数系数 (km)

高程改正系数 (Height Correction)	值 (values)
a_{ht}	2.53×10^{-5}
b_{ht}	5.49×10^{-3}
c_{ht}	1.14×10^{-3}

表4.6 Niell干映射函数的平均系数

平均系数	纬度(φ_i)				
	$\varphi = 15^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 45^\circ$	$\varphi = 60^\circ$	$\varphi = 75^\circ$
$a_{average/dry} (\times 10^{-3})$	1.2368924	1.2578321	1.2346387	1.2286059	1.2154886
$b_{average/dry} (\times 10^{-3})$	2.9043674	2.9243389	2.9177334	2.9133464	2.9213801
$c_{average/dry} (\times 10^{-4})$	6.2521414	6.1748482	6.2612665	6.2713154	6.1147366

NMF 湿分量投影函数采用连分数的形式, 与高度角、测站的纬度有关, 计算公式为:

$$MF(Z)_{wet} = \frac{\frac{1}{1 + \frac{a_{wet}}{1 + \frac{b_{wet}}{1 + c_{wet}}}}}{\sin Z + \frac{a_{wet}}{\sin Z \frac{b_{wet}}{\sin Z + c_{wet}}}} \quad (4.26)$$

式中： $MF(Z)_{wet}$ 为 Niell 湿映射函数； $a_{wet}, b_{wet}, c_{wet}$ 为 Niell 湿映射函数测站纬度的系数项；

表4.7 Niell湿映射函数的平均系数

平均系数	纬度(φ_i)				
	$\varphi = 15^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 45^\circ$	$\varphi = 60^\circ$	$\varphi = 75^\circ$
$a_{average/wet} (\times 10^{-4})$	1.2368924	1.2578321	1.2346387	1.2286059	1.2154886
$b_{average/wet} (\times 10^{-3})$	2.9043674	2.9243389	2.9177334	2.9133464	2.9213801
$c_{average/wet} (\times 10^{-2})$	6.2521414	6.1748482	6.2612665	6.2713154	6.1147366

以上各表中所介绍的取决于特定纬度的系数，都可以通过线性内插方法，取得任意纬度处的特定系数。

采用 matlab 编程语言，实现了四种对流层延迟改正模型，对于 Saastamoinen 模型与 EGNOS 模型，其投影函数采用 Niell 投影函数模型。应用西安 CORS 站 CHDC2012 年第 119 天的监测数据，数据采样间隔为 30s，取截止高度角 10° ，计算该站单站的对流层延迟量。

表4.8 不同对流层模型不同高度角对应延迟量

高度角	延迟量 (m)			
	Hopfield	Saastamoinen	EGNOS	Black
10	14.2	12.9	13.1	13.3
20	7.5	6.9	7.1	7.2
30	5.1	4.6	4.7	4.8
40	4.1	3.6	3.6	3.8
50	3.5	3.2	3.2	3.3
60	3.1	2.6	2.6	2.8
70	2.7	2.4	2.4	2.5
80	2.6	2.3	2.3	2.4

表 4.8 为采用 Hopfield 模型、Saastamoinen 模型、EGNOS 模型、Black 模型求取的 PRN18 号卫星伴随着高度角的变化关于测站的对流层延迟，从表 4.8 可以看出，当高度角降到 10° 时，对流层延迟量可达十多米，而当高度角在天顶方向附近，即接近 90° 度时，对流层延迟量约为 2.5m 左右。

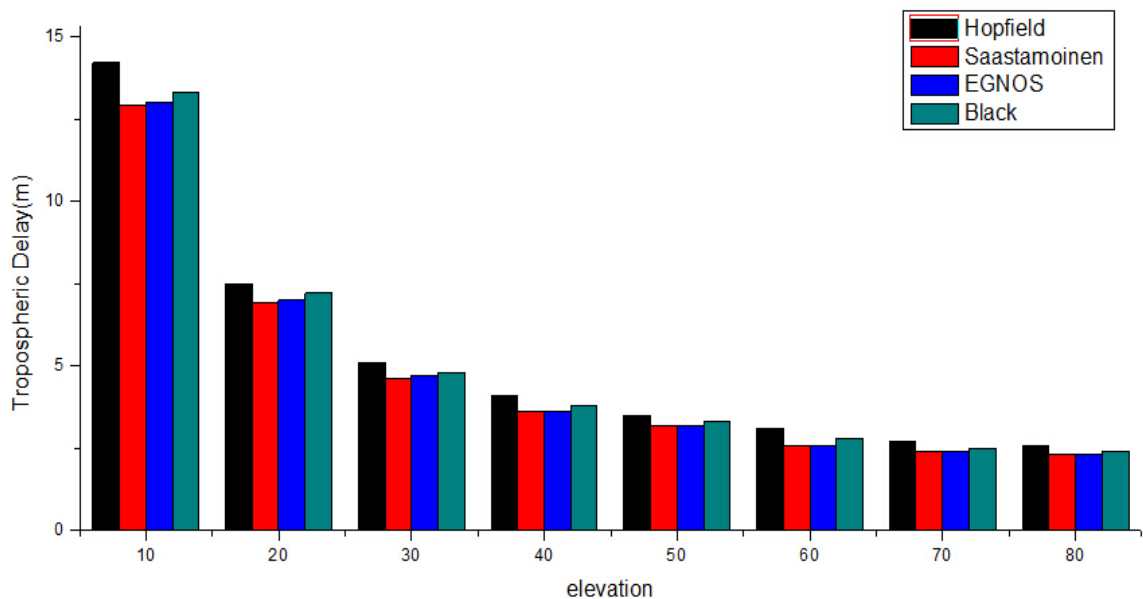


图4.4 不同模型不同高度角对应的对流层延迟量

将不同对流层延迟改正模型不同高度角对应对流层延迟统计成柱状图，如图 4.4 所示，可以明显看出通过四种模型求得的对流层延迟量随高度角的变化趋势是一致的，都是随着高度角的增大而减小。当卫星截止高度角变大时，各模型求得的延迟量相差不多。

4.4 本章小结

本章主要对对流层的特性以及对流层延迟误差作了较为详细的分析，在探讨分析对

流层延迟形成的原理后，主要论述了对流层延迟改正的三种改正方法，即经验模型改正法、参数估计法和外部修正法，着重介绍了对流层延迟的经验模型改正法,对各种对流层改正模型的原理公式进行了总结，并且对投影函数中应用最广泛的 Niell 投影函数模型做了介绍。

第五章 对流层模型对 GPS 精密单点定位影响研究

5.1 概述

为了分析不同的对流层延迟改正模型对精密单点定位结果的影响,本文利用不同的对流层延迟改正模型分别进行 PPP 解算。采用西安地区 2012 年地面沉降监测数据,在 SOPAC 下载精密星历,精密钟差及卫星天线相位中心改正文件,本章主要应用东京海洋大学利用 Matlab 平台开发的免费开源的高精度 GPS 数据处理软件—Gpstools 来完成相关数据的处理分析工作。

Gpstools 主要包含三个模块,即数据预处理模块、误差改正模块和参数估计模块。可进行单频、双频和 GPS 精密单点定位;采用消除电离层影响的 P 码伪距观测值和载波相位观测值根据高度角对观测值进行定权;进行数据预处理时利用宽巷、无电离层等组合观测值来进行周跳的探测;误差改正模块中,考虑了潮汐改正(包括固体潮、海洋潮汐)、相对论效应、相位缠绕、卫星及接收机天线相位中心改正等多项误差改正,在精密单点定位的参数估计过程中,采用迭代最小二乘方式来解算测站坐标、接收机钟差等参数。其数据处理流程及各个功能模块如图 5.1 与 5.2 所示:

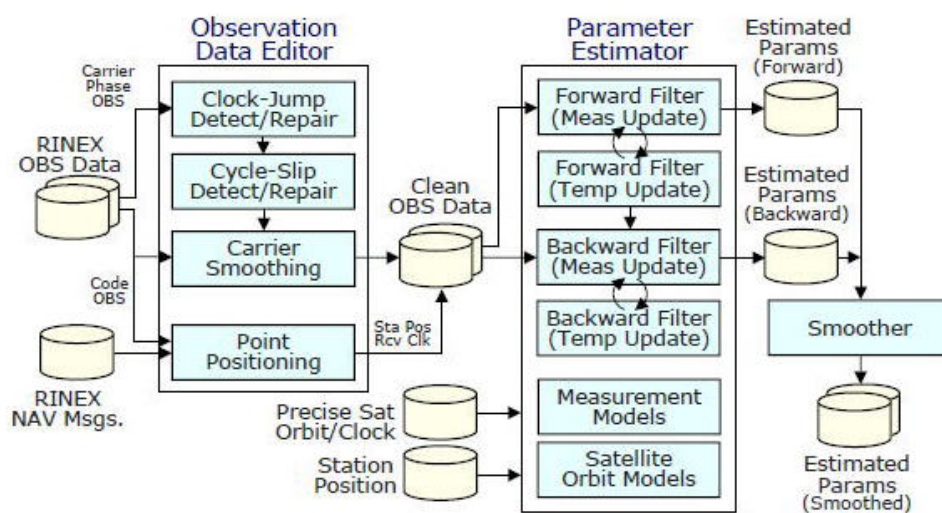


图5.1 Gpstools数据处理流程

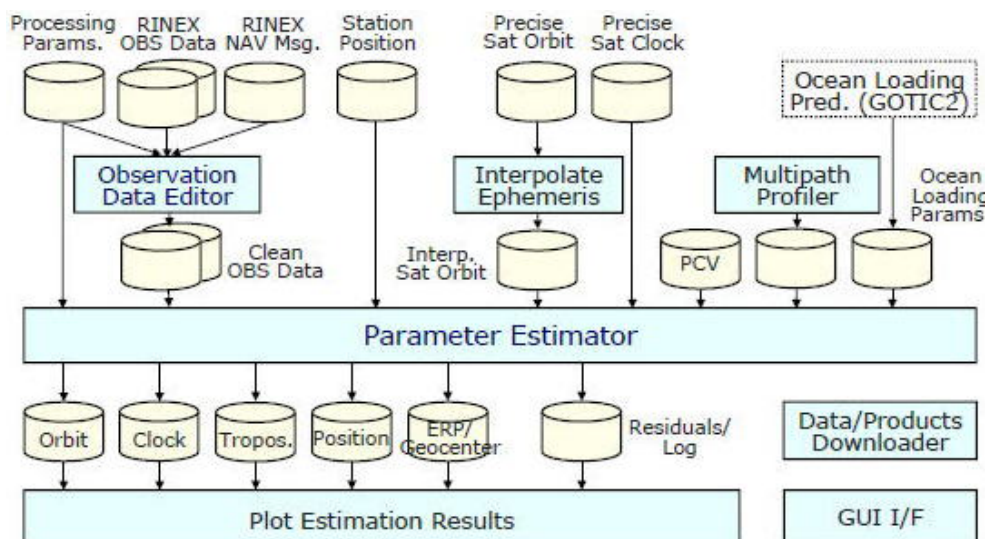
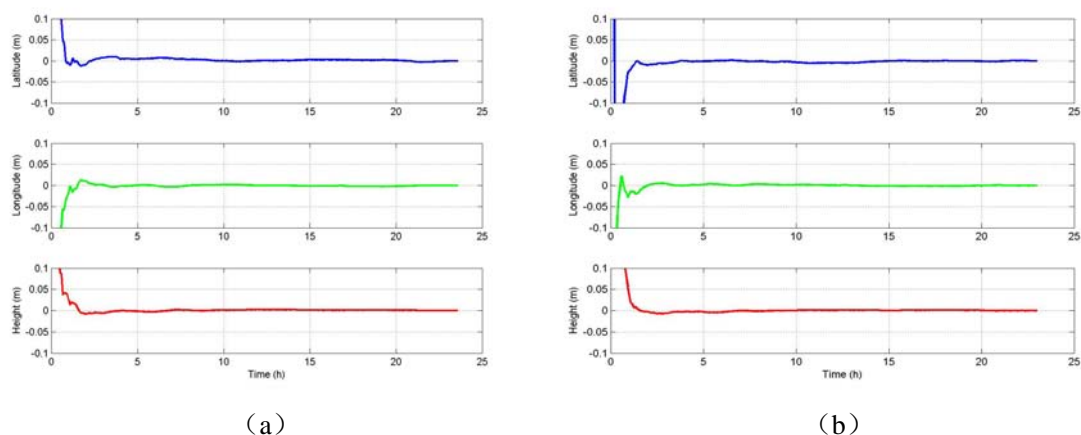
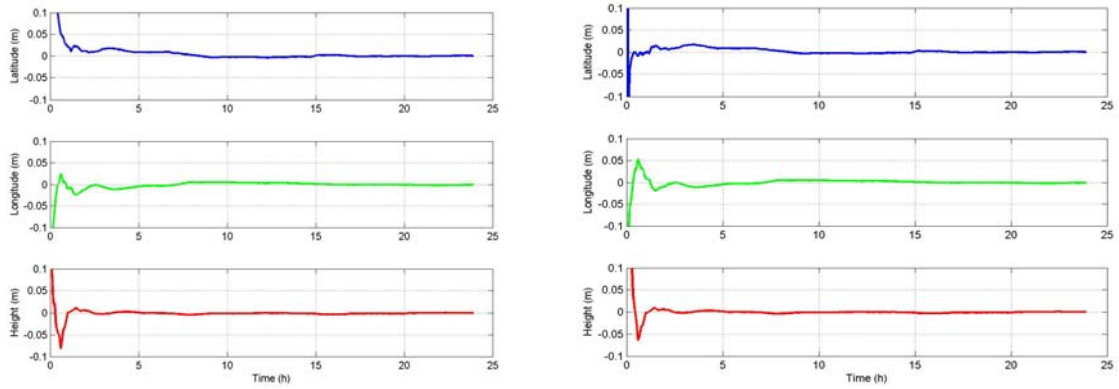


图5.2 Gpstools功能模块

5.2 模型改正后的结果分析

在对 Gpstools 软件各个功能模块充分理解后，在定位模块中加入 Matlab 程序，在原有程序的基础上加入了几种对流层延迟改正模型。程序默认对流层延迟改正模型为 Saastamoinen 模型，新加入的模型为 Hopfield 模型、Black 模型和 EGNOS 格网模型，其中 Saastamoinen 模型与 EGNOS 模型均采用 Niell 投影函数。选取 CHDC 与 XJ07 两个 GPS 监测点第 119 天的数据，应用四种对流层延迟改正模型分别进行 PPP 解算，将得到的定位结果与长安大学空间定位技术研究所用 GAMIT 解算得到的结果进行对比，得到各坐标的误差分量，不同模型的定位结果如图 5.3 所示。其中 (a) 为加入 Hopfield 模型后定位结果，(b) 为加入 Black 模型后定位结果，(c) 为加入 Saastamoinen 模型后定位结果，(d) 为加入 EGNOS 模型后的定位结果。

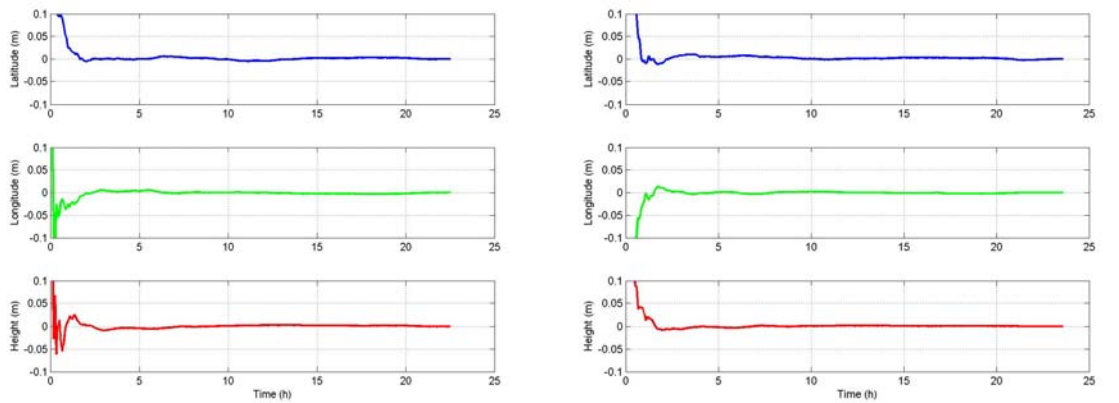




(c)

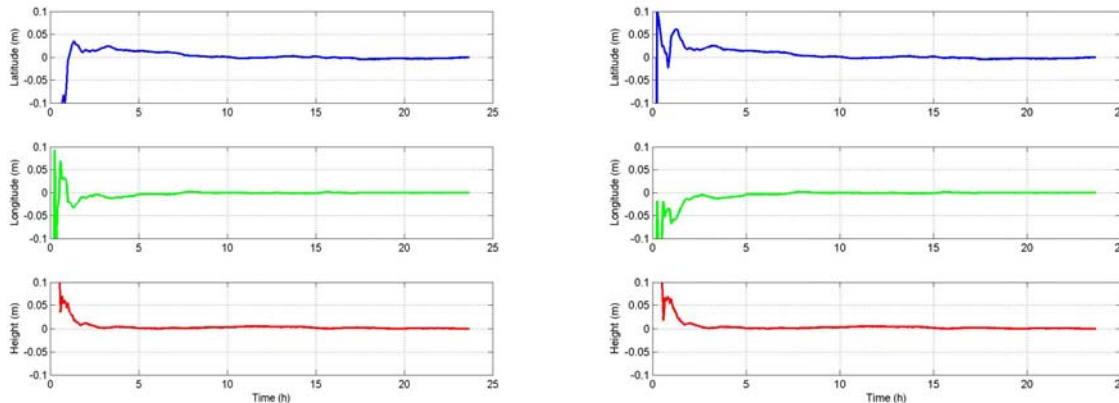
(d)

CHDC



(a)

(b)



(c)

(d)

XJ07

图5.3 不同对流层模型的定位结果

从图 5.3 各图的纵轴表示精密单点定位在东、北、高程方向坐标分量的误差单位为 m，横轴为 GPS 时间，因为 Gpstools 软件将卡尔曼滤波算法应用于定位过程，可以看到从第 3 小时（即第 360 历元）开始，四种对流层改正模型对应的三个方向上的坐标误差

开始收敛^[44]。由于在第 360 个历元之前并非所有的误差曲线趋于稳定,故在统计坐标分量误差时只选取第 360 历元之后的数据进行坐标分量误差的统计。

表5.1 坐标分量误差表 (cm)

	CHDC			XJ07		
	N	E	U	N	E	U
Hopfield	4.62	4.84	6.71	4.57	4.94	6.66
Black	4.74	4.33	6.47	4.81	4.26	6.53
Saastamoinen	4.22	4.06	4.91	3.69	3.38	4.14
EGNOS	3.90	3.83	4.86	4.19	3.63	4.78

从表 5.1 中可以看出,四种改正模型得到的定位结果均为 cm 级,使用不同的对流层改正模型,对平面位置定位结果影响不明显,Hopfield 模型与 Black 模型的定位结果相当,Saastamoinen 模型与 EGNOS 模型的定位结果相当。但在高程方向,Saastamoinen 模型与 EGNOS 模型定位精度要优于 Hopfield 模型和 Black 模型。

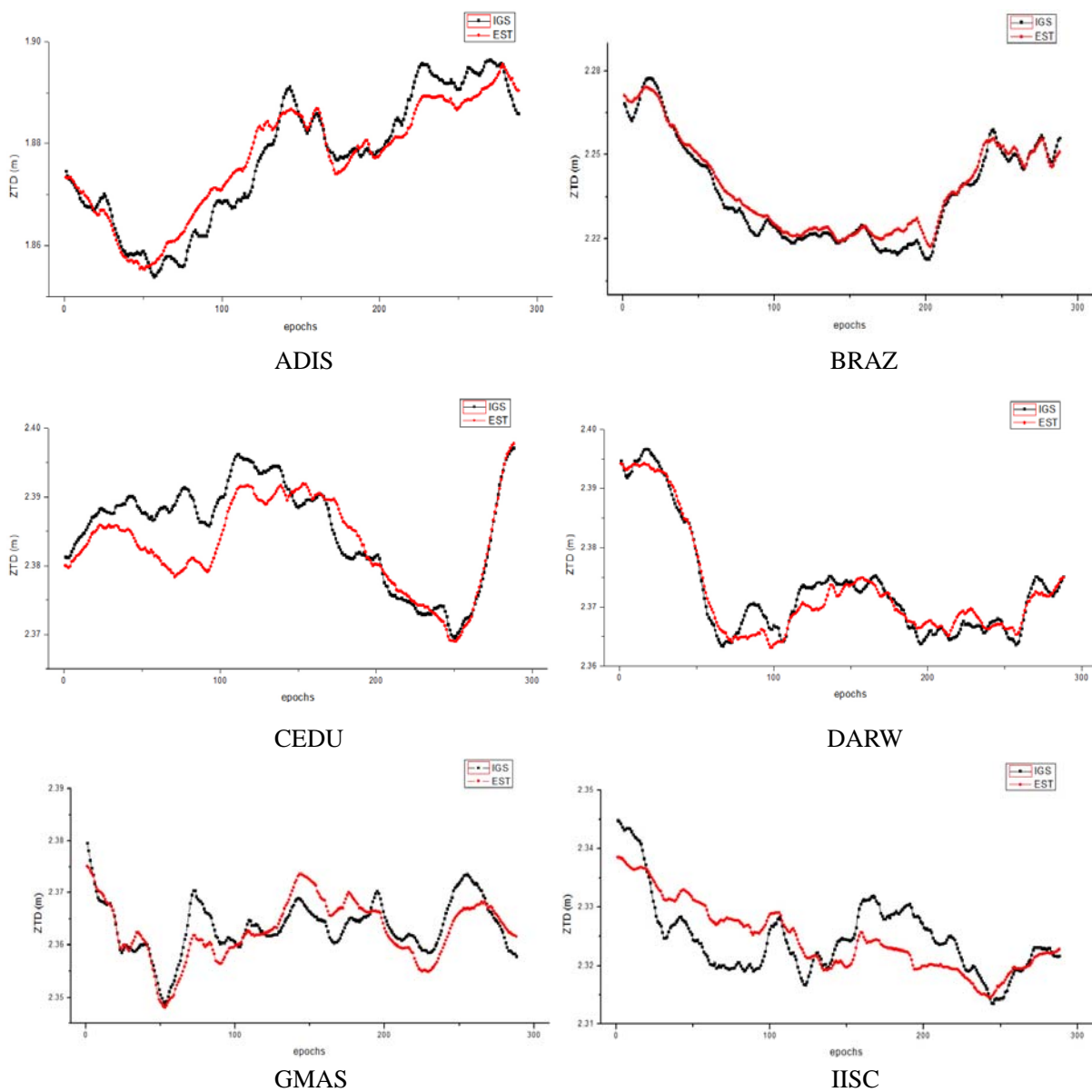
5.3 引入参数估计法后的结果分析

在精密单点定位中,利用模型改正法对干延迟改正可以达到很高的精度,而湿延迟的改正效果较差,这使得在天气变化较剧烈时得到的定位精度不高,因此常常通过引入未知参数对其进行估计。东京海洋大学开发的高精度 GPS 数据处理分析软件 Gpstools 提供相应的参数处理策略,其通过 Saastamoinen 模型来改正干延迟,湿延迟则通过参数估计的方法求出。以下是选取 2012 年第 119 天全球 10 个 IGS 站的数据,分析其参数估计法求得的天顶对流层延迟改正与 IGS 提供真值之间的差异。

IGS 分析中心从全球资料中获取观测资料,计算生成各种 IGS 产品,这些 IGS 产品中包括天顶对流层延迟 ZPD,其精度在 5mm 以内。IGS 从 1997 年开始提供测站时间分辨率为 5 分钟的 ZPD 产品,各跟踪站站每天生成一个文件。本文选取的十个 IGS 站分布如图 5.4 所示。



图5.4 选取IGS站全球分布图



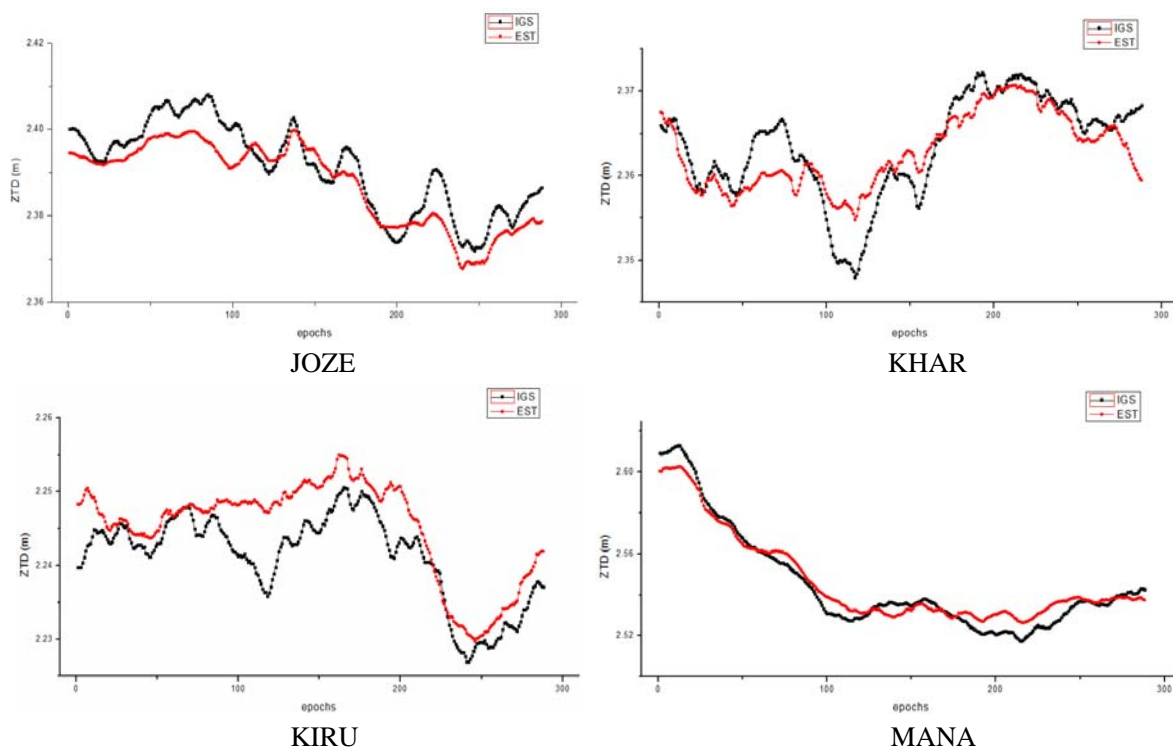


图5.5 天顶对流层延迟比较

图 5.5 中 IGS 表示 IGS 分析中心提供的对应跟踪真的 ZPD 值, EST 为采用 Gpstools 计算得到的 ZPD 结果, 从整体上看, 每幅图中两条曲线的走势基本一致吻合的较好, 仅在少数时间段有出现差值较大的情况, 除 MANA 站外, 其他 IGS 站大部分时间两者的偏差在 6mm 以内。由此, 可得出通过参数估计法求得的天顶对流层延迟量是可靠地, 同时可以通过此方法得到较好的定位结果。各站所求得的最大偏差如表 5.2 所示。

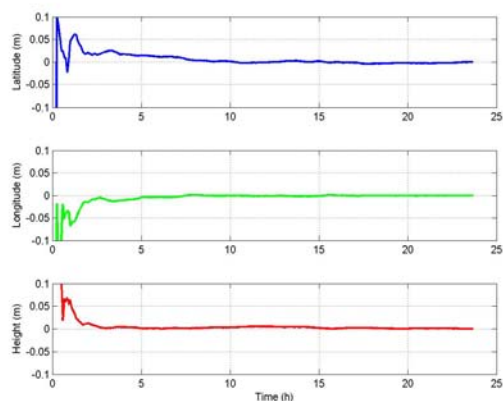
表5.2 各IGS站求得天顶对流层延迟的最大偏差量 (m)

Site	ADIS	BRAZ	CEDU	DARW	GMAS
Bias	0.0069	0.005	0.0119	0.0054	0.0086
Site	IISC	JOZE	KHAR	KIRU	MANA
bias	0.0091	0.0109	0.0088	0.0144	0.0104

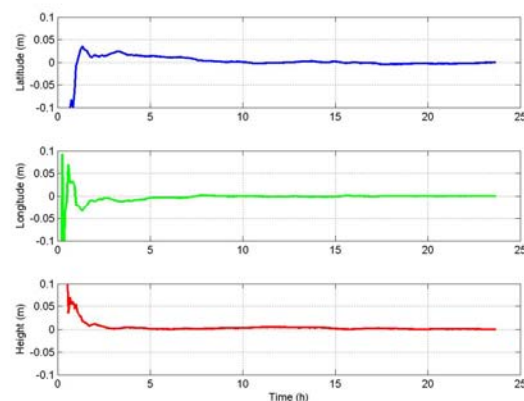
在 Gpstools 所在的 Matlab 平台基础上, 由于其默认的对流层干延迟的改正模型为 Saastamoinen 模型, 在其中加入了自己编写的三种基于 Matlab 的对流层延迟改正模型的程序, 分别为 Hopfield 模型、Black 模型和 EGNOS 模型, 投影函数依然选择 Niell 投影函数模型。在精密单点定位过程中, 对流层干延迟通过模型改正法改正, 湿延迟则通过参数估计法改正, 这样可以更好的与之前仅通过模型改正得到的定位结果作比较。通过对西安 2012 年地面沉降地裂缝监测数据的处理, 对比分析不同的改正模型对定位结果的影响。

试验选取 2012 年长安大学 CORS 站 CHDC 与沉降监测点 XJ07 年积日 119 天的观

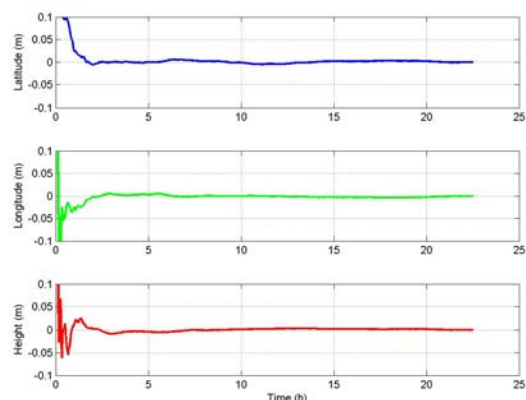
测数据，得到不同对流层模型定位结果如图 5.6 所示。其中（a）为加入 Hopfield 模型后定位结果，（b）为加入 Black 模型后定位结果，（c）为加入 Saastamoinen 模型后定位结果，（d）为加入 EGNOS 模型后定位结果。



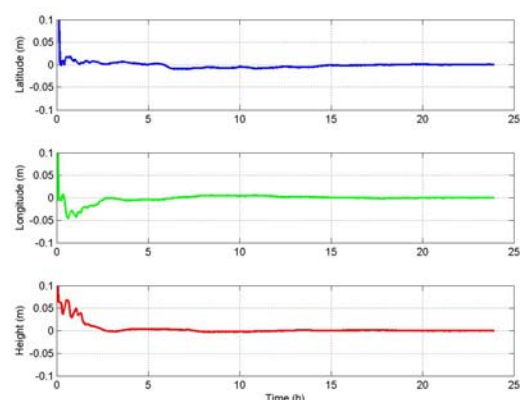
(a)



(b)

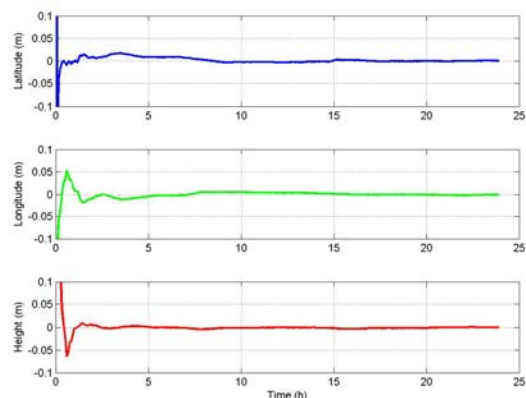


(c)

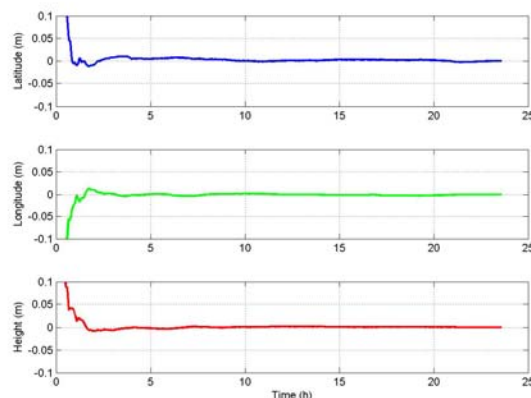


(d)

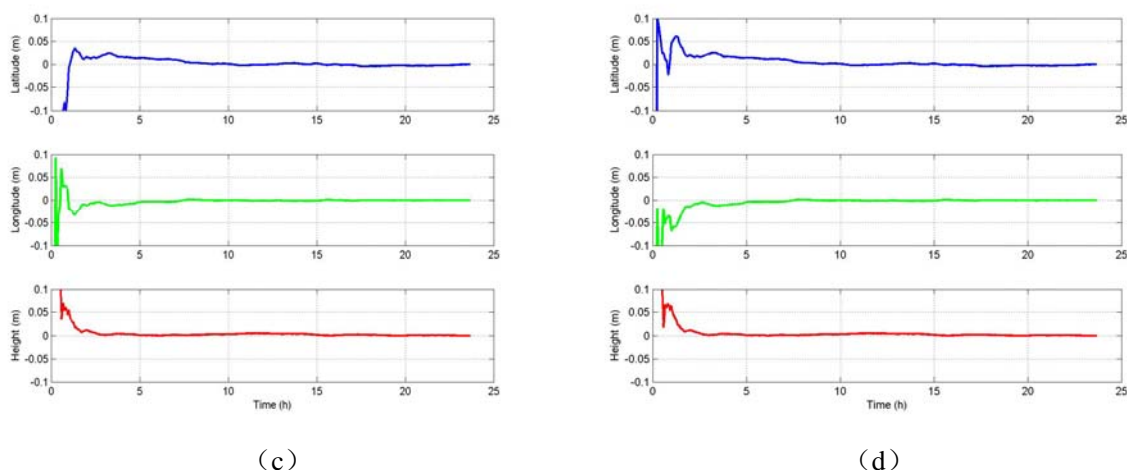
CHDC



(a)



(b)



XJ07

图 5.6 不同对流层模型的定位结果

表 5.3 坐标分量误差表 (cm)

	CHDC			XJ07		
	N	E	U	N	E	U
Hopfield	3.22	3.64	4.13	3.53	3.86	4.62
Black	3.58	3.36	4.55	3.71	3.13	4.54
Saastamoinen	2.69	2.54	3.76	2.52	2.85	3.11
EGNOS	2.37	2.22	3.34	2.47	2.63	3.32

从表 5.3 中可以看出, Hopfield 模型与 Black 模型的定位结果相当, Saastamoinen 模型与 EGNOS 模型的定位结果相若, 且其定位精度要优于前两者。总体来看, 四种模型在 N 方向和 E 方向的定位结果相当, 都可以达到 cm 级定位精度。但在高程方向, Saastamoinen 模型与 EGNOS 模型定位精度要优于 Hopfield 模型和 Black 模型。

与采用模型法得到的定位结果相比, 引入参数估计后得到的定位精度更好, Saastamoinen 模型和 EGNOS 模型在三个方向上的定位精度均优于 Hopfield 模型与 Black 模型。

5.4 本章小结

本章主要基于 Matlab 平台的 Gpstools 软件, 加入了不同对流层延迟改正模型, 并分析了各种对流层改正模型对 GPS 精密单点定位的影响, 通过对西安地区地面沉降观测数据的处理分析, 可以看出加入 Saastamoinen 模型与 EGNOS 模型后的点位精度要高于 Hopfield 模型与 Black 模型, 引入参数估计法后得到的定位结果优于采用模型改正法得到的定位结果。

结论与展望

结论

对流层延迟是影响 GPS 测量精度的关键因素, 为了消除对流层延迟误差, 一般运用对流层延迟模型进行改正。本文主要在 GPS 精密单点定位的数据处理研究基础上, 探讨了精密单点定位中处理对流层误差常用方法, 重点探讨了模型改正法和参数估计法两种对流层延迟改正方法对 GPS 精密单点定位精度的影响。在讨论对流层误差处理的几种经典模型之后, 利用 Matlab 平台进一步实现了各种误差改正模型。最后依托 Gpstools 软件, 在处理西安地区地面沉降监测数据时, 将不同模型加入到精密单点定位模块中, 以分析其对定位结果的影响。通过将采用各模型得到的精密单点定位结果与利用 GAMIT 求得的坐标作比对, 得到了更适用于西安地区的改正模型。本文主要做了以下几项工作:

1、针对大气对 GPS 测量的影响, 尤其是对流层延迟产生原因及在 GPS 数据处理中所采用的一些方法进行了总结, 并对常用的几种经验对流层延迟改正模型进行了比较和分析。

2、详细论述了 GPS 精密单点定位的基本原理及其误差改正方法, 阐明了精密单点定位中的观测方程及其三种常用的定位模型, 分析了各种模型的优缺点, 并重点分析了本文所采用的消电离层组合的传统模型。介绍了精密单点定位中的各种误差源, 探讨了各种误差源的形成及常用的改正方法, 并分析了各种误差对定位精度的影响。

3、模型改正法、参数估计法与外部修正法是精密单点定位中对流层延迟常用的三种改正方法, 本文对三种改正方法做了详细的分析, 并对其优缺点进行了总结。介绍了应用最广泛的经典对流层映射函数模型—Niell 映射函数模型, 并对各种模型计算得到的对流层延迟量进行了比较分析。

5、应用西安地区的地面沉降监测数据, 详细分析了不同对流层延迟改正模型对精密单点定位结果的影响, 就定位精度方面, 通过 Saastamoinen 模型与 EGNOS 模型得到的定位结果由于采用 Hopfield 模型与 Black 模型得到的定位结果; 引入参数估计法定位后, Saastamoinen 模型与 EGNOS 模型得到的定位结果依然较好, 从整体来看, 定位精度较模型改正法均有所提高, 建议在需要更高定位精度时可以引入参数估计的方法。

展望

由于时间有限，本文只是在已有软件的基础上加入各种对流层延迟改正的程序，并对各种模型得到的定位结果进行对比，得出了一些结论。若想得到高精度的对流层改正模型，还需要对大量的数据进行分析处理，就对流层延迟改正而言，还是仍有许多问题尚待深入研究的：

- 1、分析研究的对流层延迟改正模型还不够，下一步应将 UNB 模型，以及更符合我国地形气象特征的 SHAO 模型加入，做更进一步的分析。
- 2、利用长时间多测站的观测数据，获取大量的样本数据，分析探讨建立西安地区精密对流层延迟改正模型的可能性。
- 3、利用不同对流层延迟改正模型的精密单点定位结果还有进一步提高定位精度的空间，下一步将继续优化程序，使其能更广泛的应用。

参考文献

- [1] 张勤,李家权. GPS 测量原理及应用[M].北京科学出版社,2005.
- [2] 李征航,黄劲松. GPS 测量与数据处理 (第二版) [M].武汉:武汉大学出版社,2010.
- [3] 李征航,张小红.卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法[M].武汉:武汉大学出版社,2009.
- [4] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks[J]. J Geophys Res,1997, 102: 5005-5017.
- [5] 刘经南,叶世榕.GPS 非差精密单点定位技术讨论[J].武汉大学学报信息科学版,2002,27 (3): 234-240.
- [6] 陈默.GPS 静态精密单点定位精度分析[D].东南大学,2007.
- [7] 郑立平,白彦馄.GPS 测量的误差分析[J].科技资讯(高新技术),2005,22(2):19-20.
- [8] 徐绍铨,张华海,杨志强,王泽民.GPS 测量原理及应用[M].武汉:武汉大学出版社,2005,87-99.
- [9] 丁晓光.对流层延迟改正在 GPS 数据处理中的应用与研究[D].长安大学,2009.
- [10] HanS C, Kwon J H, Jekeli C. Accurate Absolute GPS Positioning Through Satellite Clock Error Estimation[J]. Journal of Geodesy,2001,77:33-43.
- [11] Kouba J,Heroux P. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products[J]. GPS Solution, 2001,5(2): 12-28.
- [12] Gao Y.,X. Shen. A New Method of Carrier Phase Based Precise Point Positioning[J]. Journal of the institute of navigation, Vol.49 No.2.
- [13] 陈良,赵齐乐,赵颖.四种在线精密单点定位服务系统的比较与精度分析[J].测绘信息与工程,2009.
- [14] 阮仁桂.GPS 非差相位精密单点定位研究[D].解放军信息工程大学,2009.
- [15] 叶世榕.GPS 非差相位精密单点定位理论与实现:[博士学位论文].武汉:武汉大学,2002.
- [16] Abdel-salam M. Precise point positioning using un-differenced code and carrier phase observations[D]. Canada, The university of Calgary, 2005.
- [17] 朱爽,姚宜斌,张瑞.天顶对流层延迟计算方法研究[J].大地测量与地球动力学,2011,03:120-123.
- [18] 刘立龙,黄良珂,姚朝龙,颜伟,刘贵云.基于区域 CORS 网天顶对流层延迟 4D 建模研究[J].大地测量与地球动力学,2012,03:45-49.
- [19] 李成钢.网络 GPS/VRS 系统高精度差分改正信息生成与发布研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [20] A new global zenith tropospheric delay model IGGtrop for GNSS applications[J].Chinese Science Bulletin,2012,17:2132-2139.

- [21] 肖复何.霍普菲尔德对流层大气折射改正模式述评[J].测绘工程,1998,7(3):7~11.
- [22] 张瑜,魏山城.Hopfield 大气模型的精度分析[J].河南师范大学学报(自然科学版),2005,33(4):46-49
- [23] Huang Liang ke,Liu Li long,Yao Chao long.A zenith tropospheric delay correction model based on the regional CORS network[J].Geodesy and Geodynamics,2012,04:53-62.
- [24] Accuracy Improvement of Zenith Tropospheric Delay Estimation Based on GPS Precise Point Positioning Algorithm[J].Geo-Spatial Information Science,2010,04:306-310.
- [25] 周命端,郭际明,孟祥广.GPS 对流层延迟改正 UNB3 模型及其精度分析[J].测绘信息与工程,2008,04:3-5.
- [26] 施展,孟祥广,郭际明,刘东明.GPS 精密单点定位中对流层延迟模型改正法与参数估计法的比较[J].测绘通报,2009,06:9-11.
- [27] 刘靖晔,宋元明,胡加星.EGNOS 对流层延迟改正模型及其精度分析[J].地理空间信息,2011,02:96-98+9.
- [28] 欧吉坤.GPS 测量的中性大气折射改正的研究[J].测绘学报,1998,01:34-39.
- [29] 陈刘成,陈金平.EGNOS 数据处理模型与实例[J].测绘科学,2004,29(5):53~55.
- [30] 王小亚,朱文耀,严豪健,等.地面 GPS 探测大气可降水量初步结果[J].大气科学,1999,23(5):605-612.
- [31] Saastamoinen,J.Atmospheric Correction for the Troposphere and stratosphere in Radio Ranging of Satellites [J].The use of Artificial Satellites for Geodesy,1972,15:247~251.
- [32] 杨力.大气对 GPS 测量影响的理论与研究[D].解放军信息工程大学,2001.
- [33] 熊永良,黄丁发,丁晓利,殷海涛.基于多个 GPS 基准站的对流层延迟改正模型研究[J].工程勘察,2005,05:55-57+64.
- [34] Bona, P. Accuracy of GPS phase and Code Observations in Practice[J]. Acta Geod.Geoph.Hung., 2000, 35(4): 433-451.
- [35] 戴吾蛟,陈招华,匡翠林,蔡昌盛.区域精密对流层延迟建模[J].武汉大学学报(信息科学版),2011,04:392-396.
- [36] 殷海涛.基于参考站网络的区域对流层 4D 建模理论方法及应用研究[D].成都:西南交通大学,2006.
- [37] 魏丽,钟强.青藏高原模式大气[J].高原气象,1955,7(2):105-116.
- [38] 吴必军.大气指数模型与探空资料分析的比较[J].陕西天文台台刊,1994.(17):16-19.
- [39] 熊聚中.估计对流层折射的随机过程方法研究[J].全球定位系统,2007(6):11~13.
- [40] 徐宗秋,徐爱功,高扬,徐彦田,徐辛超.对流层延迟参数与坐标参数的相关性研究[J].测绘通

- 报,2013,01:25-28+44.
- [41] 鄢子平,吕翠仙,何锡扬,郭斐.基于 PPP 的对流层延迟估计方法及其影响因素分析[J].大地测量与地球动力学,2011,02:107-110+116.
- [42] 李玮.GPS 精密单点定位算法研究与软件实现[D].中国测绘科学研究院,2010.
- [43] 吴江飞,黄城. GPS 精密单点定位模型及其应用分析[J]. 大地测量与地球动力学,2008,01:96-100.
- [44] 祁芳.卡尔曼滤波算法在 GPS 非差相位精密单点定位中的应用研究[D].武汉大学,2003
- [45] 丁朋辉.GPS 非差相位精密单点定位算法研究与实现[D].中国测绘科学研究院,2008.
- [46] 宋伟伟,姚宜斌,罗峰.精密单点定位中周跳探测与修复方法研究[J].测绘信息工程,2007,32(3):34-35.
- [47] 郑作亚,程宗颐,黄城.对 Blewitt 周跳探测与修复方法的改进[J].天文学报,2005,46(2):216-224.
- [48] 王爱生,欧吉坤.无几何距离组合联合利用 MW 组合探测周跳的改进算法[J].数据采集与处理,2007,22(4):468-474.
- [49] 范龙,吴韩柱.联合 M-W 组合和电离层残差组合的周跳探测与修复方法[J].海洋测绘,2011,31(2):13-16.
- [50] 袁玉斌,党亚民,成英燕,等.非差相位数据预处理的 TurboEdit 算法及其改进[J].大地测量与地球动力学,2009,29(3):110-113.
- [51] 李黎,匡翠林,朱建军,陈永奇,龙四春,何原荣.基于 GPS 非差技术近实时获取对流层延迟[J].测绘科学,2012,02:22-25.
- [52] 王新龙,李亚峰.GPS 定位中 4 种对流层延迟修正模型适应性分析[J].电光与控制,2008,11:5-9+18.
- [53] 曲伟菁,朱文耀,宋淑丽,平劲松.三种对流层延迟改正模型精度评估[J].天文学报,2008,01:113-122.
- [54] 叶世榕,张双成,刘经南.精密单点定位方法估计对流层延迟精度分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2008,08:788-791.
- [55] 陈招华.区域精密对流层延迟建模[D].中南大学,2010.
- [56] 包海.GPS 精密单点定位中对流层延迟改正模型的研究与分析[D].中南大学,2008.
- [57] 李昭,邱卫宁,邱蕾,花向红.几种对流层延迟改正模型的分析与比较[J].测绘通报,2009,07:16-18.
- [58] 戴吾蛟,陈招华,梁铭.高差对 GPS 大地高测量精度的影响[J].大地测量与地球动力学,2009,03:80-83+87.
- [59] 李凯锋,欧阳永忠,任来平,刘传勇.GPS 精密单点定位中对流层延迟处理方法研究[J].测绘科学,2009,04:93-94.
- [60] 何锡扬,张小红,李星星,梁寅.PPP 估计天顶对流层延迟方法与结果分析[J].测绘信息与工

程,2010,01:3-5.

[61] 刘焱雄,陈永奇,刘经南. 利用地面气象观测资料确定对流层加权平均温度[J]. 武汉测绘科技大学学报,2000,05:400-404.

[62] 陈招华,戴吾蛟.区域对流层延迟水平变化对 GPS 测量精度的影响[J].大地测量与地球动力学,2010,03:83-87..

致 谢

转眼之间，两年的研究生生活即将结束。经历了找工作的喧嚣与坎坷，使我深深体会到了在进行论文写作时的那份宁静。回首在长安大学两年的求学历程，对那些曾经引导我、帮助我、激励我的人，我心中充满了无限感激。

首先要感谢导师王利副教授，从论文开题到写作定稿，倾注了王老师大量的心血。在我攻读硕士研究生期间，深深受益于王老师的关心、爱护和谆谆教导。他作为老师，点拨迷津，让人如沐春风；作为长辈，关怀备至，让人感念至深。能师从王老师，我为自己感到庆幸。在此谨向王老师表示我最诚挚的敬意和感谢！

同时，我要感谢所有教导过我、关心过我的老师。特别是空间定位研究所的张勤老师、张双成老师、赵超英老师、瞿伟老师、黄观文老师、杨成生老师，张老师以她宽阔的胸襟，渊博的知识为我的研究方向指明了道路，使我再求学的道路上少走了许多弯路。赵超英老师给我在生活和学习上提了许多建设性意见，使我受益匪浅。各位老师为我的学业倾注了大量心血，你们为人师表的风范令我敬仰，严谨治学的态度令我敬佩，感谢各位老师对我的一贯帮助。

感谢一直关心与支持我的同学和朋友们！我的好哥们，王可尧、周晓、韩军强，感谢你们的鼓励和帮助。还要感谢的是我寝室的兄弟王伟超、陈晨、国计鑫，感谢你们这两年的陪伴，这段快乐的时光我会永生难忘。感谢空间定位技术与信息研究所的张静博士、曲菲霏博士、赵红博士、张睿博士、范丽红博士、刘媛媛博士，刘超、曹海洋、范鹏飞、刘一霖、张鹏飞、张明、石鹏卿、熊应国、付文举、魏传军、高涵等师兄师姐对我学习上的指导；感谢同级的吴腾飞、牛玉芬、王乐、徐超、余航、敖萌、孙赫、李时俊、王心雨、臧楠等兄弟姐妹对我学习和生活上的照顾和关心；感谢庄文泉、田婕、吴丹、何杨、王笑蕾、李毓照、康亚、刘广全、赵立都、何佳、吕旭阳等师弟师妹对我生活和学习中给予的帮助。

在此要感谢我生活学习了两年的母校——长安大学，母校给了我一个宽阔的学习平台，让我不断吸取新知，充实自己。

需要特别感谢的是我的父母。父母的养育之恩无以为报，他们是我十多年求学路上的坚强后盾，在我面临人生选择的迷茫之际，为我排忧解难，他们对我无私的爱与照顾是我不断前进的动力。