



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

对流层模型上海地区适用性评估分析

姓 名：陈猛

学 号：1335456

所在院系：测绘与地理信息学院

学科门类：工学

学科专业：大地测量学与测量工程

指导教师：胡丛玮 副教授

副指导教师：陈俊平 研究员

二〇一六年三月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Master of Engineering

**Performance Evaluation
of Troposphere Models Application in Shanghai**

Candidate: Chen Meng

Student Number: 1335456

School: College of Geodesy and Geoinformatics

Major: Geodesy and Survey Engineering

Supervisor: Vice Prof. Congwei Hu

Vice Supervisor: Prof. Junping Chen

March, 2016

对流层模型上海地区适用性评估分析

陈猛

同济大学

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年月日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年月日

摘要

对流层延迟是 GNSS 高精度定位中的重要误差源之一,为提高局部区域范围内对流层延迟的改正精度,本文结合上海地区水汽辐射计(WVR)2014 年的实测数据,对 SAASTAMOINEN, UNB3M, EGNOS, GPT2 这四种常用的对流层改正模型以及 ECMWF 的大气等压面资料在上海地区的适用性进行了评估分析,并使用中国大陆构造环境监测网络 260 个测站的 2011~2014 年的实测气象数据,建立了中国区域气象格网模型。具体工作如下:

1. 分析了大气对 GNSS 测量的影响,总结几种常用的对流层延迟改正方法并进行了比较分析。

2. 总结水汽辐射计的使用方法及其在延迟改正中的应用,与 Bernese 软件估计得到的对流层天顶延迟一起对四种对流层模型在上海地区的适用性进行了比较分析,并将延迟应用于精密单点定位(PPP),结果表明:以 WVR 观测结果为基准,GPT2 模型的对流层改正精度比其余 3 种要好,其天顶干延迟(ZHD)的偏差均值与中误差分别为-0.11cm 和 $\pm 0.75\text{cm}$,天顶湿延迟(ZWD)的平均偏差与中误差分别为-2.34cm 和 $\pm 7.67\text{cm}$,和传统的 PPP 结果相比,采用 WVR 对流层观测值的定位精度提高了 16%。

3. 对欧洲中期天气预报中心(ECMWF)数据资料的获取与使用方法进行了总结,并在 MATLAB 平台上完成解码与相关计算工作,依据大气折射理论,使用分层积分的方法计算出对流层天顶延迟(ZTD),并将延迟应用于精密单点定位,评估其在上海地区的适用性,结果表明:ECMWF 等压面资料拟合延迟精度优于实测气象数据的 SAAS 模型精度,将延迟结果应用于动态精密单点定位,在 U 方向上,ECMWF 定位精度比 SAAS 模型精度平均提高 53%,表明对 GNSS 精密定位具有辅助作用,可应用于上海地区 GNSS 导航定位中的高精度对流层延迟改正。

4. 获取中国大陆构造环境监测网络(陆态网)260 个测站 2011~2014 年的实测气象数据,建立了只需要输入时间与位置参数的中国区域格网气象模型。检验分析表明,格网气象模型 Cpt2 相对对流层延迟的测定精度与标准气象参数的 Saastamoinen 模型相比提高了约 31%。与陆态网测站解算的天顶总延迟相比,Cpt2 模型计算的对流层天顶总延迟平均中误差仅为 5.5cm,能较好的反映中国区域大气变化特征,可作为适用的 GNSS 实时定位和导航的对流层天顶延迟的改正模型。

关键词: 对流层天顶延迟,水汽辐射计,气象数值模型,欧洲中期天气预报中心,中国大陆构造环境监测网络,气象格网模型,精密单点定位

ABSTRACT

The tropospheric delay is one of the most important error sources in GNSS positioning, which is often corrected by troposphere model. To improve the precision of troposphere delay correction in local area, water vapor radiometer data of year 2014 were used as reference to evaluate the suitability of troposphere correction model of the four kinds commonly used that SAASTAMOINEN, UNB3M, EGNOS, GPT2 and ECMWF atmospheric pressure level data in Shanghai area. Finally meteorological data of 260 stations of Crustal Movement Observation Network of China in year 2011 to 2014 were used to establish the China regional meteorological grid model. Specific work is as follows:

1. The influence of atmosphere on GNSS measurement was analyzed and comparatively analysis several commonly methods of troposphere delay correction.

2. Summarize the use of the water vapor radiometer and its application in delay correction, together with the tropospheric zenith delay estimated by Bernese software to evaluate the suitability of troposphere correction model of the four kinds commonly used in Shanghai area, finally delay was applied to precise point positioning (PPP). Results show: Compared with the results of WVR, correction precision of GPT2 is better than the rest of the three, the ZHD mean bias of GPT2 is -0.11 cm and RMS is ± 0.75 cm, ZWD mean bias is -2.34 cm, rms is ± 7.67 cm. The position accuracy of PPP result from the ZHD and ZWD observed by WVR is improved by 16%, as compared with the conventional PPP model, in which the tropospheric is estimated.

3. Method of obtaining and using ECMWF data are summarized, completed solution to the code and the related calculation work on the MATLAB platform. Based on the theory of atmospheric refraction, layered integral method is used to calculate ZTD, which was applied to PPP and evaluated its applicability in Shanghai. The results show that the data of ECMWF pressure level fitting delay precision is better than that of the SAAS model accuracy of measured meteorological data. Applying the precise ZTD observed by ECMWF to kinematic PPP, compared to SAAS model position accuracy was improved by 53% in up direction, We can conclusion that WVR and ECMWF layered data can assist in GNSS precision point positioning, it is also mean ECMWF meteorological data has a good performance when used to correct troposphere delay in GNSS navigation and position in Shanghai.

4. Obtain meteorological data of 260 stations of Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC) in year 2011 to 2014 to establish the China regional meteorological grid model, which only need to input the time and position parameters. Result show that, compared to standard meteorological parameters Saastamoinen

model, precision of ZTD thatcalculated bygrid meteorological model of Cpt2 was improved by 31% in Shang hai area. Compare to ZTD estimated by CMONOC , mean RMS of model Cpt2 is 5.5cm,it Can better reflect the atmospheric characteristics of Chinaregional and can used as an applicable modelto correct the tropospheric zenith delay in GNSS real-time positioning and navigation.

At the end of the paper, a summary is made and a conclusion is drawn that the mobile mapping system realized in this paper is capable of providing position and orientation information for calculating point cloud data. And several prospects are listed at the end of the paper simultaneously.

Key Words: Zenith Tropospheric Delay, Water Vapor Radiometer, Numerical Weather Models, ECMWF, Crustal Movement Observation Network of China,Meteorological grid model, Precise Point Positioning

目录

第 1 章绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.3 研究思路与主要内容.....	4
1.3.1 研究思路.....	4
1.3.2 主要研究内容.....	4
1.3.3 论文结构.....	5
第 2 章大气基本理论及对流层延迟改正方法.....	6
2.1 大气的基本理论与相关参数.....	6
2.1.1 大气的分层结构.....	6
2.1.2 大气层气象参数.....	8
2.2 中性大气对 GNSS 测量的影响	10
2.3 对流层延迟改正方法.....	12
2.3.1 参数估计法.....	13
2.3.2 差分法.....	14
2.3.3 经验模型改正法.....	15
2.3.4 水汽辐射计外部修正法.....	22
2.3.5 气象数值模型延迟修正.....	33
2.4 本章小结.....	34
第 3 章常用气象数值预报模型.....	35
3.1 简介.....	35
3.1.1 ECMWF 资料分类.....	36
3.1.2 数据获取.....	36
3.2 NetCDF 格式说明	37
3.3 数据解码与计算.....	38
3.4 ECMWF 数据适用性分析	42
3.4.1 对流层延迟比较.....	42
3.4.2 延迟对 GNSS 精密定位的影响	45
3.5 本章小结.....	47
第 4 章区域格网气象模型建立.....	49
4.1 陆态网气象数据.....	49

4.2 中国区域格网气象模型的建立.....	50
4.2.1 数据分析.....	51
4.2.2 测站选取.....	53
4.2.3 拟合格网点参数并建立模型.....	53
4.3 格网模型精度验证.....	55
4.3.1 内符合精度检验.....	55
4.3.2 外符合精度检验.....	60
4.3.3 延迟比较.....	66
4.6 本章小结.....	70
第 5 章总结与展望.....	71
5.1 总结.....	71
5.2 展望.....	73
致谢.....	74
参考文献.....	75
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	79

第 1 章绪论

1.1 研究背景与意义

随着 GNSS 技术在地球动力学、天文学、大气物理学、资源勘察、航空遥感、变形监测等领域的广泛应用, 不仅对 GNSS 卫星、地面接收机和天线等硬件提出了改进需要, 而且对 GNSS 数据处理算法的精度和可靠性都提出了较高的要求。因此要实现 GNSS 高精度定位就必须尽量消除或削弱各项 GNSS 误差源的影响, 改进误差的修正模型与方法。

影响 GNSS 定位精度的误差主要包括三个方面: (1)与卫星有关的误差; (2)与传播路径有关的误差; (3)与接收设备有关的误差。在 GNSS 数据后处理过程中, 利用由 IGS(international GNSS Service)提供的精密星历, 可以极大的削弱星历误差, 同时利用差分相对定位, 可以削弱轨道误差、卫星钟差以及接收机钟差等。近年来卫星预报星历的精度不断提高以及对接收机中硬件的技术改进, 与卫星轨道误差和接收机设备有关的误差已经得到很好的消除。在常规 GNSS 测量时通常采用双频无电离层组合 L3 作为基本观测值, 在基线长度一定的范围内可以消除电离层的折射误差^{[1][2]}。卫星信号穿过大气时发生的折射主要集中在对流层, 大气层中质量 99%都集中在此层中, 对流层属于非弥散性介质, 对电磁波信号会产生非色散性折射, 即传播速度小于在真空中的速度, 且路径不再是直线, 折射率与电磁波的频率或波长无关, 只与传播速度有关, 因此不能用双频观测值来计算对流层延迟^[3], 这就导致对流层的折射延迟成为卫星定位中的一个重要误差源, 对流层延迟模型对于 VLBI(甚长基线干涉测量), SLR(卫星激光测距)和 GNSS(全球定位系统)的精度分析来说, 仍然是一个主要的限制因素, 尤其是在测高时影响很大, 准确计算出对流层延迟不仅对提高卫星定位精度有很大意义, 也可以作为结果矫正 INSAR 图像, 改善成像质量, 对流层湿延迟还可以经过转换得到对流层中水汽含量, 为气象、交通等部门服务。因此, 如何有效计算并削弱这种由对流层折射引起的延迟, 获得准确可靠的三维坐标尤其是高程坐标是一个关键且迫切的任务。

常用的对流层延迟改正方法, 包括经验模型改正以及气象科学中的数值预报模型应用于对流层延迟改正。其中, 在较平坦、范围不大的地区, 差分法可以很好地削弱对流层折射的影响; 利用水汽辐射计(WVR)进行外部修正可得到较好的 ZTD 改正, 但是设备本身的特性限制了使用范围; 参数估计法只要参数选

择恰当,就能很好的估计出天顶湿延迟分量,但依赖于高精度的 GNSS 数据处理软件,在常规的数据处理中应用较少;对流层经验模型由于简单实用,在一般的数据处理软件中被广泛使用。延迟经验改正模型均与气象参数相关,即使是 GPT2 等依赖于测站位置及年积日的模型,本质上也是在全球气象数据的基础上建立的格网气象模型,这种模型对于全球 GNSS 测站具有较好的精度,但是对于局部地区的测站会有模型误差。对某些区域 GNSS 测量数据处理而言,不同的对流层模型适用性也不一样,可依据实测气象资料建立局部区域的对流层模型,具有一定的参考实用价值。

1.2 国内外研究现状

大气延迟研究可以追溯到 20 世纪的无线电传播延迟改正,当电磁波穿过大气层时,传播速度将发生变化,路径也将产生弯曲。信号穿过大气层时,首先要经过电离层,会因折射产生延迟,导致定位精度降低。利用模型改正或者双频观测值消除一阶项电离层影响后,剩余的高阶项影响大约为 2-4cm,由于两端的电离层延迟具有很强的相关性,因而使用单频观测也能获得很好的精度。而电磁波信号从电离层传出之后进入对流层会再次发生折射,信号传播速度也发生变化,折射率与电磁波的频率或者波长无关,只与传播速度有关,所以不能用双频观测值来消除对流层延迟。对流层延迟分为干延迟与湿延迟两部分分量,前者是由干燥大气引起的,可用对流层模型改正,若气象参数较为精确,干延迟模型精度可达到毫米级;后者则是由水汽引起的,因其分布不均匀且随时间变化剧烈,湿延迟模型精度只能达到厘米级。如果不对 GNSS 信号进行对流层延迟改正,会导致定位结果精度有很大的误差。实验表明:对流层延迟在天顶方向约为 2m 左右,而当高度角在 10 度以下时,延迟值可到 20m^{[4][5]},而 1mm 的对流层延迟误差可导致 3mm 的高程误差^[6]。截止高度角在 5°-25°之间时,1mm 的天顶对流层延迟会对测站高造成 2.6-6.5mm 的偏差影响^[7],对流层带来的延迟情况主要是受其中变化剧烈的水汽的影响。

现有的 GNSS 对流层延迟改正模型按照参数类型可分为两类:一类是需要气象参数的模型,如 SAASTAMOINEN 模型^[9]等,在使用该类模型时需要输入实测的气象参数或标准气象参数;另一类不需要输入气象参数,只需测站所处的纬度及观测时间,在使用中首先由接收机的空间位置和年积日推算出平均海平面处的 5 个气象参数,再由相应的公式计算出测站天顶干湿延迟值,如 UNB3M^[10],EGNOS^[27]模型等。第一类模型受模型误差和气象元素代表性误差的影响,测量中一般采用标准气象参数,致使改正精度不高,第二类模型不需气象参数,使用

方便,精度也较高。由于第二类模型是基于全球气象资料建立的,在区域测量中会有较大误差^[8]。对流层的折射与地面气候、大气压力、温度和湿度变化密切相关,对流层模型的建立也依赖于地面气象数据,因此,可使用气象数值模型预报资料来计算对流层延迟量,目前可通过多种方法获取气象数值资料,一些气象数值模型也可以推算出来,将这些气象数据应用于 GNSS 定位以及对流层延迟改正中,可以提高定位的精度,但是实测气象数据与经验模型数据对模型的精度影响是不同的。国内外许多学者对此方面做了很多研究,有学者提出假设:任意方向上的斜路径延迟均与天顶方向延迟相关。因此将对流层延迟写为天顶延迟与映射函数的乘积形式,其中映射函数是关于卫星高度角的函数,把天顶延迟与任意方向路径延迟联系起来,天顶延迟方面, Saastamoinen 基于美国标准大气压模型计算得到了天顶延迟,并首次把被积函数按照天顶距三角函数进行展开逐项进行积分,中纬度地区应用该模型预测干、湿延迟,能分别达到 2~3mm 和 3~5cm 的精度水平^[9]。加拿大 New Brunswick 大学的 Rodrigo Leandro^[10]等人建立了 UNB3 (University of New Brunswick) 模型,该模型通过分析海平面处的气象资料,把温度、气压、相对湿度等气象参数表达成关于纬度和年积日的格网形式,并且考虑了参数的季节变化,从而求出海平面处的天顶延迟,然后通过高程函数求得测站处的天顶延迟,UNB3 模型计算时不需要任何实测气象参数,之后又将格网中的相对湿度换成水汽压,更新为 UNB3M 模型,扩大了应用的范围。国内一些学者也做了相应的研究,上海天文台的严豪健、平劲松^[62]等学者首次用母函数方法在数学上得出了大气延迟改正的近似解析解,并且利用标准大气模型建立了一个改进连分形势的映射函数 UNSW,此方法的精度比传统技术展开法高了一个量级并且具有更好的低高度角($<10^\circ$)改正效果。Chuan-Sheng Wang^[7]利用标准气象数据与实测气象数据,采用参数估计与外部修正的方法,对 GPS 高的测量结果进行了比较,发现用实测的地表气象数据可以获得更稳定的结果; Randolph^[11]等人使用定向的水汽辐射计,在实验所用的每个测站都安装 WVR,并指向观测卫星,以此来直接改正斜路径上的水汽含量,结果显示 50km 长的基线具有 2.6mm 的高程精度。由于条件所限,不可能期望大部分测站都配备水汽辐射计。这样,以地面气象资料为参数的湿大气延迟映射函数的种种理论模型也随之发展起来, GPT2 模型是 Boehm^[12]等人在 2012 年提出的一种新的对流层延迟经验模型,将测站的修正儒略日与大地坐标代入即可求出气象参数。

1.3 研究思路与主要内容

1.3.1 研究思路

气象参数是对流层延迟改正中的重要影响因子,对流层模型的建立也与气象参数密切相关,对流层延迟改正的方法很多,在导航定位中应用最多的还是对流层改正经验模型。现有的对流层经验模型大多是依据标准气象参数或者是在全球性气象参数的基础上建立的,在局部区域适用性会存有较大的模型误差,难以满足高精度的测量需求,为了提高定位精度,有必要对不同的模型进行局部区域适用性分析以及建立新的模型。

由于对流层改正模型都需要直接或者间接输入气象参数来确定对流层天顶延迟,这会因气象元素的代表性误差影响导致精度降低,因此建立区域性无需输入标准气象参数的对流层延迟模型,对于更好地削弱对流层延迟提高导航和定位的精度有重要意义。本文拟以水汽辐射计的观测数据为参考,对常用对流层模型与气象数值预报模型进行上海地区适用性评估分析,并将模型延迟与分层积分延迟应用于 GNSS 定位,以期获得更高的定位精度,尤其是高程方向的精度,探讨其上海地区的适用性。然后利用中国大陆构造环境监测网络测站多年观测的气象数据,建立中国区域气象格网模型,与水汽辐射计和对流层模型进行比较,分析其上海地区的精度。

1.3.2 主要研究内容

由于对流层延迟是制约导航定位精度的一个主要误差因素,而现有的模型大多是面向全球的经验模型,在区域性测量使用中具有较大的误差,难以满足高精度导航定位的需求,对流层折射延迟与气象元素密切相关,为了提高定位精度,有必要对区域的大气参数进行分析,建立起区域性的大气模型。近年来,随着中国大陆构造环境监测网络的建成以及投入使用,可获取连续的气象参数观测数据,通过对实测气象参数分析并建立模型,然后求取对流层天顶延迟,可削弱由标准气象元素产生的误差。本文研究内容包括四部分:

(1) 总结大气对 GNSS 的延迟影响与常用的改正方法

分析大气对 GNSS 测量的影响,尤其是对流层延迟的产生与影响,对几种常用的对流层延迟改正方法进行比较分析。

(2) 研究水汽辐射计在上海地区延迟改正与定位中的应用

不同的对流层模型区域适用性不同,本文将介绍水汽辐射计的使用方法及其在 GNSS 延迟改正中的应用。使用 Bernese 软件处理气象仪接收的 GNSS 数据,估计对流层天顶延迟。对不同对流层模型在上海地区的适用性进行了比较分析,

并将延迟应用于 GNSS 精密单点定位, 分析不同模型对定位精度的影响。

(3) 研究 ECMWF 资料在上海地区的适用性

大气折射与温度、气压、湿度等气象数据密切相关, 使用积分方法计算出的延迟结果更精确, 但是需要获取信号传播路径上各处的气象参数数值, 气象数值预报模型可以提供全球范围内的分层气象数据, 为了研究气象数值预报模型在上海地区的适用性, 本文将详细介绍 ECMWF37 层等压面资料获取与使用方法, 并进行解码与延迟的计算, 依据大气折射理论, 应用积分的方法计算出 0.125° 与 0.25° 分辨率数据的对流层天顶延迟, 并分析不同拟合函数对于测站延迟结果的影响, 最终将延迟应用于 GNSS 精密单点定位, 评估其在上海地区的适用性。

(4) 基于中国大陆构造环境监测网络实测气象值建立中国区域格网气象模型

为了削弱局部地区使用标准气象元素引起的误差, 提高对流层延迟改正精度, 根据收集的中国大陆构造环境监测网络 260 个测站 4 年的实测气象数据, 拟分别对气压, 温度, 相对湿度 3 个参数进行处理, 依据最小二乘平差理论拟合出测站参数的系数, 并使用反距离加权的方法将测站参数系数内插到格网点上, 建立了只需要输入时间与位置参数的中国区域格网气象模型, 并对模型的精度与可靠性进行检验。

1.3.3 论文结构

全文共分为五章:

第一章, 研究了对流层延迟的研究背景与意义, 国内外基于气象与非气象因素的对流层延迟模型的研究现状, 概括了本文的主要研究内容。

第二章, 研究了大气基本理论知识, 包括大气对 GNSS 导航定位过程中的延迟影响, 对流层延迟的基本改正方法。并详细介绍了几种常用的对流层天顶延迟模型, 并对这些模型进行了精度评估。

第三章, 分析了气象学中的数值气象模型在对流层延迟改正中的应用, 主要使用 ECMWF 等压面数据, 对其处理方法以及精度进行了评估分析, 验证其在上海地区的适用性。

第四章, 基于中国大陆构造环境监测网络测站多年实测气象数据, 建立了中国区域格网气象模型, 并对模型的精度进行评定与可靠性检验。可削弱局部地区使用标准气象元素引起的误差, 提高了对流层延迟改正的精度。

第五章, 对本文的科研工作进行了总结并提出了一些建议, 为后续的研究提供理论依据。

第 2 章大气基本理论及对流层延迟改正方法

2.1 大气的基本理论与相关参数

大气折射引起的延迟是 GNSS 测量的最主要误差之一，折射延迟在很大程度上取决于大气内部结构和测站与卫星的空间几何关系，因此要研究其延迟的影响，有必要了解大气的基本理论知识。

2.1.1 大气的分层结构

包围在地球外部的一层气体总称为大气或大气圈，是地球与宇宙进行复杂物质交换、能量传输交换以及其他复杂相互作用的一个边界通道。地球大气在地球自转产生的重力场作用下，包围在地球的外表面上，其密度随着高度的增大呈现指数形式的递减趋势，高度越高则越稀薄。大气质量的 99% 位于 30km 以下，所以大气圈可看作是包围地球的一层薄壳，大气层的厚度大约在 1000km 以上，但没有明显的界限，而天气的变化仅仅发生在大气层几十公里范围内。受地球自转影响，大气在水平方向分布比较均匀，而不同高度的大气对太阳辐射吸收程度的差异则导致其在垂直方向呈明显的层状分布。常用的大气结构分层方法有四种：(1)按化学成分分为均质层、非均质层；(2)按压力结构分为外大气层、气压层；(3)按电磁特性分为中性层、电离层、磁层；(4)按热力学垂直分布，根据大气垂直减温率的正负变化分为对流层(Troposphere)、平流层(Stratosphere)、中间层(Mesosphere)、热层(Thermosphere)和外逸层 (Exosphere)，各层分布的大致范围如图 2.1 所示^[13]：

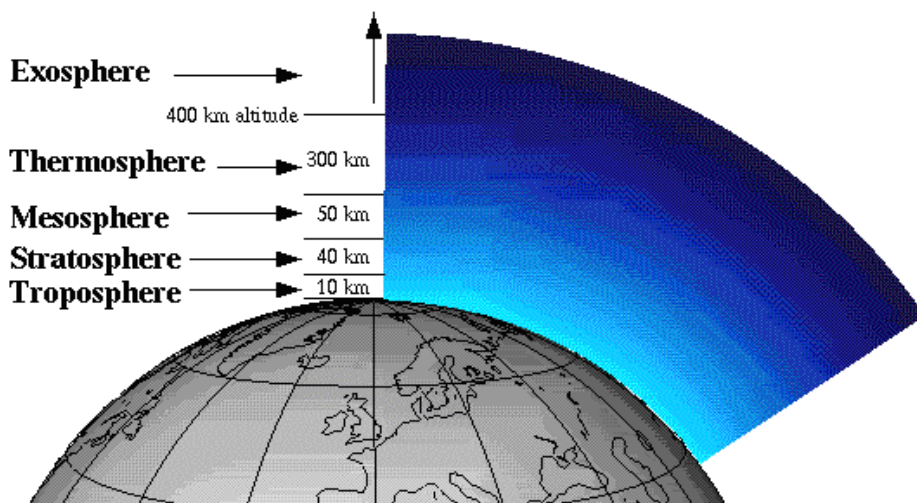


图 2.1 大气分层结构

大气对 GNSS 测量的影响一般按照特性分为中性大气层影响与电离层影响，本文中主要考虑与气象元素相关的中性大气层，因此只对最后一种分层方法进行说明：

(1) 对流层(Troposphere)

对流层是大气的最底层，相对于整个大气层来说非常薄，但是集中了大气 80% 的质量，是多种气体(氮、氧、氢、二氧化碳等)与水蒸汽的混合物，包含了大气中 99% 的水汽，几乎全部与人类和动植物生存息息相关的各种天气现象都发生在这一层，大致范围在从地面向上约 40km 的厚度，其厚度会随纬度和季节而改变，对流层顶的高度在夏季高于冬季，在赤道附近为 16km-18km，在中纬度地区为 10km-12km，两极附近为 8km-9km。随着高度的增加对流层空气会越来越稀薄，气压随高度的增加而大致呈现指数形式下降趋势，太阳辐射到地面的热量会通过垂直对流形式引起对流层升温，因此对流层顶以下的温度一般都会随着高度的增加呈现线性关系下降。对流层密度远大于电离层，其介电特性随时间和空间的变化而变化，导致 GNSS 卫星的无线电波信号在对流层中传播路径弯曲并且速度小于真空中的光速，即产生大气折射效应，其中水汽会产生很大的影响，水汽在时间与空间上具有复杂多变性，造成对流层大气折射的研究非常困难，对流层大气变化无规则，通常只能进行统计研究，且难以准确预测。

(2) 平流层(Stratosphere)

平流层是从对流层顶向上到距地约 50km 高度的大气层，平流层顶的气压约为 1hPa，在这一层内气流运动稳定，地面对气温的影响微弱，臭氧层即位于此层，会吸收太阳辐射的紫外线对大气加热，随着高度的增加温度起初变化缓慢，直至距地 20km 高度以上，把吸收的紫外辐射能量转换为分子动能，气温才逐步升高，每公里大约升高 2℃，平流层中水汽和尘埃含量很少，没有云雨等多变天气的现象，因而对 GNSS 信号的折射影响较小。

(3) 中间层(Mesosphere)

中间层是从平流层顶到距地面约 80km 高度的大气层，中间层顶气压约 0.01hPa，其气温随着高度的增加而迅速下降，电离层的底部就在中间层内，由于下层的气温比上层高，空气有垂直对流运动，故中间层亦称为上对流层或高空对流层，这一层的水汽含量极少，空气总量尚不到整个大气层的 1%，因此对 GNSS 信号传播的影响非常小。

(4) 热层(Thermosphere)

热层距地面 500km 左右，因为直接吸收太阳辐射的能量，温度会随高度升高而迅速增高，是地球大气各层中顶部温度最高的一层。这一层高度受太阳活动的强弱影响而变化，且最高温度也会随之变化。热层大气极为稀薄，难有对流运动，氧分

子和部分氮分子处于高度电离状态，所以热层也称电离层。这一层大气对 GNSS 信号主要产生电离层延迟折射，但使用 GNSS 双频信号的 L1 和 L2 载波线性组合可以削弱甚至消除电离层的影响。

(5) 外逸层(Exosphere)

热层顶以上称为外逸层，这里几乎没有的空气，其温度常高于 1000K，高速运动的空气质点能克服地球引力逃逸进入行星际空间，故称为外逸层。

对流层、平流层、中间层和部分热层的合成大气称为中性大气，由以上分析可知，GNSS 信号传播过程中受中性大气影响非常大，对流层更是起着非常重要的作用，其与气象和大气物理参数又密切相关，将在章节 2.1.2 对大气层气象参数进行简单介绍。

2.1.2 大气层气象参数

1. 气象参数

表示大气宏观物理状态的物理量称为气象参数，它是大气科学研究的基础。气象站可以对气象参数进行观测，在高精度的 GNSS 定位中，一般需要使用其中三个重要的气象参数：

(1) 气温 T ：表示大气冷暖程度的物理量，常用摄氏温标 t 、华氏温标 F 、绝对温标 T 来表示。换算关系为：

$$\begin{cases} T = 273.15 + t \\ t = 5/9(F - 32) \\ F = 9/5t + 32 \end{cases} \quad (2.1)$$

(2) 气压 P ：表示从观测高度到大气上界，在单位面积上垂直空气柱的总重量，常用单位 mbar 或 hPa 表示。气压主要受大气密度、气温和海拔因素的影响，有年变化和日变化，一年之中，冬季气压较高而夏季气压较低，一天中气压有一个最高值和一个最低值，分别出现在 9~10 时和 15~16 时，还有一个次高值和一个次低值，分别出现在 21~22 时和 3~4 时，气压日变化幅度一般为 1~4mbar，并随纬度增大而减小。气压的大小与海拔高度、大气密度、大气温度等有关，一般随高度升高呈现指数规律递减，此外，其变化与风和天气状况也密切相关，因而是重要的气象因素。

(3) 湿度 RH ：表示大气干燥程度的物理量。在一定的温度和体积的空气中含有水汽越少空气越干燥，水汽越多空气越潮湿。湿度常用的表现形式有三种：水汽压表示空气中水汽部分的压强，单位为 hPa 或 mbar；相对湿度为空气中实际的水汽压与当时气温下的饱和水汽压之比，单位为%；露点湿度是表示空气中水汽含量和气压不变的条件下冷却达到饱和时的温度，单位为℃。

2. 气象参数测定

对于基本气象参数可以通过气象仪等仪器测定或者均值推求，量测时应该在接

收机天线相位中心附近进行，但是在进行与大气折射相关的计算过程中需要根据高度作相关的改正，甚至还涉及一些无法测定的量如测站处水汽压 e_s ，一般需要通过特定的关系式求得。

(1) 水汽压计算

- 根据测站上的相对湿度 RH 来计算 e_s :

用温度计或其他气象元素传感器直接测定测站处的相对湿度 RH 、气压 P_s 、温度 T_s ，然后用下式计算水汽压 e_s :

$$e_s = RH \cdot e^{(-37.2465 + 0.213166T_s - 0.000256908T_s^2)} \quad (2.2)$$

- 用干湿温度计测定测站上的干温 T_s 和湿温 T_w ，然后按照下列公式计算 e_s ：
饱和水汽压 e_w 计算公式为：

$$e_w = 1013.246 \text{ mbar} (373.16 \text{ K} / T_w)^{5.02808} \cdot e^{-g(T_w)} \quad (2.3)$$

式中，

$$\left\{ \begin{array}{l} g(T_w) = g_1(T_w) + g_2(T_w) + g_3(T_w) \\ g_1(T_w) = 18.19728 \left(\frac{373.16 \text{ K}}{T_w} - 1 \right) \\ g_2(T_w) = 0.0187265 \{ 1 - \exp[-8.03945 \left(\frac{373.16 \text{ K}}{T_w} - 1 \right)] \} \\ g_3(T_w) = 3.1813 \times 10^{-7} \{ \exp[26.1205 \left(\frac{373.16 \text{ K}}{T_w} - 1 \right)] \} \end{array} \right. \quad (2.4)$$

式中，373.16 K 为用绝对温度表示的水的沸点。

在公式(2.3)~(2.4)的基础上，根据干温 T_s 、湿温 T_w 、气压 P_s 和饱和水汽压 e_w 计算测站上的水汽压 e_s :

$$e_s = e_w - 4.5 \times 10^{-4} (1 + 1.68 \times 10^{-3} T_w) (T_s - T_w) P_s \quad (2.5)$$

式中， T_s 、 T_w 以绝对温度 K 为单位； P_s 、 e_w 、 e_s 以毫巴 (mbar) 为单位。

(2) 海拔高气象元素推算

采用海平面平均气象元素或标准气象元素(T_0 、 P_0 、 RH_0)时，可根据测站的高程 h 用标准气象元素推算出测站的气象元素：

SAASTAMOINEN/NELL 模型的设置， H 为到平均海水面的高：

$$\begin{cases} T = T_0 - \beta H \\ P = P_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{g}{R\beta}} \\ e = e_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{4g}{R\beta}} \end{cases} \quad (2.6)$$

(准参考大气: $P=1013.25 \text{ mbar}$, $T=288.15 \text{ K}$, $e=11.691 \text{ mbar}$)

天宝接收机中设置:

$$\begin{cases} T = T_0 - 0.0065H \\ P = P_0 (1 - 2.26 \times 10^{-5} \cdot H)^{5.225} \\ RH = RH_0 \cdot \exp(-6.396 \times 10^{-4}) \end{cases} \quad (2.7)$$

加拿大 New Brunswick 大学开发的 DIPOP 软件中的设置:

$$\begin{cases} T = T_0 - 0.0068H \\ P = P_0 \left(1 - \frac{0.0068}{T_0} \cdot H \right)^5 \end{cases} \quad (2.8)$$

$$e = \begin{cases} e_0 \left[1 - \frac{0.0068}{T_0} \cdot H \right]^4 & H < 11000m \\ 0 & H \geq 11000m \end{cases} \quad (2.9)$$

H 为海拔高, 也可以用一点计算 P_0 后, 计算另一点的高差 H 代入求参数^[14]。

2.2 中性大气对 GNSS 测量的影响

GNSS 卫星导航定位中的对流层延迟通常是泛指电磁波信号在通过高度为 50km 以下的未被电离的中性大气层时所产生的信号延迟。在研究信号延迟的过程中, 不再像大气科学中那样将该大气层细分为对流层和平流层, 也不顾及两者之间性质上的差别。在中性大气层中, 对流层是最活跃的部分, 因而也是中性大气影响 GNSS 信号的主体, 中性大气产生的延迟大约有 80% 发生在对流层, 因此通常将发生在中性大气的信号延迟通称为对流层延迟^[15], 本文也采用这种说法。

对流层对 GNSS 卫星的电磁波信号产生非色散性折射延迟, 主要是引起两方面的变化:

(1) 在传播的过程中, 不同密度的大气之间折射率不同, 使信号发生折射导致电磁波的传播路径发生弯曲, 实际传播距离增长, 称为几何学的图形延迟, 如图 2.2 所示。

(2) 大气中的介质导致电磁波在大气中的传播速度小于在真空中的速度,使信号产生时间上的延迟,称为光学延迟,可等效于传播路径的增长。电磁波折射率与电磁波的频率或波长无关,只与传播速度有关,这种折射称为对流层延迟。

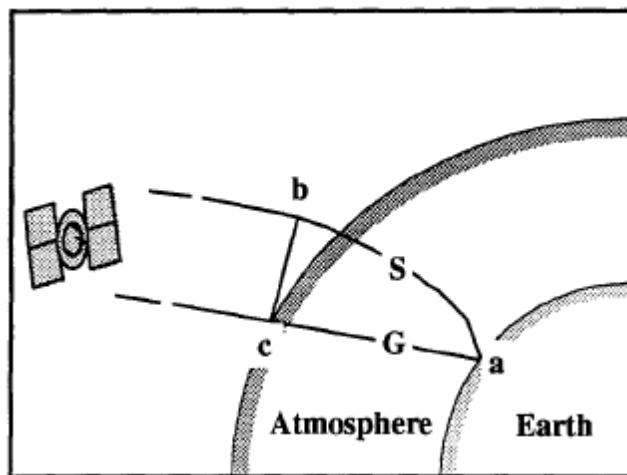


图 2.2 大气中 GNSS 信号传播路径变化

(G 是折射率固定时信号沿直线传播路径, S 是受折射率变化影响弯曲的传播路径^[16])

两种延迟都可等效为距离上的变化,实际距离与直线距离的差值 ΔL 即是电磁波信号沿传播路径上的总延迟。与介质中大气的折射系数 n 有关,可用下式表示:

$$\Delta L = \int_L n(s) \cdot d_s - G \quad (2.10)$$

式中, $n(s)$ 是信号从卫星到接收机沿着曲线路径 L 的折射系数,G是穿过大气位置点间的直线路径距离,折射系数的值一般变化极小,为方便计算,定义大气折射指数 $N(s)$ 公式:

$$N(s) = [n(s) - 1] \times 10^6 \quad (2.11)$$

将其代入式(2.11),可得:

$$\Delta L = 10^{-6} \int_L N(s) \cdot d - (S - G) \quad (2.12)$$

式中,等号右边第一部分表示路径上的信号因光学折射产生的延迟量,第二部分表示几何学路径延迟,要注意折射效应并不等同于几何距离延迟,因为路径延迟是沿着信号弯曲路径估计的。大气折射指数是温度、气压与水汽压的函数,近似表达式^[17]:

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \quad (2.13)$$

式中, P_d 表示干空气的分压, e_s 表示湿空气的分压(水汽压),两者之和为总气压值

P , 单位均是 mbar, $k_1=77.604\text{K/mbar}$, $k_2=64.79\text{K/mbar}$, $k_3=377600.0\text{K}^2/\text{mbar}$ 均为物理常数, T 表示绝对温度(K)。一般的数值气象模型可以提供总的气压值, 可将式(2.13)写为^[18]:

$$N = k_1 \frac{P}{T} + \left(k_2' \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right) = N_{dry} + N_{wet} \quad (2.14)$$

式中, N_{dry} 与 N_{wet} 分别表示流体静力学与非流体静力折射率, 系数 k_2' 的表达式:

$$k_2' = k_2 - k_1 \frac{R_d}{R_w} \quad (2.15)$$

式中, R_d 、 R_w 分别为干空气与水汽的气体常数。水汽压的值一般无法直接测定, 其计算公式为^[19]:

$$e = \frac{qP}{\varepsilon + (1 - \varepsilon) \cdot q} \approx \frac{qP}{(0.622 + 0.378q)} \quad (2.16)$$

式中, q 表示比湿, 由此可以得到对流层天顶总延迟(ZTD)、天顶流体静力学延迟(ZD_{dry})、天顶非流体静力学(ZD_{wet})的计算公式分别为:

$$ZTD = 10^{-6} \int_S N d_s = 10^{-6} \sum_i N_i \Delta s_i \quad (2.17)$$

$$ZD_{dry} = 10^{-6} \int_S N_{dry} d_s = 10^{-6} \sum_i N_{dryi} \Delta s_i \quad (2.18)$$

$$ZD_{wet} = 10^{-6} \int_S N_{wet} d_s = 10^{-6} \sum_i N_{weti} \Delta s_i \quad (2.19)$$

式中, Δs_i 表示每一层大气层的厚度。

卫星导航定位中的对流层延迟改正和电磁波测距中的气象改正一样, 都是电磁波信号在中性大气层中传播时的信号延迟改正。但在电磁波测距中, 信号一般是沿着大气稠密的地面传播, 测线上各处的气象元素可视为基本相同, 并用测站上所测定的气象元素或测线两端测定的气象元素均值代替; 而卫星导航定位中的信号来自太空, 信号传播路径上各处的气象元素有明显的差异, 由积分公式可知, 要求得对流层的延迟改正就需要知道信号传播路径上各处的大气折射系数, 大气折射系数是温度、气压、湿度的函数, 因此需要知道传播路径各处的气象参数, 实际上传播路径上的气象数值是很难测定的, 所以我们只能量测测站处的气象参数值, 然后根据数学模型计算出空中各点处的气象元素值, 进而利用积分公式求出对流层延迟改正。

2.3 对流层延迟改正方法

对流层延迟的改正方法主要有五种: 参数估计法、差分法、对流层延迟模型改正法、外部修正法、数值气象模型法。

2.3.1 参数估计法

在稳定的条件下使用模型函数法可以很好地改正对流层延迟，但是大气中的水汽通常变化较为剧烈，无论使用标准大气参数还是实测气象参数，往往都无法反映真实的垂直大气状态。在高精度 GNSS 处理过程中，将模型改正值作为先验值，然后将天顶延迟的剩余误差作为待定参数，与待定点坐标以及其他未知量一起求解估计，叫做参数估计法^{[20][21]}。参数估计法又分为单参数法、多参数法、随机过程法和分段线性法。下面就对这几种参数估计方法进行介绍。

1. 单参数估计法

用模型法对天顶延迟进行改正时，单参数方法假设每个测站天顶方向的延迟改正值与实际值之间存在一个常数偏差 δ ，相应的传播路径上的对流层折射为：

$$\mu = (\mu_d^z + \mu_w^z + \delta) \times M(E) \quad (2.20)$$

δ 是观测量的附加参数，可以一起代入方程解算。

2. 多参数估计法

单个参数可能无法很好地改正模型存在的天顶延迟偏差，采用每隔一段时间间隔 Δt 设置一个对流层天顶延迟偏差的方法，称为多参数估计法。

$$\begin{cases} \mu(t) = (\mu_d^z + \mu_w^z + \delta(t)) \times M(E) \\ T_{i-1} \leq \delta \leq T_i, T_i = T_{i-1} + \Delta t \end{cases} \quad (2.21)$$

在 Bernese 软件中，全天测站解算比较具有代表性的是 2~6 小时设定一个参数，参数对应的历元就是间隔时间段的开始和结束时间，例如 2 小时估计一个参数，那么全天 24 小时就会有 13 个参数，理论上参数越多越能真实反映对流层折射的变化，更好地补偿模型误差，但实际上过多的参数会影响解的结果，使精度变差，甚至会导致法方程的病态。但参数过少则不足以反映出对流层特别是湿分量随时间变化的特征，从而导致估计结果的精度下降。所以，选择适当的对流层天顶延迟参数个数是多参数方法的关键。

3. 随机过程法

根据用微波辐射计观测的数据分析发现，天顶延迟的湿分量可以用一阶高斯马尔可夫过程来描述：

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{1}{\tau} \rho + W(t) \quad (2.22)$$

其中 τ 为随机过程中的相关时间， $W(t)$ 是方差为 σ_w^2 的零均值高斯白噪声，微分方程的离散解为：

$$\begin{cases} \rho(i+1) = m(i)\rho(i) + \bar{W}(i) \\ m(i) = e^{-\frac{t_{i+1}-t_i}{\tau}} = e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} = m(\Delta t) \\ \bar{W}(i) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} e^{-\frac{t_{i+1}-\tau}{\tau}} W(\tau) d\tau \\ \delta_{W(i)}^2 = \frac{1}{2} \tau \delta_{W(0)}^2 \{1 - [m(i)]^2\} \end{cases} \quad (2.23)$$

$\rho(i)$ 表示第 i 个历元湿延迟的待估参数, τ 、 $\delta_{W(i)}^2$ 分别为随机过程的相关时间和方差, 两参数可以在经验估计前给定, 数值对结果有一定影响, 不同的测站可有不同的估值, 通常 τ 趋向无穷大, 即随机游走过程, δ_w^2 为对应连续过程的方差, 取 $1\text{cm}^2/\text{h} \sim 9\text{cm}^2/\text{h}$ 之间, 这样随机过程可以简单表示为:

$$\begin{cases} \rho(i+1) = \rho(i) + \bar{W}(i) \\ \delta_{W(i)}^2 = \Delta t \cdot \delta_w^2 \end{cases} \quad (2.24)$$

4. 分段线性法

在随机过程方法中, 存在一个严重的不足之处, 即每个历元都要有一个状态待估参数, 这样很不利于方程的解算。在实际使用中, 通常构造一种分段线形函数的随机过程, 它在一定时间间隔 k 取一个待估参数, 用步长 $k \cdot \Delta t$ 的离散随机过程来表示湿延迟随时间的随机变化, 设相邻两个状态待估参数为: $\rho(i)$ 和 $\rho(i+k)$, 其方程为:

$$\begin{cases} \rho(i+k) = m(k \cdot \Delta t) \rho(i) + W(i+k) \\ m(k \cdot \Delta t) = e^{-\frac{k \cdot \Delta t}{\tau}} \\ \delta_{W(i)}^2 = \frac{1}{2} \tau \delta_w^2 \{1 - [m(k \cdot \Delta t)]^2\} \end{cases} \quad (2.25)$$

另外, 设在 i 和 $i+k$ 之间的历元 j 满足线性函数变化形式, 即:

$$\rho(i) = \rho(i) + \frac{j-i}{k} [\rho(i+k) - \rho(i)] \quad (2.26)$$

适当选择 k , 可使待求解的测站天顶方向的对流层折射参数 $\rho(i)$ 、 $\rho(i+k)$ 等的个数减少, 从而可以用最小二乘的方法估计参数。其中状态方程(2.25)可以以未知参数先验权的方式直接放到法方程中。

2.3.2 差分法

当两个测站相距不远时 (一般为 20km 以内), 测站上空的大气状况可认为近似相同, 卫星信号穿过对流层时产生的延迟可认为相同, 利用同步观测量求差的方法可以明显削弱对流层折射的影响。差分法被广泛应用于精密相对定位中, 但是效果会随着测站之间距离的增大而降低^[22]。当高差较大时, 即使是短基线, 测站处的气

象差异也较大，使得对流层延迟的相关性降低，此时使用差分法无法有效的削弱对流层延迟的影响。另外，在一些强对流的特殊天气条件下，如暴雨、台风等，对流层中水汽的水平梯度较大，即使在 1~2 公里的短基线中，其残余的对流层延迟也比较大。残余的对流层延迟不仅会降低 GNSS 测量的精度，甚至有可能导致模糊度解算失败。

2.3.3 经验模型改正法

对于中性大气层影响的处理，国内外通用的方法是依据大气传播理论建立大气折射理论和修正模型。常用的对流层延迟改正模型按照参数类型可分为两类：第一类是需要气象参数的模型，比较具有代表性的是 SAASTAMOINEN 模型，在使用该类模型时需要输入实测或标准气象参数；另一类是根据测站位置与年积日计算的相关模型，如 EGNOS 模型、UNB3M 模型、GPT2 模型。第一类模型受模型误差和气象代表性误差的影响，一般在测量中采用标准气象参数，致使改正精度不高，第二类模型不需气象参数，使用方便，精度也较高。由于第二类模型是基于全球气象资料建立的，在区域测量中会有较大误差。

2.3.1.1 SAASTAMOINEN 模型

SAASTAMOINEN模型（简称SAAS）把对流层分为两部分，第一部分是地面到12km左右的对流层顶部，大气温度呈线性递减变化，递减率约为6.5℃/km，第二层是从对流层顶到50km左右的平流层顶，这一层中把大气温度假设成常数^[15]。主要采用三角函数进行展开并逐项积分而得到对流层天顶总延迟ZTD^{[9][23]}：

$$ZTD = \frac{0.002277}{f(\phi, h)} \times \left(P_s + \left(0.05 + \frac{1255}{T_s} \right) e_s \right) \quad (2.27)$$

$$e_s = rh \times 6.11 \times 10^{\frac{7.5(T_s - 273.15)}{T_s}} \quad (2.28)$$

$$f(\phi, h) = 1 - 0.00266(2\phi) - 0.00028h \quad (2.29)$$

式中，ZTD单位为m， T_s 为地面温度（K）， P_s 为地面气压（mbar）， e_s 为地面水气压， rh 为地面相对湿度（0~1之间）。其中气象参数可以是实测数据， $f(\phi, h)$ 是纬度和高度的函数，反映了重力加速度随地理位置和海拔高度的变化， ϕ 为测站的地心大地纬度，单位为弧度， h 为测站大地高（km）。

若没有实测气象数据，利用SAAS模型计算测站处对流层天顶延迟所需的气象参数可通过加拿大New Brunswick大学提供的标准大气参数DIPOP模型计算：

$$\begin{cases} T_s = T_0 - 0.0068h \\ P_s = P_0 \left(1 - \frac{0.0068}{T_0} h \right)^5 \end{cases} \quad (2.30)$$

$$e_s = \begin{cases} e_0 \left[1 - \frac{0.0068}{T_0} h \right]^4 & h < 11000m \\ 0 & h \geq 11000m \end{cases} \quad (2.31)$$

式中的初始标准参考大气参数为： $P_0=1013.25\text{mbar}$ ， $e_0=11.691\text{mbar}$ ， $T_0=288.15\text{K}$ ， h 为测站大地高(m)。SAAS模型天顶干延迟的计算公式^{[24][25]}：

$$ZHD = \frac{0.0022768P_s}{f(\phi, h)} \quad (2.32)$$

式中， P_s 为GPS接收机天线处大气压， ZHD 单位为m， $f(\phi, h)$ 公式及变量含义同式(2.29)。

由公式(2.27)~(2.32)可知，对流层天顶延迟模型是气象元素的函数，如果气象元素存在误差，将直接影响对流层天顶延迟的精度。表 2.1 中显示了在不同的大气条件下，气象元素误差对对流层天顶延迟精度的影响。通过误差传播定律对公式进行换算，就可以得到气象元素对高程估值影响大小^[26]。由表 2.1 可知，在炎热潮湿的环境下，1%的相对湿度误差将产生 4mm 的对流层天顶延迟误差，最终导致 1cm 的高程误差；1℃的温度误差将产生 2.7cm 的对流层天顶延迟误差，进而导致 8cm 的高程误差。

表 2.1 气象元素误差对对流层天顶延迟影响

T	P	RH	$\frac{\partial d_{tro}}{\partial T}$	$\frac{\partial d_{tro}}{\partial P}$	$\frac{\partial d_{tro}}{\partial RH}$
℃	mbar	%	mm/℃	mm/mbar	mm/1%
0	1000	100	5	2	0.6
30	1000	100	27	2	4
0	1000	50	3	2	0.6
30	1000	50	14	2	4

2.3.1.2 EGNOS 模型

为了便于使用，欧盟在 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 ECMWF 资料基础上建立了 EGNOS 模型，在每隔 15° 纬度网格点上提供了用于计算对流层天顶延迟的平均海平面处的 5 个气象参数：温度、气压、水汽压、温度梯度和水汽梯度，其中温度梯度与水汽梯度用于将海平面处的值换算到测站高度处。它们在平均海平面上的变化值只与纬度和年

积日有关，且其年变化呈余弦函数形式，余弦函数的振幅和年平均值均由气象资料拟合求得，五个参数的具体年均值与变化率见表 2.2 与表 2.3。用户根据测站所处纬度和年积日利用余弦函数计算出自己所需要的气象参数，进而基于高差改正计算对流层天顶延迟，模型主要特点是计算天顶延迟时无需实测气象数据，主要适用于欧洲地区。

此模型的具体计算流程是：先由接收机的纬度和观测日期求得平均海平面的气象参数，计算平均海平面处的干、湿延迟，然后根据接收机的高程由平均海平面处的延迟值计算接收机处的干、湿延迟，天顶总延迟则由两者相加求得。其数学模型为 [20][27]：

$$\begin{aligned} d_{dry} &= z_{dry} \left[1 - \frac{\beta H}{T} \right]^{\frac{g}{R_d \beta}} \\ d_{wet} &= z_{wet} \left[1 - \frac{\beta H}{T} \right]^{\frac{(1+\lambda)g}{R_d \beta} - 1} \end{aligned} \quad (2.33)$$

式中， $g=9.80665\text{m/s}^2$ ， $R_d=287.054\text{J/Kg/K}$ ， H 表示测站距离平均海平面的高(m)， T 表示平均海平面处的温度(K)， β 表示温度梯度(K/m)， λ 表示水汽压梯度(无量纲)， z_{dry} 表示平均海平面处的干延迟， z_{wet} 表示平均海平面处的湿延迟。干、湿延迟计算公式为：

$$\begin{aligned} z_{dry} &= \frac{10^{-6} k_1 R_d P}{g_m} \\ z_{wet} &= \frac{10^{-6} k_2 R_d}{g_m (1+\lambda) - \beta R_d} \times \frac{e}{T} \end{aligned} \quad (2.34)$$

式中， $k_1=77.604\text{K/mbar}$ ， $k_2=382000\text{K}^2/\text{mbar}$ ， $g_m=9.784\text{m/s}^2$ ， P 表示平均海平面处的气压， e 表示平均海平面处的水汽压(mbar)。EGNOS 模型中，平均海平面处的 5 个气象参数可根据表 2.2 与 2.3 计算，公式为：

$$\xi(\phi, D) = \xi_0(\phi) - \Delta\xi(\phi) \times \cos \left[\frac{2\pi(D - D_{\min})}{365.25} \right] \quad (2.35)$$

式中， ϕ 表示接收机纬度， D 表示年积日， $D_{\min}$ 为各气象参数的年变化最小值的日期(北半球时 $D_{\min}=28$ ；南半球时 $D_{\min}=211$)， ξ_0 和 $\Delta\xi$ 表示气象参数的年均值与年度变化值。

表 2.2 EGNOS 模型 5 个气象参数年均值

Latitude(°)	P_0 (mbar)	T_0 (K)	e_0 (mbar)	β_0 (K/m)	λ_0
≤15	1013.25	299.65	26.31	$6.30e^{-3}$	2.77
30	1017.25	294.15	21.79	$6.05e^{-3}$	3.15
45	1015.25	283.15	11.66	$5.58e^{-3}$	2.57
60	1011.75	272.15	6.78	$5.39e^{-3}$	1.81
≥75	1013.00	263.65	4.11	$4.53e^{-3}$	1.55

表 2.3 EGNOS 模型 5 个气象参数年度变化值

Latitude(°)	ΔP (mbar)	ΔT (K)	Δe (mbar)	$\Delta \beta$ (K/m)	$\Delta \lambda$
≤15	0.00	0.00	0.00	$0.00e^{-3}$	0.00
30	-3.75	7.00	8.85	$0.25e^{-3}$	0.33
45	-2.25	11.00	7.24	$0.32e^{-3}$	0.46
60	-1.75	15.00	5.36	$0.81e^{-3}$	0.74
≥75	-0.50	14.00	3.39	$0.62e^{-3}$	0.30

通过实验数据验证，EGNOS 模型计算的天顶延迟的精度与实测气象参数的 SAAS 模型相当，无明显的系统偏差，平均中误差仅为 5cm，高于标准大气参数的 SAAS 模型计算的精度。它所需参数较少，并且不需要输入实测的气象参数值，是能较好的反映全球大气变化特征的全球性平均对流层大气延迟改正模型，可作为适用的 GNSS 实时定位和导航的对流层天顶延迟改正模型，满足 GNSS 米级定位精度的需求^[28]。但是，此模型是基于欧洲中期天气预报中心全球范围大气数据建立的，在全球性的平均对流层大气中改正精度较高，小范围区域内尤其是地形较复杂的地区则会产生较大的误差，对 GNSS 大地高的测量影响特别明显。因此可以参考 EGNOS 模型，在此基础上建立区域精密对流层模型，提高对流层延迟改正精度。

2.3.1.3 UNB3M 模型

针对 SAAS 模型使用中存在的不足，Paul Collins 等人^[10]利用 1966 美国标准大气资料和 NEILL 映射函数推出了 UNB3 模型，推导出了 5 个气象参数：温度、气压、相对湿度、温度梯度和水汽压高度变化因子。在实际使用中发现，由水汽压计算相对湿度时会出现结果不可靠的情况，相对湿度超过 100%，这是由于温度、水汽压、相对湿度并不是线性关系，只用余弦函数不能很好的表达出水汽分压的年度变化情况导致的，为了避免这一不可靠现象，推出了 UNB3M 模型。该模型基于 SAAS

模型和气象参数来计算天顶流体静力学延迟和非流体静力学延迟,在全球纬度每 15° 给出一组气象参数的平均值以及周年变化振幅,结果见表 2.4。用户可以根据测站所处的纬度和时间,利用余弦函数计算所需的气象参数来计算。

此模型的具体计算流程是:根据表 2.4 中气象参数的年度变化振幅以及平均值,由接收机的纬度和观测日期求得 5 个气象参数,然后计算出接收机处的流体静力学延迟与非流体静力学延迟,天顶方向总延迟则由两者相加求得。其数学模型为^[10]:

$$Avg_\phi = \begin{cases} Avg_{15}, & \text{if } \phi \leq 15 \\ Avg_{75}, & \text{if } \phi \geq 75 \\ Avg_i + \left(\frac{Avg_{i+1} - Avg_i}{15} \right) (\phi - Lat_i), & \text{if } 15 < \phi < 75 \end{cases} \quad (2.36)$$

式中, ϕ 表示纬度(单位为度), Avg_ϕ 表示计算的参数年均值,年振幅的计算公式与其类似:

$$Amp_\phi = \begin{cases} Amp_{15}, & \text{if } \phi \leq 15 \\ Amp_{75}, & \text{if } \phi \geq 75 \\ Amp_i + \left(\frac{Amp_{i+1} - Amp_i}{15} \right) (\phi - Lat_i), & \text{if } 15 < \phi < 75 \end{cases} \quad (2.37)$$

式中, Amp_ϕ 表示参数年振幅。根据测站纬度利用公式(2.36)~(2.37)计算出参数年振幅与均值后,测站处的参数值可用年积日表达式进行计算:

$$X_{\phi, doy} = Avg_\phi - \Delta Amp_\phi \cos\left((doy - 28) \frac{2\pi}{365.25}\right) \quad (2.38)$$

式中, $X_{\phi, doy}$ 表示年积日为 doy 时, ϕ 纬度处的气象参数值,五个参数均使用此公式计算。当所处纬度为南半球时,将余弦函数改为正弦函数即可。

由公式(2.36)~(2.38)求出所需的气象参数,代入公式(2.39)求出测站处的天顶流体静力学延迟 d_h^z 与非流体静力学延迟 d_{nh}^z :

$$\begin{aligned} d_h^z &= \frac{10^{-6} k_1 R P_0}{g_m} \left(1 - \frac{\beta H}{T_0} \right)^{\frac{g}{R\beta}} \\ d_{nh}^z &= \frac{10^{-6} (T_m k_2' + k_3) R e_0}{g_m \lambda' - \beta R} \frac{1}{T_0} \left(1 - \frac{\beta H}{T_0} \right)^{\left(\frac{\lambda' g}{R\beta} \right)^{-1}} \end{aligned} \quad (2.39)$$

式中, P_0 、 T_0 、 e_0 、 λ 、表示根据公式(2.36)~(2.38)计算出来的气象参数, R 表示干空气固定气体常数 287.054 J/kg/K , H 表示正高(m),当无法获取正高时,也可使用椭球高代替,不同高度类型导致的结果误差远小于模型误差, g 表示标准重力加速度

9.80665m/s²。e₀的计算公式^[29]:

$$e_0 = \frac{RH}{100} \cdot e_s \cdot f_w \quad (2.40)$$

$$e_s = 0.01 \cdot e^{(1.2378847 \times 10^{-5} T_0^2 - 1.9121316 \times 10^{-2} T_0 + 33.937110476.3431645 \times 10^3 T_0^{-1})} \quad (2.41)$$

$$f_w = 1.00062 + 3.14 \times 10^{-6} P_0 + 5.6 \times 10^{-7} (T_0 - 273.15)^2 \quad (2.42)$$

式中, e_s表示饱和水汽压, f_w表示增强因子。

$$g_m = 9.784(1 - 2.66 \times 10^{-3} \cos(2\phi) - 2.8 \times 10^{-7} H) \quad (2.43)$$

$$T_m = (T_0 - \beta H) \left(1 - \frac{\beta R}{g_m \lambda'} \right) \quad (2.44)$$

式中, g_m表示大气几何中心的重力加速度(m/s²), T_m表示大气加权平均温度(K), λ = λ' + 1, 是无量纲, k₁=77.60K/mbar, k₂=16.6K/mbar, k₃=377600.0K²/mbar。

表 2.4 UNB3M 模型气象参数年均值与年度变化振幅

Latitude(deg.)	Pressure(mbar)	Temperature(K)	RH(%)	$\beta(K \cdot m^{-1})$	λ
Average					
15	1013.25	299.65	75.0	6.30e ⁻³	2.77
30	1017.25	294.15	80.0	6.05e ⁻³	3.15
45	1015.75	283.15	76.0	5.58e ⁻³	2.57
60	1011.75	272.15	77.5	5.39e ⁻³	1.81
75	1013.00	263.65	82.5	4.53e ⁻³	1.55
Amplitude					
15	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00
30	-3.75	7.00	0.0	0.25e ⁻³	0.33
45	-2.25	11.00	-1.0	0.32e ⁻³	0.46
60	-1.75	15.00	-2.5	0.81e ⁻³	0.74
75	-0.50	14.50	2.5	0.62e ⁻³	0.30

2.3.1.4 GPT2 模型

GPT2 模型是 Boehm 等人^[12]收集了 ERA-Interim 发布的 10(2001~2010)年的分辨率为 1° 的等压面格网资料, 包括温度、气压、比湿和位势月平均值, 在 2012 年提出的一种新的对流层延迟经验模型, 通过位势高与椭球高之间的转换, 根据分层资料内插出所需的地表气象参数, 是对 GPT/GMF 模型的一种改进, 表 2.5 描述了 GPT2 模型的发展以及优势。

用户可根据测站位置与年积日求出气压、温度、温度递减率、水汽分压、影射

函数系数以及各系数年度与半年度的变化，年度或者半年度测站高振幅差异较小。GPT2 模型将全球划分为 $5^\circ \times 5^\circ$ 的格网，根据 ECMWF 的多年的格网气象参数时间序列，依据最小二乘平差原理对每个格网点处的参数系数进行拟合，拟合公式为：

$$a = a1 + a2 \times \cos\left(\frac{2 \times \text{doy} \times \pi}{365.25}\right) + a3 \times \sin\left(\frac{2 \times \text{doy} \times \pi}{365.25}\right) + a4 \times \cos\left(\frac{4 \times \text{doy} \times \pi}{365.25}\right) + a5 \times \sin\left(\frac{4 \times \text{doy} \times \pi}{365.25}\right) \quad (2.45)$$

式中， $a1$ 为气象参数的年均值， $(a2, a3)$ 与 $(a4, a5)$ 分别为参数年度与半年度变化值， doy 为年积日。对拟合出的每个格网点参数取最优值并保存为文本文件，根据距离测站最近的四个格网点内插计算测站参数。用户可从维也纳理工大学网站 <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/SOURCE/> 上下载子程序以及运行所需的格网数据进行计算。此模型根据测站年积日以及大地坐标来获取测站处的气象数据，不能直接得到延迟值，因此使用公式(2.27)~(2.29)计算天顶总延迟。Boehm 等人采用 VieVS (Vienna VLBI Software) 软件对 1984-2012 年的观测数据进行处理分析认为，在考虑大气负荷效应改正的情况下，GPT2 模型精度要高于 GMF/GPT 模型。

表 2.5 GPT2 相对于 GPT/GMF 的改进情况

GPT/GMF		GPT2
NWM 数据	1999-2002 年 ERA40 提供的月平均廓线	2001-2010 年 ERA-Interim 提供的月平均廓线
地形数据	平均海平面上的 9 阶球谐函数	基于 ETOPO5 平均高程的 5° 格网
时间变化	平均及年变化周期项	平均、年及半年周期项
相位	固定到 1 月 28 日	估计值
温度变化	假定为常数， $-6.5^\circ/\text{km}$	在每个格网点估计平均、年以及半年周期项
气压变化	基于标准大气压的指数	基于格网点实际气温的指数
输出参数	气压、气温以及干湿映射函数参数	气压、气温、温度变化率、水汽压、干湿映射函数参数

2.3.4 水汽辐射计外部修正法

GNSS 信号穿过对流层时会引起折射延迟,分为干湿两部分,其中湿延迟受大气中水汽影响,由于水汽在空间与时间上变化剧烈,导致使用对流层模型进行改正的精度不高。外部修正法就是利用外部设备来实际测定卫星信号传播路径上水汽对信号传播的影响,使用该方法时,天顶静力学延迟分量部分仍由经验气象模型计算,并且由地面测量和标准大气参数进行估值,天顶方向湿延迟则利用遥测的总水汽量与湿延迟之间的转换关系求出^[31]。水汽辐射计可以连续工作并以较高的时间分辨率对大气中的水汽情况进行监测,近年来,许多学者对水汽辐射计数据的使用做了许多研究,陈俊平^[32]等利用气象观测文件直接求出的水汽含量与水汽辐射计的观测量平均差值为 0.03mm,均方差为 0.02mm,说明由 GPS 基线解算出的水汽含量与 WVR 天顶方向水汽含量观测值是一致的; Randolph Ware^[11]等使用水汽辐射计对卫星进行定向跟踪来改正不同方位的水汽含量,得到 50km 的基线高程精度可以达到 2.6mm 的结果;王勇^[33]等利用事后精密星历解算对流层延迟并与水汽辐射计的观测数据比较,得出水汽辐射计与精密星历湿延迟的差值均值为 0.77cm,均方根为 1.51cm,证明了 GPS 反演对流层湿延迟与水汽辐射计湿延迟变化趋势大致相同;陈俊平^[34]等将水汽辐射计的水汽观测数据引入到 GPS 基线解算中,结果表明对于 10^6 米的基线能够产生厘米级的差异。

2.3.4.1 微波辐射计简介

微波辐射计具有多种类型,一般具有多个通道。本文将介绍德国莱比信公司生产的水汽和液态水含量微波辐射计(RPG-LWP),它是一种标准型双通道(23.84GHz和31.40GHz两种微波观测通道)水汽辐射计,其主要组成部件见图2.3,技术参数见表2.6。主要特性有:

- 双通道并行探测接收器组技术;
- 极高的时空分辨率(积分时间: 1s);
- 自动进行天空倾斜式定标 Sky-tipping;
- 内置自动定标:噪声二极管增益定标和快速迪克开关定标(系统噪声定标),无须频繁外部人工液氮定标;
- 软件的数据反演和管理功能强大,高度自动化和可视化;
- 恶劣天气时,高效加热系统(1.8KW)能防止微波接收窗口上露水凝结(水和冰);
- 追踪卫星视线,测定沿卫星视线方向的湿度廓线、干/湿延迟和大气衰减等;

表 2.6 WVR 相关技术参数

序号	内容	技术参数
1	频率	双通道 23.84 GHz 和 31.40 GHz
2	液态水路径(LWP)精度	$\pm 20\text{g/m}^2$, 噪声 : 2g/m^2 RMS
3	综合水汽含量(IWV)精度	$\pm 0.2\text{kg/m}^2$, 噪声 : 0.05kg/m^2 RMS
4	接收器和天线热稳定性	$< \pm 0.03\text{K}$
5	系统噪声温度	$< 350\text{K}$
6	系统绝对稳定度	0.5 K
7	积分时间	≥ 1 秒
8	方位定位仪调控/定位系统	高度角 : $-90^\circ \sim +90^\circ$; 方位角 : $0 \sim 360^\circ$; 分辨率 $< 1^\circ$ 高度角 $45^\circ/\text{秒}$ (0.6 %分辨率) ;
9	定位速度	方位角 $20^\circ/\text{秒}$ (0.1 %分辨率) 温度 (-50°C to $+50^\circ\text{C}$) ;
10	地表气象传感器测量范围	相对湿度 (0-100%) ; 气压 (800 to 1060 mbar) ;
11	数据接口	RS 232, 115kBaund 光纤
12	定标方式	反射式液氮定标, 内置黑体定标, 噪声源定标, 天空 倾斜式定标 (Sky Tipping , 2 分钟)
13	重量和尺寸	重量 : $> 60\text{kg}$; 尺寸 : $65 \times 40 \times 100\text{cm}^3$;

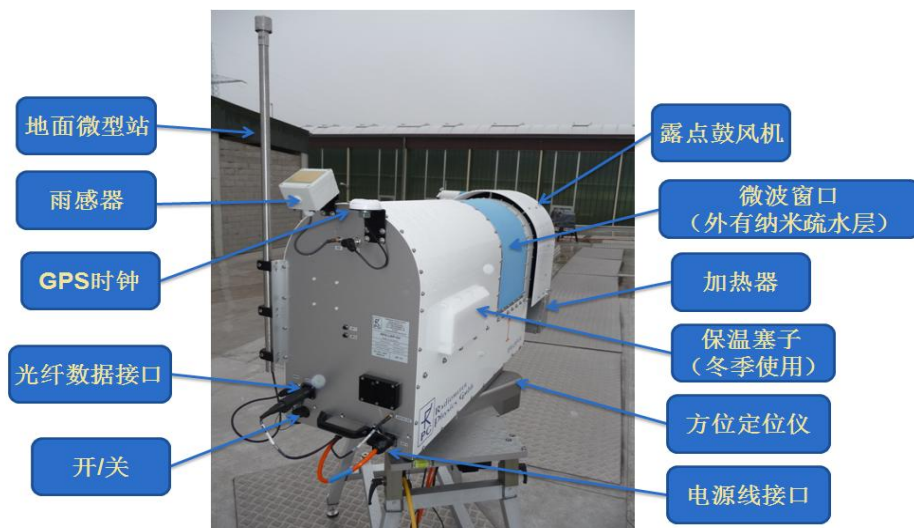


图 2.3 水汽辐射计主要部件

WVR 具有先进的独立工作能力，性能稳定、测量精确，高度自动化，非常适合于自动气象站，能在几乎各种环境条件下工作，通过测量双通道亮温并存储为原始数据，进而反演出综合水汽含量(IWV)、液态水路径积分含量(LWP)、干湿延迟，利用内置传感器获取温度、气压、相对湿度等地面气象参数、降水状况、GPS 时钟。

2.3.4.1 数据处理实例

为了验证不同的对流层延迟改正模型在上海地区的适用性和水汽辐射计在 GNSS 定位中的应用，本文收集了气象仪与并址的水汽辐射计 2014 年 6~12 月份的观测数据(两者相距约 3 米)，以水汽辐射计精密观测值为参考，首先采用 Bernese 软件根据并址的 GPS 观测数据解算出 ZHD、ZWD、ZTD，然后编写程序计算 SAAS、GPT2、UNB3M 和 EGNOS 四种模型的 ZHD、ZWD 和 ZTD。评估了四种对流层模型在上海地区的适用性。并将水汽辐射计精密观测值、常用对流层模型计算的延迟值引入到 GNSS 精密单点定位，分析了不同模型动态精密单点定位的精度。本文中对流层天顶延迟的计算分为三种方式：

(1) 采用 Bernese5.0 软件，选择 NEILL 模型对天顶延迟进行估算。这是目前数据处理中通用的处理方法，利用收集到的观测数据，把天顶方向干延迟（ZHD）利用模型进行修正，而天顶湿延迟（ZWD）则作为参数估计^[35]。

(2) 采用经验模型 SAAS、GPT2、EGNOS、UNB3M 进行改正。基于经验的模型引入实测气象数据、标准大气数据，直接求取天顶延迟。

(3) 基于水汽辐射计观测的天顶延迟改正。其中，干延迟部分是利用 WVR 的实测气象数据根据经验模型求得，而湿延迟是使用转换因子以及水汽观测量(IWV)计算获得。

下面分别对天顶干延迟、天顶湿延迟、天顶总延迟的计算结果进行分析。

1. 天顶干延迟

根据公式(2.32)计算了不同对流层模型的 ZHD，结果见图 2.4，图中 SCSAAS 表示 SAAS 模型使用气象仪实测气象数据计算的结果，SDSAAS 表示标准大气下的 SAAS 模型天顶干延迟，WVR 为采用水汽辐射计实测气象数据获取的干延迟值。

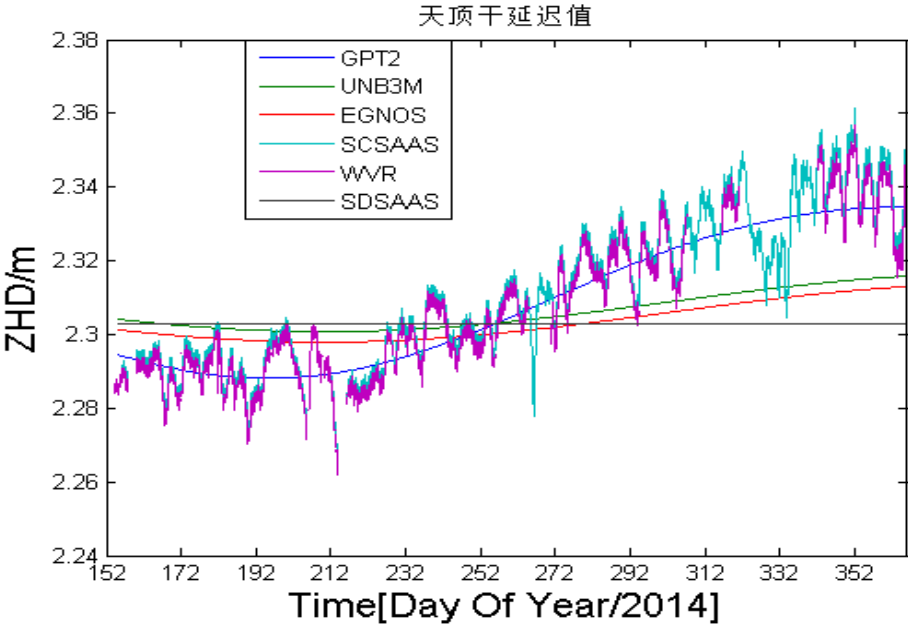


图 2.4 利用经验模型以及 WVR 观测的气象数据计算的天顶干延迟比较

以 WVR 为参考，比较对流层模型之间差异，结果如图 2.5 和表 2.7 所。

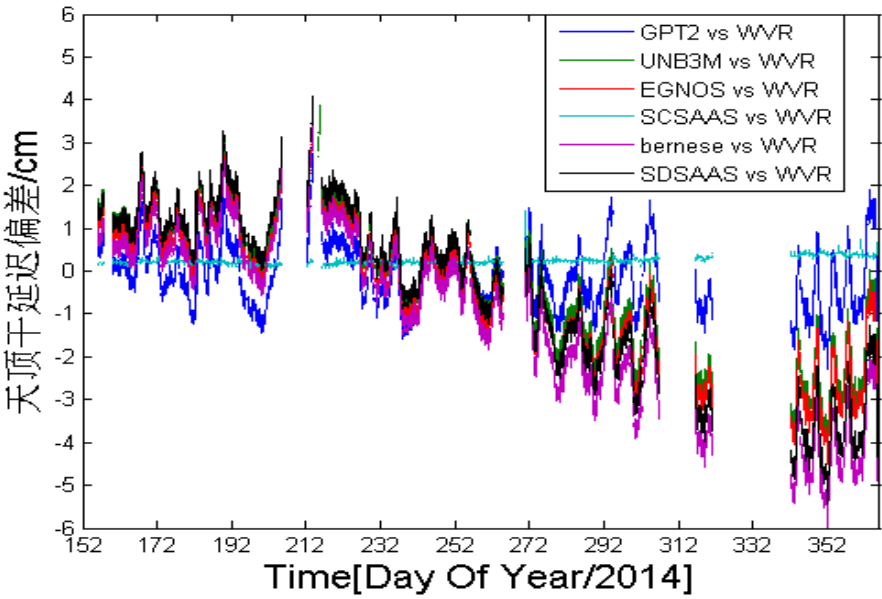


图 2.5 利用经验模型与 WVR 观测的气象数据计算的天顶干延迟偏差

表 2.7 各模型与 WVR 的天顶干延迟偏差均值、中误差

	GPT2	UNB3M	EGNOS	SCSAAS	SDSAAS
Bias/cm	-0.11	-0.17	-0.45	0.24	-0.40
RMS/cm	± 0.75	± 1.56	± 1.62	± 0.25	± 2.01

由图2.4、图2.5和表2.7可知，在夏季不同模型干延迟的改正精度相当，冬季差异较为明显。GPT2模型干延迟中误差为± 0.75cm；SDSAAS模型改正精度最差；UNB3M模型与EGNOS模型干延迟改正精度介于GPT2与SDSAAS模型之间。

2. 天顶湿延迟

湿延迟量主要受水汽影响，由于水汽含量随时间和空间变化剧烈，模型化表达不精确，一般做法是从求出的天顶总延迟中扣除天顶干延迟，从而求得对流层天顶湿延迟^[36]：

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (2.46)$$

此外，WVR 能够对水汽进行观测，可将其观测的综合水汽含量 IWV 转换为天顶湿延迟^{[16][37]}：

$$ZWD = IWV \Pi^{-1} \quad (2.47)$$

式中 Π 为转换因子（无量纲），一般随季节的变换有所不同，主要取决于水气加权平均温度 T_m ，计算公式如下：

$$\Pi = 10^6 \left(\rho_{H_2O} R_v \left(\frac{c_1}{T_m} + c_2 \right) \right)^{-1} \quad (2.48)$$

式中， ρ_{H_2O} 是指液态水的密度为 10^3kg/m^3 ， R_v 是指水汽特定气体常数 $461.5 \text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ 。 c_1 与 c_2 是两个常量： $c_1=(3.739 \pm 0.012)10^5 \text{K}^2 \text{hPa}^{-1}$ ； $c_2=(22.1 \pm 2.2)\text{K hPa}^{-1}$ ， T_m 是大气水汽加权平均温度，考虑到与地表温度的线性关系，其近似观测值可用测站处温度 T_s 计算出来，两者之间的线性关系具有区域性差异，针对上海地区，计算时可用公式^[38]：

$$T_m \approx 75.3 + 0.72T_s \quad (2.49)$$

公式(2.49)中的测站温度为实测值。本文比较了实测温度与模型温度计算出的转换因子，结果见图2.6。 Π 值变化在图中以Q表示，SC表示实测温度的转换因子值。

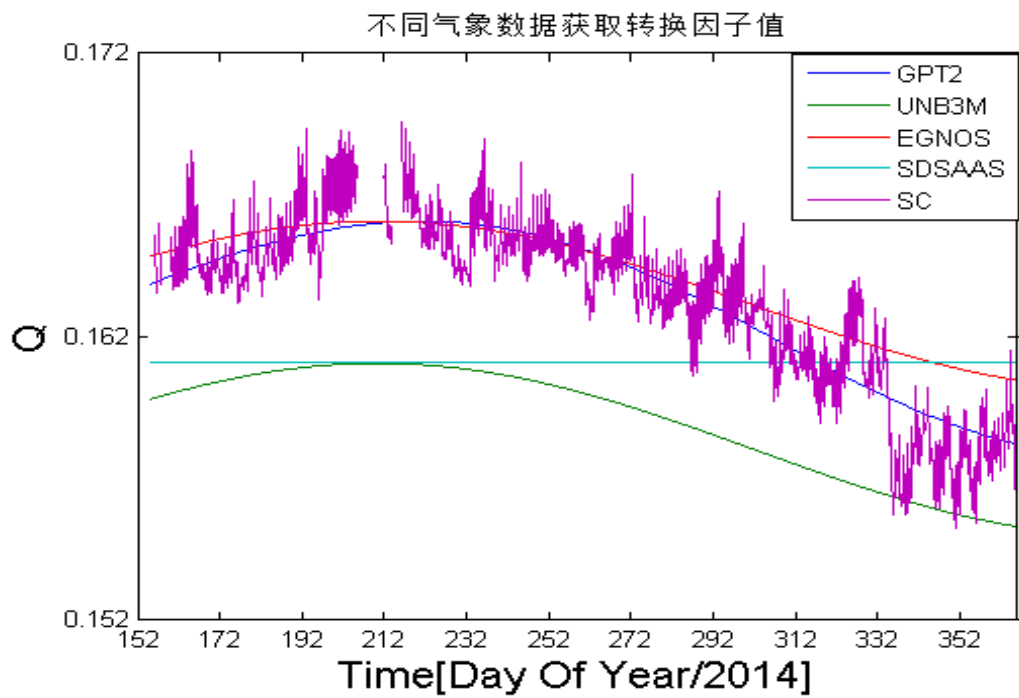


图 2.6 不同模型获取的转换因子比较

以实测温度的转换因子值为参考，比较各个对流层模型的转换因子差异，结果见图 2.7 和表 2.8。

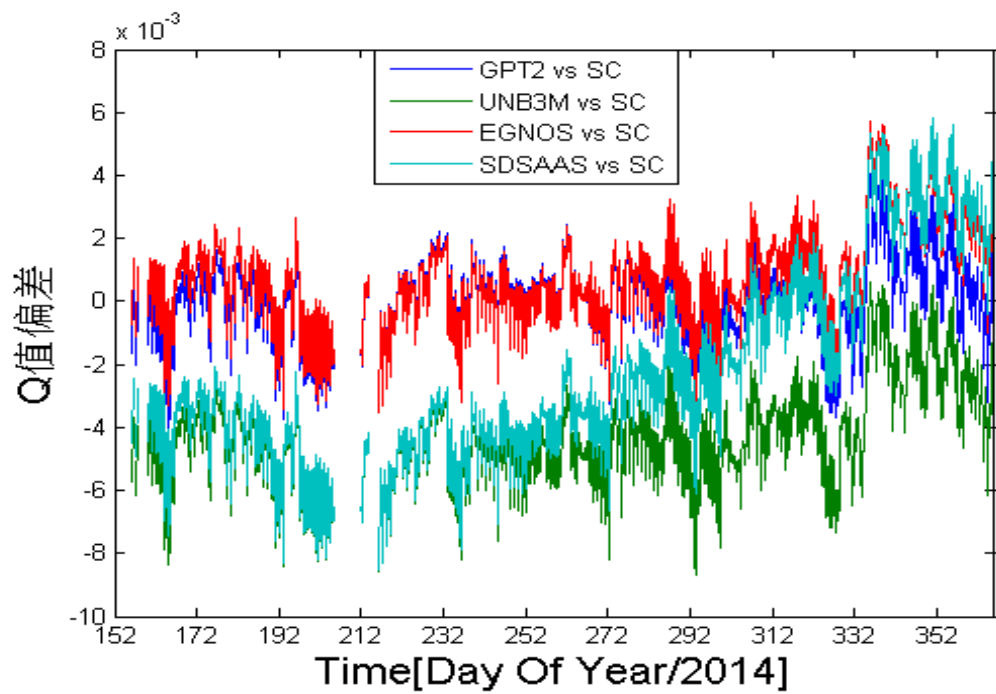


图 2.7 转换因子偏差

表 2.8 转换因子偏差均值和中误差

	GPT2	UNB3M	EGNOS	SDSAAS
Bias/ 10^{-3}	0.08	-4.26	0.76	-2.19
RMS/ 10^{-3}	± 1.25	± 4.56	± 1.73	± 3.75

公式(2.48)~(2.49)表明温度值变化 10K 会导致转换因子值变动 0.0058。由图 2.6、图 2.7 和表 2.8 结果可知，与实测气象值的转换因子相比，GPT2、EGNOS 模型转换因子差值均在 0.001 左右，温度差值约 2K，UNB3M 模型与 SDSAAS 模型的转换因子差值均约为 0.004，温度差值约为 7K，表明 GPT2 模型与 EGNOS 模型对上海地区温度变化描述更符合实际情况。

使用转换因子与水汽含量求湿延迟时，降雨天观测的水汽数值会增大 10~30mm，导致 6~18cm 的湿延迟偏差，因此需要根据观测文件中的降雨标志进行剔除，将剔除异常的水汽值转换为湿延迟并作为参考值，评估各对流层模型计算的湿延迟和 Bernese 软件解算的湿延迟精度，结果见图 2.8 与图 2.9。偏差与中误差结果见表 2.9。

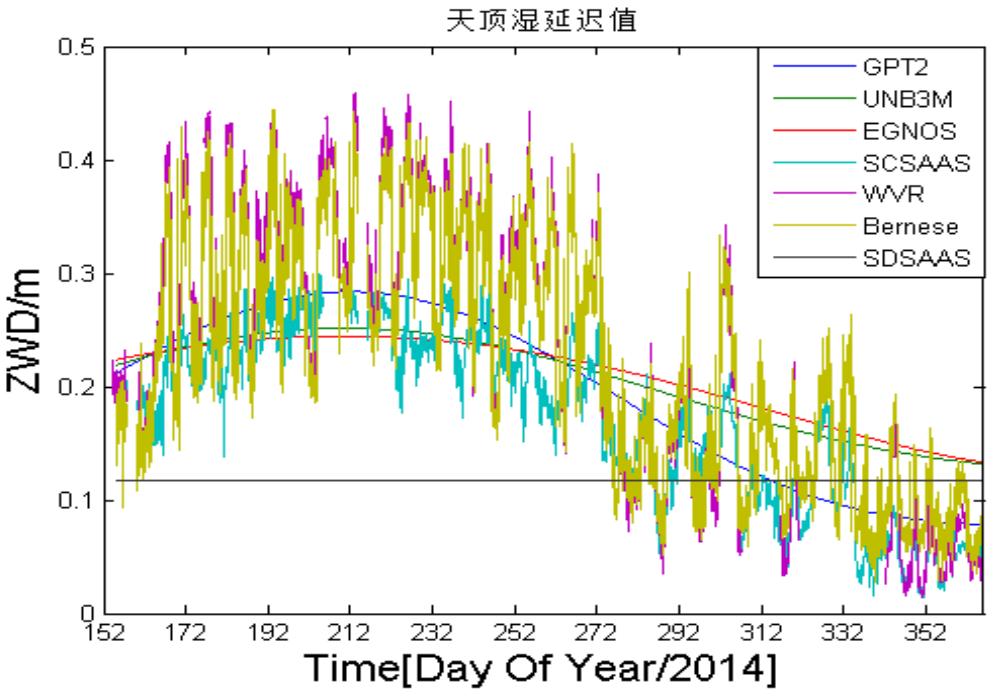


图 2.8 各经验模型计算值和 WVR 观测的天顶湿延迟比较

表 2.9 天顶湿延迟偏差均值与中误差

	GPT2	UNB3M	EGNOS	SCSAAS	Bernese	SDSAAS
Bias/cm	-2.34	-1.83	-1.68	-5.15	0.41	-11.31
RMS/cm	± 7.67	± 9.36	± 9.72	± 8.33	± 2.58	± 16.61

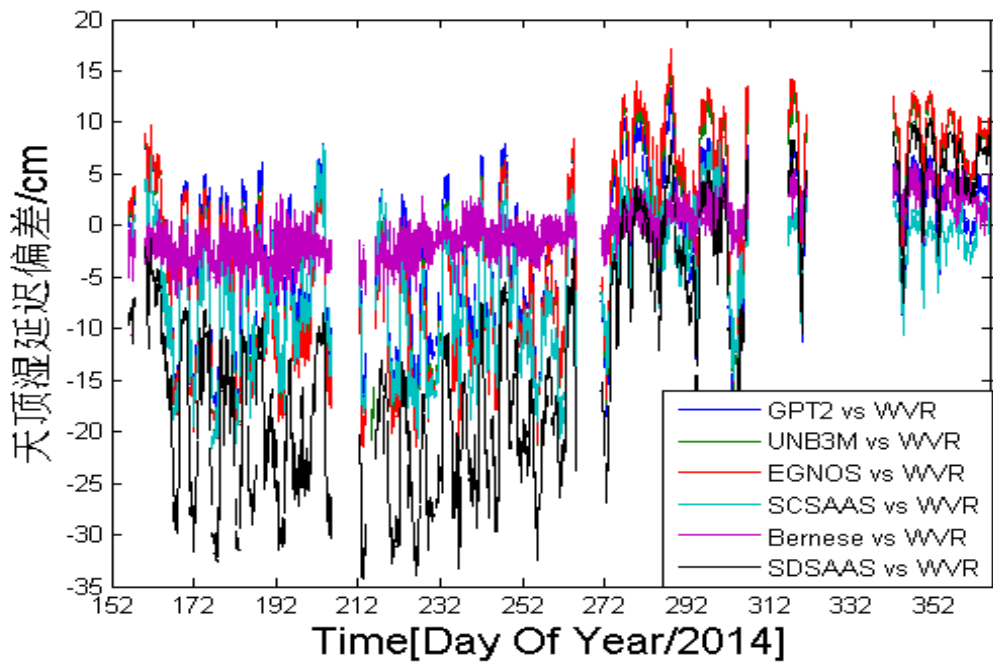


图 2.9 各经验模型计算值与 WVR 观测的天顶湿延迟偏差

由图 2.8 与图 2.9 及表 2.9 结果可知，对流层模型湿延迟改正精度较低；GPT2 模型与 SCSAAS 模型湿延迟改正精度相当，具有明显的季节性变化，比其余对流层模型中改正精度最高的 UNB3M 模型精度提高了 18%；UNB3M 模型与 EGNOS 模型改正精度相当，SDSAAS 模型改正精度最差。

3. 天顶总延迟

ZHD、ZWD 的计算只能反映出模型之间的相对差异，ZTD 代表了模型整体的精度。对流层模型计算的 ZTD 和采用 Bernese 软件解算的 ZTD 结果见图 2.10。

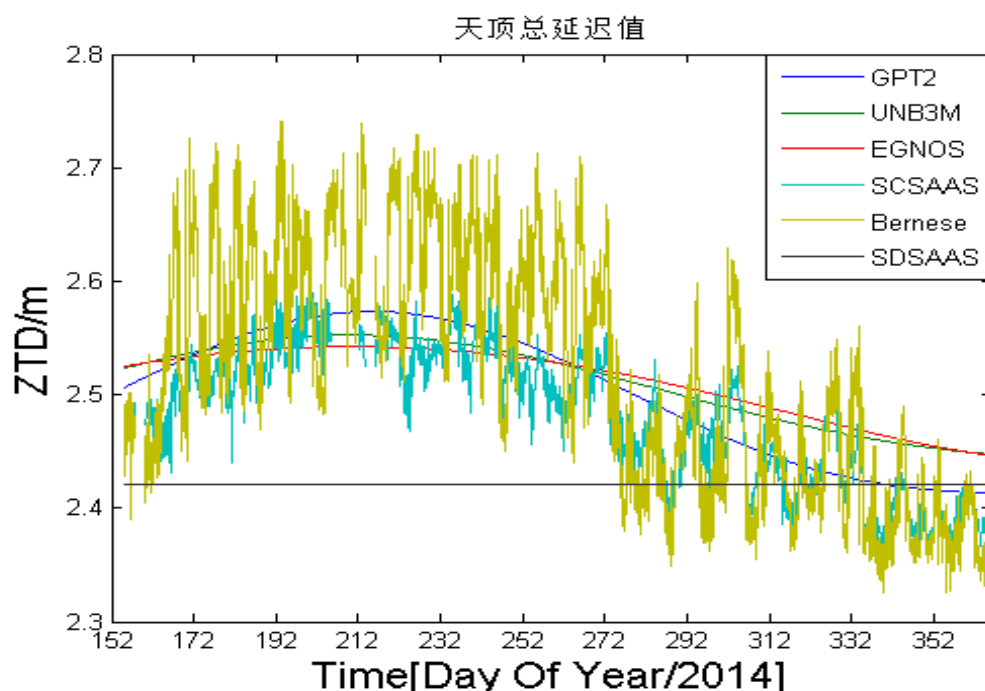


图 2.10 各经验模型计算值以及 Bernese 解算的天顶总延迟比较

WVR 测得的天顶总延迟精度较高但连续性不好，而 Bernese 解算的天顶总延迟精度与 WVR 的天顶总延迟精度相当，且具有更好的连续性，为便于比较分析，本文以 Bernese 软件解算的天顶总延迟为参考，图 2.11 和表 2.10 列出了各对流层模型的偏差均值与中误差。

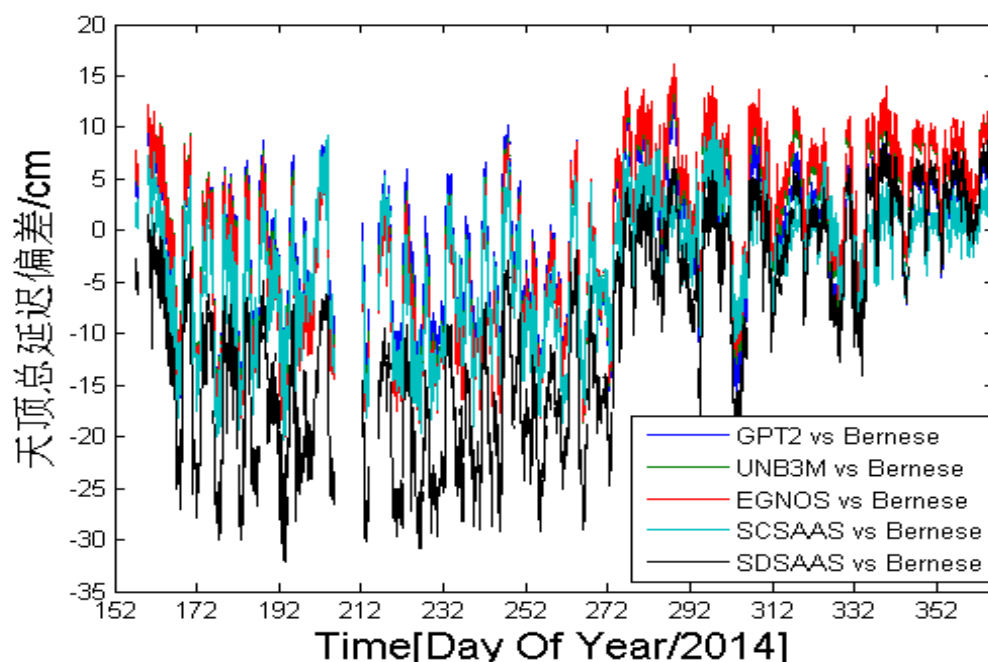


图 2.11 各经验模型计算值与 Bernese 软件解算天顶总延迟偏差

表 2.10 天顶总延迟偏差均值与中误差

	GPT2	UNB3M	EGNOS	SCSAAS	SDSAAS
Bias/cm	-1.26	-0.35	-0.35	-3.33	6.70
RMS/cm	± 6.87	± 7.88	± 8.24	± 6.70	± 13.98

由图 2.10、图 2.11 和表 2.10 的结果可知，天顶总延迟的变化趋势与天顶湿延迟基本一致，表明湿延迟所占比重虽然小，但是影响很大；GPT2 模型与 SCSAAS 模型改正精度相当，比其余对流层模型中改正精度最高的 UNB3M 模型精度提高了 13%；UNB3M 模型改正精度与 EGNOS 模型相当，SDSAAS 模型的延迟改正精度最差；GPT2 模型能更好的描述上海地区天顶总延迟变化特征。

4. 延迟对 GNSS 精密单点定位结果的影响

在精密单点定位过程中，通常是将干延迟固定，湿延迟作为参数与坐标一起解算^[39]。为进一步考察不同对流层模型延迟对定位精度的影响，采用精密单点定位的方法，引入不同模型的湿延迟作为固定值，进行逐历元动态单点定位。数据处理过程中对 Bernese 软件进行了修改，将水汽辐射计与对流层模型的湿延迟作为已知值引入到动态坐标解算过程中。采用 2014 年年积日 223、258、278、305 的数据，测站为静态观测站，其每天的精确坐标通过与 IGS 站双差网解获得。将动态坐标与精确坐标进行比较，统计偏差均值差与重复率，结果见图 2.12 和表 2.11，其中 EST 为软件参数估计得到的动态坐标结果，WVR 表示引入水汽辐射计延迟的定位结果。

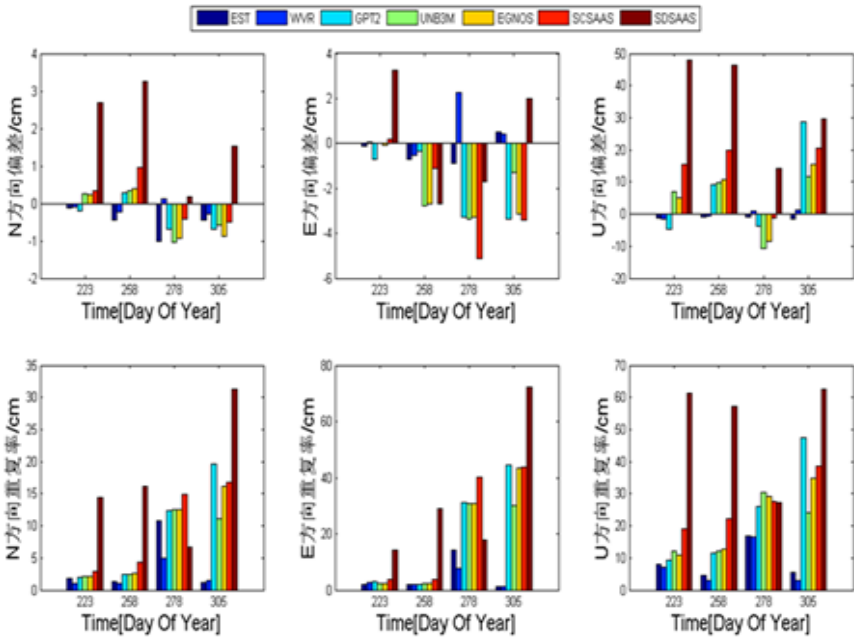


图 2.12 固定不同对流层模型条件下的精密单点定位动态坐标比较

表 2.11 动态坐标偏差均值与中误差

		EST	WVR	GPT2	UNB3M	EGNOS	SCSAAS	SDSAAS
dN/cm	223	-0.12	-0.10	-0.20	0.25	0.22	0.34	2.69
		±1.79	±1.07	±1.89	±2.20	±2.10	±2.88	±14.35
	258	-0.45	-0.22	0.29	0.34	0.38	0.95	3.27
		±1.34	±1.09	±2.41	±2.51	±2.60	±4.36	±16.22
	278	-1.00	0.13	-0.69	-1.0	-0.9	-0.4	0.17
		±10.74	±5.00	±12.41	±12.56	±12.49	±14.82	±6.66
	305	-0.44	-0.27	-0.68	-0.5	-0.8	-0.4	1.54
		±1.19	±1.43	±19.56	±11.06	±16.09	±16.84	±31.32
	223	-0.14	0.05	-0.71	0.03	-0.07	0.19	3.25
		±2.02	±2.80	±3.16	±2.50	±2.40	±3.90	±14.32
dE/cm	258	-0.72	-0.53	-0.34	-2.78	-2.71	-1.14	-2.69
		±2.05	±2.15	±2.12	±2.17	±2.24	±3.70	±28.95
	278	-0.87	2.26	-3.29	-3.3	-3.2	-5.1	-1.72
		±14.26	±7.90	±31.11	±30.80	±30.91	±40.03	±17.67
	305	0.50	0.42	-3.38	-1.2	-3.1	-3.4	1.99
		±1.42	±1.38	±44.58	±30.09	±43.28	±43.68	±72.18
	223	-1.40	-1.49	-4.65	6.92	5.00	15.4	47.9
		±7.94	±7.21	±9.26	±12.09	±10.80	±18.97	±61.29
	258	-0.77	-0.57	9.05	9.90	10.5	19.8	46.4
		±4.68	±3.06	±11.45	±12.24	±12.93	±22.12	±57.29
dU/cm	278	-1.05	0.99	-3.87	-10.57	-8.5	-1.1	14.3
		±16.82	±16.44	±26.11	±30.58	±29.03	±27.47	±27.19
	305	-1.44	1.20	2.87	11.5	15.4	20.3	29.6
		±5.50	±2.87	±47.4	±24.19	±34.84	±38.55	±62.45

由图 2.12 与表 2.11 可知，与 Bernese 软件解算的结果相比，水汽辐射计湿延迟值应用于 GNSS 动态精密单点定位，坐标精度比软件解算的结果提高了 16%。对流层经验模型延迟应用于动态精密单点定位，定位精度得到了降低；在夏季，GPT2、EGNOS、UNB3M 模型和基于实测气象数据的 SAAS 模型对 N、E 方向定位精度相当，在 U 方向上，虽然不能提高结果精度，但 GPT2 模型的定位精度比其余对流层模型中精度最高的 UNB3M 模型提高了 15%。

2.3.5 气象数值模型延迟修正

气象数值模型(Numerical Weather Model, NWM)已经成为空间大地测量技术中提高精度的重要方法,数值天气预报就是在给定的初始条件下,通过数值积分描写大气运动的方程而得到未来某一时刻大气环流和气象要素的分布。这些初始条件可以来自地面气象台站、高空气象台站、气象卫星、船舶等各种气象观测资料,大气动力学和热力学偏微分方程是非线形的,一般不存在解析解,必须将其离散化,通常离散化方法有差分法、谱方法和有限元法。经过数据处理最终形成空间上分层的经纬格网模式,便于用户使用。但大气是一个非线性的耗散系统,依赖于初值确定性预报的时效有限,必须采用一些技术延长时效,而且在一定时间内要进行资料同化^[15]。近年来,随着其空间分辨率与时间分辨率的不断提高,以及数据同化技术的大力发展,气象数值模型资料被广泛的应用于 GPS 和 VLBI 等技术中,用于削弱湿延迟或者总延迟的影响。我们常用的映射函数模型,如 NMF, VMF, GMF 等基本都是在 NWM 数据的基础上建立的^[40]。Nievinski^[41]将气象数值模型资料计算的延迟应用于海上 GPS 动态精密单点定位,证明了其比 SAAS、UNB3M 模型具有更好的改正效果。Hobiger^[42]将格网气象模型应用于定位,与常用的延迟改正方法相比,测站高度方向的重复率提高了 30%。

气象数值模型数据计算对流层天顶延迟一般与射线轨迹法类似,数值预报模式格网点总延迟可以按此点垂直方向上各层数据积分求得,依据章节 2.2 中所述的大气折射理论和积分公式计算格网点天顶延迟,最后通过距离测站位置最近的四个格网点延迟内插计算测站天顶延迟值。

设离散点为 $D(B,L)$, 该处天顶延迟值 D 可以用所在格网的四个端点延迟值 $D_i(B_i, L_i)$, $i=1\sim 4$, 按照双线性内插的方法计算,离散点延迟为:

$$D = (1-c)(1-d) \cdot D_1 + c \cdot (1-d) \cdot D_3 + d \cdot (1-c) \cdot D_2 + c \cdot d \cdot D_4 \quad (2.50)$$

$$c = B - B_1 \quad (2.51)$$

$$d = L - L_1 \quad (2.52)$$

一般测站与格网在不同的高度上,因此计算出格网点延迟之后,还需要根据格网点与测站间的高差,将格网点高度处的延迟换算到测站高度处,具体计算过程 and 实际算例将在第 3 章中给出。

2.4 本章小结

本章简要介绍了有关大气科学基础理论的知识,在初步了解地球大气分层结构、参数及其特性之后,分析大气层的参数对 GNSS 测量的影响,介绍常用的对流层延迟改正方法,包括经验模型改正以及气象科学中的数值预报模型应用于对流层延迟改正。将上海地区水汽辐射计测量值作为参考,对不同对流层延迟改正模型在上海地区的适用性进行了评估分析,并将延迟应用于精密单点定位(PPP),通过对不同模型的实际算例进行比较分析,得出如下结论:

(1) 与 WVR 干延迟结果相比, GPT2 模型干延迟改正精度在四种经验模型中最高,其偏差均值为-0.11cm,中误差为 ± 0.75 cm,与测站实测值差异最小。

(2) 与 WVR 湿延迟结果相比, GPT2 模型湿延迟改正精度在四种经验模型中最高,其偏差均值为-2.34cm,中误差为 ± 7.67 cm,比余下对流层模型中改正精度最高的 UNB3M 模型精度提高了 18%。

(3) 与 Bernese 解算的天顶总延迟相比, GPT2 模型总延迟改正精度在四种经验模型中最高,其偏差均值为-1.26cm,中误差为 ± 6.87 cm,比其余对流层模型中改正精度最高的 UNB3M 模型精度提高了 13%。GPT2 模型能更好的描述上海地区的温度、气压以及对流层延迟情况,有更好的适用性。

(4) 与软件估算结果相比,水汽辐射计延迟值应用于动态精密单点定位,结果精度提高了 16%。模型计算的延迟对于结果精度没有提高,夏季在 N、E 方向改正精度相当,但在 U 方向上, GPT2 模型定位精度比其余对流层模型中精度最高的 UNB3M 模型提高了 15%,这表明 GPT2 模型在上海地区具有更好的适用性。

(5) 水汽辐射计作为一种高精度的探测仪器,既可以获取地面气象参数,也可以对信号传播路径上的综合水汽含量进行测定,通过转换公式可以计算出信号传播路径上的湿延迟量,因此其观测值可应用于 GNSS 定位系统中,作为提高定位精度的一种有效方法。

对流层经验改正模型均与气象参数相关,即使是 GPT2 等依赖于测站位置及年积日的模型,本质上也是依据格全球格网气象数据建立的,这种模型对于全球 GNSS 测站具有较好的精度,但是对于局部地区的测站会有模型误差,对区域 GNSS 测量数据处理而言,不同的对流层模型适用性也不一样。可依据实测气象数据或者数值分析资料的气象资料仿照 EGNOS 等建立局部区域的对流层模型,具有一定的参考实用价值。欧盟一些地区已经根据数值气象模型建立了适用于北美和欧盟地区的对流层延迟改正模型并应用于导航定位。因此,接下来的第 3、4 两章将分别对数值气象预报模型以及局部区域格网气象模型的建立进行介绍。

第 3 章常用气象数值预报模型

数值天气预报就是在给定的初始条件下,通过数值积分描写大气运动方程而得到未来某一时刻大气环流和气象要素的分布。这些初始条件可以来自地面气象台站、高空气象台站、气象卫星、船舶等各种气象观测资料,大气动力学和热力学偏微分方程是非线形的,一般不存在解析解,必须将其离散化,通常离散化方法有差分法、谱方法和有限元法,经过定期数据同化处理最终形成空间上分层的经纬格网模式,便于用户使用。目前,国际上已经有多种数值预报资料可供使用,如欧洲中期天气预报中心(ECMWF, the European Center for Medium-Range Weather Forecasts)提供的分析资料,美国国家环境预报中心(NCEP, the United States National Centers for Environmental Prediction)的再分析资料和预报资料等。北美和欧盟已经将 ECMWF/NCEP 数据应用于导航定位中对流层延迟改正,建立了一些适用于北美和欧盟地区的对流层延迟改正模型^[43]。BalsamoG 等人^[44]2010 年对 ERA-Interim 降雨量资料在美国地区的精度进行了首次评估; Szczypka 等人^[45]2011 年对 ERA-Interim 降雨量、温度和湿度资料在法国地区的适用性进行了分析验证,发现总体精度较好,但在山区和近海等地区精度有待提高。陈钦明^[46]等人研究发现,相对于 GPS 实测 ZTD,用 ECMWF2.5° 分辨率资料计算出 ZTD 的 bias 和 RMS 分别为-1.0cm 和 2.7cm; 马志泉^[47]等人 2012 年使用 ECMWF 资料在中国地区计算的 ZTD 的总体平均偏差和中误差分别约为-1cm 和 2cm。因 ECMWF 归档资料同化时间长、数据资料来源丰富、产品形式多样、空间与时间分辨率高,本文选择以欧洲中期天气预报中心为例,对其数据使用方法进行简单介绍。

3.1 简介

欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF),是由 34 个国家支持的政府间的独立组织,其前身是欧洲科技合作计划(COST (European Co-operation in Science and Technology Project),成立于 1975 年,目标是发展中期天气预测的数值方法、为成员国提供预测服务、为提高预测水平而进行科学技术研究、积累气象数据等,并据此需求建立资料同化和预测系统(Integrated Forecasting System ,IFS),与世界气象组织(WMO)、欧洲

气象卫星开发组织(EUMETSAT)、非洲气象应用发展中心(ACMAD)都有业务工作上的协议,同时还与世界各国气象预报机构在天气预报领域有广泛的联系。该中心于 1979 年 6 月首次实现了实时的短期天气预报。自 1979 年 8 月 1 日起 ECMWF 开始发布业务性的中期天气预报,主要提供 10 天的中期数值预报产品,预报模式包括谱模式、格网模式等,各成员国通过专用的区域气象数据通信网络得到这些产品后做出各自的中期预报。

3.1.1 ECMWF 资料分类

ECMWF 数据按产品分类为实时数据(预报产品)与存档数据,实时数据与部分存档数据需要在 ECMWF 的官网订购并付费下载,但是存档数据中的公开数据集资料是对外免费开放的,我们可以下载使用。公开数据集的数据资料分为五类^[48]: Global Reanalysis、Observation Feedback、Multi-model、Atmospheric composition、Miscellaneous。其中,Global Reanalysis 资料类型依据归档的时间可分为六类: ERA-20C (Jan 1900 - Dec 2010)、ERA-Interim (Jan 1979 -present)、ERA-Interim/LAND (Jan 1979-Dec 2010)、ERA-20CM (Jan 1900-Dec 2010)、ERA-40 (Sep 1957-Aug 2002)、ERA-15 (Jan 1979 -Dec 1993)。这些数据资料是利用 IFS 系统对多年的观测数据资料进行处理,包括航海观测(Marine observations)、飞机观测(Aircraft observations)、高空探测(upper air soundings)以及卫星观测在内的观测资料,将这些不同来源,不同误差信息,不同时空分辨率的观测资料融合到数值动力模式中,依据严格的数学理论,实现数据同化。可提供最大平面分辨率 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 、最小平面分辨率 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ 、垂直方向高度 80km 左右的分层气象资料,是 ECMWF 研制的最新的全球大气再分析产品。

ECMWF 通常以 GRIB 的格式将数据资料集合在气象资料归档与检索系统(Meteorological Archival and Retrieval System, MARS)中,这一资源库用来存储 ECMWF 的气象数据和研究数据,在 Web MARS 和数据服务器上提供了数据格式转换的功能,可以将预下载的数据文件转换为 NetCDF(Network Common Data Format)格式,扩展了数据的适用范围,用户可根据实际需求自行选择。

3.1.2 数据获取

在章节 3.1.1 中已经简单介绍了 ECMWF 的数据类型,下面介绍数据获取的方式、种类以及下载过程中需要注意的事项。

1. 下载方法

(1) 登陆地址: <http://apps.ecmwf.int/datasets/>,可直接进入 ECMWF 的数据下载点,在右上角注册成为 ECMWF 的用户,即可免费下载部分归档气象数据。

(2) 选择 ERA-Interim 入口，在界面左侧上方显示分层数据的多种类型，我们通常使用地面数据(surface)、模式面数据(model level)、等压面数据(press level)。每种类型的参数种类有所差异，但均能够提供一天四个 UTC 时刻的参数值。

(3) 选定分层数据的类别，在主界面依次输入起止时间、参数、参数类型、UTC 时间、存储格式、数据格网区域范围、格网平面分辨率。

2. 注意事项:

(1) 下载的文件大小不要超过 2G，否则系统提示错误导致无法下载。

(2) 部分分层数据会有分析资料与预报资料的下载选项，在 step list 中显示出“0”，“3”，“6”，“9”，“12”，其中选择“0”表示分析数据，其余均表示预报数据，这部分资料需付费订购。

3.2 NetCDF 格式说明

NetCDF（统称为 NC）中文译法为“网络通用数据格式”，它和 zip、jpeg、bmp 等文件格式类似，都是一种文件格式的标准。NC 文件初始目的是用于存储气象科学中的数据，现在已经成为许多数据采集软件生成文件的格式。从数学上来说，NC 存储的数据就是一个多自变量的单值函数。用公式来说就是 $f(x,y,z,...)=value$ ，函数的自变量 x,y,z 等在 NC 中叫做维(dimension)或坐标轴(axis)，函数值 value 在 NC 中叫做变量(Variables)。自变量和函数值在物理学上的一些性质，比如计量单位(量纲)、物理学名称等在 NC 中就叫做属性(Attributes)。一个 NC 文件的结构包括 3 个对象^[49]：

1. 变量(Variables)

变量对应着真实的物理数据。它是一个以时间为自变量（或者说自变量个数为一维）的单值函数。再比如在气象学中要作一个气压图，就是“东经 x 度，北纬 y 度的点的大气压值为多少帕”，这是一个二维单值函数，两种维度分别是指经度和纬度，函数值为大气压。由此可知，NC 文件中的变量就是一个 N 维数组，数组的维数就是实际问题中的自变量个数，数组的值就是观测得到的物理值。变量（数组值）在 NC 中的存储类型有六种：ASCII 字符(char)，字节(byte)，短整型(short)，整型(int16、int32)，浮点(float)，双精度(double)。

2. 维(dimension)

一个维对应着函数中的某个自变量，或者说函数图象中的一个坐标轴，在线性代数中就是一个 N 维向量的一个分量（这也是维这个名称的由来）。在 NC 文件中，一个维对应一个名字和范围（或者说长度，也就是数学上所说的定义域，

可以是离散的点集合或者连续的区间), 维的长度基本都是有限的, 最多只能有一个具有无限长度的维。

3. 属性(Attribute)

属性对变量值和维的具体物理含义的注释或者说解释。因为变量和维在 NC 中都只是无量纲的数字, 要想让人们明白这些数字的具体含义, 就需要靠属性来定义。在 NC 文件中, 属性由一个属性名和一个属性值(一般为字符串)组成。比如, 在某个 NC 文件中有 `temperature:units = "Celsius"`; `temperature` 是一个已经定义好的变量(Variables), 即温度, 冒号后面的 `units` 就是属性名, 表示物理单位, “=” 后面的就是 `units` 这个属性的值, 为“Celsius”, 即摄氏度, 整个一行代码的意思就是温度这个物理量的单位为 Celsius。

简单来说, NC 文件维度信息, 通常依次是经度、纬度、层数、时间四种参数; 变量具体信息, 通常包含变量的值、维度、属性, 其中变量属性用于说明变量的计量单位、变量全名、偏移量与缩放因子。文件中的数据以经纬度划分的格网点为存储单位, 经度数值逐行增大, 表明经向是由西向东递增, 纬度数值逐行减小, 表明是由北向南递减, 数据起点是左上角。并且列在前, 行在后, 因此计算时要注意行列的读取顺序, 如维度信息显示 `Nj*Ni`, 代表有 `Nj` 列, `Ni` 行。高度方向从最顶层开始向下将层数依次编号为 1, 2, 3..., 每个格网点所在高度并不相同, 由此可知格网点上的气象数据一般具有四个维度, 包括经度、纬度、层数、时间。

3.3 数据解码与计算

为了便于气象数据的传输, 降低网络资源损耗并节省存储空间, NC 文件中数据存储方式为二进制, 无法使用文本编辑器直接打开查看数据, 因此在进行计算使用之前, 需要解码的工作, 在气象学领域中, 一般使用 Grads 软件进行气象数据的读取与解码, ECMWF 提供了 GRIB-API 工具包用于在 Linux 系统中实现解码工作, 熟悉 Windows 操作系统的用户也可在 MATLAB^{[50][51]}与 ArcGIS 平台下进行相应的解码工作。解码完成之后, 用户可以直观地观察到数据值, 其类型一般为 `double`, 有些软件在解码过程中没有还原参数的真实值, 其存储格式会显示为 `int`, 此时需要根据解码出的文件中提供的比例因子与偏移量进行换算得到真实值^{[52][53][54]}。本文使用的是 ERA-Interim (Jan 1979-present)的 NC 格式 37 层等压面(press level)资料, 平面分辨为 0.125° 与 0.25° , 高度范围为 0.01km-47km, 是 ECMWF 研制的最新全球大气再分析产品, 所用气象参数为每个等压面每天 4 个时刻的位势、温度、气压、相对湿度、比湿。根据章节 3.12 中的步骤下载所

需区域范围内的 NC 格式数据, 在 MATLAB 平台上实现数据的读取与解码, 并根据公式(2.13)~(2.19)用积分的方法计算对流层天顶延迟。

1. 数据的读取

最新版本 MATLAB 的工具箱中有处理 NC 格式文件的函数, 不同的版本调用函数形式有所不同, 若版本较低不具备处理 NC 文件的函数, 用户可登陆 <http://mexcdf.sourceforge.net/> 下载处理 NC 文件的工具包。本文中的软件版本是 MATLABr2011b, 使用自带的 `ncdisp` 函数可以显示文件的数据信息, 包括数据类型 (一般为 INT)、维度、变量、时间、属性 (包括物理单位、偏移量、比例因子) 等, 使用 `ncread` 函数可将所需变量值读取出来。在数据读取的过程中需要注意:

(1) 查看数据类型用于判断变量是否为真值。通过查看本文中所用 NC 数据的信息, 可知变量类型为浮点型, 表明此时读取出的数据已经使用比例因子与转换因子进行了换算, 因此得到的结果已经是真实值, 不需要再进行转换, 否则会造成所用值与真实值不符的情况而出错。

(2) 层数与 `time` 的数据类型是 `int32`, 在 MATLAB 中不能直接与其余的变量进行科学运算, 需要将他们转换为 `double` 类型。

2. 数据计算

本文中计算对流层延迟的方法分为两种: 对流层经验模型与气象数值模型延迟改正。第一种方法中选择对流层模型为应用最广泛的 SAAS 模型, 结合实测的地面气象参数, 可以得到天顶方向延迟量; 第二种方法使用 ECMWF 的 37 层等压面资料, 分别对 0.125° 与 0.25° 两种分辨率数据计算天顶方向的延迟量。两种方法在前面的章节中均已作了简单介绍, 由积分公式可知, 要求得对流层积分延迟就需要知道信号传播路径上各处的大气折射系数, 大气折射系数是温度、气压、湿度的函数, 因此需要知道传播路径各处的气象参数, ECMWF 等压面资料可提供不同高度处气象参数, 在使用此数据计算时, 需要注意的问题有:

(1) 统一时间单位: NC 数据以格里高利历 (也称公历) 作为时间单位, 起算时间是 1900 年 1 月 1 日 00 时, 为便于绘图与结果统计, 要将时间转换为常用的时间单位, 如儒略日或者 UTC 时间^[55]。

(2) 统一高度单位: 在流体静力学平衡的条件下, 为了使数学表达形式简洁以及便于方程式解算, 气象学中以位势高来表示高度的概念, 大地测量学的框架中则使用大地高来表示高度, 是一种几何高度。气象系统与大地参考系统高度基准不一致, 因此, 在使用 NC 文件中的高度数据之前, 必须对这些不同系统间的高度做一个统一的转化^[56]。位势高和几何高意义完全不同, 前者是能量的一种单位, 后者仅为高度单位。两者在数学上虽有差别, 但数值差别很小, 可忽略不

计, 因此可将位势米近似等效为几何米。位势高度也称为动态高, 其定义公式为:

$$\zeta = \zeta_0 + \frac{\Phi}{g_0} \quad (3.1)$$

式中, ζ 为位势高度(单位是位势米), ζ_0 为位势高度的初始值, Φ 为位势(m^2/s^2), 是指单位质量的物体从海平面到达某高度处克服重力所做的功。 g_0 是由世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)定义的一个常值 9.80665m/s^2 , ECMWF 规定在任意纬度与高度处, 位势除以常数 g_0 即可得到以米为单位的位势高度^[57], 故上式可简化为 $\zeta = \Phi / g_0$ 。正高与位势的关系:

$$H_0 = \frac{\Phi}{\bar{g}(\theta, \lambda, H_0)} = \frac{\zeta \cdot g_0}{\bar{g}(\theta, \lambda, H_0)} \quad (3.2)$$

式中, H_0 为大地测量学中的正高(m), $\bar{g}(\theta, \lambda, H_0)$ 表示物体所在位置与大地水准面之间沿铅垂线方向的平均重力加速度。重力加速度随着纬度与高度的变化而变化, 当物体所处高度远小于地球半径时, 其所受重力变化可忽略不计, 此外, Nievinsk^[58]通过比较标准重力、EGM96 推求的真实重力等不同的重力加速度计算公式, 应用于上式, 结果证明, 在 35km 高度处与位势高产生的不符值达到 1m, 不同的重力计算表达式对于总延迟的结果影响甚微, 因此本文中正高与位势高在数值上视为相等。测站与 ECMWF 的格网点一般不在同一高度上, 导致气象参数或者天顶延迟值差异, 尤其是在高山地区差异更大, 因此通过格网点的延迟计算测站位置延迟时, 要进行高程方向上的改正。ECMWF 获取的是格网点的位势高, 测站获取的是椭球高, 本文中将高度基准统一为椭球高, 并根据格网点与测站的高差进行延迟改正。椭球高计算公式:

$$H = H_0 + \bar{N} \quad (3.3)$$

式中, $\bar{N}$ 为大地水准面差距(m), 只要获取了相应位置处的大地水准面差距值, 结合公式(3.3)即可求得任意经纬度处的海拔高。本文中采用 GPT 程序中的方法计算任意位置处的 $\bar{N}$ 值: 根据 GPT^[59]模型中的椭球高与正高转换方法在 MATLAB 中实现程序的编写, 输入年积日与测站经纬度即可用九阶球谐函数推求全球任意位置处的大地水准面差距, 用户可登陆维也纳理工大学网站下载 GPT 模型参考程序(<http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/SOURCE/>)。

(3) 计算等压面间折射率: 等压面数据共分为 37 层, 从最顶层至最底层依次编号为 1, 2, 3...37, 等压面上气压值处处相等, 但是同一等压面上格网点位势高度不相同, 其形式如图 3.1 所示, 两等压面间形成大气层, 而气象参数是针对等压面而言的, 直接使用等压面的气象数据计算大气层折射率并积分计算延迟,

会导致结果与真值产生 10~20cm 的差异，经过比较发现，对相邻两等压面的气象参数取均值，用于计算两等压面间大气层的折射率，可有效解决这一问题。

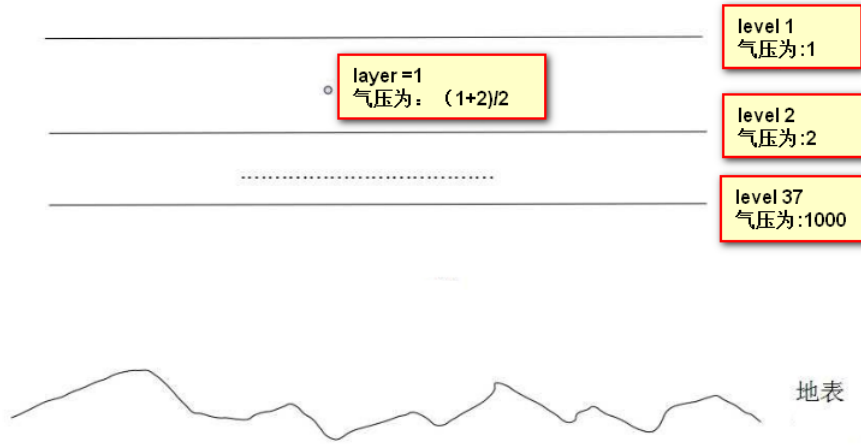


图 3.1 等压面

(4) 顶层高度以上大气延迟计算：等压面数据顶层高度一般为 47km 左右，顶层以上不能获取气象数据，无法积分计算延迟，可将第 37 层的气象值输入 SAAS 模型中，并将结果与积分延迟相加得到任意层高度处的天顶延迟。

根据问题(1)~(4)的处理方法，计算每层的对流层延迟。结果见图 3.2。

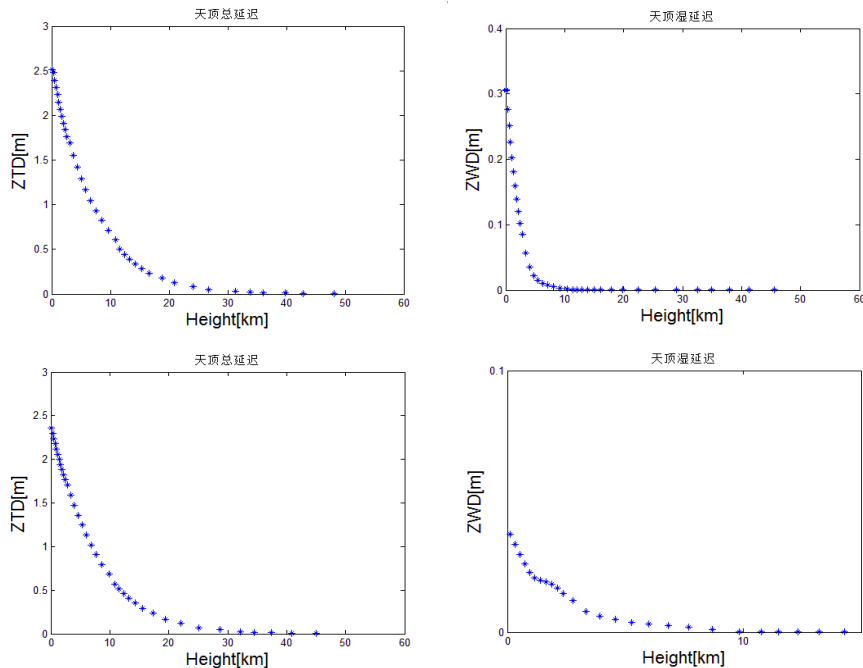


图 3.2 格网点对流层天顶延迟随高度变化图

由图 3.2 可知,对流层天顶延迟随着高度呈现高次多项式或者指数形式变化,据此进行曲线拟合,获取拟合公式的系数,并将距离测站最近的四个格网点的天顶延迟改正到测站同一高度处,使用反距离加权的方法求出测站天顶延迟。本文分别使用指数与多项式两种拟合函数,结合 ECMWF0.125° 与 0.25° 分辨率资料计算出了测站天顶延迟。以 WVR 实测天顶延迟作为参考,对两种函数拟合系数后改正的延迟结果进行了比较,并将较好的延迟结果应用于动态精密单点定位,评估了 ECMWF 资料在上海地区的适用性。

3.4ECMWF 数据适用性分析

3.4.1 对流层延迟比较

1. 指数函数拟合测站延迟

通过指数函数法拟合了 ECMWF0.125° 与 0.25° 资料天顶延迟随高度变化的系数,并求出测站的 ZHD、ZWD、ZTD,以 WVR 观测值为参考,与实测气象数据的 SAAS 模型延迟结果一起进行了比较。天顶延迟及差值结果见图 3.3,平均偏差与中误差结果见表 3.1。

表 3.1.ECMWF、SAAS 模型天顶延迟平均偏差和中误差统计

		Δ ZHD	Δ ZWD	Δ ZTD
0.125°×0.125°ECMWF	Bias/cm	0.75	0.14	0.60
	RMS/cm	2.30	1.39	2.64
	Max/cm	5.63	4.95	7.98
	Min/cm	6.39	4.22	-8.05
0.25°×0.25°ECMWF	Bias/cm	0.04	-0.14	-0.10
	RMS/cm	2.95	1.57	3.58
	Max/cm	5.59	8.42	11.68
	Min/cm	-8.95	-6.94	-10.64
SCSAAS	Bias/cm	0.21	-5.06	-4.85
	RMS/cm	0.31	8.30	8.23
	Max/cm	1.83	8.47	8.72
	Min/cm	-0.87	-22.95	-22.71

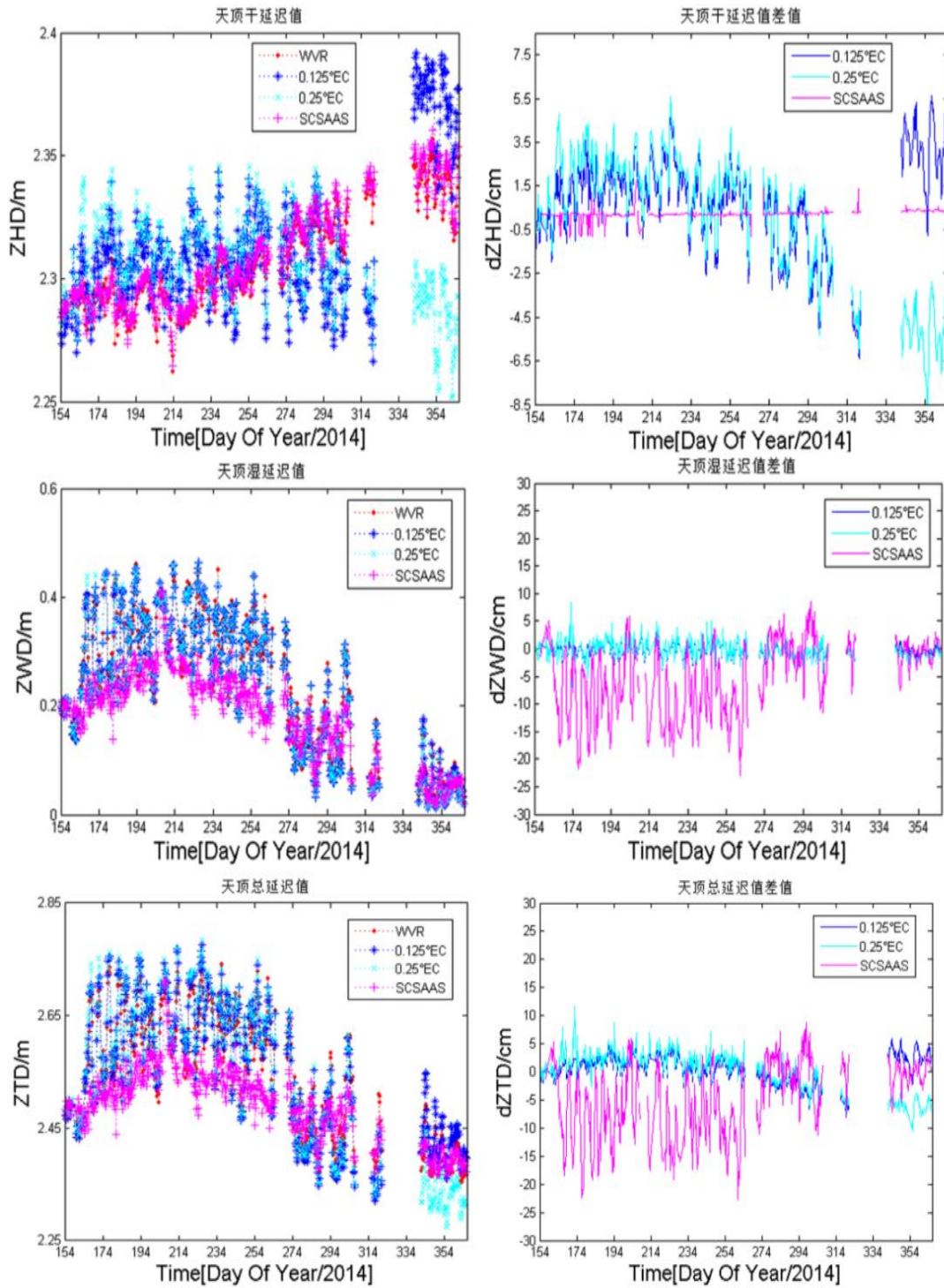


图 3.3 ECMWF、SAAS 模型天顶延迟及与 WVR 的偏差

2. 高次多项式函数拟合测站延迟

经过比对分析, 用 5 次多项式拟合 ECMWF0.125° 与 0.25° 资料的效果最好。以 WVR 观测值为参考, 将求出的测站天顶延迟、实测气象数据 SAAS 模型

计算的延迟结果比较分析。天顶延迟及差值结果见图 3.4，平均偏差与中误差结果见表 3.2。

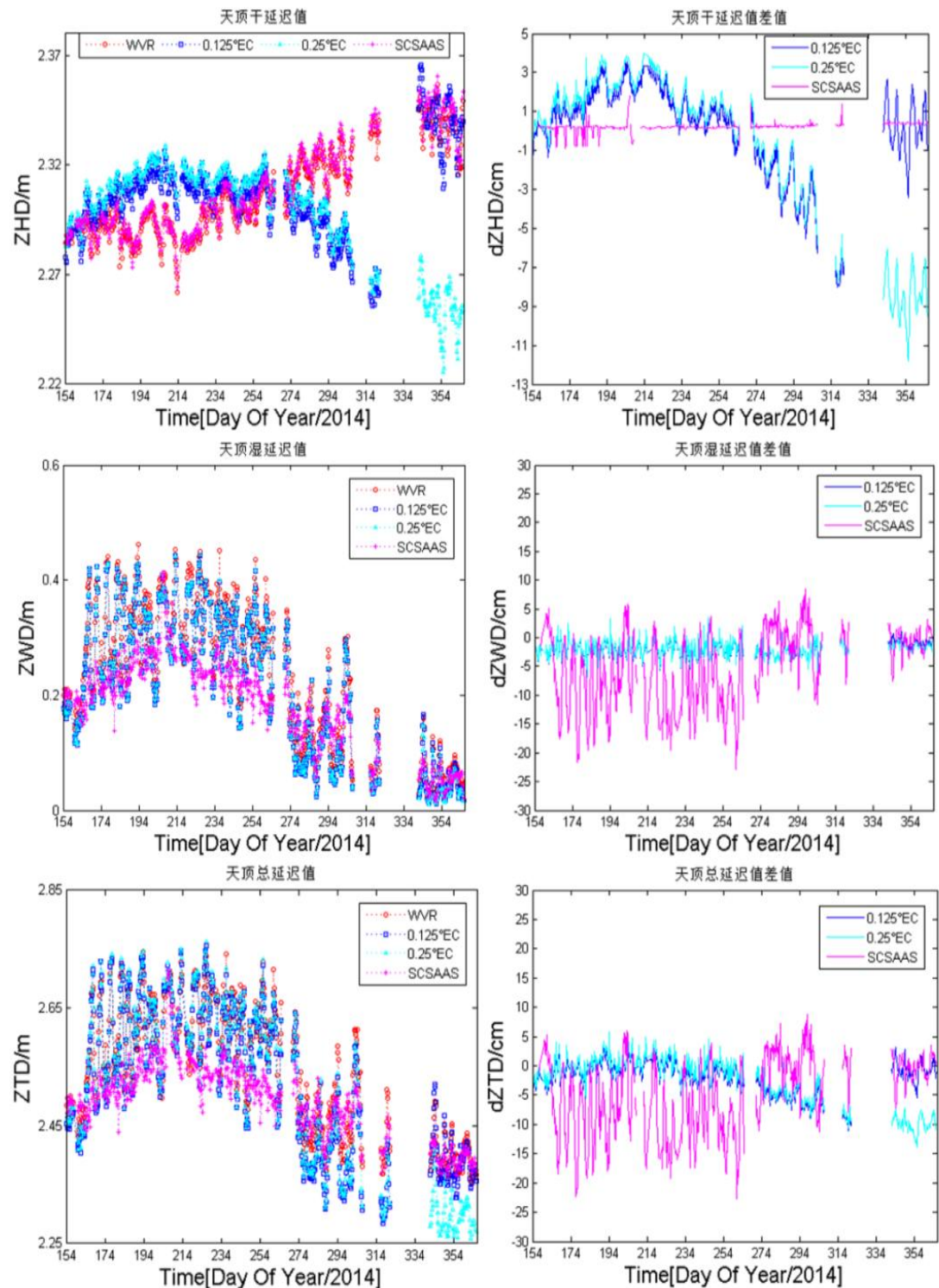


图 3.4 ECMWF、SAAS 模型天顶延迟及与 WVR 的偏差

表 3.2 ECMWF、对流层模型天顶延迟平均偏差和中误差统计

		ΔZHD	ΔZWD	ΔZTD
0.125°×0.125°ECMWF	Bias/cm	0.05	-1.96	-1.91
	RMS/cm	2.34	2.41	3.43
	Max/cm	3.75	3.46	5.06
	Min/cm	-8.04	-6.82	-11.10
0.25°×0.25°ECMWF	Bias/cm	-0.78	-1.97	-2.75
	RMS/cm	3.99	2.49	4.91
	Max/cm	3.98	3.56	5.73
	Min/cm	-11.81	-6.82	-13.98
SCSAAS	Bias/cm	0.21	-5.06	-4.85
	RMS/cm	0.31	8.30	8.23
	Max/cm	1.83	8.47	8.72
	Min/cm	-0.87	-22.95	-22.71

由图 3.3、图 3.4、表 3.1、表 3.2 结果可知,以 WVR 实测值为参考,对 ECMWF 相同分辨率的数据拟合时,指数函数拟合测站延迟结果的精度优于多项式函数拟合的结果,湿延迟中误差精度提高约 1cm;两种拟合方法得到的结果中,0.125°分辨率资料天顶延迟结果均优于 0.25°资料的结果,天顶总延迟精度提高约 1cm,湿延迟精度相当,说明上海地区水汽空间分辨率不高于 0.125°;ECMWF 两种分辨率资料分层积分延迟的精度高于实测气象数据的 SAAS 模型,指数函数法拟合 0.125°天顶湿延迟比实测气象数据 SAAS 模型的湿延迟精度提高了约 6cm。

3.4.2 延迟对 GNSS 精密定位的影响

为进一步考察不同分辨率的 ECMWF 资料在上海地区的适用性,采用精密单点定位的方法,将计算出的延迟值引入到 Bernese 软件中作为已知值固定,进行逐历元动态单点定位。由章节 3.4.1 可知,指数函数拟合测站延迟结果优于多项式函数,因此将指数函数拟合的延迟结果应用于动态精密单点定位,数据处理过程中对 Bernese 软件进行了修改,选用 NEILL 模型作为映射函数并固定对流层天顶干延迟,然后将每天 0、6、12、18 时刻的水汽辐射计、实测气象数据、气象数值模型计算的天顶湿延迟作为已知值引入到动态坐标解算过程中。采用 2014 年年积日为 223、258、278、305 的数据结果进行分析。将解算的动态坐标与测站精确坐标进行比较,统计偏差与重复率,结果见图 3.5 和表 3.3,其中 EST

为软件解算的动态坐标结果，WVR 表示水汽辐射计延迟引入的定位结果， 0.125° EC 与 0.25° EC 分别表示两种分辨率 ECMWF 资料的延迟引入定位的结果，SC 表示实测气象数据 SAAS 模型延迟引入定位的结果。

由图 3.5 与表 3.3 可知，与软件解算的结果相比，水汽辐射计每天 4 个时刻的湿延迟值应用于动态精密单点定位，其精度优于 ECMWF 资料，平均提高 26%，在 N、E 方向上相差不大，在 U 方向上中误差平均提高 3.87cm；实测气象数据的 SAAS 模型湿延迟应用于动态精密单点定位，精度得到了降低， 0.125° 资料比 0.25° 资料定位精度平均提高 6%，均优于实测 SAAS 模型，在 U 方向上，ECMWF 资料的定位精度比实测 SAAS 模型平均提高 53%。综上可知 ECMWF 资料在上海地区有较好的适用性，可用于上海地区 GNSS 导航定位中的高精度对流层延迟改正。

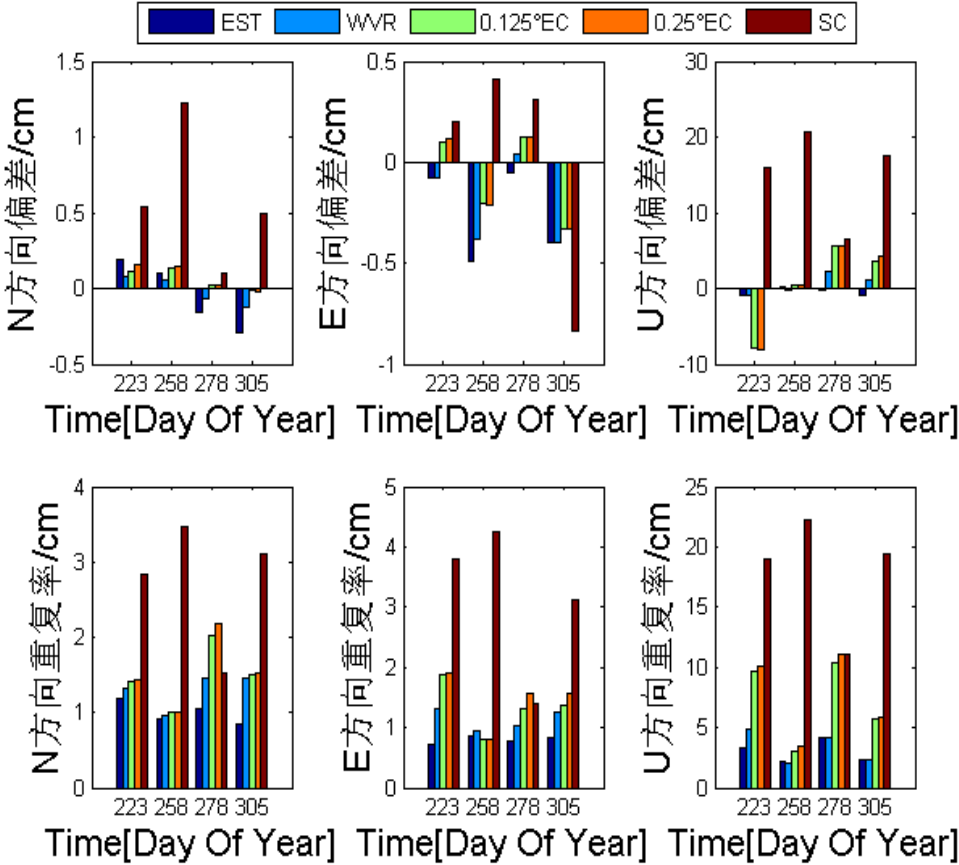


图 3.5 固定不同延迟条件下的动态精密单点定位坐标比较

表 3.3 动态坐标偏差均值与中误差

		EST/cm	WVR/cm	0.125 °C/cm	0.25 °C/cm	SCSAAS/cm
dN	223	0.20±1.20	0.07±1.32	0.11±1.42	0.15±1.44	0.54±2.83
	258	0.10±0.91	-0.05±0.95	0.13±1.00	0.14±0.99	1.2±3.46
	278	-0.16±1.04	-0.06±1.47	0.02±2.03	0.30±2.18	0.10±1.53
	305	-0.30±0.85	-0.13±1.45	-0.01±1.51	-0.02±1.51	0.50±3.11
dE	223	-0.08±0.71	-0.08±1.31	0.10±1.87	0.11±1.92	0.20±3.80
	258	-0.49±0.87	-0.38±0.95	-0.20±0.80	-0.21±0.80	0.41±4.25
	278	-0.05±0.77	0.04±1.03	0.12±1.32	0.12±1.58	0.31±1.38
	305	-0.40±0.82	-0.40±1.25	-0.33±1.38	-0.33±1.56	16.06±3.13
dU	223	-0.94±3.38	-0.93±4.86	-7.78±9.74	-8.17±10.06	15.42±19.02
	258	0.31±2.22	-0.25±2.08	0.36±3.02	0.40±3.41	20.73±22.21
	278	-0.32±4.17	2.31±4.11	5.61±10.41	5.63±11.10	6.44±11.12
	305	-0.96±2.31	1.20±2.32	3.56±5.66	4.33±5.87	17.45±19.45

3.5 本章小结

本章主要对气象数值模型 ECMWF 进行了简单介绍, 对其通用的数据格式使用方法进行了总结, 并给出实例运算。通过对不同分辨率的 ECMWF 实际算例进行比较分析, 得出如下结论:

(1) 与 WVR 实测天顶路径延迟相比, 分辨率为 0.125 °的 ECMWF 资料计算 ZTD 的 bias 和 RMS 分别为 0.60cm 和 2.64cm, 分辨率为 0.25 °时 ZTD 的 bias 与 RMS 分别为 -0.10cm 和 3.58cm, 优于实测气象数据 ZTD 的 bias 和 RMS, 结果分别为 -4.85cm 和 8.23cm。

(2) 以 WVR 实测延迟值为参考, 相同分辨率的 ECMWF 的数据使用指数函数拟合延迟结果更好, 湿延迟中误差精度比多项式函数拟合结果提高约 1cm; 两种拟合函数得到的结果中, 0.125 °分辨率资料的天顶延迟结果均优于 0.25 °资料的计算结果, 天顶总延迟精度提高约 1cm, 湿延迟精度相当, 说明上海地区水汽空间分辨率不高于 0.125 °。

(3) 以 WVR 测定的 ZWD 为参考, ECMWF 两种分辨率资料拟合延迟精度均高于实测气象数据的 SAAS 模型, 指数函数法计算 ECMWF 0.125 °等压面资料 ZWD 的 bias 和 RMS 分别为 0.14cm 和 1.39cm, 比实测气象数据 SAAS 模型的湿

延迟精度提高了约 6cm。

(4) 实测气象数据的 SAAS 模型湿延迟应用于动态精密单点定位，精度得到了降低，ECMWF 0.125 °资料比 0.25 °资料定位精度平均提高 6%，均优于实测气象数据 SAAS 模型；在 U 方向上，ECMWF 资料的定位精度比实测 SAAS 模型精度平均提高 53%。表明 ECMWF 资料在上海地区有较好的适用性，可用于上海地区 GNSS 导航定位中高精度对流层延迟改正。

第 4 章区域格网气象模型建立

对流层的折射与大气压力、温度和湿度变化密切相关，对流层模型的建立也依赖于地面气象数据，国外已经有许多对流层改正模型是在气象元素的基础上建立起来的，并且已经应用于导航定位中。目前可通过多种方法获取气象数值资料，利用气象观测的数值预报资料可用来计算对流层改正量，但是实测的气象数据与经验模型数据对于改正模型的影响是不同的。本文在多年实测气象数据的基础上建立了区域格网气象模型，并且对其精度进行分析。

4.1 陆态网气象数据

中国大陆构造环境监测网络(简称陆态网络)以卫星导航定位系统（GNSS）观测为主，辅以甚长基线干涉测量（VLBI）和卫激光测距（SLR）等空间技术，并结合精密重力和水准测量等多种技术手段，建成了由 260 个连续观测和 2000 个不定期观测站点构成的、覆盖中国大陆的高精度、高时空分辨率和自主研发数据处理系统的观测网络。主要用于监测中国大陆地壳运动、重力场形态及变化、大气圈对流层水汽含量变化及电离层离子浓度的变化，为研究地壳运动的时空变化规律、构造变形的三维精细特征、现代大地测量基准系统的建立和维持、汛期暴雨的大尺度水汽输送模型等科学问题提供基础资料和产品。本文获取了 260 个陆态网测站 2011 年~2014 年实测气象数据，包括温度、气压、相对湿度。通过对多年的数据进行统计分析，建立中国地区格网气象模型。陆态网测站分布见图 4.1^[59]。

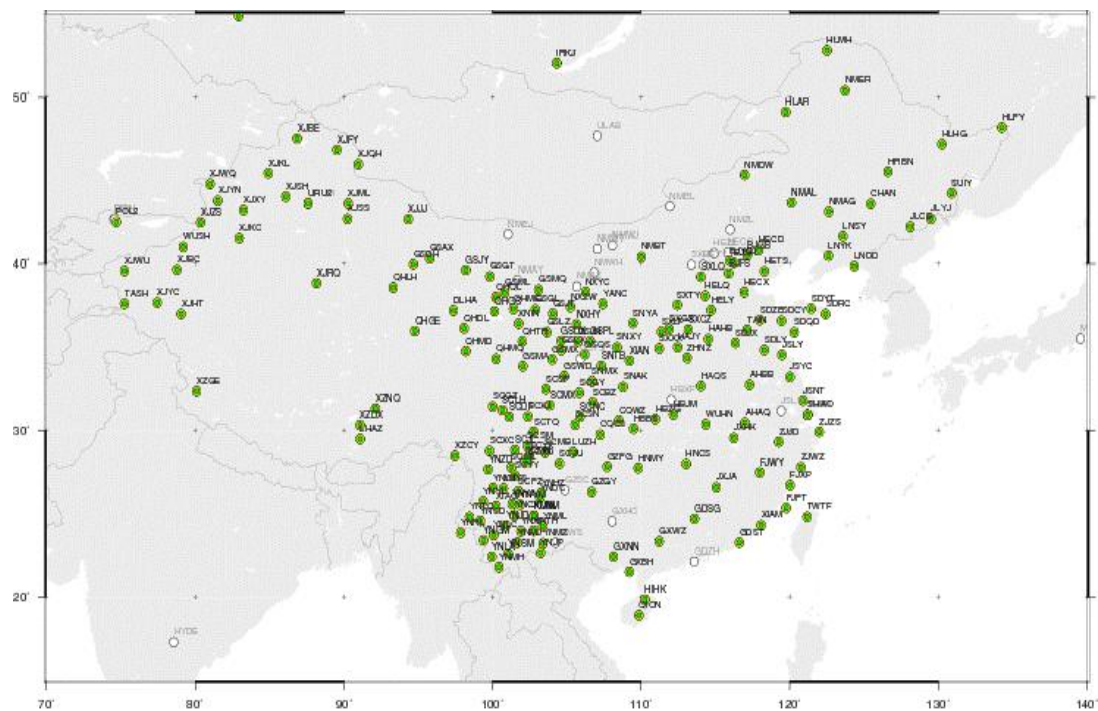


图 4.1 中区域陆态网测站分布图

4.2 中国区域格网气象模型的建立

利用实测气象资料建立的区域大气模型，具有与当地实际大气状况相符合的特点，可极大的削弱因标准气象参数误差或模型局部区域不适用性导致的精度降低的现象。本文使用陆态网多年的实测气象数据，分别对气压，温度，湿度参数进行拟合，并依据测站分布选择合适的网格间隔，建立了适用于中国区域格网气象模型。主要步骤包括：

- (1)对多年气象数据时间序列进行分析，观察其变化规律，若具有周期性的变化，可选取合适的函数进行拟合。
- (2)将部分陆态网测站的数据作为拟合数据，预留一部分进行检核。依据最小二乘平差原理，对测站多年的气压、温度、相对湿度参数进行系数拟合，求取最优系数，并依据测站分布划分网格。
- (3)根据拟合出的测站点参数的系数，使用反距离加权法内插出每个格网点上参数对应的系数，建立格网气象模型。
- (4)通过陆态网测站实测气象数据检验格网气象模型的内外符合精度，并将模型计算的 ZTD 与对流层经验模型 ZTD 和陆态网测站解算的 ZTD 进行比较分析。

4.2.1 数据分析

从中国科学院上海天文台陆态网数据处理中心获取测站的实测气象数据，进行数据预处理工作：

(1)测站坐标数据

依据测站位置文件，将不符合要求的测站剔除（包括不在中国区域以及经纬度坐标错误的点）。

(2)测站气象数据

在 MATLAB 中对陆态网测站 2011~2014 年 4 年的气象数据进行预处理，将同一测站 4 年的数据保存到同名称的文件中，根据处理后的测站坐标文件与气象数据文件，从中任意选取 4 个不同经纬度地区的测站，以 TAIN、GSGL、NXYC、AHAQ 为例，其气压、温度、相对湿度时间序列结果见图 4.2、图 4.3、图 4.4。

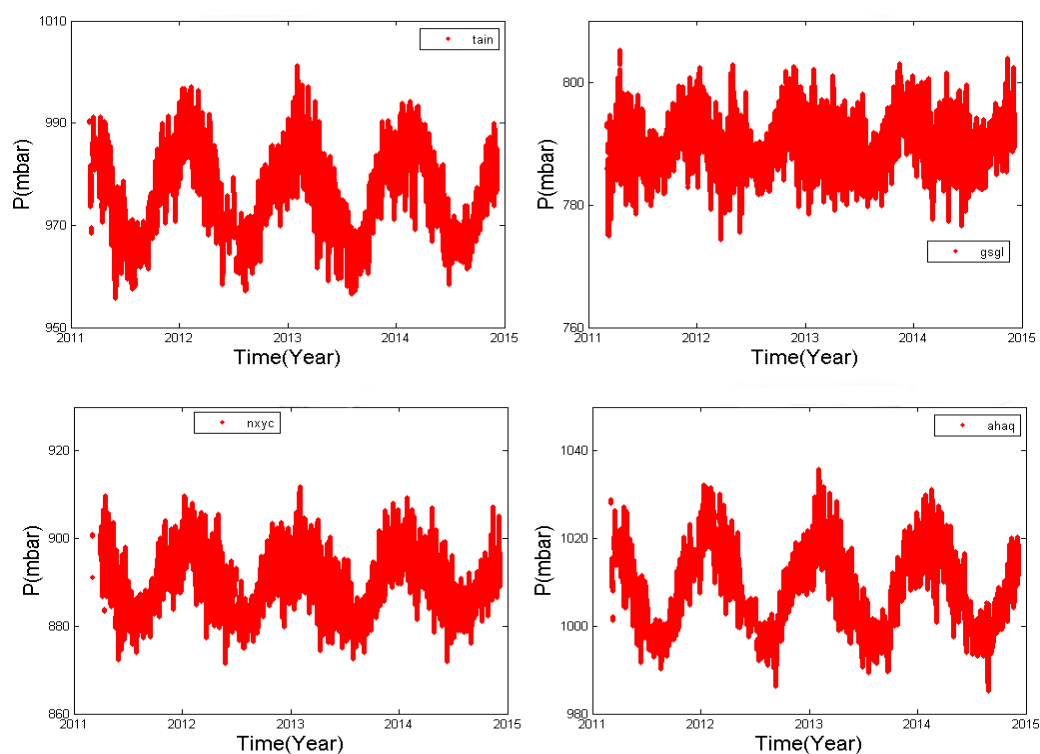


图 4.2 气压时间序列

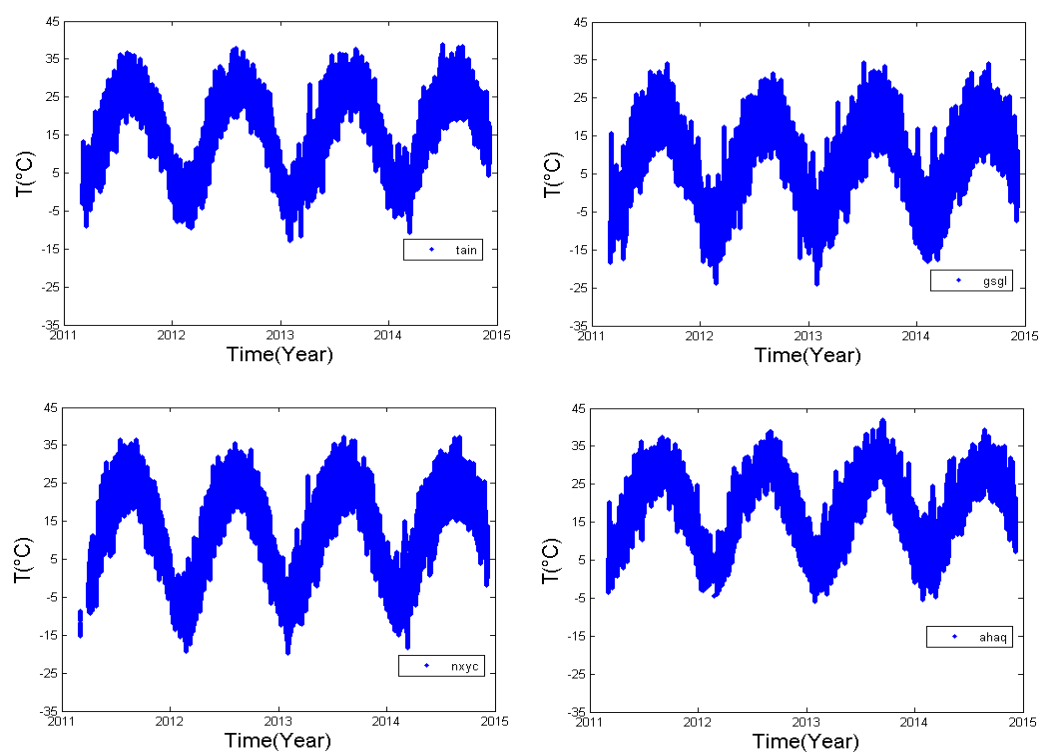


图 4.3 温度时间序列

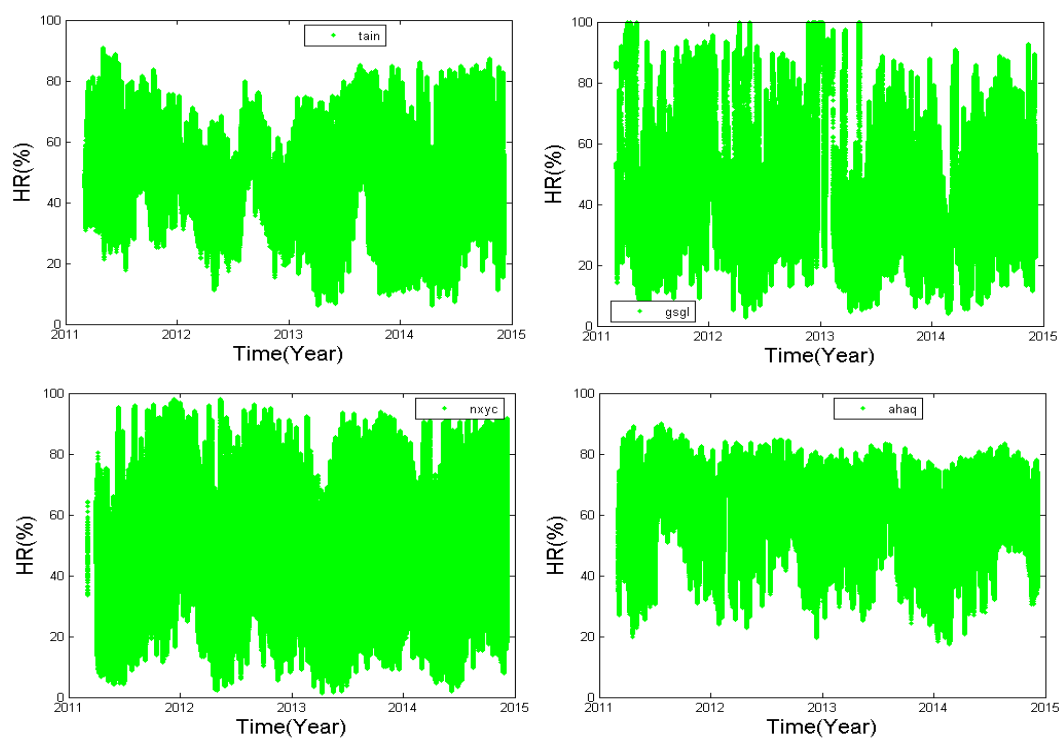


图 4.4 相对湿度时间序列

由图 4.2、图 4.3、图 4.4 可知,测站温度、气压、相对湿度具有一定的周期性变化,可用拟合公式对测站气象参数进行系数拟合,获取各测站的系数后建立中国区域格网气象模型,输入任意位置的大地坐标与年积日即可得到相应气象参数值与天顶延迟值。其中,相对湿度受水汽的影响变化剧烈,通过对多年的数据进行分析,发现某些测站在一些时间出现大于 100% 的现象,一般认为相对湿度的数值在 0-100% 之间,因此,需将大于 100 的数值剔除之后再行拟合。

4.2.2 测站选取

在 MATLAB 平台上通过对陆态网测站位置文件(.txt 格式)和中国区域边界文件(.shp 格式)的读取与处理,经过剔除错误数据之后,文件中共包含 259 个测站,绘制出陆态网测站位置分布结果,见图 4.5,选取数据质量较好的 221 个测站(图中红点)用于格网模型的建立,从余下测站(图中绿点)选取数据较好的站用于外符合精度的检验。

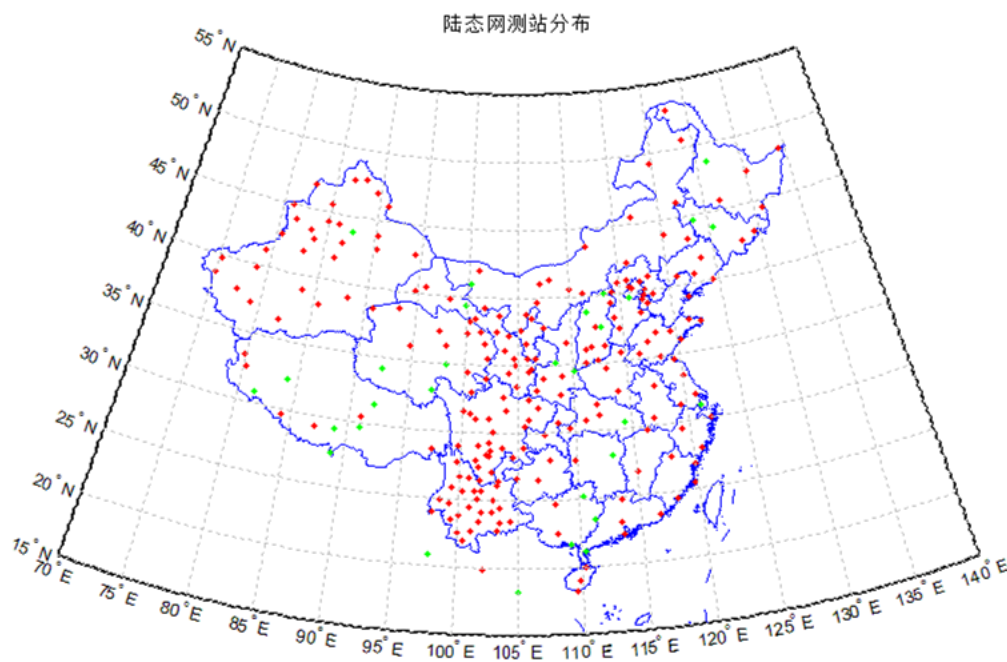


图 4.5 陆态网测站分布

4.2.3 拟合格网点参数并建立模型

拟合参数与格网模型建立的步骤:

- (1) 考虑到高度对气象数值的影响,根据经验公式(4.1)~(4.3)将 P 、 T 、 RH 值

归算到平均海平面处^[60]:

$$P_r = P_0 \times (1 - 0.0000226 \times h)^{5.225} \quad (4.1)$$

$$T_r = T_0 - 0.0065 \times h \quad (4.2)$$

$$HR_r = HR_0 \times e^{(-0.0006396 \times h \times 0.001)} \quad (4.3)$$

式中, h 为测站海拔高(m)。

(2) 根据公式(2.45), 使用最小二乘平差法^[61]拟合出各测站温度、气压、相对湿度的系数;

(3) 对中国区域(N: 18°~54°, E: 70°~135°)进行格网划分, 分辨率依据所选测站经纬度间隔, 将中国区域纬度与经度方向分别按照 2° 与 2.5° 进行划分, 格网划分与覆盖情况见图 4.6。使用反距离加权法将拟合出的测站系数内插到格网点, 每个格网点的参数包括格网点的经度、纬度、5 个气压系数、5 个温度系数、5 个相对湿度系数, 并将数据保存为 Cpt.mat(China press and temperature.mat) 文件;

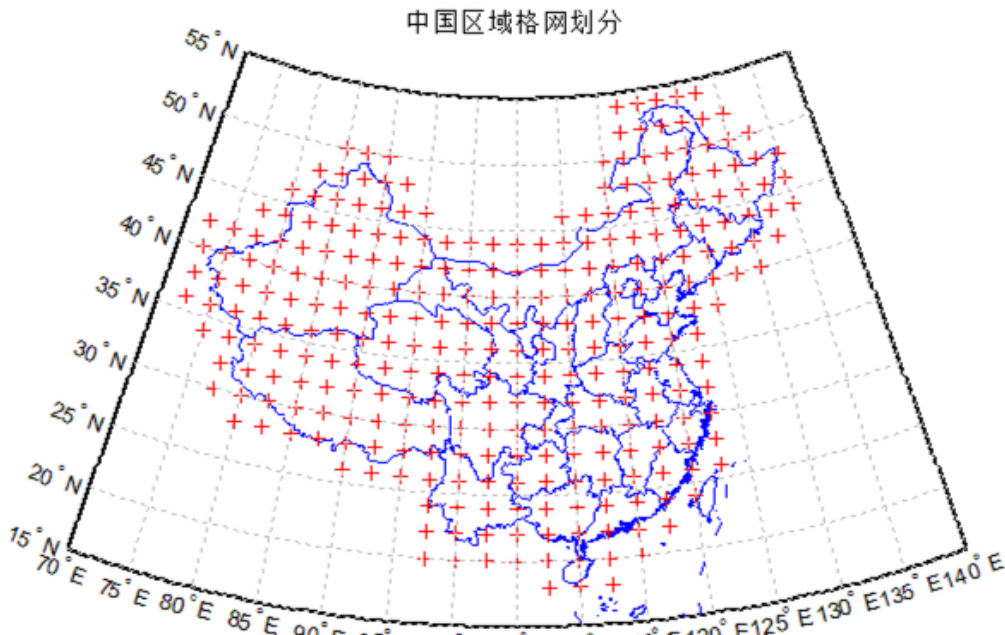


图 4.6 中国区域格网图

(4) 建立中国区域分辨率为 2°×2.5° 的格网气象模型 Cpt2(B,L,H,DOY), 根据输入的测站经纬度与年积日, 结合 Cpt.mat 中的格网点系数, 找出距离测站最近的四个格网点, 使用反距离加权法内插出平均海平面高度处的气象参数值, 并依据测站高使用公式(4.1)~(4.3)进行高度改正, 推算出任意位置处 P 、 T 、 HR , 并结合萨斯塔莫宁模型计算天顶延迟。

4.3 格网模型精度验证

依据章节 4.2.3 中的步骤(1)~(4)建立中国区域格网气象模型，用户只需要输入测站大地坐标与年积日即可推求出测站位置的气象参数与天顶延迟。现分别对模型的精度和局部地区适用性进行验证，共分为两步：第一步是通过与参与拟合和预留的陆态网站实测气象数据进行比较，完成内符合精度与外符合精度的检验；第二步是通过与陆态网测站解算天顶总延迟以及上海地区水汽辐射计实测延迟、GPT2 模型延迟、ECMWF 数据资料计算的天顶总延迟进行比较，完成模型之间精度的检验。模型验证所用测站分布见图 4.7，其中，红色点表示内符合精度检验的测站分布，绿色点表示外符合精度检验的测站分布，黄色点表示上海地区用于延迟精度检验的测站。

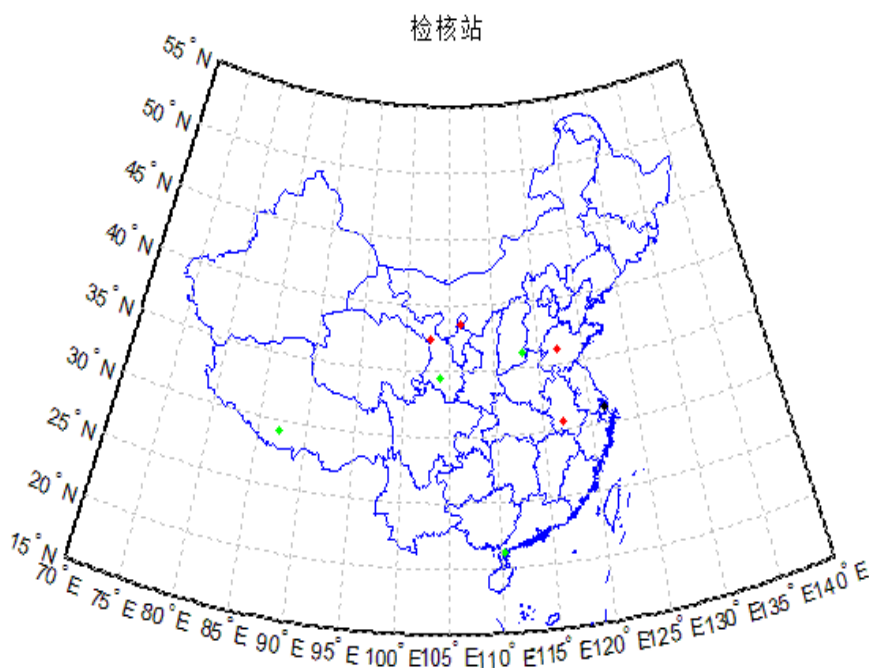


图 4.7 精度验证测站分布

4.3.1 内符合精度检验

从参与拟合的陆态网测站中选取 AHAQ、GSGL、NXYC、TAIN 四个测站进行内符合精度的检验，根据测站的位置与年积日，使用格网气象模型计算气压、温度、相对湿度数据，每间隔一小时计算一个值，对三类气象参数的拟合残差分别统计分析。

1. 气压

使用 Cpt2 模型计算所选测站 2011~2014 年气压数据，时间间隔为 1h，与测站实测气压值比较，气压时间序列见图 4.8。

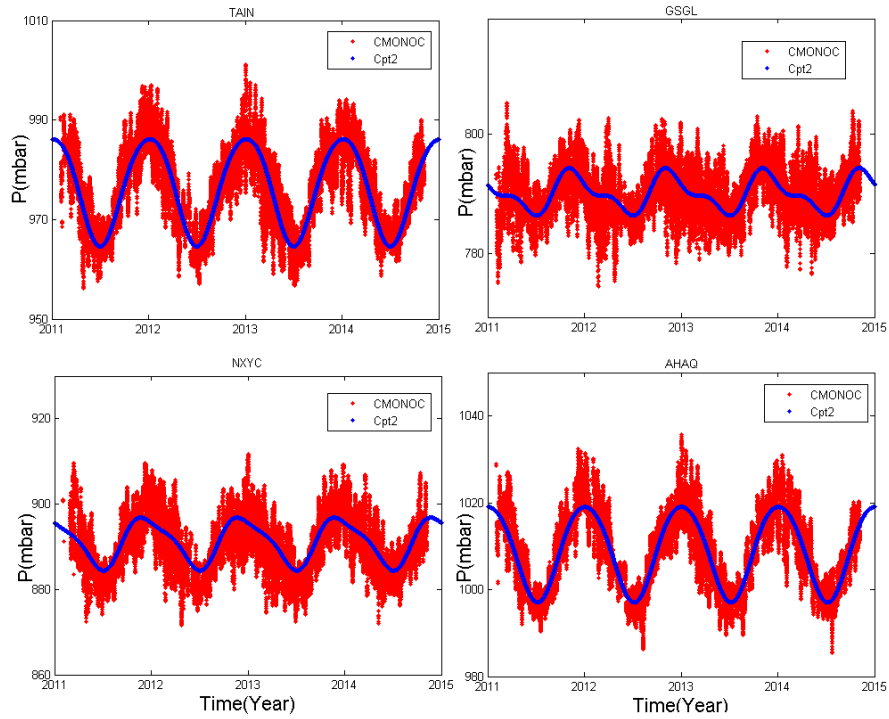


图 4.8 Cpt2 模型气压与陆态网站实测气压时间序列

以测站实测气压值为参考，Cpt2 模型气压与其差值结果见图 4.9，气压平均偏差与中误差统计结果见表 4.1。

表 4.1 气压平均偏差与中误差

Station	B/°	L/°	H/m	Bias/mbar	RMS/mbar	Max/mbar	Min/mbar
AHAQ	30.6171	116.9905	58.656	-0.40	4.13	17.07	-16.66
GSGL	37.4548	102.8895	2062.009	-0.07	3.59	15.31	-15.53
NXYC	38.4942	106.2739	1071.112	0.86	4.68	18.09	-17.39
TAIN	36.2144	117.1229	338.845	-0.36	4.25	19.81	-14.97

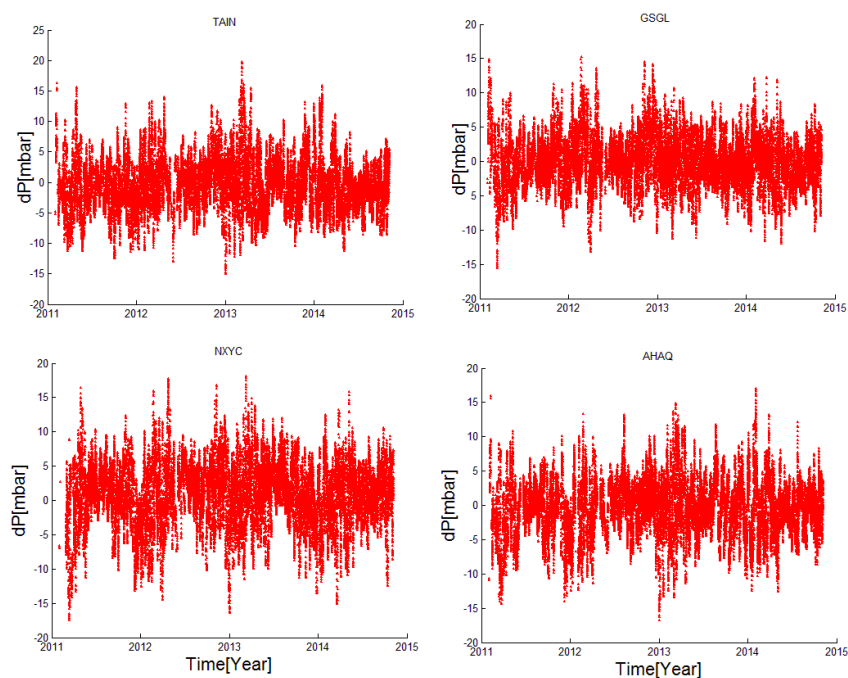


图 4.9 Cpt2 模型气压与实测气压差值图

由图 4.8、图 4.9 和表 4.1 的结果可知，Cpt2 格网模型计算的陆态网测站位置多年的气压变化情况与实测值变化趋势相符，在海拔较高与较低的地区均能很好的反映气压的变化特征。与实测气压值相比，模型计算的气压偏差均值小于 1mbar，中误差在 3.5~5mabr 之间，对对流层天顶延迟约产生 8mm 的误差，最终导致约 2cm 的高程误差。

2. 温度

使用格网气象模型计算所选测站 2011 年~2014 年温度数据，与陆态网站实测温度值比较，温度时间序列见图 4.10。

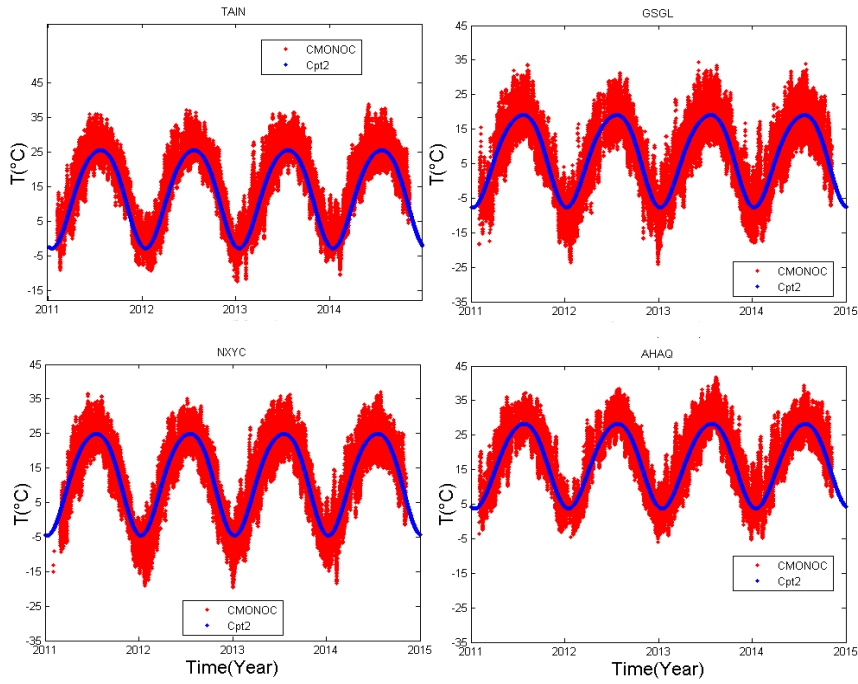


图 4.10 格网模型温度与陆态网站实测温度时间序列

以测站实测温度值为参考，格网模型温度与其差值结果见图 4.11，平均偏差与中误差统计结果见表 4.2。

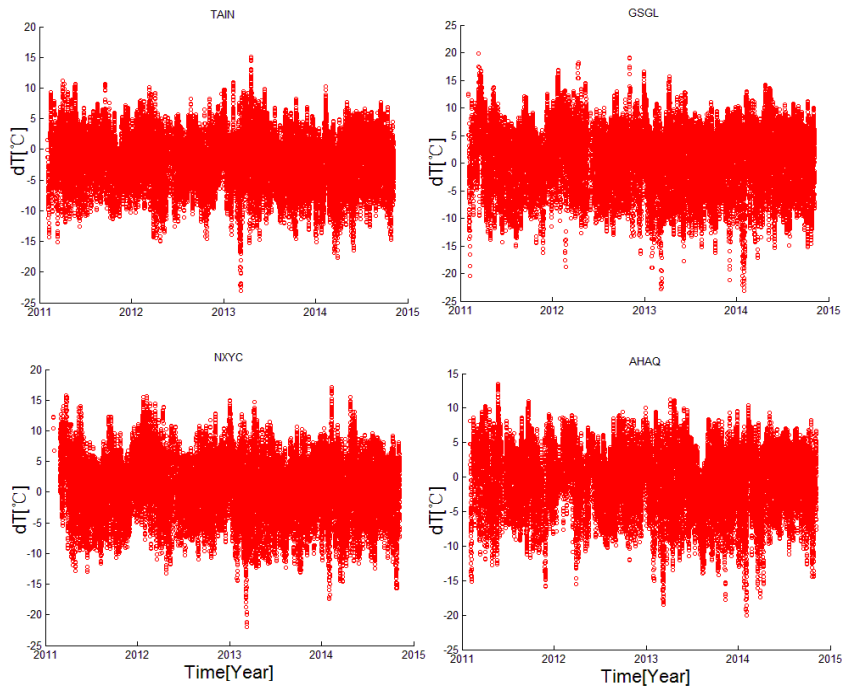


图 4.11 格网模型温度与实测温度差值图

表 4.2 温度平均偏差与中误差

Station	B/°	L/°	H/m	Bias/°C	RMS/°C	Max/°C	Min/°C
AHAQ	30.6171	116.9905	58.656	-0.36	4.44	13.48	-20.06
GSGL	37.4548	102.8895	2062.009	0.71	5.64	19.86	-23.19
NXYC	38.4942	106.2739	1071.112	0.58	4.90	17.10	-21.94
TAIN	36.2144	117.1229	338.845	-1.78	4.68	15.13	-23.05

由图 4.10、图 4.11 和表 4.2 的结果可知, Cpt2 格网模型计算的陆态网测站位置多年的温度变化情况与实测值变化趋势相符, 在海拔较高与较低的地区均能很好的反映温度的变化特征, 且精度随着海拔的增大呈现降低的趋势。与实测温度值相比, 模型计算的温度平均偏差均值均小于 2°C , 中误差在 $4.5\sim 6^{\circ}\text{C}$ 之间。

3. 相对湿度

使用格网气象模型 Cpt2 计算所选测站 2011~2014 年相对湿度, 每隔一小时计算一个值, 与陆态网站实测相对湿度比较, 其时间序列见图 4.12。

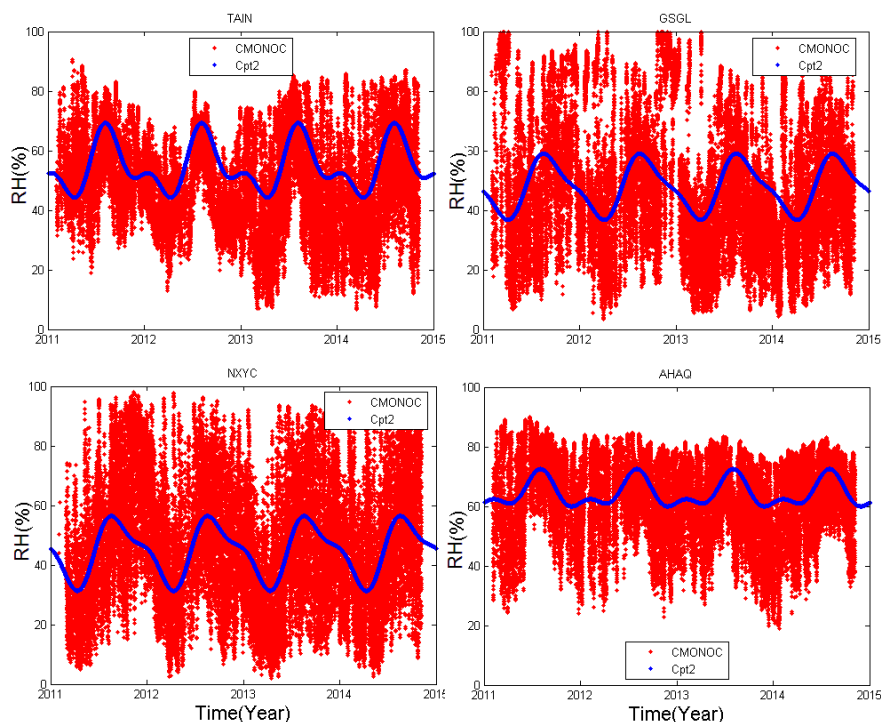


图 4.12 Cpt2 模型相对湿度与陆态网站实测相对湿度时间序列

以测站实测的相对湿度为参考, Cpt2 模型计算的相对湿度与其差值结果见图 4.13, 相对湿度平均偏差与中误差统计结果见表 4.3。

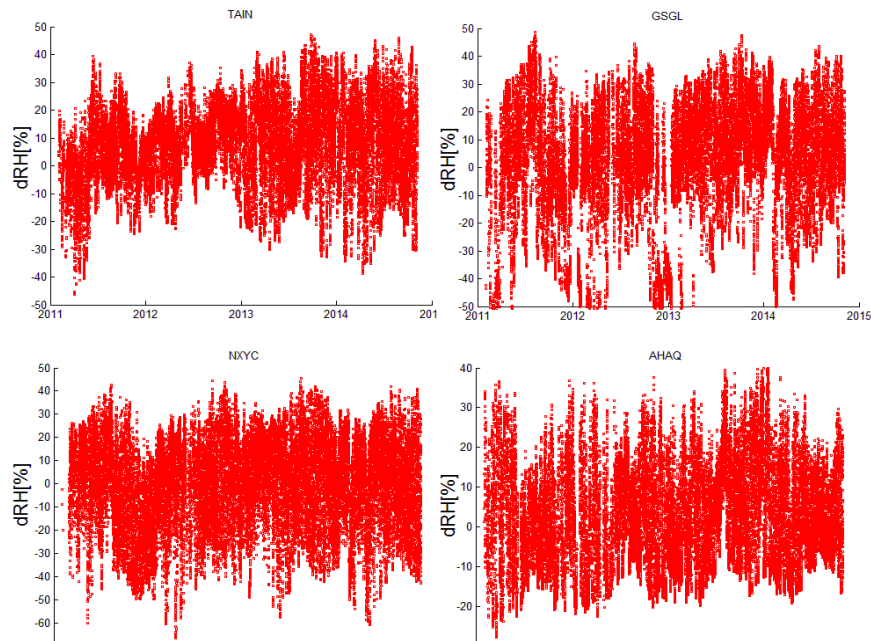


图 4.13 Cpt2 模型相对湿度与实测相对湿度差值图

表 4.3 相对湿度平均偏差与中误差

Station	B/°	L/°	H/m	Bias/%	RMS/%	Max/%	Min/%
AHAQ	30.6171	116.9905	58.656	2.76	12.96	43.14	-27.73
GSGL	37.4548	102.8895	2062.009	-0.19	22.32	48.80	-64.89
NXYC	38.4942	106.2739	1071.112	-1.14	19.23	45.68	-66.47
TAIN	36.2144	117.1229	338.845	6.76	16.15	47.23	-46.18

由图 4.12、图 4.13 和表 4.3 的结果可知，Cpt2 模型计算的陆态网测站位置多年的相对湿度变化情况与测站实测值变化情况相差较大，并且精度随着海拔的增大而降低。与实测值相比，相对湿度偏差均小于 7%，中误差平在 12~23%之间，在炎热的环境下，会对天顶延迟产生约 7cm 的误差影响。

4.3.2 外符合精度检验

从预留的陆态网测站中选取数据质量较好的四个测站进行外符合精度的检验，依次为 GSGT、GXBH、SXYC、XZRK 四个测站，根据测站所处的位置与年积日，使用格网气象模型计算气压、温度、相对湿度数据，每间隔一小时计算一个值，对三类气象参数分别统计分析。

1. 气压

使用格网气象模型 Cpt2 计算所选测站 2011~2014 年气压数据，时间间隔为

一小时一个值，与陆态网站实测气压比较，其时间序列见图 4.14。

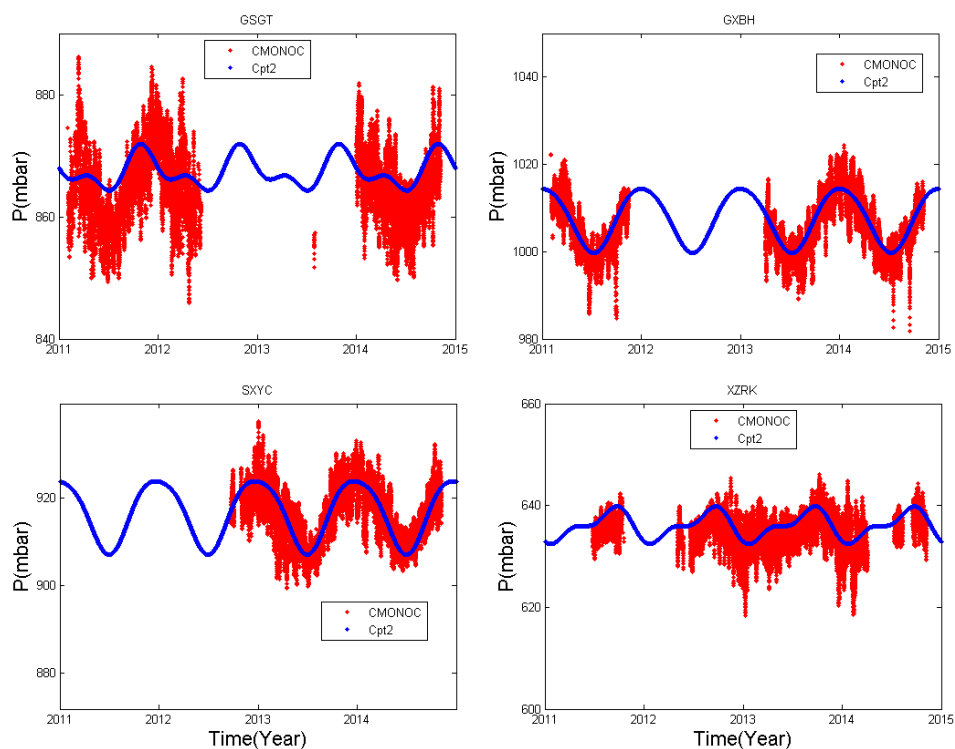


图 4.14 Cpt2 模型气压与陆态网站实测气压时间序列

以测站实测气压为参考，Cpt2 模型计算的气压与其差值结果见图 4.15，气压平均偏差与中误差统计结果见表 4.4。

表 4.4 气压平均偏差与中误差

Station	B/°	L/°	H/m	Bias/mbar	RMS/mbar	Max/mbar	Min/mbar
GSGT	39.4098	99.8133	1298.993	2.5	5.99	20.73	-19.76
GXBH	21.6526	109.2126	28.614	1.00	3.79	33.32	-11.58
SXYC	37.6324	112.8916	855.219	0.15	4.07	18.49	-13.93
XZRK	29.2489	88.8652	3854.801	1.77	3.49	14.24	-12.37

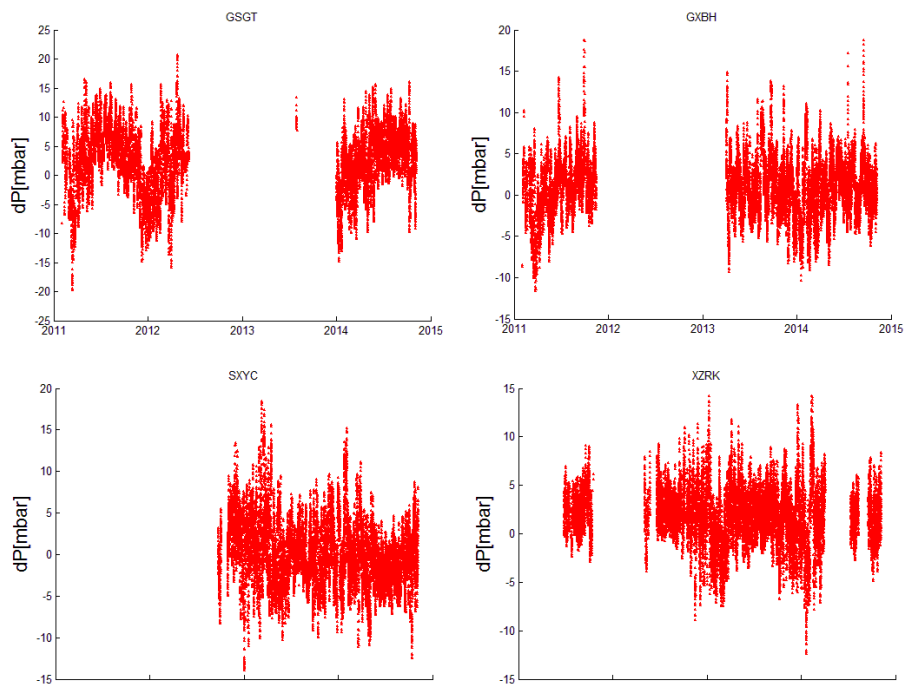


图 4.15 Cpt2 模型气压与实测气压差值图

由图 4.14、图 4.15 和表 4.4 的结果可知，Cpt2 格网模型计算的陆态网测站位置多年的气压变化情况与实测值变化趋势相符，在海拔较高与较低的地区均能很好的反映气压的变化特征。与实测气压值相比，模型计算的气压偏差均值均小于 3mbar，中误差在 3.5~6mabr 之间，对对流层天顶延迟约产生 9mm 的误差，最终导致约 2cm 的高程误差。

2. 温度

使用 Cpt2 格网气象模型计算所选测站 2011~2014 年的温度数据，间隔一小时给出一个结果，与陆态网站实测温度值比较，其时间序列见图 4.16。

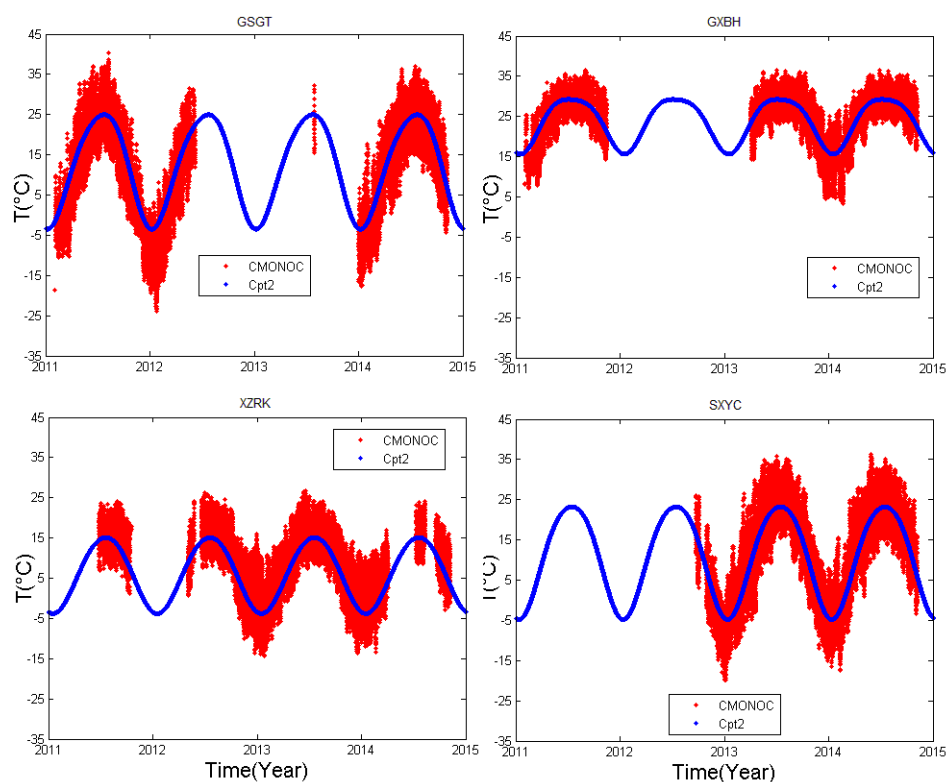


图 4.16 Cpt2 模型温度与陆态网站实测温度时间序列

以测站实测温度为参考,Cpt2 格网模型计算的温度值与其差值结果见图 4.17, 平均偏差与中误差统计结果见表 4.5。

表 4.5 温度平均偏差与中误差

Station	B/°	L/°	H/m	Bias/°C	RMS/°C	Max/°C	Min/°C
GSGT	39.4098	99.8133	1298.993	2.22	6.37	21.10	-19.33
GXBH	21.6526	109.2126	28.614	1.02	3.94	14.55	-10.32
SXYC	37.6324	112.8916	855.219	-0.28	5.57	16.58	-23.12
XZRK	29.2489	88.8652	3854.801	-2.05	5.11	11.46	-19.36

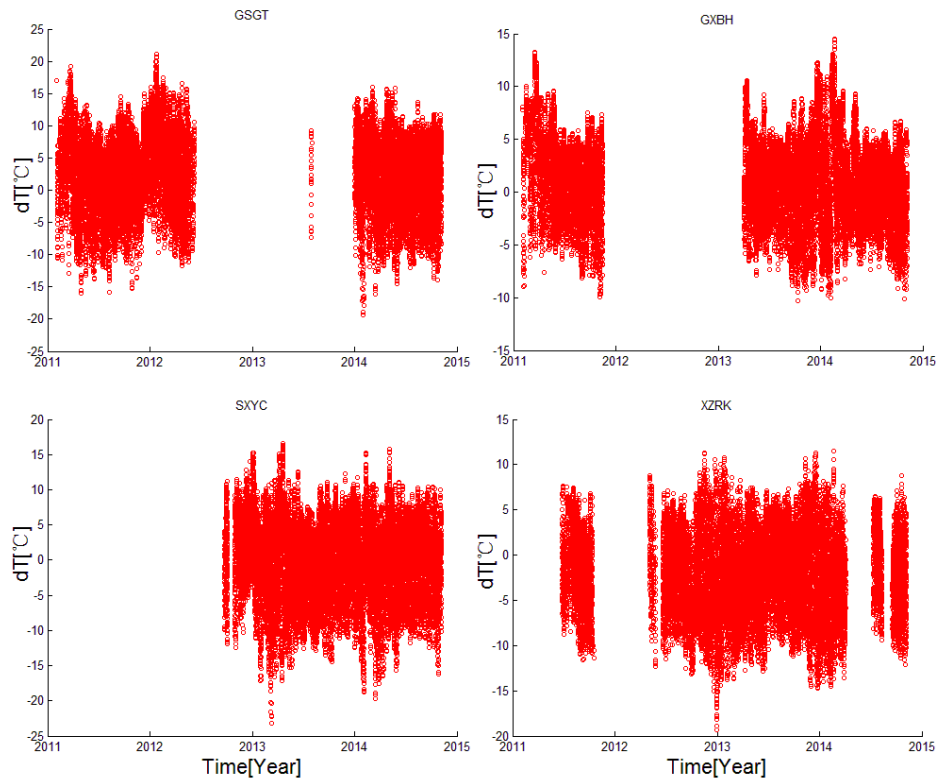


图 4.17 Cpt2 模型温度与实测温度差值图

由图 4.16、图 4.17 和表 4.5 的结果可知，Cpt2 格网模型计算的陆态网测站位置多年的温度变化情况与实测值变化趋势相符，在海拔较高与较低的地区均能很好的反映温度的变化特征，且精度随着海拔的增大呈现降低的趋势。与实测温度值相比，模型计算的温度偏差均值均小于 $2.5^{\circ}C$ ，中误差在 $3.5\sim 6.5^{\circ}C$ 之间。

3. 相对湿度

使用 Cpt2 格网气象模型计算所选测站 2011~2014 年相对湿度数据，每隔一小时给出一个结果，与陆态网站实测相对湿度比较，其时间序列见图 4.18。

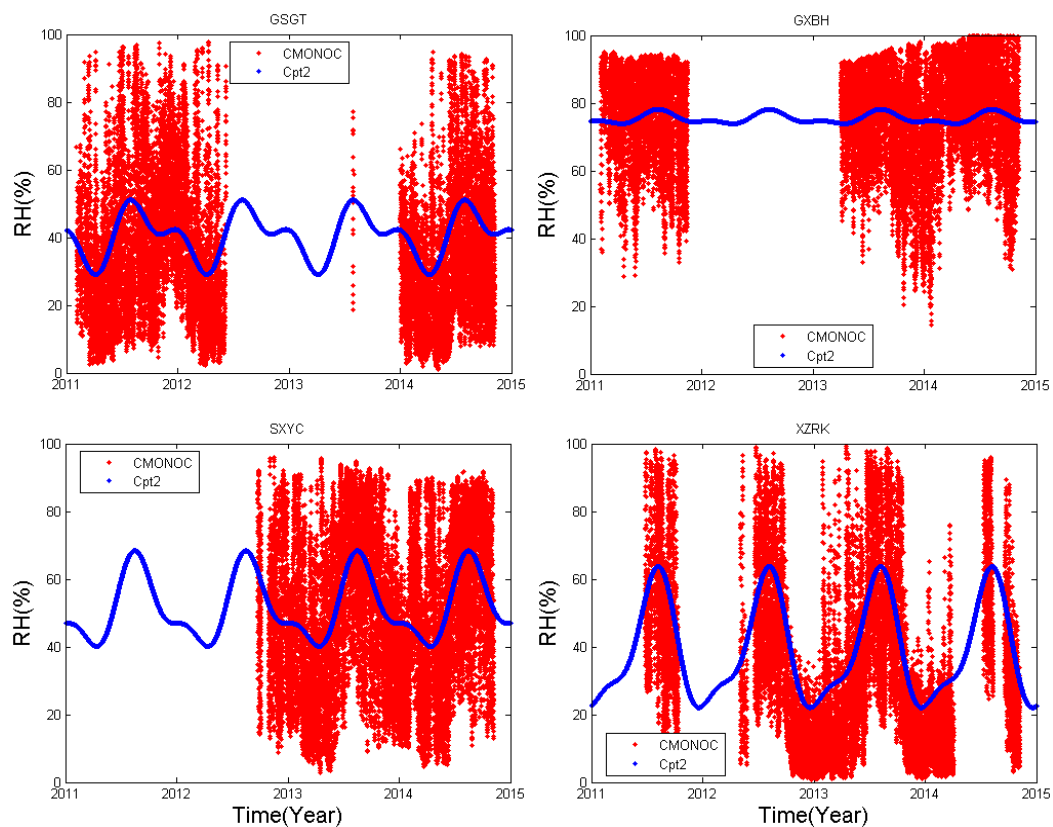


图 4.18 Cpt2 模型相对湿度与陆态网站实测相对湿度时间序列

以测站实测相对湿度值为参考，Cpt2 格网模型计算的相对湿度与其差值结果见图 4.19，平均偏差与中误差统计结果见表 4.6。

表 4.6 相对湿度平均偏差与中误差

Station	B/°	L/°	H/m	Bias/%	RMS/%	Max/%	Min/%
GSGT	39.4098	99.8133	1298.993	3.96	20.00	44.20	-68.54
GXBH	21.6526	109.2126	28.614	-2.38	15.50	60.27	-33.94
SXYC	37.6324	112.8916	855.219	1.85	20.68	57.04	-55.42
XZRK	29.2489	88.8652	3854.801	8.32	19.45	48.38	-68.62

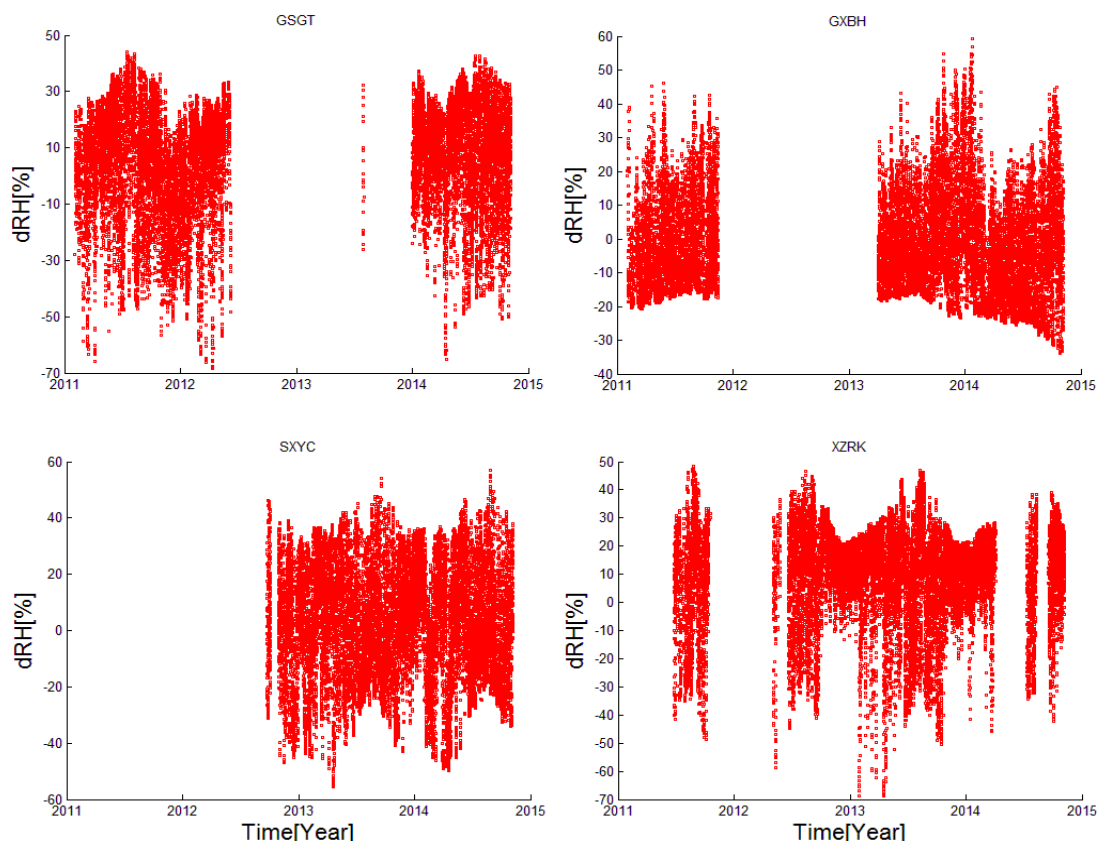


图 4.19 格网模型相对湿度与实测相对湿度差值图

由图 4.18、图 4.19 和表 4.6 的结果可知，Cpt2 模型计算的陆态网测站位置多年的相对湿度变化情况与测站实测值变化情况相差较大，并且精度随着海拔的增大而降低。与实测值相比，相对湿度偏差均值均小于 9%，中误差在 15~20% 之间，在炎热的环境下，会对天顶延迟产生约 7.5cm 的误差影响。

4.3.3 延迟比较

4.3.3.1 模型延迟的比较

为了分析模型在上海的地区的适用性，本文收集了上海同济大学某学院楼顶的水汽辐射计 2014 年的观测数据，将其作为参考值，取每天 UTC 时间 00, 06, 12, 18 四个时刻的值，对实测气象数据 SAAS 模型延迟、ECMWF 积分延迟、GPT2 模型延迟、Cpt2 模型延迟、标准大气 SAAS 模型延迟进行比较分析。天顶延迟时间序列与差值结果见图 4.20，平均偏差与中误差见表 4.7。

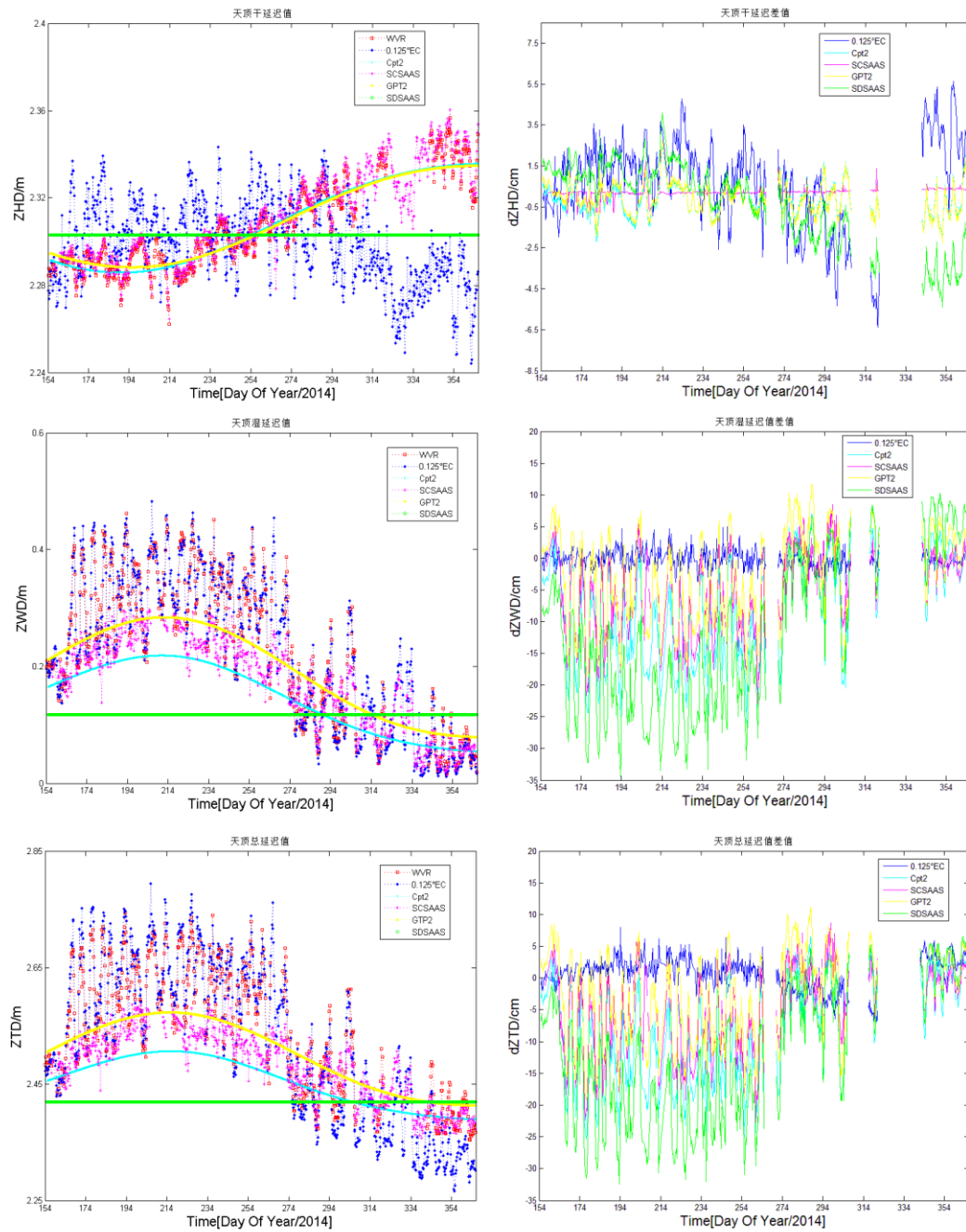


图 4.20 各模型天顶延迟时间序列与差值图

表 4.7 天顶延迟平均偏差与中误差

		Δ ZHD	Δ ZWD	Δ ZTD
0.125°×0.125°ECMWF	Bias/cm	0.75	0.14	0.60
	RMS/cm	2.30	1.39	2.64
	Max/cm	5.63	4.95	7.98
	Min/cm	6.39	4.22	-8.05
	Bias/cm	-0.18	-7.65	-7.84
Cpt2	RMS/cm	2.95	11.07	11.09
	Max/cm	0.77	7.04	6.53
	Min/cm	2.64	-25.95	-25.34
	Bias/cm	0.21	-5.06	-4.85
SCSAAS	RMS/cm	0.31	8.30	8.23
	Max/cm	1.83	8.47	8.72
	Min/cm	-0.87	-22.95	-22.71
	Bias/cm	-0.14	-2.50	-2.65
GPT2	RMS/cm	0.77	7.68	7.56
	Max/cm	2.75	11.77	11.17
	Min/cm	-2.27	-19.81	-19.29
	Bias/cm	-0.40	-11.62	-12.03
SDSAAS	RMS/cm	1.99	16.82	16.08
	Max/cm	4.08	10.25	6.55
	Min/cm	-5.39	-34.44	-32.42

由图 4.20 和表 4.7 的统计结果可知，格网气象模型计算的天顶延迟具有明显的季节性变化，其变化情况与实测值变化情况相符合。以水汽辐射计实测延迟值作为参考，各模型对干延迟的估算精度相当，用模型对湿延迟难以精确估算，其中 0.125 度 ECMWF 资料通过沿着天顶路径积分的方法计算出每层的湿延迟结果，能够较好的表述大气层中湿延迟的变化特征，其计算的天顶湿延迟精度最高。Cpt2 模型计算上海地区天顶总延迟的偏差均值与中误差分别为-7.84cm 和 11.09cm，精度略低于实测气数据 SAAS 模型，与标准气象参数的 SAAS 模型相比，Cpt2 模型对对流层天顶总延迟的测定精度提高了约 31%，相应大地高的测量精度可提高约 10%。

4.3.3.2 陆态网测站的延迟比较

为了分析 Cpt2 模型计算的天顶延迟在中国区域的精度, 选取用于内符合精度与外符合精度检验的 8 个陆态网测站, 根据大地坐标与年积日计算每个测站 2011~2014 年的天顶总延迟, 每间隔一小时给出一个延迟结果, 与测站解算的天顶总延迟进行比较分析, 以 TAIN 和 XZRK 站为例, 其 2011~2014 年天顶总延迟时间序列和差值对比结果见图 4.21 和图 4.22。

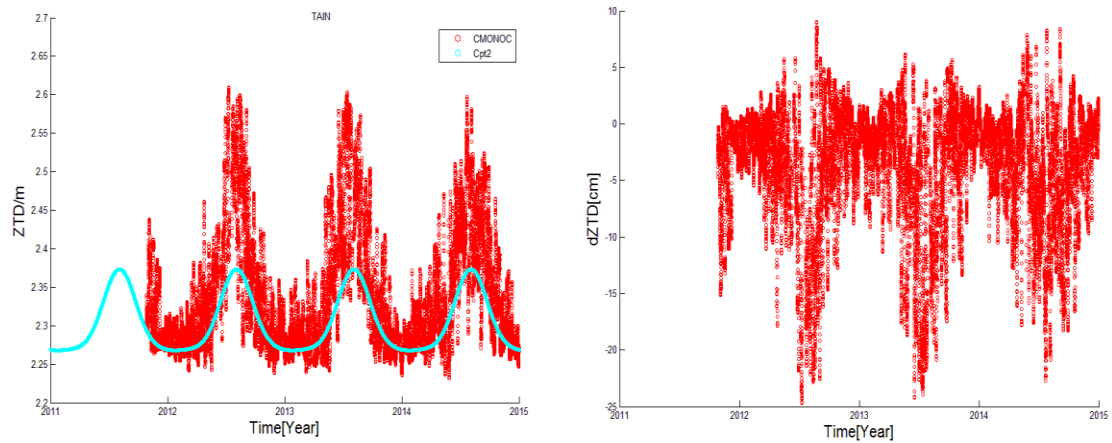


图 4.21 TAIN 站 ZTD 时间序列

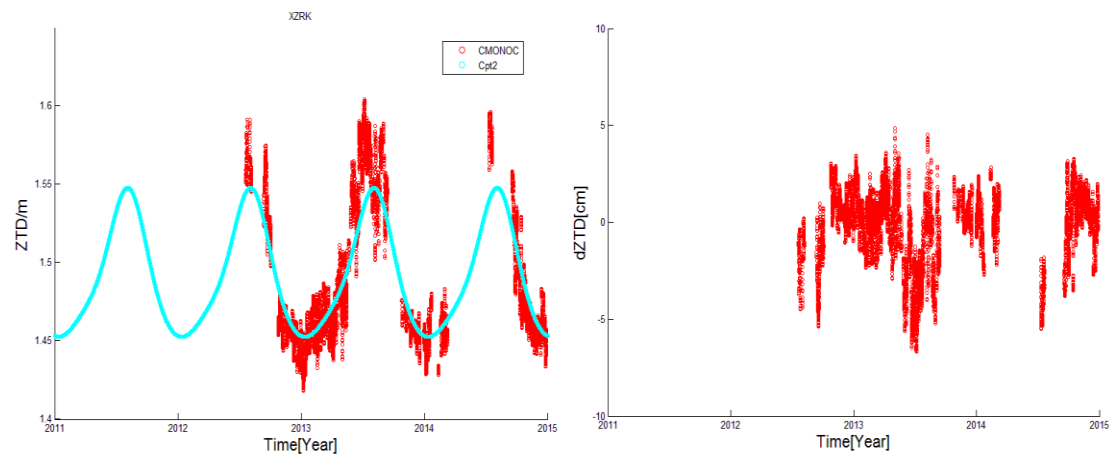


图 4.22 XZRK 站 ZTD 时间序列

以陆态网测站解算的天顶总延迟为参考, 对所选的 8 个测站的天顶总延迟统计, 其平均偏差与中误差见表 4.8。

表 4.8 天顶总延迟平均偏差与中误差

Station	B/°	L/°	H/m	Bias/cm	RMS/cm	Max/cm	Min/cm
AHAQ	30.6171	116.9905	58.656	-6.84	9.94	10.36	-25.20
GSGI	37.4548	102.8895	2062.009	-0.23	2.97	8.01	-13.15
NXYC	38.4942	106.2739	1071.112	-0.93	3.80	7.07	-17.77
TAIN	36.2144	117.1229	338.845	-3.64	6.45	9.04	-24.71
GSGT	39.4098	99.8133	1298.993	-0.5	3.08	8.68	-14.24
GXBH	21.6526	109.2126	28.614	-8.68	10.62	12.55	-25.37
SXYC	37.6324	112.8916	855.219	-1.88	5.19	8.41	-19.72
XZRK	29.2489	88.8652	3854.801	-0.32	1.97	4.84	-6.67
Mean				-2.88	5.50	8.62	-18.35

由图 4.21、图 4.22 和表 4.8 的统计结果可知，格网气象模型计算的陆态网测站对流层天顶总延迟具有明显的季节性变化，与测站解算的延迟变化情况相符合。Cpt2 模型无明显的系统偏差，ZTD 平均中误差仅为 5.5cm，能较好的反映中国区域大气变化特征，其所需参数较少，不需要输入实测的气象参数值，可作为中国区域适用的 GNSS 实时定位和导航的对流层天顶延迟的改正模型，满足 GNSS 米级定位精度的需求。

4.6 本章小结

本章主要介绍了中国区域格网气象模型的建立过程，并对模型的内外符合精度进行了分析，并与常用的对流层延迟改正模型进行了比较。经验证，Cpt2 格网模型能较好的反映中国区域内气压与温度的变化特征，具有明显的季节性变化，但对相对湿度的计算结果与真实值相差较大，尤其是在海拔较高的地区精度会降低，这与水汽在空间与时间变化剧烈的特性有关。在上海地区，Cpt2 模型计算的对流层延迟比标准大气的 SAAS 模型延迟精度提高了约 31%，可应用于对流层延迟改正中提高导航定位的精度。与陆态网测站解算的天顶总延迟相比，Cpt2 模型计算的对流层天顶总延迟平均中误差仅为 5.5cm，能较好的反映中国区域大气变化特征，可作为适用的 GNSS 实时定位和导航的对流层天顶延迟的改正模型，满足 GNSS 米级定位精度的需求。

第 5 章总结与展望

5.1 总结

对流层延迟是制约 GNSS 导航定位精度的一个主要误差因素,在导航定位中一般采用对流层改正模型。现有的模型大多是面向全球的经验模型,在区域性测量中具有较大的误差,难以满足高精度导航定位的需求,对流层折射延迟与气象元素密切相关,为了提高定位精度,有必要对区域的大气参数进行分析,建立起区域性的大气模型。近年来,随着中国大陆构造环境监测网络的建成以及投入使用,可获取连续的气象参数观测数据,通过对实测气象参数分析并建立模型,然后求取对流层天顶延迟,可削弱由标准气象元素产生的误差,提高对流层模型改正精度。本文主要研究的内容有:

(1) 系统的总结了大气对 GNSS 的延迟影响与常用改正方法,分析了大气对 GNSS 测量的影响,尤其是对流层延迟的产生与影响,总结几种常用的对流层延迟改正模型,介绍水汽辐射计的使用方法及其在 GNSS 延迟改正中的应用。使用 Bernese 软件处理气象仪接收的 GNSS 数据,估计了对流层天顶延迟。最终以水汽辐射计的观测值为参考,对 SASTAMOINEN 模型、EGNOS 模型、UNB3M 模型、GPT2 模型在上海地区延迟改正结果进行比较分析,并将延迟应用于精密单点定位(PPP)。通过对不同模型的实际算例进行比较可知:与 WVR 干延迟结果相比,GPT2 模型干延迟改正精度在四种经验模型中最高,其偏差均值为 -0.11cm ,中误差为 $\pm 0.75\text{cm}$,与测站实测值差异最小;与 WVR 湿延迟结果相比,GPT2 模型湿延迟改正精度在四种经验模型中最高,其偏差均值为 -2.34cm ,中误差为 $\pm 7.67\text{cm}$,比余下对流层模型中改正精度最高的 UNB3M 模型精度提高了 18%;与 Bernese 解算的天顶总延迟相比,GPT2 模型总延迟改正精度在四种经验模型中最高,其偏差均值为 -1.26cm ,中误差为 $\pm 6.87\text{cm}$,比其余对流层模型中改正精度最高的 UNB3M 模型精度提高了 13%。GPT2 模型能更好的描述上海地区的对流层延迟情况,有更好的适用性;与软件估算结果相比,水汽辐射计延迟值应用于动态精密单点定位,结果精度提高了 16%,模型计算的延迟对于结果精度没有提高,在 N、E 方向改正精度相当,但在 U 方向上,夏季时 GPT2 模型定位精度比其余对流层模型中精度最高的 UNB3M 模型提高了 15%,这表明 GPT2 模型在上海地区具有更好的适用性。水汽辐射计作为一种高精度的探测仪器,既

可以获取地面气象参数,也可以对信号传播路径上的综合水汽含量进行测定,通过转换公式可以计算出信号传播路径上的湿延迟量,因此其观测量可应用于 GNSS 定位系统中,作为提高定位精度的一种有效方法。

(2) 研究分析了欧洲中期天气预报中心(ECMWF)资料在上海地区的适用性,本文对 ECMWF 的 37 层等压面资料的获取与使用方法进行了研究,并在 MATLAB 平台上完成解码与延迟计算程序的编写工作,依据大气折射理论,使用积分的方法计算出 0.125° 与 0.25° 分辨率数据的对流层天顶延迟,并分析了不同拟合函数对于测站延迟改正结果精度的影响,最终将延迟应用于精密单点定位,评估其上海地区的适用性。与 WVR 实测天顶路径延迟相比, ECMWF 0.125° 资料计算 ZTD 的 bias 和 RMS 分别为 0.60cm 和 2.64cm, 0.25° 时 ZTD 的 bias 与 RMS 分别为 -0.10cm 和 3.58cm,均优于实测气象数据 ZTD 的 bias 和 RMS,结果分别为 -4.85cm 和 8.23cm;相同分辨率 ECMWF 资料使用指数函数拟合延迟改正结果精度更高,两种拟合函数得到的结果中, 0.125° 分辨率资料的天顶延迟结果均优于 0.25° 资料的计算结果,天顶总延迟精度提高约 1cm,湿延迟精度相当,说明上海地区水汽空间分辨率不高于 0.125° ;实测气象数据的 SAAS 模型延迟应用于动态精密单点定位,精度得到了降低,ECMWF 0.125° 资料比 0.25° 资料定位精度平均提高 6%,均优于实测 SAAS 模型;在 U 方向上, ECMWF 资料的定位精度比实测 SAAS 模型精度平均提高 53%。表明 ECMWF 资料在上海地区有较好的适用性,可用于上海地区 GNSS 导航定位中高精度对流层延迟改正。

(3) 为了削弱局部地区使用标准气象元素引起的误差,提高了对流层延迟改正的精度,本文收集了中国大陆构造环境监测网络 260 个测站 4 年的实测气象数据,分别对气压,温度,相对湿度 3 个参数进行了处理,依据最小二乘平差理论拟合出测站参数的系数,并用反距离加权法将系数内插到格网点,建立了只需要输入时间与位置参数的中国区域格网气象模型,并对模型的精度与可靠性进行了检验,结果表明, Cpt2 模型能够较好的反映中国区域大气变化特征,对对流层延迟的改正精度比标准大气的 SAAS 模型提高了约 31%,可用于提高导航定位的精度。

本文的主要贡献有:

(1) 用水汽辐射计的观测数据对模型在上海地区的适用性进行了分析,并将延迟结果引入到 Bernese 定位过程中,分析了模型延迟与水汽辐射计对于定位的辅助性作用。

(2) 使用 ECMWF 气象资料时,选取不同的函数进行拟合,对垂直方向上层折射率的计算采用相邻两等压面格网点参数取平均的方式,减小了天顶延迟误差。

(3) 以陆态网测站实测的气象数据为基础建立格网气象模型。

5.2 展望

本文结合水汽辐射计的实测数据对常用的对流层经验模型在上海地区的适用性进行了分析, 并对气象数值模型 ECMWF 不同分辨率的等压面资料进行了比较, 基于陆态网测站 2011~2014 年的实测气象数据建立了适用于中国区域的气象格网模型, 验证了模型的精度。受空气中水汽的影响, 相对湿度难以模型化表达导致模型湿延迟的计算精度不高, 下一步工作可以尝试将 ECMWF 积分的湿延迟与格网气象模型配合使用, 其区域适用性有待分析; 另外, 也可尝试用 ECMWF 等压面资料积分延迟来建立中国地区对流层模型, 在建立模型过程中, 对格网点参数内插方法进行改进; 使用 ECMWF 的 60 层 model level、surface 资料计算对流层延迟, 并与本文中的等压面资料计算的延迟在中国区域的精度进行比较分析。

致谢

时光匆匆，两年半的研究生学习生活即将结束，期间经历的都历历在目，从最初的报到内心紧张不安，到与老师同学打成一片，我学到了很多，也成长了很多。

回首三年来的研究生生活，感触颇深。刚从辽宁工程技术大学毕业来到同济大学求学，除了课程学习之外，就能有机会参加各种学术会议和 LBS 等科研项目。这使我认识到知识不再是课本上的公式，如何将知识产品化，是需要经历很多的努力的，渐渐的我从一个只知课本知识的本科生成长为一个有一定专业水平和科研能力的硕士研究生，这种转变，离不开身边的每一个人对我的帮助。

首先衷心感谢我的两位导师胡丛玮教授与陈俊平教授，他们渊博的学术知识、敏锐的洞察力、严谨的治学态度和对学术发展的高瞻远瞩都让我难以忘怀。在研究生的学习和科研生活，胡老师与陈老师对我严格要求、精心指导、悉心培养，给予我许多学习和提高的机会，并且以高度的耐心和宽容对待我在科研之路上走过的弯路和犯过的错误，使我在科研中得到锻炼，在学习中不断提高，在生活中也愈加成熟。在学习和科研之外，两位老师为人正派，行为高洁，我在他们身上也学到了很多做人的道理。除此之外，胡老师还关心我的生活，刚读研时经常有很多迷茫困惑的问题，胡老师主动和我聊天让我不要焦躁，保证休息时间，做好眼前的事情，踏踏实实的学习，这份感动铭记在心。陈老师也在学习与生活上同样给予了我悉心的指导，他们对科研的追求和敬业精神都是我追求的楷模。两位老师对我的帮助与教诲让我受益匪浅。

同时，我还要感谢张益则师兄、段兵兵、吴伟伟、赵婧雯、王明华、李茂、郑二龙、毕元，在你们的帮助才我才能快速适应科研生活的节奏并且跟上同门的步伐；感谢胡强、张泽峰、王君刚、刘翔、辛杰，在你们的陪伴下，我才能坚持锻炼身体，强健了体格，每天都能保持饱满的精神状态迎接生活；感谢中科院上海天文台的杨塞男、章洁君、陈倩，在学习与生活中给了我很多的帮助，还要感谢教研室的其他师弟师妹们，和你们交流学习、讨论问题，总是能让我学习很多。

最后，感谢我的父亲、母亲、妹妹和女朋友，感谢你们的支持、照顾和鼓励。你们的支持是我前进的动力，你们能够感受到幸福和快乐，是我最大的希望。

2016 年 3 月

参考文献

- [1] 徐绍铨,张华海,杨志强等.GPS 测量原理及应用[M].武汉:武汉大学出版社,2005,87-99.
- [2] KLOBUCHARJA.Ionospheric time-delay algorithm for single frequency GPS users [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,1987,AES22(3):325-331.
- [3] 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.
- [4] BRUNNER, WELSCH. Effect of the troposphere on GPS measurements [J]. GPS World, 1993, 4(1): 42-51.
- [5] VANDERMAREL. Virtual GPS reference stations in Netherlands[C]//ION GPS-98,11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Nashville, 1998: 49-58.
- [6] Santerre R. Impact of GPS satellite sky distribution [J] .Manuscripta Geodaetica,1991,16: 28-53.
- [7] Chuan-Sheng Wang. Impact of surface meteorological measurements on GPS height determination [J]. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2008(35), L23809.
- [8] 赵岩.区域对流层延迟建模分析[D],中南大学,2013.
- [9] Saastamoinen J. Contribution to the Theory of Atmosphere Refraction [J].Geodesique. 1973:105-107.
- [10]Rodrigo F. Leandro, Richard B. Langley, Marcelo C. Santos;UNB3M_pack: a neutral atmosphere delay package for radiometric space techniques. GPS Solution,2008, 12:65-70.
- [11]Christian Rocken. Pointed Water Vapor Radiometer Corrections For Accurate Global Positioning System Surveying[J], Geophysical Research Letters,1993:2635-2638.
- [12]M. Schindelegger, J. Bohm. GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques.Geophysical Research Letters, 2013,40: 1069-1073.
- [13]盛裴轩,毛节泰,李建国.大气物理学[M].北京:北京大学出版社,2003:48-56.
- [14]李征航,黄劲松.GPS 测量与数据处理[M].武汉: 武汉大学出版社,2008.
- [15]杨力.大气对 GPS 测量影响的理论与研究[D].郑州:中国人民解放军信息工程学,2001.
- [16]Wen Youtao, Near Real-time GPS PPP-inferred Water Vapor System Development and Evaluation. Department of Geomatics engineering, UNIVERSITY OF CALGARY,2008.
- [17]E. K. Smith and S. Weintraub, "The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies," J. Res. Natl. Bur. Stand. 1953, vol.

- 50:39-41.
- [18] J. L. Davis, T. A. Herring, I. I. Shapiro, A. E. E. Rogers, and G. Elgered, "Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling error on estimates of baseline length," *Radio Sci.* 1985, vol. 20, no. 6, pp. 1593-1607.
- [19] J. M. Wallace and P. V. Hobbs, *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. New York: Academic, 2006, p. 483.
- [20] 丁晓光. 对流层延迟改正 GPS 数据处理中的应用研究[M]. 长安大学, 2009.
- [21] 陈招华. 区域精密对流层延迟建模[M]. 中南大学, 2010.
- [22] 李国平. 地基 GPS 遥感大气可降水量及其在气象中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [23] Qinming Chen, Shuli Song. Assessment of ZTD derived from ECMWF/NCEP data with GPS ZTD over China[J]. *GPS Solution*, 2011, 15(4): 415-425.
- [24] 徐桂荣, 孙振添. 地基微波辐射计与 GPS 无线电探空和 GPS/MET 的观测对比分析[J]. *暴雨灾害*, 2012, 29(4): 315-321.
- [25] 王勇, 刘林涛, 刘根友. 基于水汽辐射计与 GPS 湿延迟的对比研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2005, 25(4): 110-113.
- [26] 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.
- [27] Nigel Penna, Alan Dodson, Wu Chen. Assessment of EGNOS Tropospheric Correction Model. Vol. 54: 37-55.
- [28] 曲伟普, 朱文耀, 宋淑丽. 三种对流层延迟改正模型精度评估[J]. *天文学报*, 2008, 49(1): 113-121.
- [29] Rodrigo Leandro, Marcelo Santos, Richard B, Langley. UNB Neutral Atmosphere Models Development and Performance [J]. *GPS Solution*, 2004.
- [30] 王君刚, 陈俊平, 王解先. GNSS 对流层延迟映射模型分析[J]. *天文学进展*, 2014, 32(3): 383-394.
- [31] 王晓英, 宋连春, 曹云昌. 利用 BERNES5_0 解算地基 GPS 天顶湿延迟[J]. *气象科技*, 2012, 40(1): 41-45.
- [32] 陈俊平, 王解先, 陆彩萍. GPS 监测水汽与水汽辐射计数据的对比研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2005, 25(3): 125-128.
- [33] 王勇, 刘林涛, 刘根友. 基于水汽辐射计与 GPS 湿延迟的对比研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2005, 25(4): 110-113.
- [34] 陈俊平, 李光炎, 王解先. 水汽辐射计资料在 GPS 精密定位中的应用[J]. *测绘通报*, 2006, 第 11 期: 9-11.
- [35] 王晓英, 宋连春, 曹云昌. 利用 BERNES5_0 解算地基 GPS 天顶湿延迟[J]. *气象科技*, 2012(1): 41-45.
- [36] 陈俊勇. 地基 GPS 遥感大气水汽含量的误差分析[J]. *测绘学报*, 1998(2): 113-118.
- [37] S. Heise, G. Dick, G. Gendt, T. Schmidt, and J. Wickert. Integrated water vapor from IGS ground-based GPS observations: initial results from a global 5-min data set[C]. *Annales Geophysicae*, 2009(27): 2851-2859.
- [38] 于胜杰, 刘林涛. 水汽加权平均温度回归公式的验证与分析[J]. *武汉大学学报*:

- 信息科学版, 2009(6):721-744.
- [39] Rolf Dach, Urs Hugentobler, Pierre Fridez, Michael Meindl. Bernese GPS Software Version 5.0[M]. University of Bern January, 2007.
- [40] J. Boehm, P.J. Mendes Cerveira. The impact of tropospheric mapping functions based on numerical weather models on the determination of geodetic parameters [J]. GPS Solutions, 2006, 10 (3): 171-186.
- [41] Felipe G, Nievinski. Numerical Weather Models for Tropospheric Mitigation in Marine Kinematic GPS: a Daylong Analysis [J]. Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Canada.
- [42] Thomas Hobiger, Seiichi Shimada. Improving GPS positioning estimates during extreme weather situations by the help of fine-mesh numerical weather models [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2010, 72:262-270.
- [43] Pany T, Pesec P. Elimination of tropospheric path delays in GPS observation with the ECMWF numerical weather model [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 2001, 26(6-8):487-492.
- [44] Balsamo G. Evaluation of ERA-Interim and ERA-Interim-GPCP-rescaled precipitation over the USA[R]. ERA report series, 5, 2010.
- [45] Szczypta1 C, et al. Verification of the new ECMWF ERA-Interim reanalysis over France [J]. Earth System Science, 2011, 15: 647 -666.
- [46] 陈钦明, 宋淑丽, 朱文耀. 亚洲地区ECMWF/NCEP资料计算ZTD的精度分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(5):1541-1548, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.011.
- [47] 马志泉. 用中国地区ERA-Interim资料计算ZTD和ZWD的精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(2):100-104.
- [48] <http://apps.ecmwf.int/>
- [49] Russ Rew, Glenn Davis, Steve Emmerson, Harvery Davies. The NetCDF Users Guide [M]. 2011.
- [50] Paul Berrisford, Dick Dee, Paul Poli, Keith Fielding. The ERA-Interim archive Version 2.0[M]. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2011.
- [51] 但玻, 冯汉中. ECMWF 0.25*0.25 经纬网格模式资料处理及软件实现[J]. 高原山地气象研究, 2013, 33(3):92-96.
- [52] <http://www.ecmwf.int/en/why-do-my-netcdf-data-only-contain-integers>
- [53] <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf>
- [54] 刘峰, 刘娟, 丽萍, 林智. 基于MATLAB实现3种气象数据的读取和绘图[J]. 广东气象, 2007, 29(4):45-47.
- [55] 卓艳红, 杨春涛. 儒略日、格里高利历和农历日期的互换[J]. 中国宇航学会计量与测试专业委员会 2006, 103-108.
- [56] Vahab Nafisi. Comparison of Ray-Tracing Packages for Troposphere Delays [J]. IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing. 2012, 50 (2):469-480.
- [57] <http://www.ecmwf.int/en/geopotential-defined-units-m2/s2-both-pressure-levels-and-surface-orography-how-can-height-metres>
- [58] F. Nievinski, Ray-tracing options to mitigate the neutral atmosphere delay in GPS [J]. Geodesy Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton,

- Canada, 2009, 262: 232.
- [59] 陈俊平. 上海天文台陆态网络数据分析中心.
- [60] Johannes Böhm, Robert Heinkelmann. A Global Model of Pressure and Temperature for Geodetic Applications [M]. Journal of Geodesy, doi: 10.1007/s00190-007-01353.
- [61] 王穗辉. 误差理论与测量平差[M]. 同济大学出版社, 2010.
- [62] Yan H j, Ping J S. The generator function method of the tropospheric refraction corrections[J]. The Astronomical Journal, 1995, 110: 934-939.

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

陈猛, 男, 1990 年 1 月生。

2013 年 6 月毕业于辽宁工程技术大学测绘工程专业获学士学位。

2013 年 9 月进入同济大学攻读硕士学位。

已发表论文:

[1] 陈猛,陈俊平,胡丛玮.对流层模型的评估及其在精密单点定位中的应用[J].大地测量与地球动力学, 2016, 36(3).

已录用论文:

[1] 陈猛,陈俊平,胡丛玮.气象数值模型应用于 GNSS 精密单点定位[J].第七届导航学术年会.2016.