



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

上海地区 GNSS 电离层模型研究

姓 名：张泽峰

学 号：1335468

所在院系：测绘与地理信息学院

学科门类：测绘科学与技术

学科专业：大地测量学与测量工程

指导教师：伍吉仓 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

Study of Shanghai Regional Ionospheric VTEC Model

Candidate: Zefeng ZHANG

Student Number: 1335468

School/Department: College of Surveying and
Geo-informatic

Discipline: Science and Technology of Survey

Major: Geodesy and Surveying Engineering

Supervisor: Prof. Jicang WU

Prof. Juping CHEN

Mar, 2016

上海地区GNSS电离层模型研究

张泽峰

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；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

电离层延迟误差是 GNSS 测量、导航和定位中的一项主要误差源。对于目前应用广泛的广域差分系统和区域增强系统的用户以及大量单频接收机用户而言,构建高精度电离层模型以精确改正电离层延迟仍是十分迫切的需求。目前 IGS 国际电离层工作组分析中心 (Ionosphere Associate Analysis Centers, IAACs) 已为用户提供全球电离层总电子含量 (Total Electron Content, TEC) 时空变化信息的服务。然而全球电离层 TEC 模型用于局域电离层研究时受到时空分辨率低的制约,限制了其建模精度,因此有必要发展和改进现有的电离层模型,使其具有局部最优特性。

本文建立了高精度的中国区域电离层 TEC 球冠谐模型与上海地区电离层 TEC 多项式多站与单站模型,并提出了基于单频 GNSS 数据解算电离层 TEC 的方案。具体研究内容如下:

1. 推导了联合 GNSS 伪距与相位观测值获得高精度 TEC 的公式,推导了基于单频 GNSS 数据解算电离层 TEC 的公式;
2. 概括了常用的几种全球/区域/局部电离层数学模型,评述了目前常用的电离层模型特点及其各自的使用范围;
3. 研究了基于单站数据的接收机硬件延迟估算方法:基于多项式模型的硬件延迟估算方法、基于“VTEC 标准差之和最小”条件的硬件延迟估算方法;
4. 利用 2013 年全年中国陆态网数据建立了中国区域球冠谐电离层 TEC 模型。数据处理的结果表明该模型具有较高的拟合精度,拟合残差均值为-0.01 TECU;并利用建立的模型研究了磁暴期间中国区域上空的电离层 TEC 的变化趋势;与电离层电子探测仪的实测数据比较,进一步验证了模型的正确性;
5. 利用上海 CORS 网观测数据分别建立了多站电离层 TEC 多项式模型与单站电离层 TEC 多项式模型,并利用同济大学 GNSS 测站 TJA1 分别验证了模型的正确性;并利用 TJA1 站 BDS 数据,联合 GPS/BDS 数据建立了上海区域电离层 TEC 模型,与多项式电离层模型和 GIM 有较好的一致性;
6. 给出了基于单频 GNSS 数据解算电离层 TEC 的方案,利用同济大学 GNSS 测站 TJA1 验证了其合理性,除了午后时间,该算法均可有效估算单频接收机的电离层延迟值。

关键词: GNSS, TEC, 区域电离层模型, 硬件延迟, 单频单站

Abstract

Ionospheric delay is one of the major error sources in GNSS measurements, navigation and positioning. For the current widely used Wide Area Augmented System(WAAS) and Regional Augmentation System(RAAS) as well as lots of single-frequency receiver users, it is still very urgent needs to build high-precision ionospheric model to accurately correct the ionospheric delay. At present, IAACs has provided users with information service of global ionospheric TEC spatio-temporal changes. However, by the global ionospheric TEC model for local ionospheric research at low spatial and temporal resolution of the constraints limiting its modeling accuracy, it is necessary to develop and improve existing ionospheric model and make it have a local optimum characteristics.

This paper has done research on the several conventional regional ionospheric model, and the establishment of a high-precision Chinese Regional Ionospheric TEC spherical cap harmonic model and the Shanghai region ionosphere TEC polynomial multi-station and single station model, and proposed solver ionosphere TEC program based on single-frequency GNSS data. The content of this thesis is as follows:

1. Derivation of combining GNSS pseudorange with phase measurements to obtain the absolute value of precision TEC formula; derivation of ionospheric TEC equation based on single- frequency GNSS data;
2. Summarizing several common global / regional / local ionospheric model and comparing the currently used ionospheric model characteristics and their respective scope;
3. Study of methods for estimation of single station Differential Code Biases(DCB) by GNSS observations: Polynomial Model of VTEC Method; Minimization of Standard Deviation of VTEC Method;
4. Establishment of Chinese Regional Ionospheric TEC spherical cap harmonic model of residuals mean -0.01 TECU by using the data of Crustal Movement Observation Network of China in 2013; study of the trends of ionospheric TEC over the China region during the storms using the established model; comparison with the measured data ionospheric electron detector further verifying the correctness of the model;
5. Establishment of the Shanghai region ionospheric TEC polynomial multi-station and single station model by using the data of Shanghai CORS network

and verifying the correctness of the model by utilizing the Tongji University GNSS stations TJA1; establishment of the Shanghai region ionospheric TEC model combined with GPS / BDS data, which has a good consistency with polynomial ionosphere model and GIM;

6. Proposing solver ionosphere TEC program based on single-frequency TJA1 GNSS data, which could effectively estimate the value of a single-frequency ionospheric delay receiver in addition to the afternoon time.

Key Words: GNSS, TEC, regional ionospheric model, DCB, single-frequency and single station

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 电离层研究及观测发展.....	2
1.2.2 基于 GNSS 的电离层研究现状及其发展	2
1.2.3 电离层预报的国内外进展.....	4
1.3 本文的研究意义与研究内容.....	5
第 2 章 GNSS 研究电离层基本原理与方法	7
2.1 电离层的基本特性.....	7
2.1.1 地球大气层结构.....	7
2.1.2 电离层的形成与分层结构.....	8
2.1.3 电离层时空变化特征.....	8
2.1.4 电离层对导航信号的影响.....	10
2.2 基于 GNSS 确定电离层 TEC 的方法.....	11
2.2.1 GNSS 基本观测量	11
2.2.2 观测量的线性组合.....	12
2.2.3 数据预处理.....	13
2.2.4 基于双频 GNSS 观测数据确定电离层 TEC 的基本原理.....	14
2.2.5 基于多频 GNSS 观测数据确定电离层 TEC 的方法.....	17
2.2.6 基于单频 GNSS 观测数据确定电离层 TEC 的方法.....	17
2.3 投影函数计算模型.....	19
2.3.1 电离层单层假设.....	19
2.3.2 投影函数.....	20
2.4 硬件延迟估算方法.....	21
2.4.1 硬件延迟参数定义及处理方法.....	21
2.4.2 GPS 卫星 TGD 参数解算方法	21
2.4.3 接收机硬件延迟估算方法.....	22
2.5 GNSS 确定 TEC 的误差分析.....	23
2.5.1 观测数据误差.....	23
2.5.2 硬件延迟误差.....	23
2.5.3 电离层单层模型高度不确定误差.....	24
2.5.4 投影函数误差.....	24

2.6 本章小结.....	25
第 3 章 电离层 TEC 建模的基本理论与方法.....	26
3.1 电离层坐标参考系.....	26
3.2 电离层建模常用数学函数.....	26
3.2.1 经验电离层模型.....	27
3.2.2 广播星历电离层延迟改正模型.....	27
3.2.3 利用 GNSS 双频观测资料建立的 VTEC 模型.....	29
3.2.4 电离层层析模型.....	33
3.3 格网内插模型.....	34
3.3.1 距离反比加权建模.....	34
3.3.2 IDWK 格网模型.....	35
3.3.3 克里格法 (Kriging)	35
3.4 电离层模型修正方法效果评估.....	37
3.5 本章小结.....	37
第 4 章 基于单站数据的接收机硬件延迟估算方法.....	38
4.1 硬件延迟估算方法.....	38
4.1.1 基于多项式模型的硬件延迟估算方法.....	38
4.1.2 基于“VTEC 标准差之和最小”条件的硬件延迟估算方法.....	39
4.2 计算结果及分析.....	40
4.2.1 数据使用.....	40
4.2.2 结果分析.....	41
4.3 本章小结.....	46
第 5 章 区域电离层模型研究.....	47
5.1 中国区域电离层模型建立.....	47
5.1.1 建模过程.....	47
5.1.2 拟合精度分析.....	49
5.1.3 与电离层测高仪的实测数据比较.....	56
5.2 上海市区域电离层模型建立.....	58
5.2.1 模型构建原理.....	59
5.2.2 模型定阶.....	61
5.2.3 穿刺点分布.....	62
5.2.4 多站电离层模型.....	64
5.2.5 单站电离层模型.....	65
5.2.6 利用单站 GPS/BDS 数据建立上海区域多项式电离层模型	67
5.3 基于 GPS 单频 L_1 数据解算电离层 TEC	68
5.3.1 解算步骤.....	68
5.3.2 解算实例分析.....	69
5.4 本章小结.....	70

第 6 章 总结与展望.....	71
6.1 总结.....	71
6.2 展望.....	71
致谢.....	73
参考文献.....	74
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	78

第1章 绪论

1.1 研究背景

根据电气和电子工程师协会（IEEE）的定义，地球电离层是离地面 60 km 以上到磁层顶之间的整个大气空间，在那里“存在着大量的自由电子足以影响无线电波的传播”。电离层作为一种传播介质造成不同波段的无线电波在电离层中被反射、折射、散射和吸收，从而对通信和广播造成一定程度的影响^[1,2,3]。

由电离层引起的 GNSS（Global Navigation Satellite Systems）导航信号时延可达数米甚至百米级，会严重削弱卫星导航定位的精度和准确度，是卫星导航定位中的主要误差源之一^[1,2,3]。通常可以利用电离层延迟效应与信号频率的平方成反比的关系，采用双频或多频组合方式能有效地消除这种影响。但是对于单频接收机用户而言，就需要采用有效的电离层延迟改正模型来削弱该误差源的影响。目前，利用 GNSS 信号对电离层的研究主要集中在三个方面^[4]：（1）GNSS 信号的电离层延迟改正，以削弱或消除电离层延迟对定位结果的影响；（2）测量 GNSS 信号传播路径上的电离层总电子含量（Total Electron Content, TEC），建立模型反演电离层的二维或三维结构及时空分布特性；（3）利用 GNSS 信号探测与预报电离层各种活动现象，并结合电离层物理理论进行解释与推演。构建电离层改正模型，一方面可供单频接收机用户进行电离层误差修正，另一方面有利于研究电离层的结构和变化特征。

世界范围内各种不同尺度、密度的连续运行GNSS跟踪站网络为电离层局部、区域以及全球特性的研究提供了高精度、高时空分辨率的数据源和研究平台。随着GPS的蓬勃发展，在地面建立相应的永久性连续运行参考站网络（Continuously Operating Reference Stations, CORS）已成为常态，当前世界上许多国家都建立或正在建立CORS系统。CORS系统不仅可在城市区域向大量用户提供高精度、高可靠性、实时的定位信息，还可以全自动、全天候、实时提供高精度空间和时间信息，以及高精度、高时空分辨率的电离层电子含量等大气物理信息。CORS系统的这一特点为我们进行电离层结构反演、监测和预报的研究提供了数据保证，同时电离层的预报也能为CORS系统提供高精度、实时定位信息服务。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 电离层研究及观测发展

人类对电离层的发现和初步研究,可以追溯到十九世纪对地磁场的观测和无线电科学的兴起。1902年Kennelly和Heaviside独立地指出高层大气中的导电层反射无线电波是跨越大西洋的无线电通信成功的原因,自此以后的一个时期内,电离层被称为“Kennelly-Heaviside”层。直到1926年, Watson首次引入了“Ionosphere”这个术语。1924年, Appleton等通过对无线电波回波的接收,证实了电离层的存在。1925年, Breit和Tuve发明的电离层垂直探测仪,是地面探测电离层的基本设备,为后来积累了大量的实测资料,为电离层研究起了重要的作用。Hulburt (1928)和Chapman (1931)提出了关于电离层形成的理论,这被认为是现代电离层理论的起点。1932年, Appleton建立了完整的磁离子理论,并提出了计算电波折射指数的Appleton-Hatree公式,为现代电离层折射延迟改正的应用奠定了基础。第二次世界大战期间及战后,由于世界各大国在政治、经济和军事上的需要,电离层及无线电波传播的研究得到了空前的发展,其应用研究的成果逐渐走入了人类的日常生活^[5]。

电离层探测是研究电离层相关物理参数的基础,国内外学者以往采用电离层测高仪、雷达等技术对电离层进行探测,但是由于探测设备的高额费用以及地理范围的限制,难以构建大范围的电离层观测网络。全球定位系统的出现,为监测全球电离层时空结构提供了前所未有的发展机遇。利用GNSS测量电离层TEC成为近年来电离层探测的主要手段之一。

1.2.2 基于 GNSS 的电离层研究现状及其发展

电离层延迟误差是影响 GNSS 测量、导航、定位精度的主要误差源之一,同时也是制约精密单点定位用户的收敛速度的主要原因之一^[1,6,7]。基于 GNSS 的电离层监测与建模一直是国内外大地测量领域 GNSS 电离层研究的热点,自 20 世纪 90 年代以来,利用 GPS 来监测电离层 TEC 的时空变化已成为一种比较理想的方法。

1987 年, Klobuchar 在电离层为水平分层且电子浓度沿经纬度的梯度平缓光滑的前提下,提出了一种计算简便,且能有效改正 GPS 单频接收机电离层影响的方法,即 Klobuchar 模型修正法,这个模型能够修正 50%~60%的电离层延迟^[6]。1988 年, Lanyi 等在地理框架下采用 3 阶多项式模型拟合 GPS 观测到的原始电离层信息,与无线电信标结果进行对比,证明了 GPS 实现电离层 TEC 监测的可

行性^[8]。1991年, Coco 和 Coker 等利用类似方法基于单站数据建立多项式模型分析卫星和接收机硬件延迟偏差之和的变化^[9]。1993年美国喷气推进实验室的 Mannucci 提出了利用三角格网内插 (TRiangular Interpolation, TRIN) 建立全球电离层模型的方法, 并利用全球分布的数十个 GPS 监测站的观测数据实现了全球电离层延迟建模^[10]。同年, Wilson 在此基础上对比分析了利用球谐函数与三角格网内插方法构建全球电离层模型之间的区别及其精度差异, 并估计差分码偏差 (differential code bias, DCB)^[11]。1994年, Sardon 利用单站模型估计硬件延迟偏差信息, 估计结果卫星的硬件延迟偏差在一年内的变化小于 1 ns^[12]。1997年, Chao 基于 Klobuchar 模型详细论述了距离加权格网电离层模型 (Inverted Distant Weight, IDW) 在广域增强系统 (Wide Area Augmentation System, WAAS) 中的区域电离层延迟改正方法^[13]。1999年, Schaer 详细论述了利用球谐函数模型进行全球电离层监测与建模的原理和方法^[14]。

IGS 国际电离层工作组分析中心 (Ionosphere Associate Analysis Centers, IAACs) 包括欧洲定轨中心 (Center for Orbit determination in Europe, CODE), 美国喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL), 欧洲空间操作中心 (European Space Operations Center, ESOC), 加泰罗尼亚理工大学 (Technical University of Catalonia, UPC), 通过对各分析中心提供的电离层 TEC 格网进行加权平均得到最终的电离层 TEC 格网, 并通过 <ftp.cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/> 进行发布, 从 1998 年开始至今已覆盖一个太阳周期, 经研究表明 IGS 全球电离层图是值得信赖的电离层信息源^[15]。CODE 和 ESOC/ESA 采用 15*15 阶球谐函数描述全球电离层 TEC, 时间分辨率为 2 小时, 每天估计 13 组球谐系数, 前者利用 GPS 和 GLONASS 双系统观测数据, 采用最小二乘整体估计, 同步估计 3 天的球谐函数模型系数, 而后者采用逐时段滤波估计方法^[14,16]; 此外, ESA 提出了基于 Chapman 函数的三维电离层建模方法, 能够有效融合电离层测高仪、GPS 掩星电离层剖面等多源电离层观测数据^[16]。JPL 采用三角格网/双三次样条内插方法, 全球分为 1280 个格网, 时间分辨率为 15 分钟^[17]。UPC 在电离层双层假设下, 根据当地时间、纬度和高度将电离层划分为 72*9*2 个网格从而对每个测站独立地建立层析模型; 另外该中心在电离层单层假设下, 基于 Kriging 内插方法提出了一种新的全球电离层 TEC 格网的计算方法, 已应用于全球电离层格网产品建立中^[15]。当前 IGS 电离层工作组正在计划对全球电离层 TEC 再处理包括顾及电离层高阶项等以进一步提高电离层产品的精度和可靠性^[18]。

此外, 近年来, 国内学者利用 GNSS 研究电离层也做了大量的工作, 取得了一系列有自己特色的研究成果。刘经南院士等基于中国的广域差分系统论述了利用多项式建立区域电离层模型的方法^[19]; 许才军等通过利用梯度模型拟合区域

电离层 TEC 并同时求解硬件延迟偏差^[20]；袁运斌提出了消除 GPS 观测中卫星和测站的仪器偏差引起的系统误差的静态实时改正方案^[21]；常青等基于卡尔曼滤波理论计算硬件延迟方面也取得很好效果^[22,23]；张小红、李征航等探讨了利用不同的 GPS 观测值和不同的计算方法建立中国区域性电离层模型，并进行了相关的精度分析^[24]；袁运斌提出了站际分区（Different Areas for Different Stations, DADS）构想，通过有效顾及电离层的局部特性，改善了构建大规模高精度电离层模型的精度，并建立了中国高精度格网电离层模型^[1]；章红平基于区域多项式模型建立了中国区域电离层模型，并分析了中国区域电离层 TEC 的变化特性^[7]；章红平、柳景斌等学者对不同数学函数模型之间的差异及电离层建模的精度进行了详细对比与分析^[25,26]；柳景斌利用球冠谐函数建立了区域电离层模型^[4]。另外，根据电离层 TEC 的变化与太阳活动密切相关的特性，袁运斌等提出了基于蚀因子的电离层建模方法，将多项式与广义三角级数函数模型进行了有机结合^[27]。目前，国内各单位如武汉大学、上海天文台、空间科学与应用研究中心、中科院测地所等对电离层监测与建模都有了一定的研究成果。2016 年 2 月 8 日-12 日，武汉大学卫星导航定位技术研究中心和中科院测地所与光电院被正式接纳为 IGS 电离层分析中心，这为我国今后开展后续工作及充分挖掘北斗系统对电离层监测的贡献提供了基础。

同时，利用地面 GNSS 接收站网，实现对大范围区域的电离层空间的断层扫描可反演电离层电子密度，从而得到电离层电子密度的空间分布图像，不仅能反映出电离层的水平变化，还能较为准确地反映电离层的垂直变化^[28,29]。而 GNSS 无线电掩星技术作为一门新的应用始于 20 世纪 90 年代初，目的是利用 GNSS 对地球大气进行临边探测，从而反演大气中性层和电离层剖面，该技术具备全球覆盖、全天候、高精度、高分辨率、低成本等优点^[30]。

1.2.3 电离层预报的国内外进展

电离层预报一直是电离层研究中的重要研究领域之一。目前，常见的电离层预报模型有 Klobuchar 模型、Bent 模型、IRI 模型等。GPS 单频接收机一般采用 Klobuchar 模型，但在一天内只能预报出电子含量的 50%~60%，且对夜间的预报具有明显的不合理性^[70]。为了提高定位、导航的精度，需对电离层电子含量进行准确的预报，并从长期预报向短期预报和实时预报发展。电离层短期预报是时间尺度为小时和天的电离层变化的预报，在电离层短期预报方面，针对 f_oF_2 的预报开展的比较早，主要有自相关分析法^[71]、多元线性回归法^[72]、人工神经网络法^[73]、暴时电离层经验修正模型^[74]、区域电离层预报的插值法^[75]、等效太阳黑子数法^[76]、电离层同化模型^[77]等。

目前在国际上开展电离层预报服务的主要有欧洲、澳大利亚、美国等国家和地区。（1）欧洲：由欧洲20个国家合作的COST251计划所完成，给出了欧洲地区未来24小时内 f_oF2 、 $M(3000)F2$ 和TEC的短期预报值（整点），以等值线数字地图的形式直观的给出，作为比较，在事后还给出了这一地区23个电离层垂测站的实测值^[72]。（2）澳大利亚：由澳大利亚空间天气局IPS（Radio and Space Services）负责发布，依据电离层当前的观测数据，给出了下一个小时某一地区的通讯频率的区域预报值，每小时更新一次，同时还发布根据电离层实测数据所换算得到的当日T指数，并给出它与预测的T指数的月中值之差^[78]。（3）美国：主要有大气海洋局空间环境中心（NOAASEC）发布电离层的近实时观测值和预报值，发布暴时电离层经验模式，给出了全球范围的电离层 f_oF2 修正因子^[76]。

在我国，电离层建模和预报一直是电离层研究的一个重点，王世凯等在电离层 f_oF2 区域重构中将国际参考电离层作为背景电离层^[79]；刘瑞源等将自相关分析法和克里格法应用于中国地区电离层 f_oF2 短期预报^[80]；毛田等提出了用经验正交模函数法进行中国地区电离层TEC现报^[63]；张小红等人在充分考虑乘积性季节模型的情况下，采用自回归移动平均模型（autoregressive integrated moving average, ARIMA）对电离层TEC值进行预报^[81]；李志刚提出了一种适用于全球的电离层电子含量预报方法^[82]；中科院地质与地球物理研究所（IGGCAS）开发了首个覆盖全境的TEC现报系统^[83]。总的来说，在我国TEC预报关键技术的研究尚处在探索阶段，尚未形成适用于我国电离层TEC预报方法。

1.3 本文的研究意义与研究内容

由电离层引起的 GNSS 导航信号时延可达数米甚至百米级，会严重削弱卫星导航定位的精度和准确度，是卫星导航定位中的主要误差源之一。对于目前应用广泛的广域差分系统和区域增强系统的用户以及大量单频接收机用户而言，构建高精度电离层模型以精确改正电离层延迟仍是十分迫切的需求。IGS 电离层工作组通过整体拟合大范围的 GNSS 观测资料，确定电离层模型参数。尽管全球电离层 TEC 模型能够提供 TEC 的大尺度变化和全球总体形态特征，然而用于局域电离层研究时受到时空分辨率低的制约，限制了其建模精度，因此有必要发展和改进现有的电离层模型，使其具有局部最优特性。本文建立了高精度的中国区域电离层 TEC 球冠谐模型与上海地区电离层 TEC 多项式多站与单站模型，并提出了基于单频 GNSS 数据解算电离层 TEC 的方案。

全文内容安排如下：

第一章：介绍研究电离层的背景以及电离层观测的发展历史，总结国内外利

用 GNSS 研究电离层的进展情况，并简要介绍本文的研究意义和内容安排。

第二章：介绍利用 GNSS 观测数据获取高精度电离层 TEC 的基本原理与方法。包括联合 GNSS 伪距与相位观测值获得高精度 TEC，推导基于单频 GNSS 数据解算电离层 TEC 的公式；电离层单层模型、穿刺点的计算以及投影函数的选择问题；卫星硬件延迟与接收机硬件延迟的估算方法。

第三章：介绍采用 GNSS 观测数据建立电离层模型的步骤，概括常用几种全球/区域/局部电离层数学模型，并评述其模型特点及其各自的使用范围。

第四章：研究基于单站数据的接收机硬件延迟估算方法：基于多项式模型的硬件延迟估算方法、基于“VTEC 标准差之和最小”条件的硬件延迟估算方法，为后续建立高精度的区域电离层 TEC 模型奠定基础。

第五章：（1）利用中国陆态网数据建立中国区域球冠谐电离层 TEC 模型，验证其拟合精度；并利用建立的模型研究磁暴期间中国区域上空的电离层 TEC 的变化趋势；与电离层电子探测仪的实测数据比较，进一步验证模型的正确性。

（2）利用上海 CORS 网观测数据分别建立多站电离层 TEC 多项式模型与单站电离层 TEC 多项式模型，并利用同济大学 GNSS 测站 TJA1 分别验证模型的正确性；利用 TJA1 站 BDS 数据，联合 GPS/BDS 数据建立上海区域电离层 TEC 模型，与多项式电离层模型和 GIM 模型比较验证其合理性。（3）给出基于单频 GNSS 数据解算电离层 TEC 的方案，利用同济大学 GNSS 测站 TJA1 验证其合理性。

第六章：总结本文的研究内容与成果，并指出本文的不足与下一步研究计划。

第 2 章 GNSS 研究电离层基本原理与方法

2.1 电离层的基本特性

2.1.1 地球大气层结构

大量观测资料的分析表明，地球大气的温度、密度、成分、压力和地磁特性等在垂直方向上有很大差异，大气层垂直方向上的差异导致其对无线电波的传播影响也显著不同^[31]。按照不同的标准，对大气层有着不同的分层方法。比如，按照温度随高度的变化，由地表向上可依次分为对流层、平流层、中间层和热层；按组成状况可分为均质层和非均质层；按电磁特性的不同可分为中性层、电离层和磁层。通常，由地表向上到 60 km 的高度为中性层，其内部大气对 GPS 信号的延迟主要表现为对流层延迟，对流层为非色散介质，其对 GPS 信号的延迟与信号的频率无关。距离地表 60~2000 km 的高度范围内的大气层为电离层，其内部分子由于太阳辐射的影响处于电离状态，含有大量的自由电子和离子，对电磁波传播有着显著地影响，这种影响主要集中在 60~1000 km 的高度范围内，特别是在 350 km 高度附近的区域。电离层向上为磁层，一直延伸到数万甚至数十万千米的高空。图 2.1 为地球大气层分布。

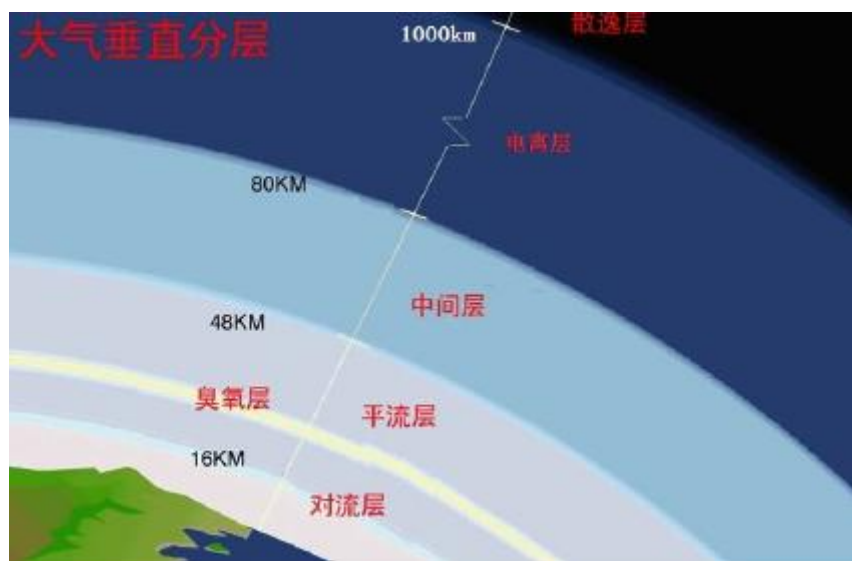


图 2.1 地球大气层分布 (<http://www.gipp.org.cn/>)

2.1.2 电离层的形成与分层结构

电离层是处于 60 km 以上的地球大气在来自太阳辐射和宇宙射线的作用下形成电离状态的区域^[14,32]。太阳辐射是电离层电离的最主要来源，太阳辐射对不同高度不同成分的空气分子电离造成电离层不同的分层：

D 层：D 层是电离层最低的一层，离地球表面 60~90 km。这个层里离子对自由电子的捕获率比较高，因此电离效应比较低，从而它对高频无线电波没有影响。10 MHz 以下的电波会被 D 层吸收，随着电波频率的增高这个吸收率下降。夜间这个吸收率最低，中午最高。日落后这个层减弱非常大。

E 层：E 层是中层，在地面上 90~140 km，其离化源是 EUV 辐射和 X 射线。这个层只能反射频率低于 10 MHz 的电波，对频率高于 10 MHz 的电波它有吸收的作用。日间 E 层的变化是非常规则的，而夜间变化稍大一些。夜间，电离层 E 层电子密度的降低幅度超过一个数量级。E 层最大电子密度约在 110 km 高度附近。

F 层：F 层是电离层中持久存在、电子密度最大的层次，其高度范围在 140 km 以上。F 层对于电波传播来说是最重要的层。夜间 F 层合并为一个层，白天分为 F1 和 F2 两个层。在白天 F 层是电离层反射率最高的层。电离层的层次结构及电子密度变化情况如图 2.2 所示。

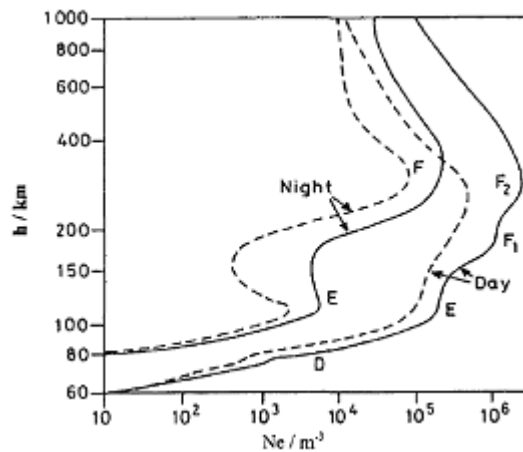


图 2.2 电子密度的高度剖面图

（图中实线代表太阳黑子活动最高年，虚线代表太阳活动最低年）

（http://roma2.rm.ingv.it/en/research_areas/4/ionosphere）

2.1.3 电离层时空变化特征

实际上，上述电离层分层结构只是对电离层状态的一种比较理想地描述，随着不同时间和空间尺度以及不同程度的太阳活动，强烈的太阳扰动而产生的剧烈变化将直接影响着电离层。

空间域上的变化特征：地球上不同地理位置的大气成分、密度以及受到的太阳辐射强度的差异会导致电离层电子密度在空间分布上表现出不均匀的现象，产生一定的变化特征，如赤道异常等^[31]。赤道异常，即磁赤道南北两边 15° 至 20° 的地方在白天会出现电离层电子含量分别存在一个极大值的现象。地磁北纬电子密度峰值大于南纬电子密度峰值，且北纬电子密度分布差异较大，而南纬电子密度分布相对均匀，如图 2.3 所示。此外电离层随纬度的变化在地磁纬度框架下表现的比较明显，因为在近地空间，电离层电子、离子的运动主要受地球磁场控制^[31,34]。

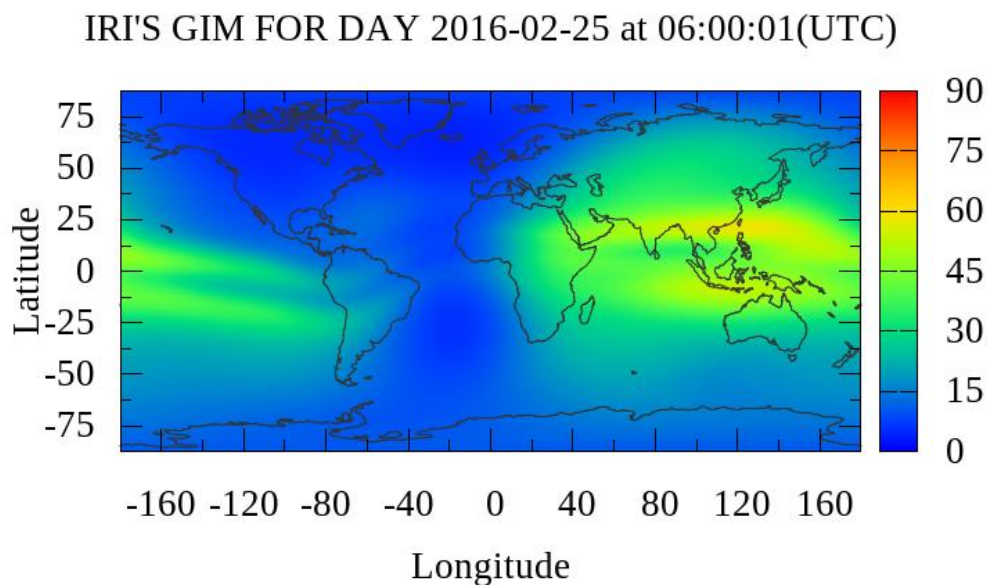


图 2.3 全球电离层 TEC 分布
(<http://www.sis.pitt.edu/iri2012/contact.html>)

时间域上的变化特征：太阳辐射是电离层电离的最主要来源，因此电离层 TEC 表现出类似于太阳变化的周期特性，如：典型的周日变化、准 27 天变化、半年度变化、年度变化、准 11 年（太阳活动周期）变化等。周日变化主要表现为正午时刻太阳高度最高，太阳辐射增加，对整个电离层的电离作用增强，所以电离层延迟会出现上升，而随着时间推移，太阳辐射不断降低，电离层延迟也不断下降。电离层 TEC 也随季节发生变化，夏季由于阳光直射中纬度区域，白天 F2 层电离度加强，但由于季节性气流的影响，分子对单原子的比例增加，造成离子的捕获率增高，甚至强于电离度的增高，从而造成夏季白天 F2 层电子密度峰值比冬季低，这个现象被称作冬季异常。在北半球冬季异常每年都会出现，而太阳活动低年里南半球没有冬季异常^[31,34]。

2.1.4 电离层对导航信号的影响

电磁波信号如 GNSS 卫星所发射的信号在穿过电离层时,其传播速度会发生变化,变化程度主要取决于电离层中的电子密度和信号频率的大小,其传播路径也会略微弯曲,从而使得利用信号传播时间乘上真空中的光速所得的理论距离不等于从信号源至接收机的几何距离。电离层对 GNSS 信号的折射效应产生的时间延迟,称为电离层延迟(时延)。对 GNSS 测量来说,尤其对于单频接收机用户,电离层延迟效应是影响导航定位精度和准确度的主要误差源之一,特别是 2000 年 5 月美国取消 SA 政策后,电离层延迟已经成为导航定位中最显著的误差源。根据实际资料的分析可以看出,对于 GNSS 测量来说,这种误差沿天顶方向可达十几米,在高度角为 5° 时可超过 50 m,而沿水平方向最大可达 150 m,因而必须仔细地加以改正^[5]。

电磁波的相位是以相速度在电离层中传播,而不同频率的一组电磁波信号作为一个整体在电离层中以群速度传播。根据 A-H (Appleton-Hartree) 公式,在忽略高阶项的条件下,得到电离层的相折射率为^[14,33]:

$$n_p = 1 - \frac{k}{f^2}, \quad k = 40.3Ne(Hz^2m^3) \quad (2.1)$$

由上式,可求得码观测和载波相位观测的电离层延迟。根据电离层的性质,它对码观测和载波相位观测的影响绝对值相同,符号相反。由 Fermat 原理出发,测量距离 s 可表示为^[32]:

$$s = \int n ds \quad (2.2)$$

在真空中的距离为:

$$s_0 = \int ds \quad (2.3)$$

则电离层折射改正为 $s - s_0$ 。

对载波相位观测及伪距观测有:

$$\Delta_{ion,ph} = -\int \frac{k}{f^2} ds = -\Delta d_{ion} \quad (2.4)$$

$$\Delta_{ion,gr} = \int \frac{k}{f^2} ds = \Delta d_{ion} \quad (2.5)$$

观测路径上总电子含量 TEC 可由下式计算:

$$TEC = \int N ds \quad (2.6)$$

则电离层延迟改正量为:

$$\Delta d_{ion} = \int \frac{40.3Ne}{f^2} ds = \frac{40.3}{f^2} TEC \quad (2.7)$$

式中，信号频率 f 以 Hz 为单位，TEC 的单位是“电子数/米²”，通常将 10^{16} 个电子/m² 称为 1 TECU。对于确定的电磁波频率来说，则 TEC 为唯一的独立变量。

GPS 工作频率 $f_1 = 1.57542GHz$ ， $f_2 = 1.22760GHz$ ，归算到各个观测值，则有：

$$\left. \begin{aligned} \Delta\Phi_{1,ion} &= -0.162292 \cdot TEC \\ \Delta\Phi_{2,ion} &= -0.267286 \cdot TEC \\ \Delta P_{1,ion} &= 0.162292 \cdot TEC \\ \Delta P_{2,ion} &= 0.267286 \cdot TEC \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

2.2 基于 GNSS 确定电离层 TEC 的方法

2.2.1 GNSS 基本观测量

GNSS 观测量是通过卫星广播信号中的测距码信息和载波来获取的。实际观测中，测距码和载波相位观测量中不可避免地含有卫星轨道误差、接收机钟差、对流层时延以及电离层误差等各类误差的影响，因此距离测量值被称为“伪距”。码伪距和相位伪距的观测方程如下（其中电离层误差只考虑其一阶项的影响）^[33]：

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_1 \Phi_{i,1}^k &= \rho_i^k + T_i^k + c(dt_i - dt_k) + \Delta\Phi_{1,ion} + \lambda_1 N_{i,1}^k + b^{k,1} + b_{i,1} + m_{i,1}^k + \varepsilon_{i,1}^k \\ \lambda_2 \Phi_{i,2}^k &= \rho_i^k + T_i^k + c(dt_i - dt_k) + \Delta\Phi_{2,ion} + \lambda_2 N_{i,2}^k + b^{k,2} + b_{i,2} + m_{i,2}^k + \varepsilon_{i,2}^k \end{aligned} \right. \quad (2.9)$$

$$\left\{ \begin{aligned} P_{i,1}^k &= \rho_i^k + T_i^k + c(dt_i - dt_k) + \Delta P_{1,ion} + B^{k,1} + B_{i,1} + M_{i,1}^k + e_{i,1}^k \\ P_{i,2}^k &= \rho_i^k + T_i^k + c(dt_i - dt_k) + \Delta P_{2,ion} + B^{k,2} + B_{i,2} + M_{i,2}^k + e_{i,2}^k \end{aligned} \right. \quad (2.10)$$

式中，下标 i 代表接收机、上标 k 代表卫星；1、2 代表 GPS 信号的两个不同的载频 L_1 和 L_2 ； λ 为相应载波的波长； N 为对应频率的整周模糊度； ρ 为 GPS 信号发射时刻卫星的位置与接收机天线接收卫星信号时刻的位置之间的几何距离； T_i^k 为对流层延迟； dt_i 、 dt_k 分别为接收机钟差与卫星钟差； B_i 、 B^k 为接收机和卫星伪距的硬件延迟； b_i 、 b^k 为接收机和卫星相位的硬件延迟； M 、 m 为多路径误差； c 为真空中的光速； ε 、 e 为观测噪声。

上式所示的观测方程是针对所有的卫星和接收机的，不同导航系统的卫星在实际处理中需要重新编号，使得不同的卫星具有不同的序号；由于接收机对应的钟差、硬件延迟等随导航系统不同也会产生变化，因此，对于多模接收机应按照导航系统的类型分别对接收机进行编号，钟差和硬件时延参数需要单独设置。另

外，对于频分多址的 GLONASS 卫星，除了同一轨道面上相对的两个卫星之外，其他卫星发射信号的频率是不同的^[32,34]。

2.2.2 观测量的线性组合

在 GNSS 研究和实际应用中，综合利用各种 GNSS 观测值的线性组合观测，会具有优于原始观测量的特性，以下是几种常用的线性组合观测^[33]：

(1) 无电离层组合 L_3

$$L_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2) \quad (2.11)$$

由于该组合基本上消除了电离层延迟误差，通常被称为“无电离层组合”。对于码测量也有类似组合：

$$P_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2) \quad (2.12)$$

(2) 电离层残差组合 L_4

$$L_4 = L_1 - L_2 \quad (2.13)$$

该组合也称为“无几何组合”或“宽巷组合”，与卫星轨道、卫星钟差、接收机钟差以及测站坐标无关，只含有电离层延迟和初始相位模糊度，可以用作评估电离层模型。对于伪距也有类似组合：

$$P_4 = P_1 - P_2 \quad (2.14)$$

(3) 宽巷线性组合观测 L_5

$$L_5 = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1 - f_2 L_2) \quad (2.15)$$

宽巷线性组合观测 L_5 在一定程度上削弱了电离层延迟的影响，且波长为 86 cm，因而常用于周跳探测与修复以及初始模糊度确定等方面。

(4) Melbourne-Wübbena组合 L_6

Melbourne-Wübbena线性组合，指利用载波 L_1 和 L_2 的相位观测值，以及码 P_1 和 P_2 观测值组合得到的观测量。该组合消除了电离层折射、对流层折射、几何误差以及钟差，因此常用于动态定位。该组合可表示为：

$$L_6 = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1 - f_2 L_2) - \frac{1}{f_1 + f_2} (f_1 P_1 + f_2 P_2) \quad (2.16)$$

总结各种组合观测量的特性，如表2.1所示：

表2.1 常用线性组合观测量及其特性

组合观测	描述	波 长 /cm	噪 声 (与 L_1 比例)	电离层误差 (与 L_1 比例)
L_1	基本载波相位	19	1.0	1.0
L_2	基本载波相位	24	1.0	1.6
L_3	电离层无关线性组合	0	3.0	0.0
L_4	几何无关线性组合	∞	1.4	0.6
L_5	宽巷线性组合	86	5.7	1.3
L_6	MW线性组合	86	0.7	0.0

2.2.3 数据预处理

数据预处理主要包括周跳的探测与处理,粗差的剔除和伪距的平滑。在利用GPS相位对伪距观测值进行平滑时,只有在相位数据不发生周跳的前提下,才能进行。如果发生了周跳,就只能对周跳发生以前和以后的观测数据分别进行平滑。

目前比较常用的周跳探测与修复方法主要有:多项式拟合法、差分法、线性拟合法、电离层组合法、星间差分或站间差分法,GAMIT、GIPSY 和 BERNESE 等软件中也提出了各自的周跳探测和修复方法^[33]。以往,GPS 观测值精度大约为 $\lambda/100$,随着接收机硬件的改进,目前的测距精度已经接近 $\lambda/1000$ 。换句话说,码伪距噪声水平降低到几个厘米。因此,利用双频 P 码伪距观测值来探测周跳是一种理想方法。下文介绍两种进行周跳检测与修复的原理与方法。

(1) 宽巷组合法:根据某一历元的双频 P 码伪距观测值 P_1 、 P_2 及载波相位观测值 φ_1 、 φ_2 即可求得宽巷组合观测值的整周模糊度:

$$N_w = \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} - (\varphi_1 - \varphi_2) \lambda_w \quad (2.17)$$

$$\lambda_w = c / (f_1 - f_2) \quad (2.18)$$

从第 1 个历元至第 i 个历元所求得的 i 个 N 的均值及其方差可用下列递推公式计算:

$$\bar{N}_w^i = \bar{N}_w^{i-1} + \frac{1}{i} (N_w^i - \bar{N}_w^{i-1}) \quad (2.19)$$

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i-1}^2 + \frac{1}{i} [(N_w^i - \bar{N}_w^{i-1})^2 - \sigma_{i-1}^2] \quad (2.20)$$

若根据第 i+1 个历元的双频观测资料求得的 N_w^{i+1} 与 $\bar{N}_w^i$ 之差的绝对值 $|N_w^{i+1} - \bar{N}_w^i|$ 满足下列方程:

$$|N_w^{i+1} - \bar{N}_w^i| < 4\sigma_i \quad (2.21)$$

就认为第 $i+1$ 个历元的载波相位观测值中无周跳。若 $|N_w^{i+1} - \bar{N}_w^i|$ 不满足上式 (2.21)，则说明第 $i+1$ 个历元出现了周跳或粗差。然后根据第 $i+2$ 个历元的双频观测资料求得的 N_w^{i+2} 与 $\bar{N}_w^{i+1}$ 之差的绝对值 $|N_w^{i+2} - \bar{N}_w^{i+1}|$ 是否大于 $4\sigma_i$ 来判断第 $i+1$ 个历元到底是出现周跳还是粗差。

(2) 电离层组合法：电离层组合观测值为：

$$\begin{aligned} \phi_I = c(\phi_1 / f_1 - \phi_2 / f_2) &= (\frac{f_1^2}{f_2^2} - 1)\Delta_I + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 = (\frac{f_1^2}{f_2^2} - 1)\Delta_I \\ &+ \lambda_1(N_1 - N_2) - (\lambda_2 - \lambda_1)N_2 \end{aligned} \quad (2.22)$$

则：

$$\phi_I = (\frac{f_1^2}{f_2^2} - 1)\Delta_I + \lambda_1 N_w - \lambda_2 N_2 \quad (2.23)$$

因为 P 码的随时间的连续性，可以用多项式 Q 拟合电离层伪距组合观测值序列 PI，拟合的准则是最小二乘法，即找出使 $\sum_{i=1}^n \|Q(x_i) - P_I(i)\|^2 = \min$ 。当阶数选为 3 阶时就能够满足要求。

设 $Q(i)$ 为多项式 Z 在第 i 点所取得值，令 $k = \frac{c}{f_2} - \frac{c}{f_1}$ ，则

$$\begin{cases} k_1 = (\Phi_I(i) - Q(i)) - (\Phi_I(i-1) - Q(i-1)) \\ k_2 = (\Phi_I(i+1) - Q(i+1)) - (\Phi_I(i) - Q(i)) \end{cases} \quad (2.24)$$

若满足下式：

$$\begin{cases} |k_1| > 6k \\ |k_2| > k \end{cases} \quad (2.25)$$

则认为 i 历元有周跳，可根据实际情况设置 k 值大小。

2.2.4 基于双频 GNSS 观测数据确定电离层 TEC 的基本原理

几何无关线性组合观测 L_4 与测站卫星间几何距离无关，消除了轨道误差、接收机钟差、卫星钟差以及对流层误差的影响。 L_4 伪距组合观测量仅包含电离层残差， L_4 相位组合观测量仅包含电离层残差与模糊度信息，因而通常被用来提取 TEC 值。

对于双频伪距观测量，式 (2.9) 简化为：

$$\begin{cases} P_1 = \rho + \frac{40.3}{f_1^2} TEC + B^{k,1} + B_{i,1} \\ P_2 = \rho + \frac{40.3}{f_2^2} TEC + B^{k,2} + B_{i,2} \end{cases} \quad (2.26)$$

式中, ρ 为消除了对流层延迟、多路径效应、钟差等误差的几何距离, 两式相减, 并记 $B^k = B^{k,1} - B^{k,2}$, $B_i = B_{i,1} - B_{i,2}$ (称 B^k 、 B_i 分别为接收机和卫星伪距的硬件延迟偏差), 整理得到:

$$TEC_p = \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)} [(P_2 - P_1) + B^k + B_i] \quad (2.27)$$

对于双频相位观测值, 式(2.10)简化为:

$$\begin{cases} \lambda_1 \Phi_1 = \rho - \frac{40.3}{f_1^2} TEC + b^{k,1} + b_{i,1} + \lambda_1 N_1 \\ \lambda_2 \Phi_2 = \rho - \frac{40.3}{f_2^2} TEC + b^{k,2} + b_{i,2} + \lambda_2 N_2 \end{cases} \quad (2.28)$$

式中, ρ 为消除了对流层延迟、多路径效应、钟差等误差的几何距离, 两式相减, 并记 $b^k = b^{k,1} - b^{k,2}$, $b_i = b_{i,1} - b_{i,2}$, $Amb = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$ (称 b^k 、 b_i 分别为接收机和卫星相位的硬件延迟偏差), 整理得到:

$$TEC_\Phi = \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)} [(\lambda_1 \Phi_1 - \lambda_2 \Phi_2) - b^k - b_i - Amb] \quad (2.29)$$

由码伪距可以求得 TEC 的绝对大小, 但是, 码观测噪声远远大于载波相位的观测噪声, 从而使得仅利用码伪距获得的原始电离层观测信息精度远低于利用载波相位获得的原始电离层观测信息精度。然而, 载波相位中含有两个频率的整周模糊度参数使得只能求定 TEC 的相对大小, 即可以反映 TEC 的总体变化趋势, 但具体的值无法求得。为了充分利用载波相位和伪距观测值的信息, 可以利用两种观测值组合联合计算电离层 TEC。

对于观测历元 t , 式(2.27)-式(2.29), 记 $\alpha = \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)}$, 可得:

$$\begin{aligned} \Delta TEC_t &= TEC_{P,t} - TEC_{\Phi,t} \\ &= \alpha[(P_2 - P_1)_t + (B_i + B^k)_t - (L_1 - L_2)_t + Amb_t + (b_i + b^k)_t] \end{aligned} \quad (2.30)$$

理论上, 该差值在短时间内认为是一常量。若 GPS 相位观测中没有发生周跳或对周跳进行了精确的校正后, 对每一卫星和接收机对, 在每个历元上都可以得到一个 ΔTEC_t , 将 ΔTEC_t 对时间进行平滑处理, 则可以得到一个精度更高的 ΔTEC 数据。

在观测历元 N , ΔTEC_N [35,36] 递推公式可表示为:

$$\begin{aligned}\Delta TEC_N &= \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \Delta TEC_t = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (TEC_{P,t} - TEC_{\Phi,t}) \\ &= \frac{1}{N} \left[\sum_{t=1}^{N-1} (TEC_{P,t} - TEC_{\Phi,t}) + (TEC_{P,N} - TEC_{\Phi,N}) \right] \\ &= \frac{1}{N} [(N-1)\Delta TEC_{N-1} + (TEC_{P,N} - TEC_{\Phi,N})]\end{aligned}\quad (2.31)$$

通常, 在不出现硬件变更的情况下, 接收机和卫星的硬件延迟的日变化较为稳定, 在连续的两天内, 接收机硬件延迟的变化在 1 ns 以内, 卫星硬件延迟的变化在 0.5 ns 以内^[37]。因此 ΔTEC_N 在一天内也可以看作一个常量。将式(2.30)代入式(2.31)中, 得:

$$\begin{aligned}\Delta TEC_N &= \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \Delta TEC_t \\ &= \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left\{ \alpha[(P_2 - P_1)_t + (B_i + B^k)_t - (L_1 - L_2)_t] + \alpha[Amb_t + c(b_i + b^k)_t] \right\} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \alpha[(P_2 - P_1)_t + (B_i + B^k)_t - (L_1 - L_2)_t] + \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \alpha[Amb_t + (b_i + b^k)_t]\end{aligned}\quad (2.32)$$

在修复了 GPS 周跳以后, 式(2.32)右边项中 Amb 为常量, 卫星和接收机的硬件延迟偏差在一天内也可以视为常量, 则上式可变换为:

$$\Delta TEC_N = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \alpha[(P_2 - P_1)_t + (B_i + B^k)_t - (L_1 - L_2)_t] + \alpha[Amb + c(b_i + b^k)] \quad (2.33)$$

综合以上各式, 可得:

$$\begin{aligned}TEC_N &= TEC_{\Phi,N} + \Delta TEC_N \\ &= \alpha[(L_1 - L_2)_N - Amb - (b_i + b^k)] + \alpha[Amb + (b_i + b^k)] \\ &\quad + \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \alpha[(P_2 - P_1)_t + c(B_i + B^k)_t - (L_1 - L_2)_t] \\ &= \alpha(L_1 - L_2)_N + \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \alpha[(P_2 - P_1)_t + (B_i + B^k)_t - (L_1 - L_2)_t] \\ &= \alpha(L_1 - L_2)_N + \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \alpha[(P_2 - P_1)_t - (L_1 - L_2)_t] + \alpha \cdot (B_i + B^k)\end{aligned}\quad (2.34)$$

根据上式, 利用伪距和相位观测值的组合即可求得高精度的电离层 TEC。这里求定的 TEC 是测站与卫星传播路径上的总电子含量, 在利用 GNSS 研究电离层时, 我们通常是以穿刺点垂直上空的 TEC 为对象, 因此需要将测站卫星传播路径上的 TEC 投影到电离层穿刺点的垂直方向, 投影函数计算模型在 2.3 节有详细地介绍。针对接收机硬件延迟偏差问题, 不同的研究者提出了不同的解算

方案，在 2.4 节有更详细地介绍，但通常的做法是采用简化的电离层模型，通过最小二乘拟合或卡尔曼滤波方法求解 TEC 并同时估计接收机和卫星的硬件延迟偏差。

2.2.5 基于多频 GNSS 观测数据确定电离层 TEC 的方法

GPS 系统自 2009 年 4 月 10 日第一颗卫星开始启用第三频率信号，到目前为止已有 4 颗 GPS 卫星正常播发第三频率信号。除了 GPS，其它卫星系统如 GALILEO 和北斗也已经开始发播三频数据，GNSS 已经进入了多频时代。

电离层延迟是影响卫星导航定位精度的主要误差之一，消除或减弱电离层延迟的方法主要包括模型改正法和双频改正法。由于多频观测数据必须通过形成电离层无关线性组合观测校正电离层的影响，这在削弱电离层延迟影响的同时放大了观测噪声、多路径残差等的影响。部分学者研究了基于三频数据确定包含有二阶项的原始电离层观测信息的方法^[37-43]，但是由于组合观测量的观测噪声与电离层二阶项的大小基本处于同一数量级，因此，上述方法确定的电离层 TEC 精度理论上并没有实质性的提高。

下面给出一种利用三频观测数据提高原始电离层观测信息确定精度和可靠性的方法。假设三个频率上伪距观测量和载波相位观测量依次为： P_1 、 P_2 、 P_3 、 L_1 、 L_2 、 L_3 ，选择频率相差较大的两组双频观测量，按照相位平滑伪距的方法确定两组电离层 TEC 观测信息，则：

$$\begin{cases} TEC_{1,2} = \alpha(L_1 - L_2)_N + \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \alpha[(P_2 - P_1)_t - (L_1 - L_2)_t] + \alpha \cdot (B_1 + B^k) \\ TEC_{1,3} = \alpha(L_1 - L_3)_N + \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \alpha[(P_3 - P_1)_t - (L_1 - L_3)_t] + \alpha \cdot (B_1 + B^k) \end{cases} \quad (2.35)$$

式中， $TEC_{1,2}$ 与 $TEC_{1,3}$ 分别表示基于上述两组观测量确定的原始电离层观测信息。

忽略不同信号传播路径之间的差异以及观测量之间的相关性，则联合确定电离层 TEC 观测信息。

$$TEC = \frac{TEC_{1,2} + TEC_{1,3}}{2} \quad (2.36)$$

2.2.6 基于单频 GNSS 观测数据确定电离层 TEC 的方法

双频改正法可以将电离层传播效应引入的距离误差修正 90%左右，三频改正法在理论上是电离层延迟修正精度最高的方法。实际上，由于双频接收机价格相

对昂贵，高密度覆盖所需的费用极高；同时双频接收机操作不便，增加了作业以及使用的负担。因此，双频接收机定位一般只应用于大地测量领域，而一般 GNSS 用户则采用单频接收机进行单站导航定位。对于单频用户，GPS 系统提供了一种简单的电离层延迟改正算法供单频用户使用，但是该算法通常只能消除约 50% 的电离层延迟误差^[6]。因此，实现一种基于单频观测数据的电离层解算方法对于充分发挥单频接收机的综合应用效率就显得非常有意义。

GPS 导航信号穿过电离层时会发生色散效应，该效应使码伪距产生一个群延迟，而载波相位观测量产生一个相位超前。2.2.4 节研究表明，群延迟和相位超前量都正比于电波传播路径上电子总含量，两者的大小相等，符号相反。因此，测伪距与载波相位伪距的差值就等于二倍的群延迟，由此得出的延迟量即可用来修正伪距观测量。对于 L_1 (1575.42MHz) 频率来说，从卫星到测站的码伪距和相位伪距可表示为：

$$\begin{cases} P = \rho_i^k + T_i^k + c(dt_i - dt_k) + 0.162292 \cdot \text{TEC} + M_{i,1}^k \\ \lambda \cdot \Phi = \rho_i^k + T_i^k + c(dt_i - dt_k) - 0.162292 \cdot \text{TEC} + m_{i,1}^k + \lambda_1 N_{i,1}^k \end{cases} \quad (2.37)$$

式中符号意义均与前文所提一致。将上式中两种数据互减，伪距的多路径效应比相位的多路径效应大的多，因此这里不忽略多路径效应的影响，记 $\varepsilon_i = M_{i,1}^k - m_{i,1}^k$ ，引入投影函数 $F(z)$ (z 为测站处信号路径方向的天顶距，2.3.2 节有详细介绍)，可得：

$$\Delta = P - \lambda \cdot \Phi = 0.324 \cdot F(z) \cdot \text{VTEC} + \varepsilon_i - \lambda_1 N_{i,1}^k \quad (2.38)$$

上式中的电离层影响是一个随时间和空间变化的复杂系统，这里假设把这种电离层变化仅仅看成是沿视线方向随时间的变化函数，通过对数据进行预处理消除相位观测量中的周跳，对每个历元的每颗卫星，对式 (2.38) 求一阶导数，得：

$$\begin{cases} \Delta_1' / 0.324 = F_1(z) \cdot \text{VTEC}' + F_1'(z) \cdot \text{VTEC} + v_1 \\ \dots \\ \Delta_N' / 0.324 = F_N(z) \cdot \text{VTEC}' + F_N'(z) \cdot \text{VTEC} + v_N \end{cases} \quad (2.39)$$

v_1 到 v_N 是对应历元卫星伪距与相位差的测量噪声、多路径效应以及其他误差的一阶项。从式 (2.39) 可以看出，只要确定了某一历元的伪距相位之差 Δ ，投影函数 $F(z)$ 及其一阶导数，便可解出该历元的 VTEC 及其变化率。

2.3 投影函数计算模型

2.3.1 电离层单层假设

由式 (2.34) 求定的 TEC 是测站与卫星传播路径上的总电子含量, 为了获得电离层电子密度的时空分布以及电离层对导航卫星信号延迟的影响, 通常必须根据具体的应用目的, 将电离层电子密度的时空分布结构做出一定的假设, 获得指定空间维度上的电离层电子密度分布。通常在 350 km~450 km 高度处, 电离层中的自由电子含量密度最高^[31], 为了简化模型, 又不影响问题本质, 通常以单层模型来代替整个电离层, 即认为所有的自由电子都集中在 350 km~450 km 某一高度处的一个无限薄层 (球面) 上。

如图 2.4 所示, R 为接收机位置, 其与卫星连线在穿刺点 P' 处与薄层相交, OP' 方向上的自由电子被假设为集中于 P' 点。

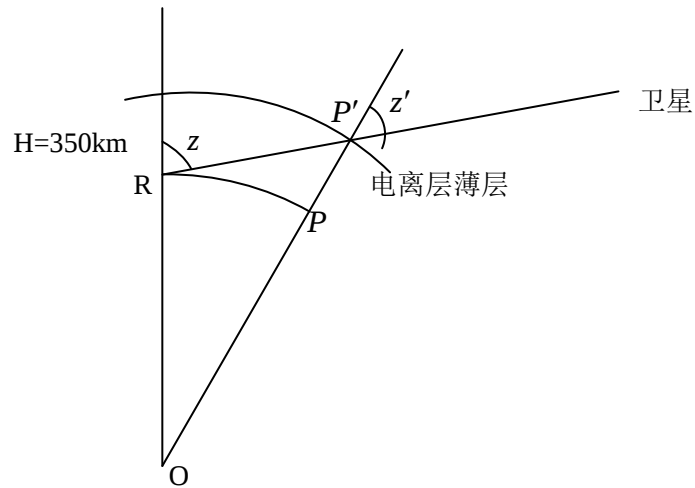


图 2.4 单层电离层模型与卫星观测的几何关系

在地心坐标系中, 穿刺点的位置以球极坐标 (φ, λ) 表示, 以 $(x_r, y_r, z_r)^T$ 表示监测站坐标, 以 $(x_s, y_s, z_s)^T$ 表示卫星坐标, 可以求出穿刺点 P' 的坐标 $(x \ y \ z)^T$, 球心至 P' 方向与监测站至卫星方向的夹角为穿刺点处的天顶距 z' 。

计算电离层穿刺点投影的经纬度, 首先计算用户以及穿刺点在地心的张角:

$$\psi_{pp} = \frac{\pi}{2} - E - \arcsin\left(\frac{R}{R+H} \cos E\right) \quad (2.40)$$

式中, R 为地球半径, E 为卫星的高度角, H 为电离层单层模型高度。

穿刺点投影的纬度和经度分别为:

$$\varphi_{pp} = \arcsin(\sin \varphi_u \cos \psi_{pp} + \cos \varphi_u \sin \psi_{pp} \cos A) \quad (2.41)$$

$$\lambda_{pp} = \lambda_u + \arcsin\left(\frac{\sin \psi_{pp} \sin A}{\cos \varphi_{pp}}\right) \quad (2.42)$$

式中， λ_u 和 φ_u 分别为用户的经度和纬度， A 为卫星的方位角。

2.3.2 投影函数

借助于电离层投影函数 MF (Mapping Function)，可实现倾斜路径上的电离层延迟到单层模型垂直方向上延迟之间的转换，从而实现倾斜观测量到电离层模型参数化。一般将 MF 视为卫星高度角的函数，定义为斜距电离层延迟 $STE C$ (Slant TEC) 与垂直电离层延迟 $VTE C$ (Vertical TEC) 的比值，最简单也最为常用的投影函数是三角投影函数^[2]，如下式所示：

$$F(z) = \frac{STE C}{VTE C} = \frac{1}{\cos(z')} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+H} \sin(z)\right)^2}} \quad (2.43)$$

式中， $F(z)$ 为电离层穿刺点处的投影函数； z' 为穿刺点处信号路径方向的天顶距； R 表示地球半径； H 表示电离层薄层的高度； z 为测站处信号路径方向的天顶距。

除此之外，Schaer 通过与 Chapman 函数对比，对上述三角投影函数做了进一步的改进，其改进之后的投影函数如下式所示^[44]：

$$F'(z) = \frac{STE C}{VTE C} = \frac{1}{\cos(z')} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+H} \sin(kz)\right)^2}} \quad (2.44)$$

当 k 为 0.9782， H 为 506.7 km， R 为 6378 km 时，该投影函数与 JPL 的扩展模型的投影函数符合较好。

另外，还有很多学者研究了类似的电离层投影函数，如：Klobuchar 提出了一种应用于 GPS 广播电离层模型的投影函数^[33]；欧吉坤研究给出了一种可适应高度角变化而分段取值的电离层投影函数^[34]。但从结构上讲，上述电离层投影函数均只顾及到了卫星高度角的变化，且在高度角大于 20° 时的应用效果基本相当。

从电离层薄层假设及投影函数的结构可以看到，该假设忽略了电离层 TEC 在高度方向上的变化，将电离层电子密度的水平结构放在假设的薄层上进行描述，并且假设某交叉点处电离层 TEC 是各向同性的。在电离层活动较为平静的

中纬度地区，上述假设是基本成立的，但是，对于电离层活动剧烈的赤道地区或者是“赤道异常”双峰结构的边缘地区，交叉点南北两侧的电离层 TEC 变化梯度在低高度角时具有较大差异，若仍采用简单的投影函数描述视线与天顶方向上电离层 TEC 之间的关系，将会带来较大的误差，温晋等基于实测电离层 TEC 数据的研究已证明了这点^[45]。

但是，总体上看，电离层薄层假设非常有利于描述电离层电子密度的整层变化，对分析穿越整个电离层的信号受到电离层的影响是非常有效的，大大简化了数据处理的过程。因此，该假设在 GNSS 电离层研究中仍然得到广泛应用。

2.4 硬件延迟估算方法

2.4.1 硬件延迟参数定义及处理方法

卫星上不同频率的信号从生成到发送是不同步的，所以不同频点间的硬件延迟之间会有差值，用来描述该差值的参数称为差分码偏差参数（Differential Code Biases, DCB），通常卫星的 DCB 参数又称为 TGD（Timing Group Delay）。同样的，这些信号从到达接收机到量测也是有延迟的，而接收机的 DCB 参数又称为 IFB（Inter-Frequency Bias）^[46,47]。袁运斌（2002）的研究表明，仪器偏差对求解电离层延迟的影响远大于观测噪声的影响，给电离层延迟观测值带来高达数米的系统误差，直接影响电离层延迟估计的可靠性^[46]。Sardon and Zarraoa 研究结果显示，GPS 卫星 DCB 在连续几天之间的变化不会超过 0.1 ns，而 GPS 接收机的 DCB 在连续几天之间的变化在 1 ns 左右^[12]。

DCB 的处理方法有两种^[17]：一个是通过仪器检定测定延迟值，然后对观测值加以改正。卫星产生的电路延迟差由导航电文中的 TGD 给出，该数值是在卫星发射前通过检验测定的，但由于卫星 DCB 数值并非长期不变，且难于进行经常性的监测和更改，故其精度以及可靠性均不够好。我们也可通过仪器鉴定的方法来确定 GPS 接收机各通道的延迟参数，但由于检测方法复杂且费时，且其数值随时间及环境都有一定的变化，需频繁进行检测，故实际操作比较困难。另外一个办法就是把这些硬件延迟作为参数引入观测方程中，通过平差计算把电离层模型系数和 DCB 一并解出。

2.4.2 GPS 卫星 TGD 参数解算方法

目前 GPS 卫星的差分码偏差参数求解通常采用同时解算电离层 TEC 和 TGD/IFB 的方法，即通过对于 TEC 进行建模，而将 TGD/IFB 作为常数，根据观

测数据进行求解。欧洲定轨中心 CODE 采用 IGS 的全球约 150 个测站的观测数据, 联合解算一组 15 阶电离层球谐函数模型和一组 TGD/IFB 参数, 卫星 TGD 和接收机 IFB 参数的分离约束条件是所有卫星的 TGD 参数和为零^[2]。除 CODE 外, 欧洲空间局 ESA、美国喷气动力实验室 JPL、西班牙加泰罗尼亚理工大学 UPC 等机构也提供 GPS 卫星 TGD 参数的相关解算结果, 不同机构因解算采用观测数据的不同等原因, 解算得到的 GPS 卫星 TGD 参数略有差异, 互差一般不超过 0.3 ns^[14]。

IGS 的电离层联合小组 (Ionospheric Associated Combination Center, IACC) 根据 CODE、ESA、JPL 和 UPC 这四个电离层分析中心得到的全球电离层图, 加权得到一组全球电离层图 GIM (Global Ionosphere Map) 作为最后产品提供。IACC 根据分布全球的 200 多个 IGS 测站的实际观测数据双频组合得到电离层延迟、卫星 TGD 和接收机 IFB 参数的组合; 根据其 GIM 计算出相应历元相应穿刺点的电离层延迟后, 得到卫星 TGD 和接收机 IFB 的组合, 给定所有卫星的 TGD 参数和为零的约束条件后, 采用最小二乘方法分离求解卫星 TGD 和接收机 IFB 参数。IGS 在提供 GIM 产品的同时提供 GPS、GLONASS 卫星 TGD 参数和参与解算接收机 IFB 参数。共提供 32 颗 GPS 卫星和 20 颗 GLONASS 卫星的 TGD 参数, 采用 291 个测站的观测数据进行解算。

通过对 2015 年 5 月 22 日至 2015 年 6 月 3 日连续 13 天 IGS 提供的 TGD 数据进行分析, 结果表明, GPS 卫星的 TGD 参数绝对值小于 10 ns, RMS 小于 0.1 ns; GLONASS 除 R17 卫星外, 其余卫星 TGD 参数绝对值小于 10 ns, RMS 小于 0.1 ns。接收机 IFB 绝对值均小于 50 ns, 大部分接收机 RMS 小于 1 ns, 个别达到 2 ns。GPS 系统 32 颗卫星连续 13 天的 TGD 值的变化量最大值为 0.34 ns, 均值为 0.19 ns; GLONASS 系统 20 颗卫星连续 13 天的 TGD 值的变化量最大值为 0.70 ns, 均值为 0.27 ns。

2.4.3 接收机硬件延迟估算方法

全球各 IGS 站的接收机硬件延迟可以从 IGS 及其数据分析中心获得, 随着 GPS 应用的深入与拓展, 大规模的 GPS 观测网在许多地区相继构建, 大量 GPS 观测站需要采用其他的方法估算硬件延迟。

目前, 常用的估算 GPS 接收机硬件延迟的方法主要包括如下四类^[48-53]: 第一类, 基于全球/区域电离层模型, 同步估计接收机和卫星的硬件延迟; 第二类, 利用经验的电离层物理模型或全球/区域电离层实测模型扣除电离层延迟的影响, 利用 IGS 发布的卫星硬件延迟估值扣除卫星硬件延迟, 进而估计得到接收机硬件延迟; 第三类, 利用单站/局部的电离层模型, 在扣除卫星硬件延迟的基

基础上，同步估计电离层模型参数和接收机硬件延迟；第四类，G. Ma and T. Maruyama 提出的 VTEC 标准差最小化法，即将电离层延迟基于“短时间小范围内的 TEC 是相近”的假设，通过计算所有视线上 TEC 的标准差最小来求解硬件延迟，严格意义上讲，此类方法是第三类方法的一种特例。

2.5 GNSS 确定 TEC 的误差分析

任何测量系统都存在观测精度和误差源的分析问题，前者是鉴定测量系统是否达到设计使用要求的关键指标，后者是从理论和实验上确认精度的可信度，并为测量系统的改进和提高提供依据^[54]。影响 GNSS 确定 TEC 精度的因素很多，既包含 GNSS 观测数据本身的精度，也包含模型理论假设中所带来的误差。

2.5.1 观测数据误差

根据国外学者研究^[55]，电离层延迟测量误差随着高度角减小呈指数增加，由天顶方向到高度角为 10° 时，P 码观测误差标准差可由亚 TECU 达到 ± 10 TECU。假设对应 30 s 采样率的 6 个小时观测弧段，能得到大概 700 个观测值，假设在最坏的情况下，即 TEC 的测量误差为 ± 10 TECU，通过将这 700 个观测值取平均，我们得到的误差量级为 $\pm 10 / \sqrt{700} \text{ TECU} \approx 0.38 \text{ TECU}$ ，那么由载波相位平滑伪距后求得的 TEC 误差则将 $\leq \sqrt{2} \cdot 0.38 \text{ TECU}$ ，精度能够到达亚 TECU 级。

此外，GPS 测量中多路径效应也会对计算 TEC 产生影响，在最坏的情况下，载波相位的多路径误差大概有 0.67 个 TECU，而伪距则能够达到 180 个 TECU，考虑到在实际情况中，伪距通常能在上述情况下缩小到 1/10，而载波相位缩小到 1/16。另外，接收机天线相位中心位置的偏差也会对计算 TEC 的观测数据产生一定的影响。

2.5.2 硬件延迟误差

Sardon 和 Zarraoa 研究结果显示，GPS 卫星 DCB 在连续几天之间的变化不会超过 0.1 ns，而 GPS 接收机的 DCB 在连续几天之间的变化在 1 ns 左右^[12]。袁运斌的研究表明，仪器偏差对求解电离层延迟的影响远大于观测噪声的影响，给电离层延迟观测值带来高达数米的系统误差，直接影响电离层延迟估计的可靠性^[46]。故利用 GPS 观测数据直接计算信号路径上的电离层延迟或求解电离层模型时，都必须事先估计接收机和卫星的仪器偏差，不能简单将其作为噪声处理。

2.5.3 电离层单层模型高度不确定误差

电离层单层模型的高度是假设自由电子密度最大的高度，即层最大电子密度离地面的高度，它是随着经纬度、时间和太阳活动等诸多因素而变化的。特别是电离层在赤道地区存在双驼峰，且 TEC 纬度方向是存在梯度的，所以，在低纬度计算 TEC 时，因考虑单层模型的高度变化因素^[33]。如果实际 F2 层最大电子密度高度大于单层模型高度，那么计算得到的 TEC 就会低于实际值，反之亦然。图 2.5 给出了单层模型高度为 300 km、350 km、400 km、450 km 和 500 km 时，投影函数随着卫星高度角的变化趋势，从图中可以看出，当卫星高度角小于 20° 的时候，不同单层模型高度的投影函数差别比较大，当大于 30° 时，投影函数的大小和变化基本一致。为了克服电离层单层模型高度的不确定误差，应当尽量选取卫星高度角大于 20° 时的数据。

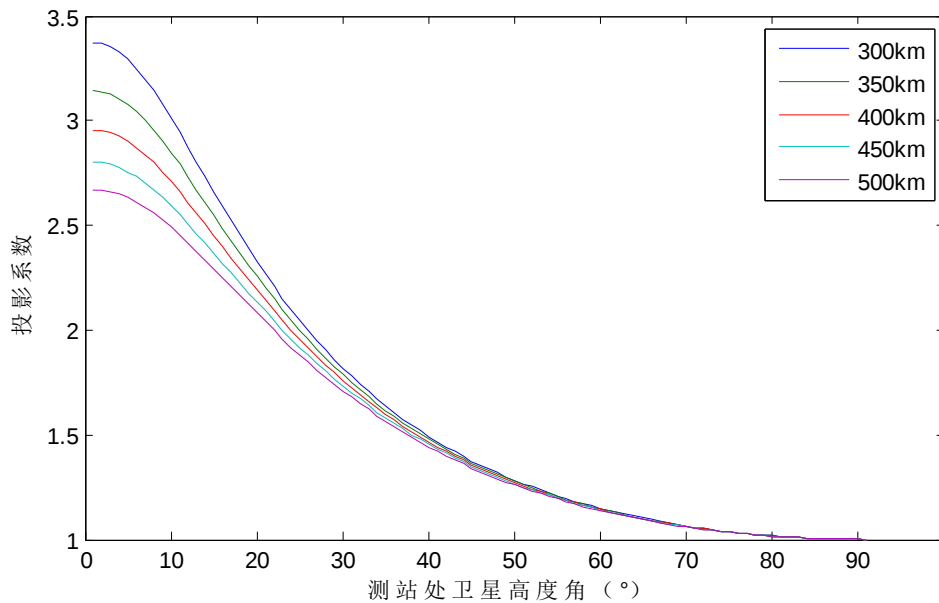


图 2.5 不同单层模型高度对投影函数的影响

2.5.4 投影函数误差

借助于电离层投影函数，可实现将 GPS 信号传播路径上的电离层延迟转换到单层模型穿刺点垂直方向上，从而实现双频电离层观测值到模型参数化。但是选择不同的投影函数将导致建模精度的不同，在实际建模时需要考虑减小投影函数的误差。分析前文介绍的四种投影函数 Klobuchar 模型投影函数、SLM 投影函数、MSLM 投影函数以及欧吉坤提出的 OJK 分段投影函数之间的区别，如图 2.6 所示，各个投影函数的计算公式及各参数的取值见参考文献^[7]。从图 2.6 中可以看出，在低高度角时不同的投影函数的投影系数有一定的差别，但在卫星高度

角大于 20° 时，各类投影函数的计算效果差别很小，并且卫星高度角越高各投影函数之间的差别越小。

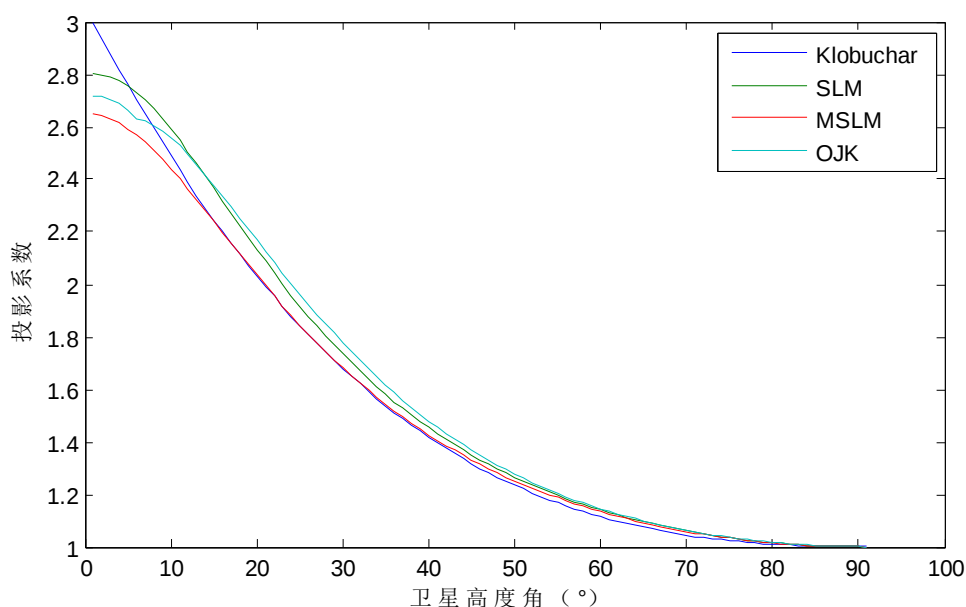


图 2.6 不同投影函数与高度角的关系

2.6 本章小结

本章首先介绍了电离层的基本特性；然后介绍了利用 GNSS 观测数据获取高精度电离层 TEC 的基本原理与方法，包括联合 GNSS 双频伪距与相位观测值获得高精度 TEC 的绝对大小，基于单频 GNSS 数据解算电离层 TEC 的公式；然后详细介绍了电离层单层模型、穿刺点的计算以及投影函数的选择问题；详细介绍了卫星硬件延迟与接收机硬件延迟的估算方法；最后对 GNSS 监测电离层 TEC 所产生的误差进行了分析研究。

第 3 章 电离层 TEC 建模的基本理论与方法

基于实测的 GNSS 观测数据得到的电离层原始观测信息是卫星视线方向上的电离层 TEC，是地球空间上一组离散的数据。实际中，需要根据上述离散数据获得局部/区域/全球电离层 TEC 在时空域上的连续或规则分布，这就需要按一定的数学方法将离散的观测数据扩展至连续/规则的电离层空间上，这个过程称之为 GNSS 电离层建模，其主要包括：电离层建模的基本假设、常用的数学函数以及常用的坐标系三部分。电离层建模的基本假设在上一章有详细地介绍，本章主要介绍常用的坐标系和常用的数学函数。

3.1 电离层坐标参考系

由于电离层电子密度的时空分布主要受太阳活动及地球磁场的影响，所以合理地选择电离层 TEC 建模的坐标系可以使得所选择的数学函数更加符合电离层 TEC 的变化，从而提高电离层建模的精度和可靠性。袁运斌将常用电离层 TEC 建模的坐标系总结为如下四类^[1]。

(1) 地固地理坐标系：电离层穿刺点处的坐标用地理经度和地理纬度来表示用以构造电离层 TEC 模型；

(2) 地固地磁坐标系：电离层穿刺点处的坐标用地磁经度和地磁纬度来表示用以构造电离层 TEC 模型；

(3) 日固地理坐标系：利用电离层穿刺点处的地理经度与太阳地理经度的差值和电离层穿刺点处的地理纬度构造电离层 TEC 模型；

(4) 日固地磁坐标系：利用电离层穿刺点的地磁经度与太阳地磁经度的差值和电离层穿刺点处的地磁纬度构造电离层 TEC 模型。

对于小范围区域电离层建模，模型受地磁场的影响较小，故可采用地固地理坐标系或日固地理坐标系；而对于较大范围甚至全球电离层建模，则要选择日固地磁坐标系。

3.2 电离层建模常用数学函数

基于拟定的投影函数可将视线方向电离层 TEC 转换至天顶方向，实际电离层 TEC 建模中通常需要合理选择一定的数学函数用于描述天顶方向上电离层 TEC 变化；并根据不同时空尺度（全球/区域/局部）选择不同的数学函数。下面

对常用的数学函数进行简要介绍。

3.2.1 经验电离层模型

经验电离层模型是反映长期全球平均状况的电离层模型,优点是无需进行实际观测即可根据这些模型和一些具体参数求得 VTEC。Bent 模型和 IRI 模型是根据全球各电离层观测站长期积累的大量观测资料拟合出来的模型和经验公式,被电离层研究和无线电通信领域的用户广泛使用。

(1) 本特 (Bent) 模型^[56]

Bent 模型可计算 1000 km 以下的电子密度高低剖面,从而获得 TEC 等参数。该模型顶部电离层用三个指数层和一个抛物线层来逼近,下部电离层则采用双抛物线来近似。输入参数为日期、时间、测站位置、太阳辐射流量及太阳黑子数等。Newby 用法拉第旋转测量法对 Bent 模型的精度进行了检核,结果表明,当太阳黑子数小于 130 时,在中纬度地区 Bent 模型的误差大约为总量的 20%~30%。

(2) 国际参考电离层 (IRI) 模型^[7]

国际参考电离层模型 (International Reference Ionosphere, IRI) 是由太空委员会 (COSPAR) 和国际无线电科学联盟 (URI) 共同参与的项目,它是根据大量电离层探测数据得到的经验模型,可计算海拔 50~2000 km 范围内的电子密度、电子温度、离子成分、离子温度等参数。该模型发展至今已经发布了 IRI78、IRI85、IRI1990、IRI2000、IRI2007 和 IRI2012 等众多版本。未来 COSPAR 和 URI 将致力于发展实时的国际参考电离层,主要采用电离层测高仪、非相干散射雷达、卫星测量、GPS 无线掩星测量来获取可靠的电离层参数并使用数据同化技术以构建较好的实时国际参考电离层。美国宇航局空间物理数据设备与国家空间科学数据中心提供了国际参考电离层的 Fortran 源程序以及相关详细说明和在线计算方式 (<http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/ionospheric/iri/>)。输入日期、时间、地点和太阳黑子数等参数后可给出电子密度的月平剖面图,从而求出总电子含量和电离层延迟。

3.2.2 广播星历电离层延迟改正模型

(1) Klobuchar 模型^[6]

Klobuchar 模型近似描述了整个垂直电离层折射,并可计算码测量值垂直时间延迟。导航电文中广播的电离层采用的就是该模型的系数。该模型把白天的时延看成是余弦函数中正的部分,将晚间的电离层时延视为常数,取值为 5 ns。于是天顶方向调制在 L_1 载波 ($f=1575.42\text{MHz}$) 上的测距码的电离层时延迟可表示

为:

$$T_g = 5 \times 10^{-9} + A \cos \frac{2\pi}{P} (t - 14h) \quad (3.1)$$

式中, t 为观测瞬间穿刺点处的地方时。 A 为余弦函数振幅; P 为周期, 可以分别用下式计算:

$$\begin{cases} A = \sum_{i=0}^3 \alpha_i (\varphi_m)^i \\ P = \sum_{i=0}^3 \beta_i (\varphi_m)^i \end{cases} \quad (3.2)$$

其中 α_i 和 $\beta_i (i=0,1,2,3)$ 是地面控制系统根据该年积日 (将一年分为 37 个区间) 以及前 5 天太阳的平均辐射强度 (共分为 10 档) 从 370 组常数中选取出来的, 然后编入 GPS 卫星的导航电文播发给用户; φ_m 为穿刺点处的地磁纬度, 具体计算方法参见参考文献^[6] (Klobuchar, 1986)。

大量观测资料的验证结果表明, 该模型在中纬度地区比较适合, 但从全球应用角度来考虑, Klobuchar 模型的改正效果一般在 60% 左右。章红平在其博士论文中指出, Klobuchar 模型中的 A_1 参数会导致整个模型的平均偏差在 20%~30% 左右, 在不同纬度上空 VTEC 含量最大值一般出现在地方时正午过后 0~4 小时左右, 而 Klobuchar 模型的初始相位固定为 14:00 则会引入 3%~10% 左右的模型误差。鉴于此, 他提出一种改进的 Klobuchar 模型, 参数扩展到 14 个, 改进模型能达到 70% 左右, 具体算法参见参考文献^[7]。

(2) NeQuick 模型^[57]

NeQuick 模型是由意大利第里雅斯特的 Abdus Salam 国际理论物理中心的超高层大气流体物理学和无线电传播实验室 (ARPL) 与奥地利格拉茨大学地球物理学、天体物理学和气象学研究所共同建立的随时间变化的三维电离层电子密度模型。该模型已经在欧空局 EGNOS 项目中使用, 并建议 Galileo 系统的单频用户采纳来修正电离层延迟。

国际电信联盟无线电部 (ITU-R) 于 2001 年采用 NeQuick 模型作为 TEC 模型化的适合方法。该模型可同时给出电离层底部和顶部的电子密度分布, 模型在给出位置、时间、太阳辐射通量后, 能给出相应时间和区域的电子浓度。NeQuick 模型可以计算电离层上任意点的电子浓度, 所以可以比较容易地计算出 GNSS 需要的沿卫星至接收机间的垂直或倾斜电子密度剖面 and TEC 值。该模型的 Fortran 源代码可至 <http://www.itu.int/oth/R0A04000018-/ens> 上下载。该模型主要由两部分组成, 高度低于 F2 层峰值的底部模型和高度在 F2 峰值以上的顶部公式, 模型基本形式为^[58]:

$$N(h) = \frac{4N_{\max}}{(1 + \exp(\frac{h-h_{\max}}{B}))^2} \exp(\frac{h-h_{\max}}{B}) \quad (3.3)$$

式中, h 为所求点的高度, $N_{\max}$ 为电离层密度峰值, $h_{\max}$ 为电子密度峰值点的高度, B 为电离层厚度参数。

3.2.3 利用 GNSS 双频观测资料建立的 VTEC 模型

(1) 全球性的球谐函数模型

球谐函数模型可用来描述全球或者大区域范围内的物理参数, 现已成为表达全球电离层 TEC 的主要模型之一。IGS 的电离层工作小组采用了球谐函数展开式来描述全球电离层总电子含量的时空分布及变化。他们采用分布在全球的 200 多个 GPS 监测站的电离层观测数据, 计算 15 阶的球谐模型系数, 然后按照纬度 2.5 度、经度 5 度划分全球格网, 公开发布电离层产品, 成为 GIM (Global Ionosphere Map) [14]。在太阳方向固定的地磁坐标系中, 球谐函数电离层模型具体形式如下:

$$VTEC = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \beta) (\tilde{C}_{nm} \cos(ms) + \tilde{S}_{nm} \sin(ms)) \quad (3.4)$$

式中, β : 穿刺点的地理纬度或地磁纬度;

s : 穿刺点的日固经度, 其表达式为 $s = \lambda - \lambda_0$, λ 是穿刺点的经度, λ_0 是太阳的经度;

$n_{\max}$: 球函数展开式的最高阶数;

$\tilde{P}_{nm} = N_{nm} P_{nm}$: 完全正规化后的 n 阶 m 次勒让德函数, N_{nm} 是正规化函数, P_{nm} : 经典的未完全正规化的勒让德函数;

$\tilde{C}_{nm}$ 、 $\tilde{S}_{nm}$: 未知的球谐系数, 即全球电离层模型参数。

正规化函数 N_{nm} 形式如下:

$$N_{nm} = \sqrt{\frac{(n-m)!(2n+1)(2-\delta_{0m})}{(n+m)!}} \quad (3.5)$$

式中, δ_{0m} 为 Kronecker 型 δ 函数。

计算球谐函数的系数个数计算公式为:

$$N = (n_{\max} + 1)^2 - (n_{\max} - m_{\max})(n_{\max} - m_{\max} + 1) \quad (3.6)$$

式中, $n_{\max}$ 、 $m_{\max}$ 为球谐函数的最高阶数和最高次数, 这两个参数还表征了电离层球谐模型的空间分辨率, 其纬度、经度的分辨率计算式分别如下:

$$\Delta\beta = 2\pi / n_{\max} \quad (3.7)$$

$$\Delta s = 2\pi / m_{\max} \quad (3.8)$$

上述全球电离层总电子含量的球谐函数的零阶项 $\tilde{C}_{00}$ 代表了该时刻全球电离层总电子含量的平均值，此时全球电离层总电子含量的个数可表述为： $n_e = 4\pi R'^2 \tilde{C}_{00}$ ， R' ($R' = R + H$) 是电离层单层模型中薄球壳的半径，其中如果 R' 以米为单位、 $\tilde{C}_{00}$ 以 TECU 为单位，则 n_e 以 10^{16} 为单位。

要获得某点的垂直总电子含量可以直接利用 IGS 的电离层工作小组所提供的产品 GIM。1998 年 Schaer 等人代表 IGS 电离层工作小组向 IGS 组织提交了电离层总电子含量数据交换格式文件 IONEX (IONosphere map Exchange format)，并得以实施^[44]。IONEX 文件的命名方式为：cccedddh.yyI.Z。其中，ccc 表示分析中心的缩写；e 表示覆盖范围，如果是“G”则表示全球；ddd 表示年积日；h 表示一天中的序列号或第几个小时，可以用“1, 2, ...”或者“A, B, ...”的形式表示，如果是“0”则表示含有全体的电离层数据；yy 表示年标记；I 表示电离层地图。在头文件部分，存放了所用到的全球 IGS 跟踪站的接收机仪器偏差改正值和中误差，以及卫星的仪器偏差改正值及其中误差。其中电离层 VTEC 是以 0.1 个 TECU 为单位，仪器偏差 DCB 是以 ns 为单位。除了发布 IONEX 格网数据，还向外提供球谐函数模型，以 COD*****.ION 的格式，可以用它内插计算任意时刻某经纬度处的 VTEC。

(2) 区域性的 VTEC 模型

区域性的 VTEC 模型一般采用多项式函数模型、低阶球谐函数模型、三角级数模型以及利用距离加权法建立的格网模型，其建模精度大体相同^[7]。

1) 多项式函数模型

多项式函数模型将电离层 VTEC 看作是纬差 $\varphi - \varphi_0$ 和太阳时角差 $S - S_0$ 的函数，其具体表达式为^[34]：

$$VTEC = \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^m E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (S - S_0)^k \quad (3.9)$$

式中， $S - S_0 = (\lambda - \lambda_0) + (t - t_0)$ ； S_0 为测区中心点 (φ_0, λ_0) 在该时段中央时刻 t_0 时的太阳时角； (φ_0, λ_0) 为测区中心点的地理经纬度； (φ, λ) 为穿刺点 IPP 的地理经纬度； t 为观测时刻； n, m 为泰勒级数展开的最大阶数； $E_{i,k}$ 为多项式模型系数。

利用多项式函数描述电离层 VTEC 的周日变化，可将观测数据按时段来划分，与此同时设置相应时段的待估模型系数。模型阶数的取值取决于测区的大小，李征航指出，当时段长度为 4 h，测区范围不超过一个洲时， $(\varphi - \varphi_0)$ 项 n 取 1~2

阶， $S-S_0$ 项 m 取 2~4 阶^[34]。

2) 低阶球谐函数模型

在日固定地磁坐标系中，一般采用了四阶次的球谐函数来拟合区域的电离层模型。具体形式如下^[34]：

$$VTEC = \sum_{i=0}^4 (A_n^k \cos k\lambda' + B_n^k \sin k\lambda') P_n^k(\cos \phi_m) \quad (3.10)$$

式中， A_n^k 、 B_n^k 为待估参数， $P_n^k(\cos \phi_m)$ 为缔合勒让德函数， λ' 为过穿刺点经线与过地心-太阳连线的经线之间的夹角， ϕ_m 为地磁纬度。

假设 GHA 为任意观测时刻 t 的太阳格林尼治时角，则电离层穿刺点在太阳-地磁坐标系中的坐标为：

$$\begin{aligned} \lambda' &= (GHA + \lambda_{IPP}) = \lambda_{IPP} - \lambda_{SUN} = 15.0 \times (UT - 12) + \lambda_{IPP} \\ \phi_m &= \sin^{-1}(\sin \phi_M \sin \phi_{IPP} + \cos \phi_M \cos \phi_{IPP} \cos(\lambda_{IPP} - \lambda_M)) \end{aligned} \quad (3.11)$$

式中， ϕ_M ， λ_M 为地磁北极在地理坐标系中的坐标，它是随时间变化的。

3) 三角级数电离层模型

区域电离层 VTEC，白天随地方时呈近似余弦的变化，一般在 14 时达到最大；晚上变化稳定且相对较小，随地方时变化不明显。记 ϕ_m 为穿刺点 IPP 处地磁纬度， t 为 IPP 处地方时， $h = 2\pi(t-14)/T$ ($T=24h$)，将 VTEC 的周日变化视为以下几部分影响的合成^[7]：

A_1 ：与地方时和纬度以外因素有关的综合变化；

$$\sum_{i=1}^{N_2} \{A_i \phi_m^i\} : \text{仅与纬度有关的变化；}$$

$$\sum_{i=1}^{N_3} \{A_i h^i\} : \text{仅与地方时有关的变化；}$$

$$\sum_{i=1, j=1}^{N_2 N_3} \{A_i \phi_m^i h^j\} : \text{与纬度和地方时有关的综合变化项；}$$

$$\sum_{i=1}^{N_4} \{A_{i1} \cos(ih) + A_{i2} \sin(ih)\} : \text{与地方时有关的周期变化综合影响项。}$$

其中， A_i 为待估的参数变量。调整 A_i 的序号，合成以上各项变化，可得三角级数模型总电子含量 VTEC 如下：

$$\begin{aligned}
 VTEC = & A_1 + \sum_{i=1}^{N_2} \{A_{i+1} \phi_m^i\} + \sum_{i=1}^{N_3} \{A_{i+N_2+1} h^i\} + \sum_{i=1, j=1}^{N_i N_j} \{A_{i+N_2+N_3+1} \phi_m^i h^j\} \\
 & + \sum_{i=1}^{N_4} \{A_{2i+N_2+N_3+N_j+1} \cos(ih) + A_{2i+N_2+N_3+N_j} \sin(ih)\}
 \end{aligned} \quad (3.12)$$

其中, $\phi_m = \phi_i + 0.064 \cos(\lambda_i - 1.617)$, ϕ_i 、 λ_i 分别为 IPP 的地理纬度和地理经度。

4) 球冠谐函数模型

CODE 采用球谐分析的方法建立全球电离层 TEC 球谐函数模型, 当同样的模型应用于局部区域时, 原来球谐函数的基函数在局部区域上不再具有正交性, 因此模型的参数将不再能描述区域电离层 TEC 的周期性。柳景斌在其博士论文中将球冠谐分析的理论和方法引入到区域电离层 TEC 建模中, 建立了区域电离层 TEC 的球冠谐模型。利用该模型对长期的电离层 TEC 观测资料进行建模, 结果表明该模型的拟合精度和空间适用性较好, 其拟合残差约为 ± 3 TECU, 且精度在时间和空间上分布较均匀^[26]。并对球冠谐函数模型参数的时间序列进行谱分析, 结果表明, 该模型的模型系数较好地描述了区域电离层 TEC 的周期性变化特征^[26]。球冠谐分析与球谐分析不同, 余纬变量 θ 的取值范围不再是 $[0, \pi]$, 而是在给定的某一半角为 θ_0 的球冠 ($[0, \theta_0]$), 区域电离层球冠谐模型的函数表达式为^[59,60]:

$$E_v(\beta_c, \lambda_c) = \sum_{k=0}^{K_{MAX}} \sum_{m=0}^M \tilde{P}_{n_k(m),m}(\cos \theta_c) (\tilde{C}_{km} \cos(m\lambda_c) + \tilde{S}_{km} \sin(m\lambda_c)) \quad (3.13)$$

式中, E_v 为穿刺点 β_c, λ_c 处天顶方向的总电子含量 (VTEC); $\tilde{P}_{n_k(m),m}(\cos \theta_c)$ 为完全正则化的非整阶缔合勒让德函数; $\tilde{C}_{km}$, $\tilde{S}_{km}$ 为待求的完全正则化球冠谐函数系数; 每组模型的系数个数为: $(K_{MAX} + 1)^2 - (K_{MAX} - M)(K_{MAX} - M + 1)$ 。

关于球冠谐分析的详细理论推导与论证可参阅相关文献^[59,60] (G.V. HAINES, 1985; 李建成, 1993)。

(3) 局部电离层 TEC 数学函数模型

局部电离层 TEC 具有明显的周日变化特性, 要在较长 (如 1 d) 的测段内描述电离层 TEC 变化并保证其精度, 必须利用能够有效体现电离层 TEC 随地方时进行 (准) 周日变化的数学函数。利用多项式函数描述一天内电离层 TEC 的变化通常需要分成 6~8 个测段才能保证其精度, 并且各测段之间电离层 TEC 的连续性并无理论上的保证。通过将多项式函数与具有周期特性的三角级数函数组合, 可有效地实现局部电离层 TEC 变化的合理精确模拟。袁运斌等在 Georgiadiou 给出的三角级数函数基础上建立与发展了如式所示的广义三角级数函数模型^[1]:

$$VTEC(\varphi, h) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{m_{max}} \left\{ E_{nm} (\varphi - \varphi_0)^n h^m \right\} + \sum_{k=0}^{k_{max}} \{ C_k \cos(k \cdot h) + S_k \sin(k \cdot h) \} \quad (3.14)$$

式中： φ_0 表示局部电离层 TEC 建模中心点的纬度； h 表示与电离层交叉点处地方时 t 相关的函数，如式 (3.15) 所示； $n_{\max}$ ， $m_{\max}$ 与 $k_{\max}$ 分别表示多项式函数及三角级数函数的最大阶次； E_{nm} ， C_k ， S_k 表示待估的模型系数；其他参数与其他式中对对应符号相同。

$$h = \frac{2\pi(t-14)}{T}, (T = 24h) \quad (3.15)$$

实际应用中，应根据局部电离层 TEC 变化特点采用统计检验的方法选择适当的广义三角级数函数的组成项，使得电离层 TEC 拟合精度达到最优。因此，广义三角级数函数因其参数个数可调，且具有一定的物理含义，与常用的分段多项式函数与低阶的球谐函数相比，其更能有效地描述局部电离层 VTEC 变化的细节。

3.2.4 电离层层析模型

电离层层析建模通常利用有限级数展开来表达电离层电子密度的空间分布，就是利用一套模拟电子密度的基函数来分解信号路径上的倾斜积分总电子含量 STEC，将电子密度表示成^[3]：

$$N_e(\lambda, \varphi, h) \cong \sum_{j=1}^{N_b} x_j \cdot b_j(\lambda, \varphi, h) \quad (3.16)$$

式中， N_b 为基函数的个数； λ 和 φ 为水平方向坐标； x_j 为相应的基函数(b_j)的权系数。故 STEC 可以表示为：

$$STEC_i \cong \int_{T_x}^{R_x} \sum_{j=1}^{N_b} x_j \cdot b_j(\lambda, \varphi, h) ds = \sum_{j=1}^{N_b} \int_{T_x}^{R_x} x_j \cdot b_j(\lambda, \varphi, h) ds \quad (i=1, \dots, N) \quad (3.17)$$

N 为 STEC 观测值的个数。将基函数的积分表示为：

$$B_{ij} = \int_{T_x}^{R_x} b_j(\lambda, \varphi, h) ds \quad (3.18)$$

则，式 (3.17) 可以表示为等效的向量形式：

$$\overrightarrow{STEC} = B \cdot \vec{x} + \vec{\varepsilon} \quad (3.19)$$

式中， B 为设计矩阵， $\vec{x}$ 为系数向量， $\vec{\varepsilon}$ 为观测噪声向量。选择合适的基函数就可确定 B 矩阵的值，然后利用合适的估计方法可求出权系数向量 $\vec{x}$ 。

三维层析模型将水平分辨率和垂直分辨率结合起来，更好的揭示了电离层的空间结构；同时考虑了信号路径隐含的水平梯度变化，这对低高度角、太阳活动高峰期以及地磁赤道附近的 GPS 电离层观测尤为重要。

3.3 格网内插模型

电离层单层模型将电离层简化为一个连续的球面,前文介绍的电离层建模方法均是以多个测站点上的 VTEC 值为基本观测量,利用数学函数拟合部分或整体 TEC 单层球面。而另一种更为简便的方法是直接利用待求测站点附近数个已知点上的 VTEC 值进行内插计算得到待求点上的 VTEC,实际应用中为方便使用,通常先将电离层格网化,再利用多个监测站的 GPS 双频观测量所计算的 VTEC 值拟合出各电离层格网点的 VTEC 值,而用户可利用格网点处 VTEC 内插出用户接收机位置的电离层电子含量,进而求得电离层延迟。

3.3.1 距离反比加权建模

美国的广域增强系统 (Wide Area Augmented System, WAAS) 采用距离反比加权方法进行格网电离层建模。当某格网点周围有效穿刺点象限至少为 3 时,可根据格网点周围有效穿刺点 VTEC 按照穿刺点与格网点的距离平方反比加权计算格网点的天顶方向电离层延迟^[7]。

$$IGP_delay_j = \frac{\sum_{i=1}^m w_i VTEC_i}{\sum_{i=1}^m w_i} \quad (3.20)$$

$$w_i = \frac{1}{6378.1 \cdot \arccos(\sin \phi_j \sin \phi_i + \cos \phi_j \cos \phi_i \cos(\lambda_j - \lambda_i))} \quad (3.21)$$

式,中 IGP_delay_j 为第 j 个格网点的天顶方向电离层延迟,该格网点周围共有 m 个有效穿刺点, $VTEC_i$ 为第 i 个穿刺点的天顶方向电离层延迟, ϕ_i 、 ϕ_j 分别为穿刺点和格网点的地理纬度, λ_i 、 λ_j 分别为穿刺点和格网点的地理经度, w_i 为根据穿刺点与格网点几何距离平方反比加权。

待解算出一组格网电离层天顶延迟后,采用下式评估格网点的解算精度^[7]:

$$e_{ipp} = I_{ipp} - \hat{I}_{ipp} \quad (3.22)$$

$$\hat{e}_{IGP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i (e_{ipp})^2}{\sum_{i=1}^n w_i}} \quad (3.23)$$

式中, I_{ipp} 为穿刺点处的 VTEC, $\hat{I}_{ipp}$ 为根据该穿刺点所在格网的四个或者三个格网点二元线性插值计算该穿刺点处的 VTEC 估计值。 w_i 为距离反比加权的权值。

距离反比加权的格网建模方式其优点是计算的格网点天顶延迟改正精度较高,但格网点的可用度受穿刺点分布影响,在穿刺点较稀疏的地区格网可用度较低。由于穿刺点分布不均匀,有可能出现一种情况:即所有可以利用的穿刺点都分布在待求格网点的一侧,这时,上述的距离加权方法由于未能考虑到穿刺点空间分布,对计算的格网点 VTEC 精度也有一定程度的影响。

3.3.2 IDWK 格网模型

印度的星基增强系统 (GPS Aided GEO Augmented Navigation, GAGAN) 采用 IDWK 格网模型 (Inverse Distance Weighted with Klobuchar Model) 计算格网电离层天顶延迟,其与距离反比加权建模的区别就是增加了格网点与穿刺点的经验模型比值^[7]:

$$IGP_delay_j = \frac{\sum_{i=1}^m w_i VTEC_i \cdot \frac{IGP_Model_j}{IGP_Model_i}}{\sum_{i=1}^m w_i} \quad (3.24)$$

该方法的好处是增加经验模型权值后,格网点周围仅有两个象限有有效穿刺点也可以计算该格网点的电离层延迟改正,在一定程度上增加了格网点的可用度,但缺点是格网点天顶延迟精度受模型值影响而略有降低。

3.3.3 克里格法 (Kriging)

传统的插值方法如距离加权法在计算时并没有考虑样本点的空间分布,只是简单的对各样本点按距离远近赋予相应的权值,如果所有样本点都分布在待插值点的一侧,那么插值的结果就有可能跟实际值有很大的偏差。利用 GPS 观测数据重构电离层 TEC 地图时,由于观测站分布不均匀,待计算格网点周围的穿刺点分布也不均匀,如果用传统的插值方法计算,势必对重构的 TEC 地图精度有一定程度的影响。

Kriging 法也称局部估计或空间局部插值,是地质统计学的主要内容之一,其基本思想是利用区域化变量的原始数据和变异函数的特点,以无偏和估计方差最小为准则,通过对样本值赋予相应的权重,用加权平均方法对未知点进行估计^[61]。Kriging 法与一般的估计方法不同之处在于对未知点进行估计时,不仅考虑了待估点与样本点之间的空间位置关系,还考虑了各样本点之间的空间分布^[62]。

设 $Z(x, y)$ 为电离层的特性参量,它是一个区域化变量,已知区域上 N 个观测站的电离层特性参量的值 $Z(x_i, y_i), i=1, 2, 3, \dots, n$, 那么区域内任一点 (x_0, y_0) 的克里格估计量 $Z_p(x_0, y_0)$ 可表示为^[63]:

$$Z_p(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^n W_i Z(x_i, y_i) \quad (3.25)$$

$i(x_i, y_i)$ 和 $j(x_j, y_j)$ 两点之间的电离层距离 d_{ij} 为:

$$d_{ij} = \sqrt{(Lon(i) - Lon(j))^2 + (SF \cdot (Lat(i) - Lat(j)))^2} \quad (3.26)$$

式中, $Lon(i)$ 和 $Lat(i)$ 分别为 $i(x_i, y_i)$ 点的经度和纬度, $Lon(j)$ 和 $Lat(j)$ 分别为 $j(x_j, y_j)$ 点的经度和纬度。SF 为尺度因子, 它与电离层观测量的相关系数有关系。

变异函数采用通过原点的线性模型, 于是

$$r(x_i, y_i; x_j, y_j) = r(d_{ij}) = kd_{ij} \quad (3.27)$$

Kriging 法要求解出的权重系数必须满足无偏条件并使其估计方差最小, 用变异函数代替协方差函数, 进一步可以得到如下“Kriging 方程组”^[63]:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N d_{ij} W_j + u = d_{i0} \\ \sum_{i=1}^N W_i = 1 \end{cases} \quad (3.28)$$

该方程组与变异函数的斜率无关, 即线性模型的斜率并不影响重构值的结果。求解上述 $N+1$ 阶线性方程组, 求出权重系数 W_i 和拉格朗日系数 u , 代入式 (3.25) 就可得到位置 (x_0, y_0) 上的克里格估计量 $Z_p(x_0, y_0)$ 。

采用交叉验证法 (Cross validation) 来检验 Kriging 法电离层 TEC 的重构效果, 即首先假定某个 GPS 台站的电离层 TEC 未知, 使用周围其他站点的值进行克里格估计, 以估计值和实测值之差的均方根值 σ 作为评估重构方法优劣的标准^[64]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (TEC_i(pre) - TEC_i(meas))^2} \quad (3.29)$$

式中, N 为参加评估的样本数。 $TEC_i(pre)$ 为估计值, $TEC_i(meas)$ 为实测值。若已知第 i 个站点每个时刻 t 的重构误差为 $\sigma_i(t)$, 那么该站的整体重构误差为:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{t=1}^M \sigma_i^2(t)} \quad (3.30)$$

式中, M 为样本个数。

3.4 电离层模型修正方法效果评估

不同的电离层模型修正方法所应用的领域和范围不同,应根据不同地区的电离层 TEC 变化特征,结合精度要求和函数复杂性选择合理的电离层模型,以实现电离层延迟的高精度修正。

根据相关文献,Bent 模型、IRI 模型、Klobuchar 模型等可进行电离层预报,其中最常用的是 Klobuchar 模型,Bent 模型的精度要优于 IRI,而 Klobuchar 模型理想情况下可改正至 75%^[6,7,56,57]。

国内外学者研究表明,球谐函数模型是后处理模型,也可以用于预报,该函数模型用来拟合全球电离层活动的效果明显好于经验模型^[1,4,7,14,18];多项式模型是目前最广泛应用的局部电离层模型,不宜作为预报模型,该模型一般只能在数小时内达到较好的拟合精度^[1,4,7,18,34];低阶球谐函数是较好的局部电离层模型,对于区域性和全球电离层形态研究而言,低阶球谐函数模型可作为最佳的模型之一^[1,4,7,18];低阶球谐函数模型、多项式模型、三角级数模型可以作为广域差分系统电离层延迟改正的函数模型^[1,4,7,18]。

3.5 本章小结

本章首先介绍了电离层模型参考系,然后详细介绍了电离层函数模型和格网模型:其中函数模型介绍了经验电离层模型(Bent 模型、IRI 模型),广播星历电离层延迟改正模型(Klobuchar 模型、NeQuick 模型),全球性的球谐函数模型,区域性的电离层模型(多项式函数模型、低阶球谐函数模型、三角级数电离层模型、球冠谐函数模型),局部电离层 TEC 函数模型(广义三角级数函数模型),电离层层析模型;格网电离层模型中详细介绍了距离反比加权建模与克里格法。最后对本章所介绍的电离层模型修正方法的效果进行了评估。

第 4 章 基于单站数据的接收机硬件延迟估算方法

GPS 卫星和接收机对信号产生的硬件延迟可能给电离层观测值 TEC 带来高达数米的系统误差，甚至可能导致 TEC 出现负值，是高精度 TEC 测量的最大误差源^[12]。卫星的硬件延迟可以从 IGS 及其分析中心获得，而 GPS 观测站的硬件延迟只有少量能从 IGS 站的分析中心获得，随着 GPS 应用的深入与拓展，大规模的 GPS 观测网在许多地区相继构建，大量 GPS 观测站需要采用其他的方法估算硬件延迟。而建立区域/局部电离层模型时能够利用的 GNSS 观测站较少，为了建立高精度的区域模型，有必要探讨一种在少站或单站情况下精确求得接收机硬件延迟的方法。

本章基于 2.4.2 节介绍的第三类、第四类两种方法利用单站 GPS 伪距与相位观测数据估算接收机硬件延迟，选取了全球不同纬度的 18 个 IGS 站 2013 年 1 月的数据解算了各自接收机硬件延迟，并与 IGS 公布结果进行了对比。

4.1 硬件延迟估算方法

4.1.1 基于多项式模型的硬件延迟估算方法

利用伪距和相位观测的组合可求得高精度的电离层 TEC：

$$TEC_N = \alpha(L_1 - L_2)_N + \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \alpha[(P_2 - P_1)_t - (L_1 - L_2)_t] + \alpha \cdot (B_1 + B^k) \quad (4.1)$$

式中， $\alpha = \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)}$ ； B^k 、 B_1 分别为接收机和卫星伪距的硬件延迟； N 为

观测历元。具体公式推导可参见 2.2.3 节。

区域性的电离层 TEC 模型一般采用多项式函数模型、低阶球谐函数模型、三角级数模型以及利用距离加权法建立的格网模型，其建模精度大体相同。而对于单站或小型 GPS 网而言，其所相应的电离层区域的垂直 TEC 具有明显的周日变化，所以要在较长（如 1 d）的测段内模拟电离层延迟并保证其精度，必须在地固系内建立能够有效体现电离层 VTEC 随地方时进行（准）周日变化的数学模型。多项式模型比较适合用于描述短时间尺度内局部地区的电离层 TEC 变化，加之，应用非常简单灵活，适合单站电离层建模。

多项式模型将垂直总电子含量 VTEC 看作是纬差 $\varphi - \varphi_0$ 和太阳时角差 $S - S_0$

的函数，其具体表达式为：

$$\text{VTEC} = \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^m E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (S - S_0)^k \quad (4.2)$$

式中， $S - S_0 = (\lambda - \lambda_0) + (t - t_0)$ ； S_0 为测区中心点 (φ_0, λ_0) 在该时段中央时刻 t_0 时的太阳时角； (φ_0, λ_0) 为测区中心点的地理经纬度； (φ, λ) 为信号路径与单层的交点即穿刺点 IPP 的地理经纬度； t 为观测时刻； n, m 为泰勒级数展开的最大阶数； $E_{i,k}$ 为多项式模型系数。

对于给定的单层模型的高度，穿刺点分布在有限的范围内，一般来说，经度方向在 23° 以内，纬度方向在 32° 以内^[53]，考虑多项式函数模型的特点， n 取 1 阶， m 取 2 阶，则多项式模型具体表示为：

$$\begin{aligned} \text{VTEC} = & E_0 + E_1(\varphi - \varphi_0) + E_2(\varphi - \varphi_0)(S - S_0) + \\ & E_3(S - S_0) + E_4(\varphi - \varphi_0)(S - S_0)^2 + E_5(S - S_0)^2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

综上所述，建立的观测方程为：

$$\begin{aligned} E_0 + E_1(\varphi - \varphi_0) + E_2(\varphi - \varphi_0)(S - S_0) + E_3(S - S_0) + E_4(\varphi - \varphi_0)(S - S_0)^2 + E_5(S - S_0)^2 = \\ \frac{1}{F(z)} \left\{ \alpha(L_1 - L_2)_N + \frac{1}{N} \sum_1^N \alpha[(P_2 - P_1)_t - (L_1 - L_2)_t] + \alpha \cdot (B_1 + B^k) \right\} \end{aligned} \quad (4.4)$$

式中， $F(z)$ 为 MSLM 投影函数，要求解的未知数包括多项式模型系数 E_0 、 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 、 E_5 ，接收机硬件延迟 B_1 。数据处理时，每 2 h 设为一个时段，卫星高度截止角设为 30° ，每个时段解出一组电离层模型参数，每天解算出一组测站接收机 DCB 值，而卫星 DCB 以 IGS 公布的结果作为已知值。为了充分利用单站的全天数据，第一个 2 h 时段从 0000-0200，第二个 2 h 时段从第一个时段的后 1 h 开始，即 0100-0300，以此类推。组成误差方程后，按法方程叠加的方式，并采用最小二乘参数估计的方法，统一解算各个时段多项式模型参数和接收机硬件延迟。此方法下文记作方法一。

4.1.2 基于“VTEC 标准差之和最小”条件的硬件延迟估算方法

“VTEC 标准差之和最小”假设：在一定的空间范围内，接收机到所有卫星视线上 TEC 对应的 VTEC 值基本一致。当然，由于卫星和接收机硬件延迟的存在和时空的变化，各点处的 VTEC 值不可能完全相等，但其相对于 VTEC 平均值的标准差应该为最小的。该方法可表示为：

$$\sigma = \sum_{n=1}^N \sigma_n \quad (4.5)$$

其中

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (VTEC_n^m - \overline{VTEC_n})^2} \quad (4.6)$$

式中， σ 为所有历元的 VTEC 标准差之和， N 表示时段数， M 表示一定范围一段时间内的穿刺点数目。VTEC 可由式（4.1）获得。

为了减少多路径效应，同时确保 GPS 观测的对称性，GPS 数据的高度截止角设为 40° ^[53]。将每一历元作为一个时段，数据的采样率为 30 s，则一天共有 2880 个时段；将 IGS 公布的卫星硬件延迟作为已知值，对于每一个给定的接收机硬件延迟，可以得到一个所有历元的 VTEC 标准差之和，而最小标准差之和所对应的接收机硬件延迟即为所要寻找的值。考虑到太阳活动对电离层的影响，本文以前一天的硬件延迟作为先验值，将搜索范围设置在 ± 5 ns，搜索步长设置为 0.001 ns 来估算接收机 DCB。此方法下文记为方法二。

4.2 计算结果及分析

4.2.1 数据使用

考虑到纬度效应对电离层 TEC 的影响，依据不同纬度选择全球 18 个 IGS 站，具体信息见表 4.1。选取的时间段是 2013 年 1 月共 31 天数据，数据采样率为 30 s。

表 4.1 所选站点列表

IGS 站	经度/（度）	纬度/（度）	接收机类型	天线类型
GUAM	144.8683	13.5893	ASHTECH UZ-12	ASH701945B_M
PIMO	121.0777	14.6357	ASHTECH UZ-12	ASH701945C_M
TNML	120.9873	24.798	AOA BENCHMARK ACT	AOAD/M_T
TWTF	121.1645	24.9536	ASHTECH Z-XII3T	ASH701945C_M
USUD	138.3620	36.1331	ASHTECH UZ-12	AOAD/M_T
MIZU	141.1328	39.1352	SEPT POLARX2	TPSCR3_GGD
NRC1	284.3762	45.4542	JAVAD TRE_G3T	AOAD/M_T
ALGO	281.9286	45.9588	TPS NET-G3A	AOAD/M_T
YSSK	142.7167	47.0297	ASHTECH Z-XII3	ASH701933B_M
GOPE	14.7856	49.9137	TPS NETG3	TPSCR.G3
DUBO	264.1338	50.2588	TPS NETG3	AOAD/M_T
PTBB	10.4597	52.2962	ASHTECH Z-XII3T	ASH700936E
ONSA	11.9255	57.3953	JPS E_GGD	AOAD/M_B
CHUR	265.9113	58.7591	TPS NET-G3A	ASH701945E_M
YELL	245.5193	62.4809	AOA SNR-12 ACT	AOAD/M_T
HOFN	344.8132	64.2673	TPS E_GGD	TPSCR3_GGD

表 4.1 所选站点列表 (续)

IGS 站	经度/(度)	纬度/(度)	接收机类型	天线类型
MCM4	166.6693	-77.8383	ASHTECH UZ-12	ASHTECHUZ-12
NYAL	11.8653	78.9296	TRIMBLE NETRS	AOAD/M_B

图 4.1 给出了该段时间内地磁及太阳活动情况, 地磁指数 Dst 来自 Data Analysis Center for Geomagnetism, Kyoto。从图 4.1 中可以看出, 从 01-17~01-20 和 01-26~01-27 期间发生了磁暴。

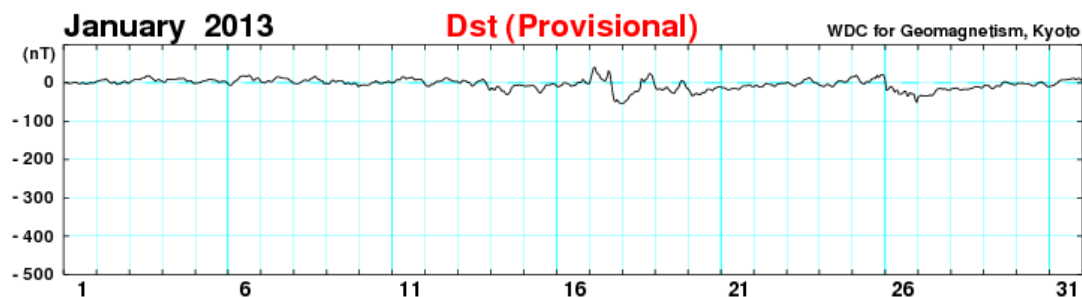
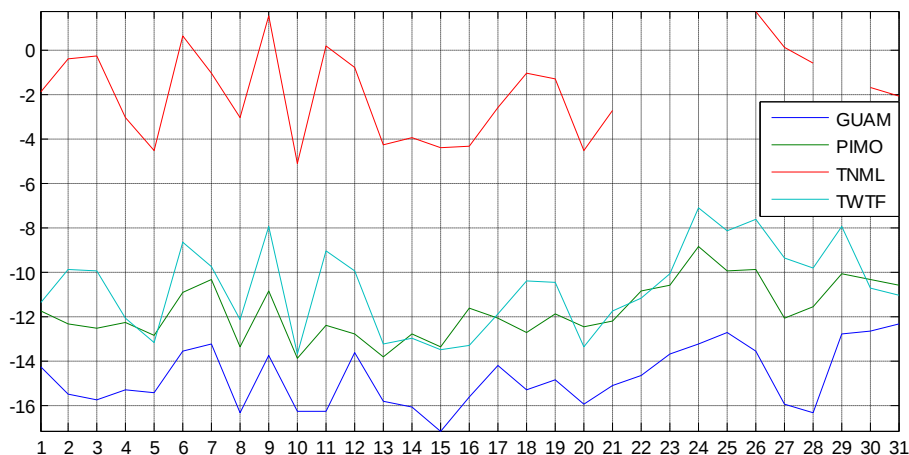


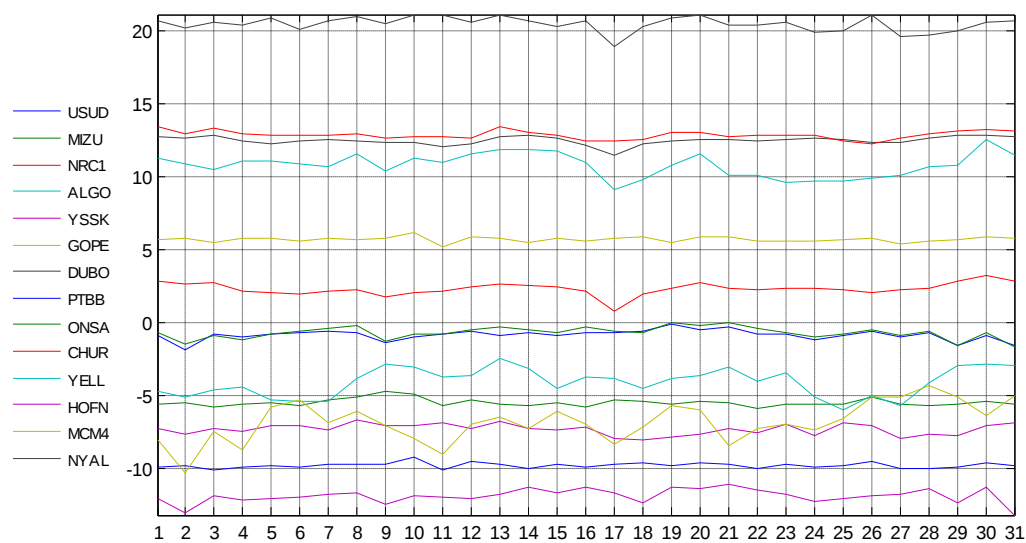
图 4.1 2013 年 1 月 Dst 指数变化曲线
(<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>)

4.2.2 结果分析

图 4.2、图 4.3 依次给出了低纬度与中、高纬度各 IGS 站在 2003 年 1 月使用方法一及方法二估算的接收机硬件延迟变化, 其中横坐标表示 2013 年年积日, 纵坐标为估算结果, 单位为 ns。从图 4.2 及图 4.3 中可以看出对于低纬度测站, 估算得到的接收机硬件延迟波动范围大, 相关文献也指出接收机硬件延迟误差随着纬度的降低而增大^[66]; 而对于中、高纬度的测站, 其接收机延迟估值变化比较稳定, 且变化趋势与地磁指数变化趋势基本一致。

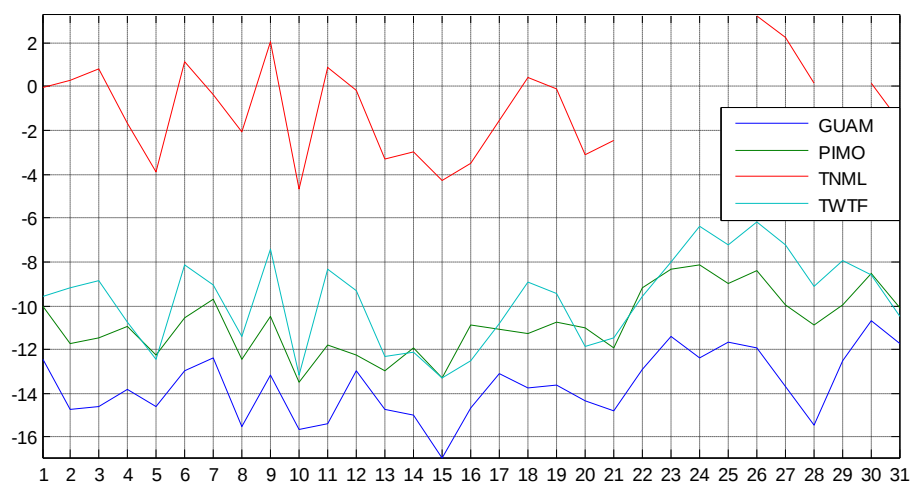


(a)低纬度 IGS 站

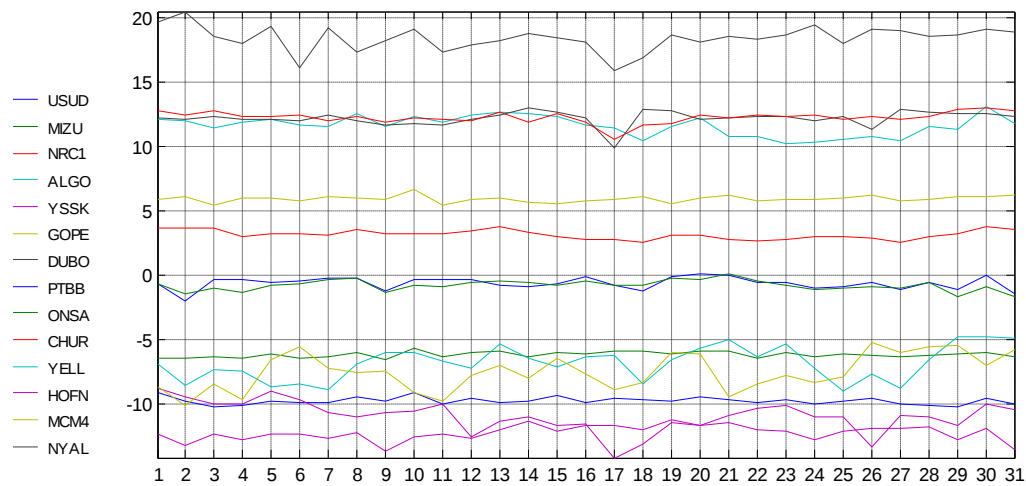


(b)中、高纬度 IGS 站

图 4.2 2013-01 各 IGS 站的接收机硬件延迟估值变化（方法一）



(a)低纬度 IGS 站



(b)中、高纬度 IGS 站

图 4.3 2013-01 各 IGS 站的接收机硬件延迟估值变化（方法二）

为了进一步比较两种方法估算接收机硬件延迟的效果，图 4.4、图 4.5 依次给出了中高纬度测站使用上述两种方法估算的结果与 IGS 公布的结果的差值变化。从图 4.4 及图 4.5 中可以看出，方法一得到的结果差值基本上在 1.5 ns 以内，只有在地磁扰日得到的结果之差将近 2 ns；方法二得到的结果之差对于中纬度地区的各站基本在 2 ns 以内，而对于高纬度的 YELL 站、HOFN 站、NYAL 站和 MCM4 站，其结果之差波动剧烈，在地磁扰日差值均偏大。

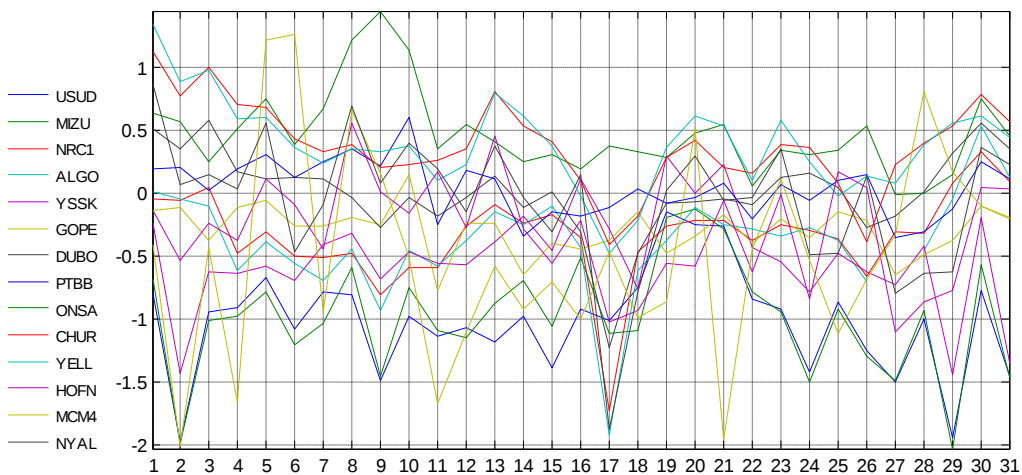


图 4.4 方法一估算的结果与 IGS 公布的结果之差

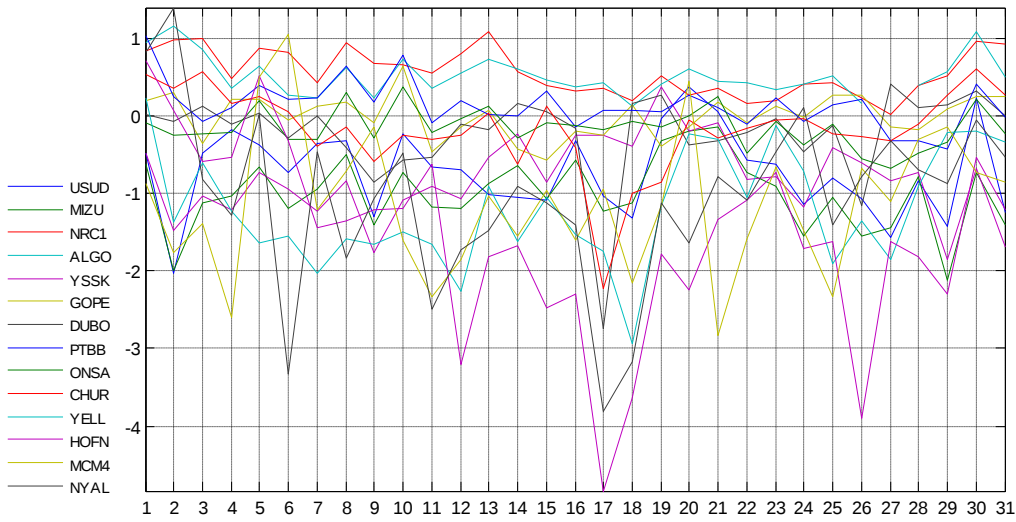


图 4.5 方法二估算的结果与 IGS 公布的结果之差

两种方法是按日估算接收机硬件延迟，将一个月中每日的结果与 IGS 的差值进行平均，鉴于方法二在地磁扰日对高纬度测站造成差值偏大的影响，统计时对于 YELL 站、HOFN 站、NYAL 站和 MCM4 站去掉地磁扰日 01-17 与 01-26 的结果，表 4.2 进一步给出了所估算的结果与 IGS 公布结果的差值的部分统计特征，图 4.6 及图 4.7 给出了统计结果的条形图。

表 4.2 估算的硬件延迟与 IGS 差值的月平均值与标准差

IGS 站	方法一		方法二	
	平均值/ns	标准差/ns	平均值/ns	标准差/ns
USUD	-1.01	0.41	-0.72	0.54
MIZU	-0.98	0.44	-1.00	0.45
NRC1	-0.33	0.34	0.55	0.28
ALGO	-0.37	0.40	0.51	0.24
YSSK	-0.50	0.40	-0.80	0.49
GOPE	-0.29	0.18	-0.01	0.26
DUBO	0.01	0.33	-0.22	0.56
PTBB	0.04	0.21	0.13	0.30
ONSA	0.46	0.32	-0.15	0.24
CHUR	0.37	0.33	-0.17	0.53
YELL	0.38	0.35	-1.14	0.66
HOFN	-0.29	0.41	-1.21	0.88
MCM4	-0.47	0.81	-1.16	0.88
NYAL	-0.06	0.52	-0.84	0.93

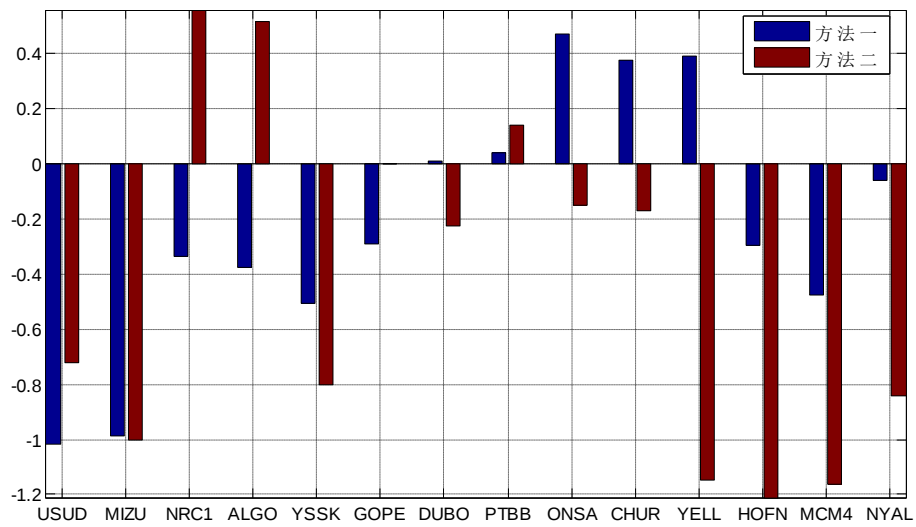


图 4.6 估算的硬件延迟与 IGS 差值的月平均值条形图

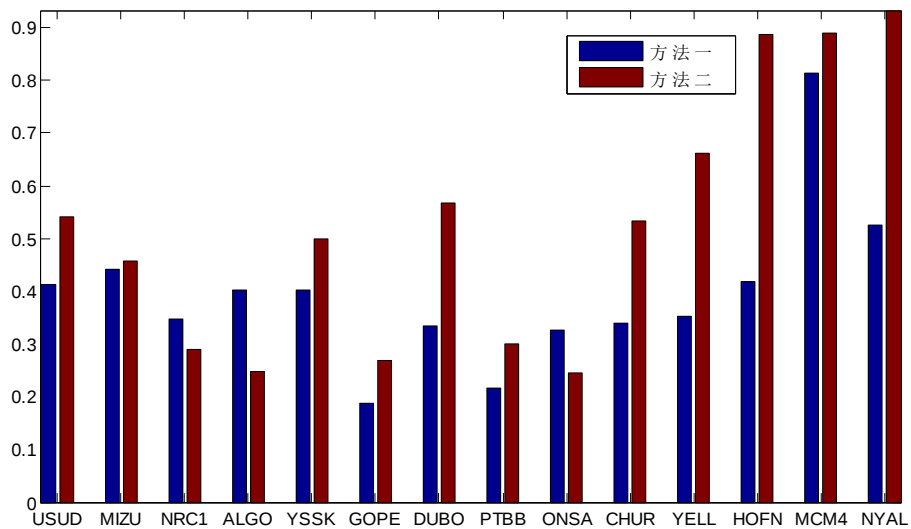


图 4.7 估算的硬件延迟与 IGS 差值的标准差条形图

从图 4.2—图 4.7 及表 4.2 中可以看出：在中纬度地区，两种方法都可以有效地估算接收机的硬件延迟，且方法一比方法二更加稳定；在地磁扰日，各站估算的硬件延迟都会出现一定波动，而除去地磁扰日，各站估算结果变化稳定，估算的结果与 IGS 公布结果的差值的平均值方法一都在 1 ns 以内，方法二都在 1.2 ns 以内，其标准差基本在 0.6 ns 以内。

4.3 本章小结

本章探讨两种估算单站接收机硬件延迟的方法，利用全球不同纬度的 18 个 IGS 站观测数据进行求解接收机硬件延迟参数实验，将求得的结果与 IGS 公布的结果进行比较，结果表明在接收机硬件性能稳定的情况下，本文方法受纬度影响较大，低纬度测站估算结果精度低且波动大，但中、高纬度测站，即使在地磁扰日，均具有很好的精度，估算的结果与 IGS 公布结果的差值的平均值，方法一都在 1.0 ns 以内，方法二都在 1.2 ns 以内，其标准差基本在 0.6 ns 以内。在测站稀少或分布不均匀的情况下，可利用本文方法计算接收机硬件延迟，进而求得高精度电离层延迟。

第5章 区域电离层模型研究

5.1 中国区域电离层模型建立

5.1.1 建模过程

考虑到观测站的分布密度以及模型的复杂程度,全球球谐函数模型的空间分辨率有限,而且此模型应用于局部区域时,原球谐函数的基函数在局部区域上不再具有正交性,因此模型参数将不再能描述区域电离层 TEC 的周期性。球冠谐分析与球谐分析不同,余纬变量 θ 的取值范围不再是 $[0, \pi]$,而是在给定的某一半角为 θ_0 的球冠 ($[0, \theta_0]$),用非整阶的勒让德函数代替整阶的勒让德函数,相关文献指出在球冠区域上其基函数具有正交性^[61,62]。

利用中国大陆构造环境监测网络 (Crustal Movement Observation Network of China, CMONOC) 的 180 个观测站数据建立中国区域电离层球冠谐模型,站点分布位置如图 5.1 所示,区域覆盖范围是:北纬 $10^\circ \sim 55^\circ$; 东经 $70^\circ \sim 145^\circ$ 。所选数据采样间隔为 30 s,截止高度角为 20° 。

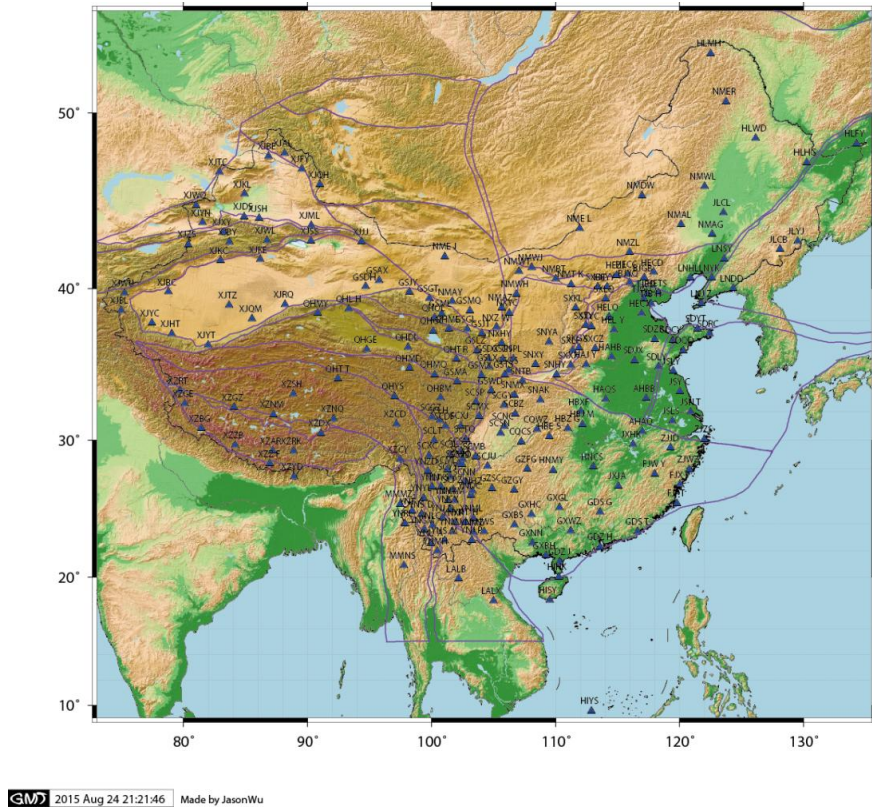


图5.1 GPS观测站（蓝色三角形）分布图

取 (35°N, 105°E) 为球冠极点, 半角 θ_0 为 30°。以选定的球冠极点为球冠北极点, 以通过该点和地理南极点的经线为经度零点, 建立球冠坐标系。球冠坐标系与地理坐标系转换关系为^[68]:

$$\beta_c = \arccos(\cos \theta_N \cos \theta + \sin \theta_N \sin \theta \cos(\lambda_N - \lambda)) \quad (5.1)$$

$$\lambda_c = \arcsin\left(\frac{\sin(\lambda - \lambda_N)}{\sin \theta} \sin \theta\right) \quad (5.2)$$

式中, θ_N, λ_N 分别为球冠极点在地理坐标系下的地心余纬 ($\theta = 90^\circ - \beta$) 和经度, (β, λ) 为地理坐标系下任意一点的球面地心坐标, β_c, λ_c 为其在球冠坐标系下的坐标。原坐标系是太阳方向固定的地理坐标系, 其经度为太阳方向固定的经度, 通过下式计算:

$$\lambda' = \lambda_{IPP} - \lambda_{SUN} = \lambda_{IPP} + 15.0 * (UT - 12) \quad (5.3)$$

利用球冠谐函数对每个时段(本节以 2 h 为时段)的 GPS 电离层数据进行建模, 利用最小二乘法求得模型参数。区域电离层球冠谐模型的函数表达式为^[4]:

$$E_v(\beta_c, \lambda_c) = \sum_{k=0}^{K_{MAX}} \sum_{m=0}^M \tilde{P}_{n_k(m), m}(\cos \theta_c) (\tilde{C}_{km} \cos(m\lambda_c) + \tilde{S}_{km} \sin(m\lambda_c)) \quad (5.4)$$

式中, E_v 为穿刺点 β_c, λ_c 处天顶方向的总电子含量 (VTEC); $\tilde{P}_{n_k(m), m}(\cos \theta_c)$ 为完全正则化的非整阶缔合勒让德函数; $\tilde{C}_{km}, \tilde{S}_{km}$ 为待求的完全正则化球冠谐函数系数^[68]。

取 $K_{MAX} = 8$, $M = 6$, 则每组模型的系数个数为:

$$(K_{MAX} + 1)^2 - (K_{MAX} - M)(K_{MAX} - M + 1) = 75 \quad (5.5)$$

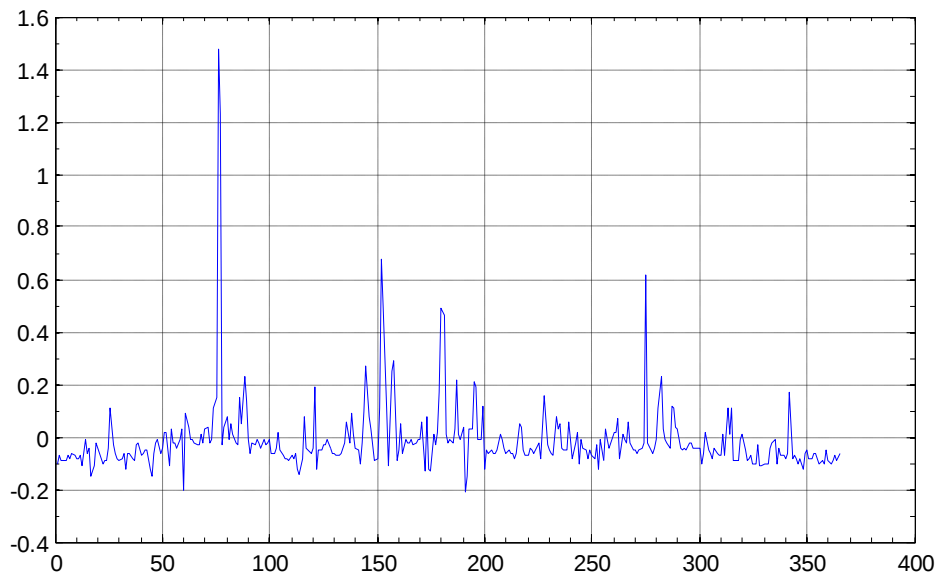
表 5.1 给出了缔合勒让德函数的非整数阶 $n_k(m)$ (第 k 个 m 次的阶数) 的取值^[62], 即可求得相应的缔合 Legendre 多项式^[19]。

表 5.1 $\theta_0 = 30^\circ$ 的球冠谐函数的非整阶 $n_k(m)$

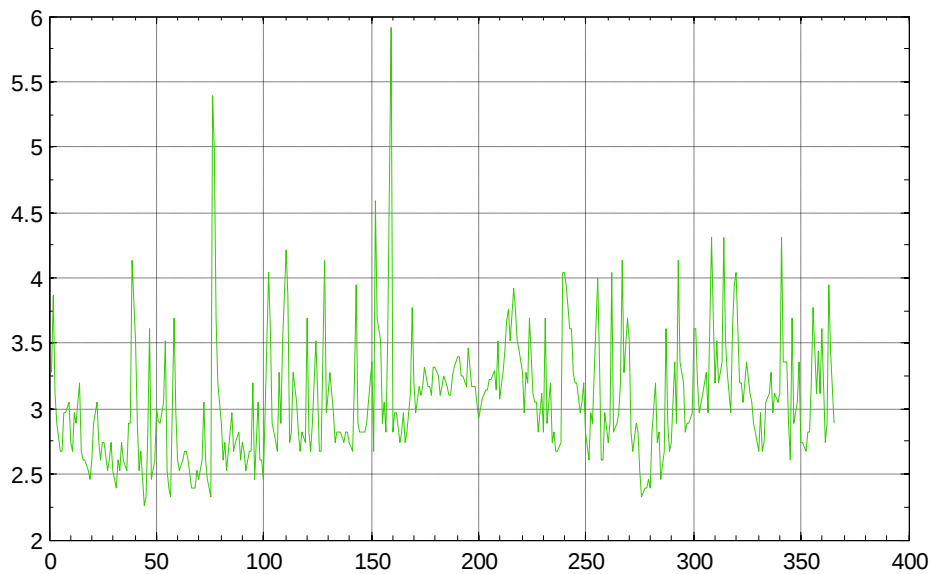
$n_k(m), \theta_0 = 30^\circ$							
$m \backslash k$	0	1	2	3	4	5	6
0	0.011719						
1	4.078125	3.121875					
2	6.837891	6.836719	5.49375				
3	10.03125	9.713672	9.384375	7.754297			
4	12.9082	12.90703	12.37266	11.80313	9.962109		
5	16.00781	15.82207	15.61875	14.91738	14.175	12.13477	
6	18.9375	18.93047	18.58359	18.225	17.3918	16.51172	14.28398
7	22.03125	21.87041	21.7125	21.24551	20.76094	19.81348	18.80156
8	24.95215	24.95391	24.68613	24.4125	23.84004	23.23828	22.19414

5.1.2 拟合精度分析

本文利用球冠谐模型处理了 2013 年全年的 GPS 观测数据，计算一天内所有穿刺点处模型值 VTEC 与观测值之差的均值与方差。利用 IGS 分析中心提供的全球电离层数据 (GIM) 在每一个电离层穿刺点处进行内插，对内插结果的残差也进行了比较分析。图 5.2 为球冠谐模型拟合的每天平均值及方差，图 5.3 为 GIM 内插结果的残差的每天平均值及方差。表 5.2 给出了一年的残差统计值。图 5.2 、图 5.3 及表 5.2 中的单位均为 TECU。

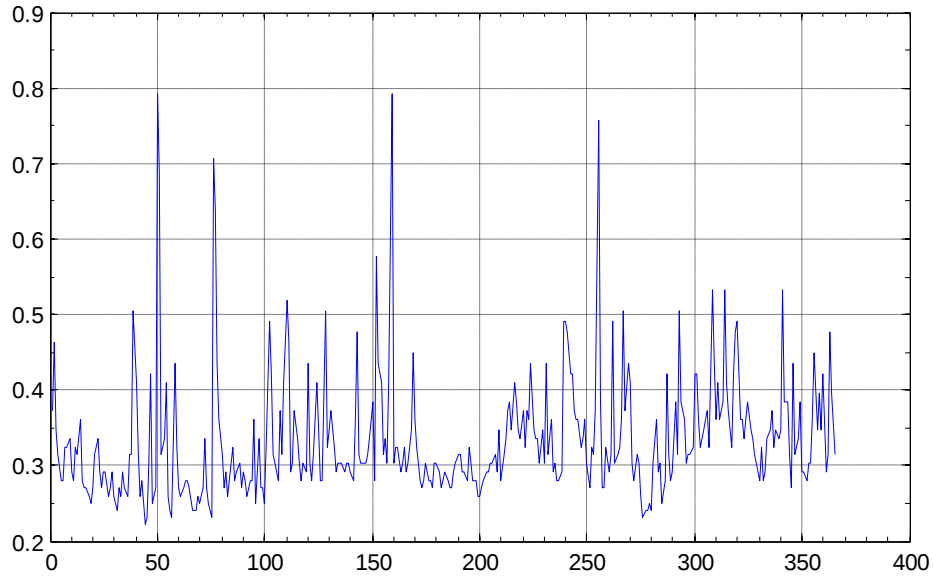


(a) 残差均值

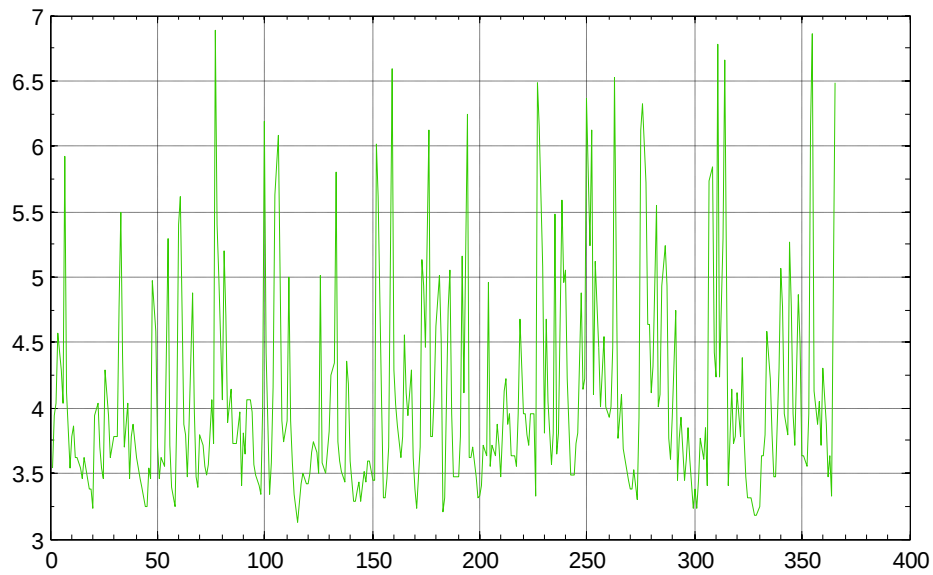


(b) 残差方差

图 5.2 球冠谐模型拟合的残差



(a) 残差均值



(b) 残差方差

图 5.3 GIM 内插的残差

表 5.2 区域电离层模型残差统计

拟合残差估计	球冠谐模型	GIM 内插
均值	-0.01	0.29
方差	3.07	4.08

(1) 从图5.2、图5.3及表5.2的结果可以看出球冠谐模型的拟合残差均值接近于零，全年的残差变化也较平稳，表明球冠谐模型在中国区域具有较高的拟合精度；GIM内插结果的残差较大，残差每日均值有0.29 TECU的系统偏差，而且不稳定，表明GIM内插的结果与实测数据不一致，在中国区域的精度较差。分析

其原因，全球电离层建模时，用到的中国区域的数据较少，且测站分布较稀疏，因而会存在较为明显的系统偏差；

(2) 从图5.2中可以看出，第76天（2013年3月17日）模型的残差均值及方差均较大。分析其原因，发现该天及后一天部分时段的Dst指数小于-100，Kp系数接近8，表明太阳地磁活动较剧烈，影响电离层活动变化以及GPS观测值的观测精度，因此利用模型模拟的精度较差。图5.4给出了2013-03的地磁指数Dst的变化趋势，地磁指数Dst来自Data Analysis Center for Geomagnetism, Kyoto。从图5.4中可以看出2013-03-17发生中等磁暴。图5.5进一步给出了2013-03-17~2013-03-18期间的Dst指数变化趋势，图5.6给出了这段时间的Kp系数变化图。

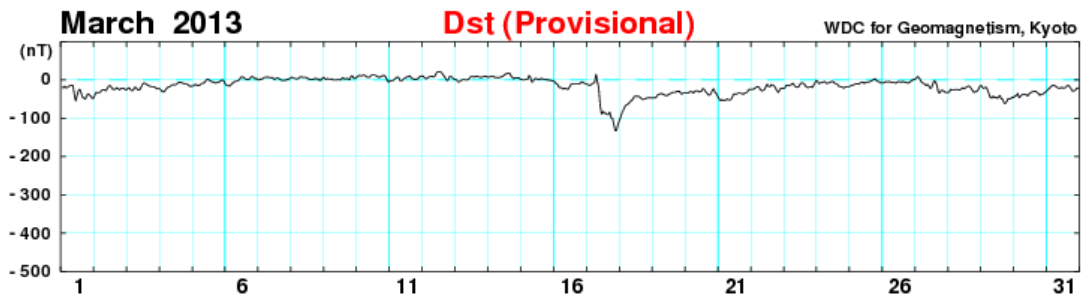


图5.4 2013-03Dst指数变化曲线

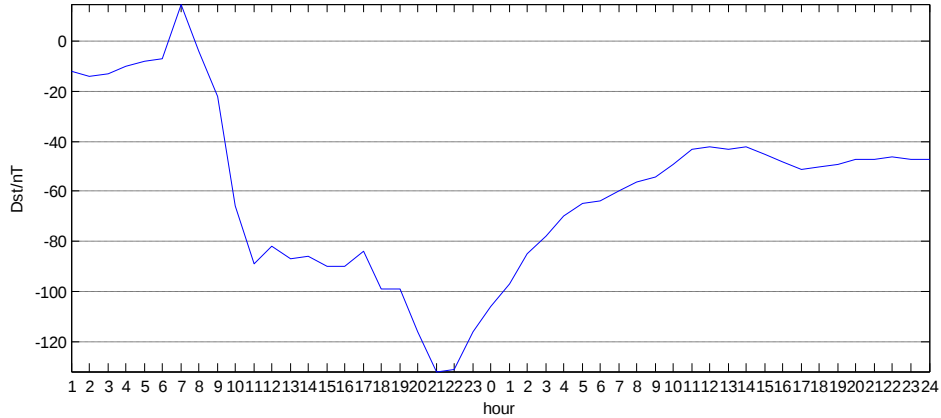


图5.5 2013-03-17~2013-03-18Dst指数变化曲线

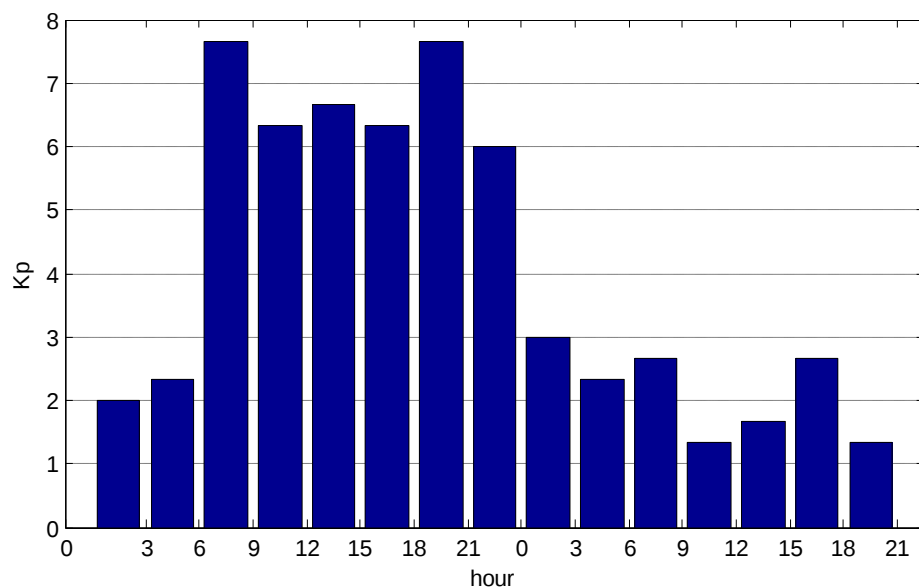


图5.6 2013-03-17~2013-03-18Kp系数变化图

为了反映 2013-03-17 磁暴发生期间中国上空电离层电子含量的变化趋势，图 5.7—图 5.13 给出了中国大陆及邻区 2013-03-17UTC12: 00~2013-03-18UTC0: 00 的电离层 VTEC 的模型结果，分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

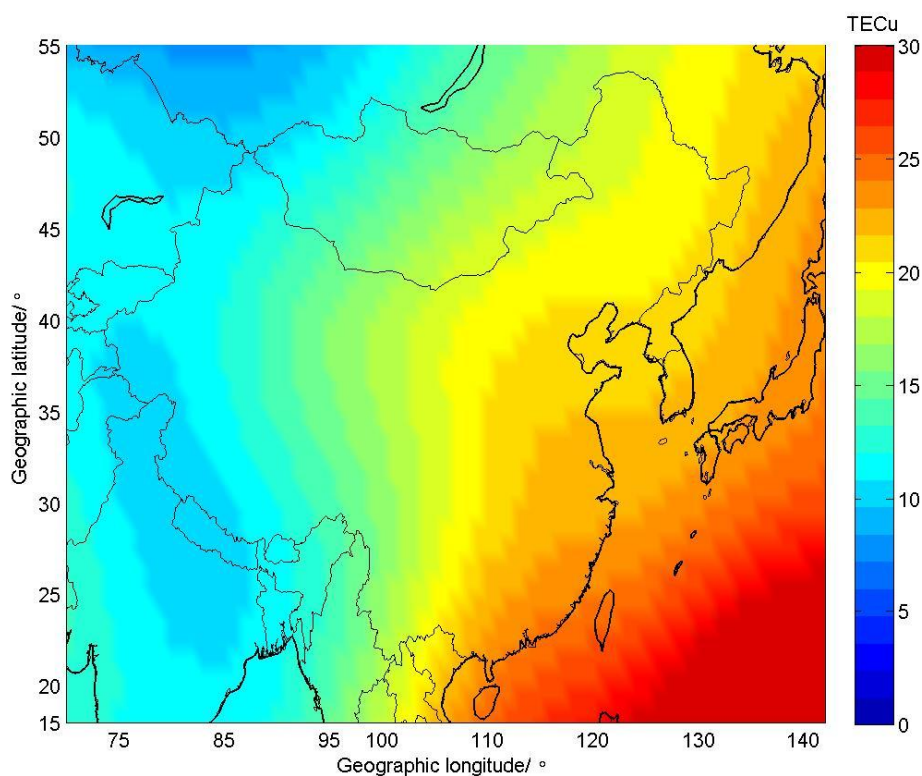


图 5.7 中国区域电子含量图（2013-03-17UTC12: 00）

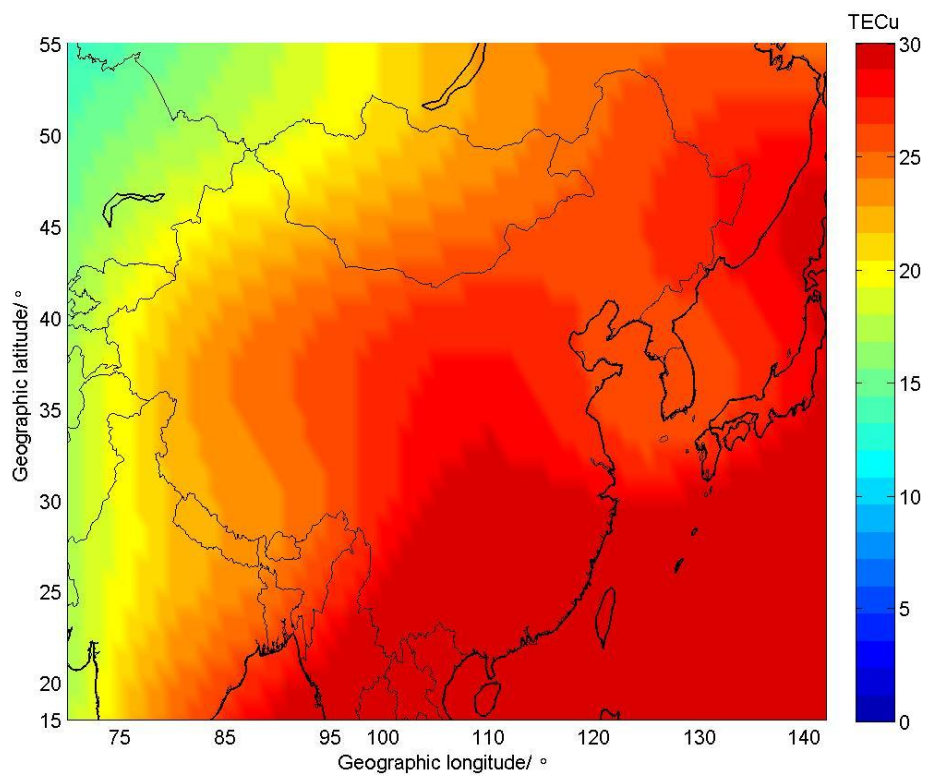


图 5.8 中国区域电子含量图 (2013-03-17UTC14: 00)

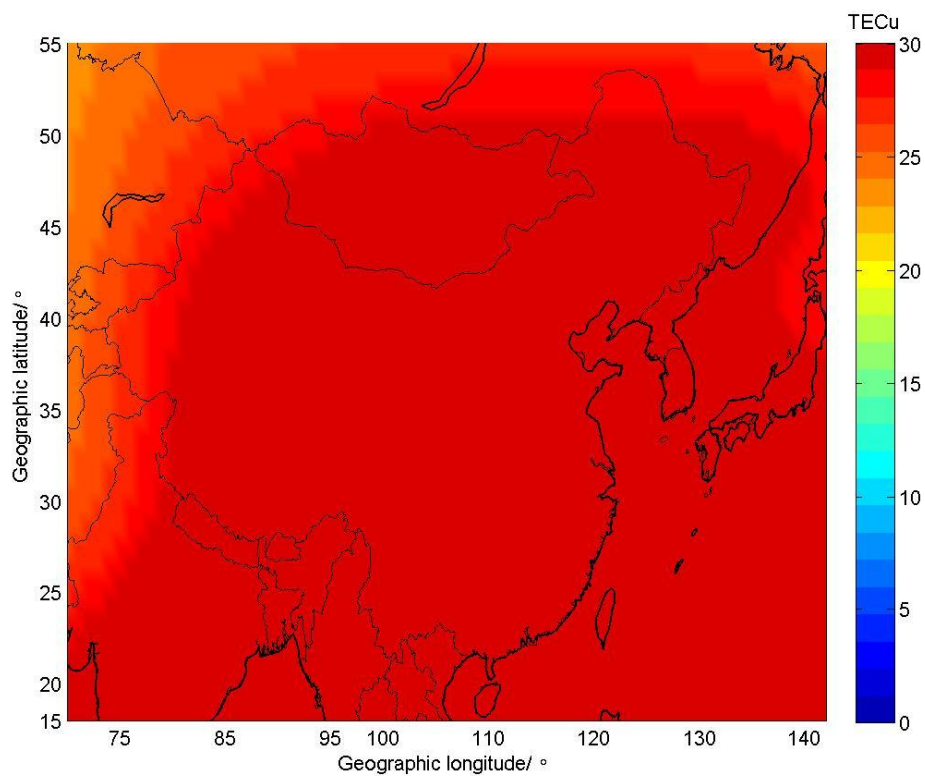


图 5.9 中国区域电子含量图 (2013-03-17UTC16: 00)

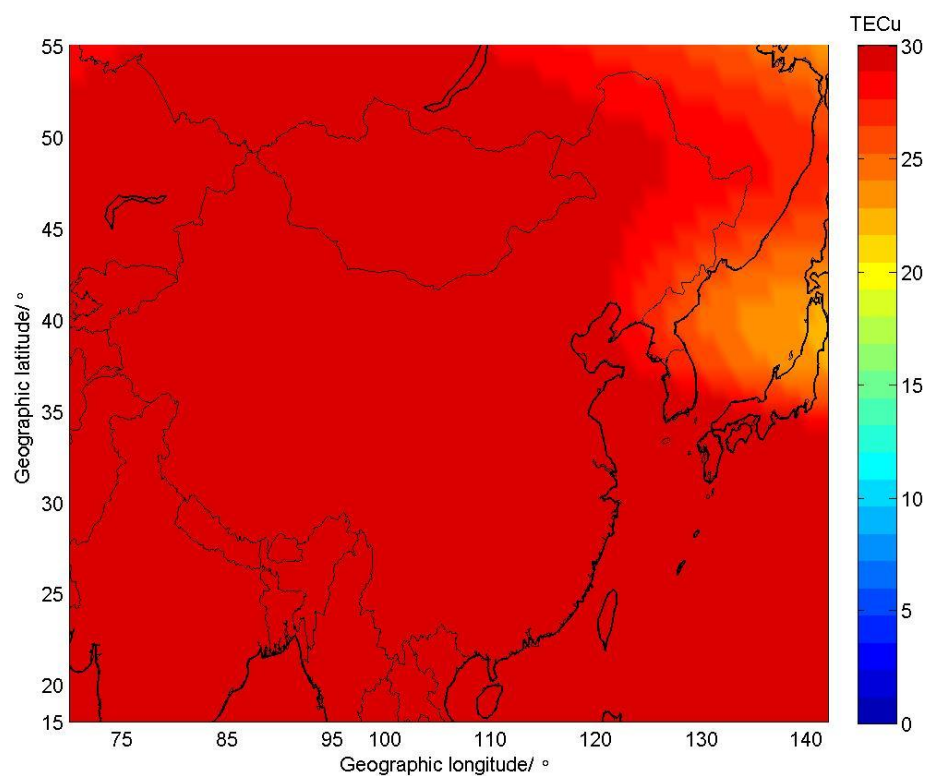


图 5.10 中国区域电子含量图 (2013-03-17UTC18: 00)

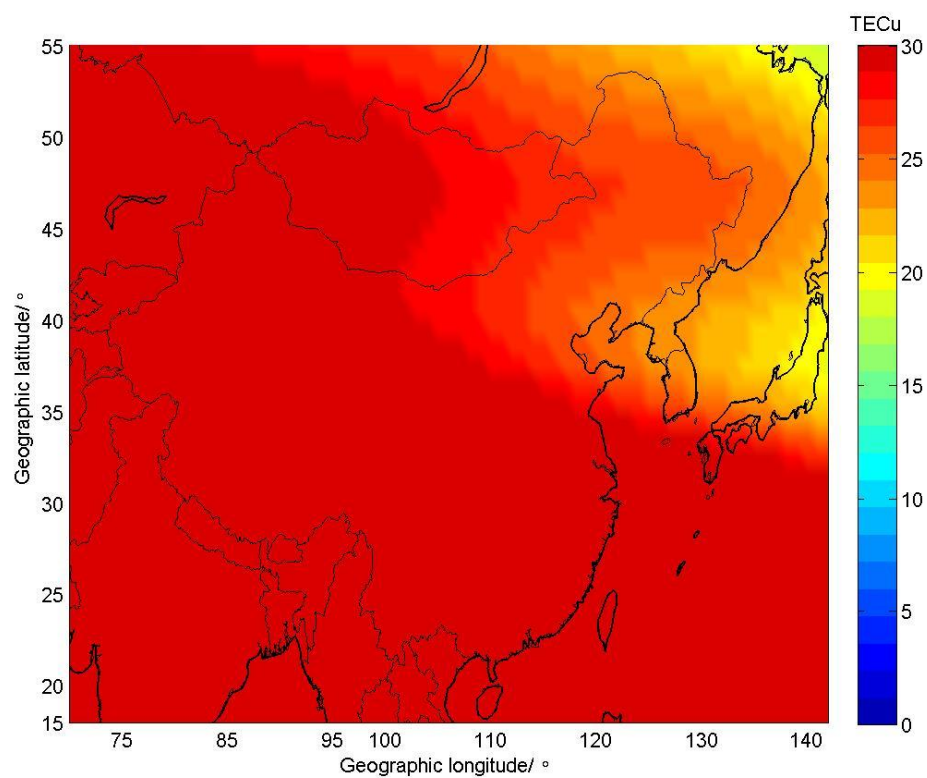


图 5.11 中国区域电子含量图 (2013-03-17UTC20: 00)

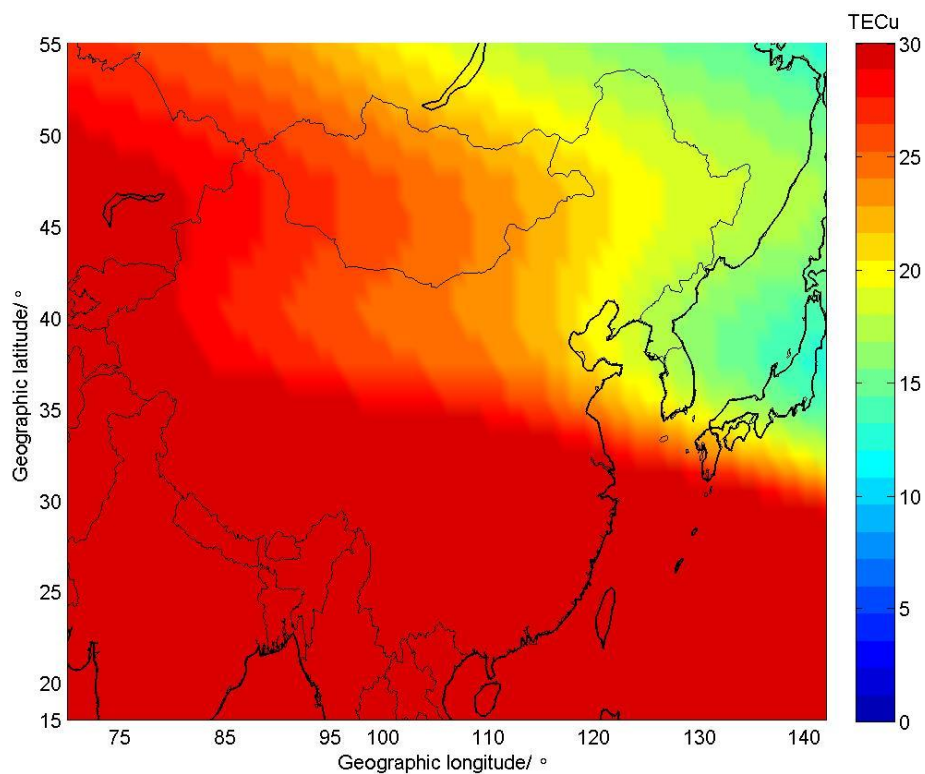


图 5.12 中国区域电子含量图 (2013-03-17UTC22: 00)

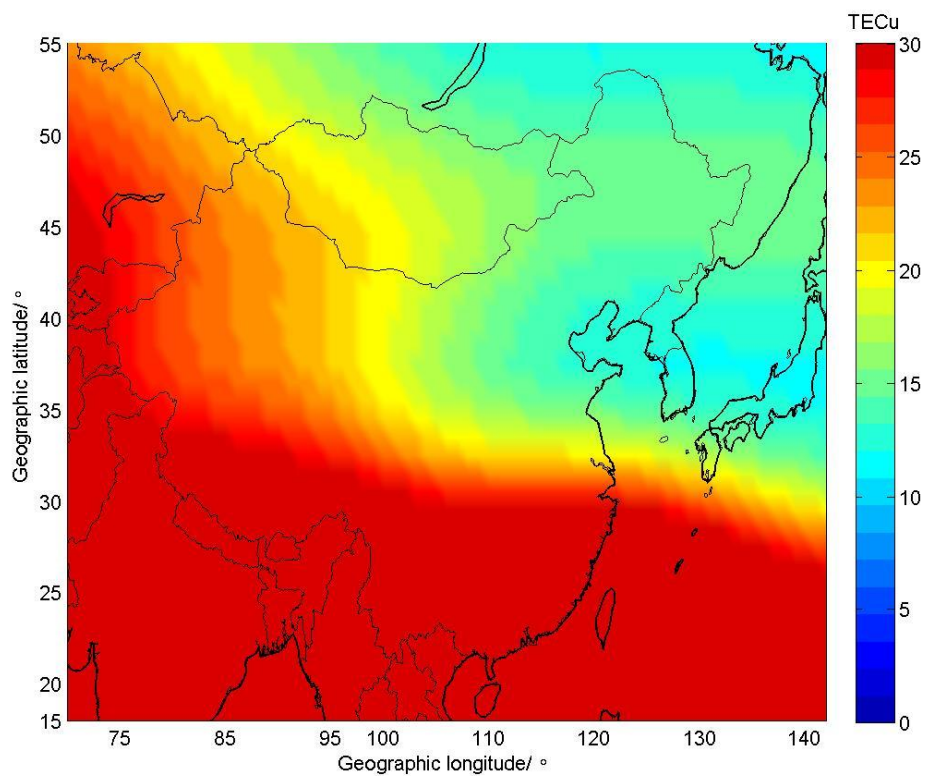


图 5.13 中国区域电子含量图 (2013-03-18UTC0: 00)

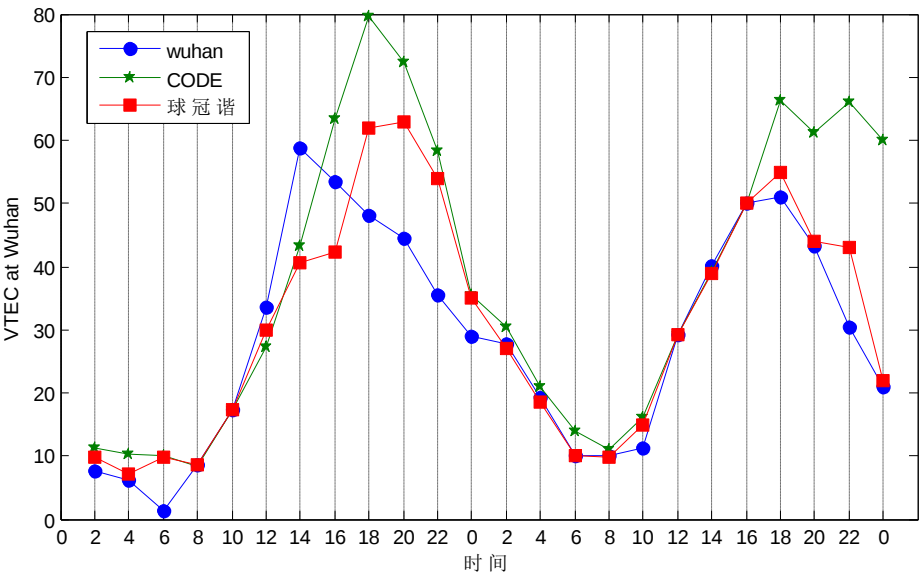
从图 5.7—图 5.13 的电离层 TEC 地图可以看出，从 2013-03-17UTC14: 00 开始中国区域上空电离层 TEC 猛然增加，基本上与 Dst 指数和 Kp 系数变化趋势吻合，而发生磁暴期间中国区域上空处于午夜时间左右，电离层 TEC 应达到一天中最低并处于稳定状态，但是该段时间的电离层 TEC 地图却直观反映出进入晚上后电离层 TEC 却突然增大，并持续数小时，太阳地磁活动的影响超过了太阳辐射的影响，分析原因为磁暴可引起卫星失锁，进而导致捕获困难，并导致电子含量的时间和空间变化加剧，以及电磁波信号相位和振幅额外的电离层闪烁。

5.1.3 与电离层测高仪的实测数据比较

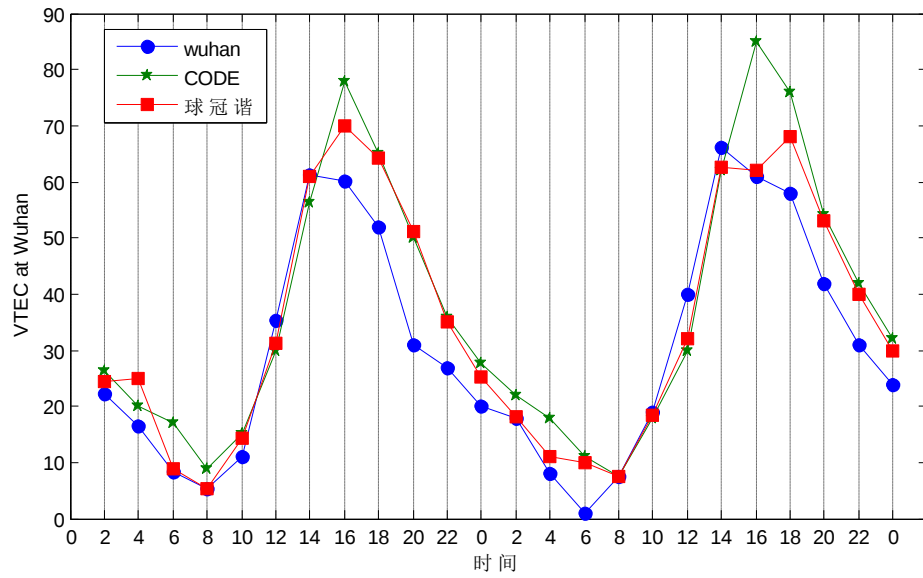
武汉大学观测中心的电子测高仪长期从事电离层电子含量观测，监测站的实测 TEC 可由数字测高仪 SAO 文件中读取，具体格式说明可参见 <http://159.226.22.74/data-format>。表 5.3 给出台站信息。为验证模型的可靠性，我们选取了 2013~2014 年四个季节不同时间段实测的电子含量，并与 CODE 提供在该处电离层 VTEC 以及利用模型参数计算的站点电离层 VTEC 进行比较，如图 5.14 所示，纵轴单位为 TECU。表 5.4 进一步给出它们之间相关系数。

表 5.3 台站信息

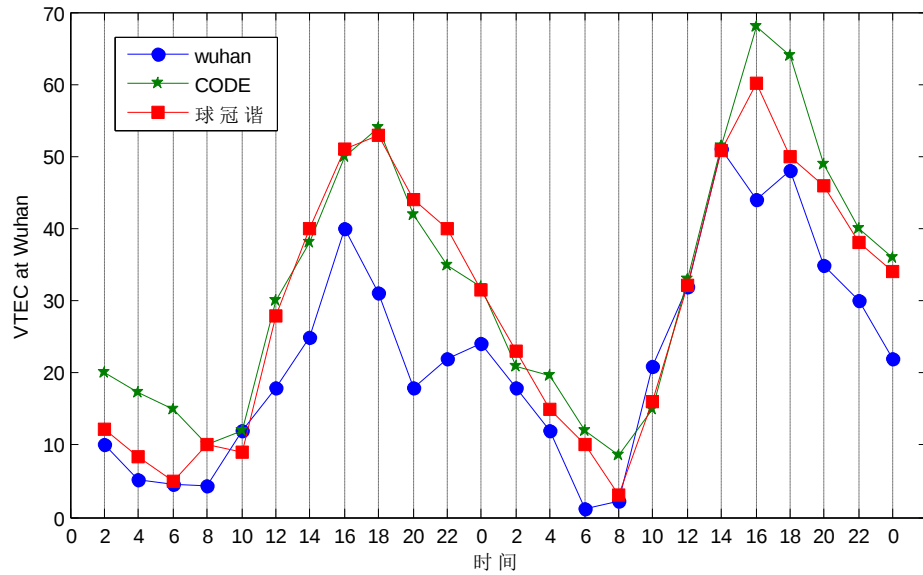
台站名称	台站编码	台站坐标 (°)
武汉左岭镇站	ZLT	114.61, 30.53



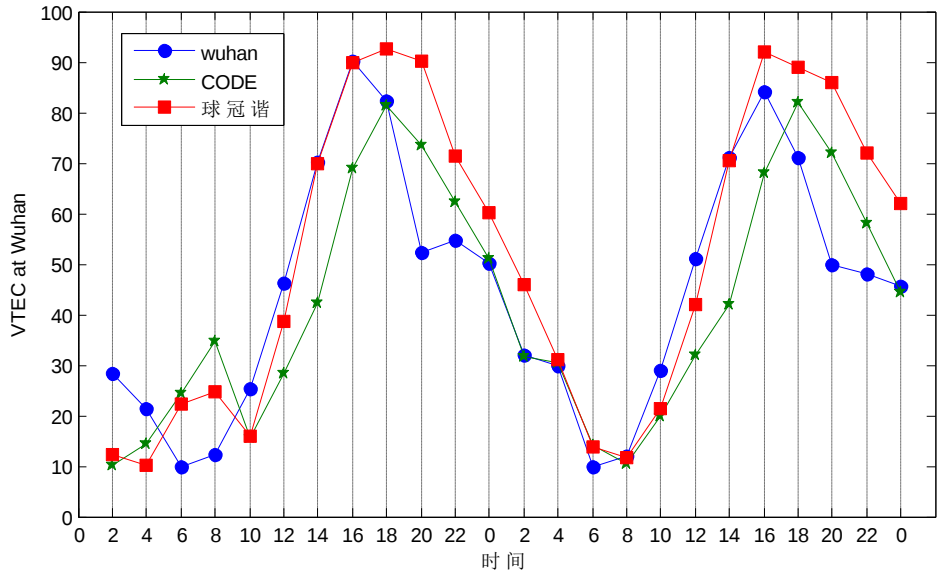
(a) 2013-06-10~2013-06-11



(b) 2013-09-20~2013-09-21



(c) 2013-12-31~2014-01-01



(d) 2014-03-20~2014-03-21

图 5.14 模型计算的结果与武汉站电子测高仪观测结果及 GIM 内插结果的比较

表 5.4 武汉站的观测电子含量与模型计算结果及 GIM 内插结果之间的相关系数

时间 模型	2013-06-10~ 2013-06-11	2013-09-20~ 2013-09-21	2013-12-31~ 2014-01-01	2014-03-20~ 2014-03-21
球谐函数模型	0.876	0.941	0.892	0.891
GIM	0.815	0.913	0.881	0.812

从图 5.14 和表 5.4 中可以看出，球冠谐模型计算的结果与 GIM 内插结果及电子测高仪的实测数据的周日变化基本一致，与 GIM 内插的结果相比，利用球冠谐模型计算的结果更接近于电子测高仪的实测数据，表明球冠谐模型更能反映中国区域的电离层变化。

5.2 上海市区域电离层模型建立

近几年来，我国多个城市已经陆续建立了一些连续运行参考站网络（Continuously Operating Reference Stations, CORS）。CORS 系统不仅可在城市区域向大量用户提供高精度、高可靠性、实时的定位信息，还可以全自动、全天候、实时提供高精度空间和时间信息，以及高精度、高时空分辨率的电离层电子含量等大气物理信息。

长三角地区是中国经济最为发达的地区，由于城市建设的需要，该地区多个城市已经建立或正在筹建 CORS 网络，使得利用 GPS 技术实时监测该区域电离层变化成为可能。建立小范围的区域电离层模型，一般采用多项式模型、三角级数模型、双线性模型等^[69]，本文采用多项式模型，利用上海 CORS 网 10 个 GNSS 测站（CMDT，CMMZ，JSXC，LGXC，SHBS，SHCH，SHJD，SHQP，

SHXZ, SJGN) 以及位于同济大学校园内的 GNSS 测站 TJA1, SGG1。图 5.15 为测站分布图。

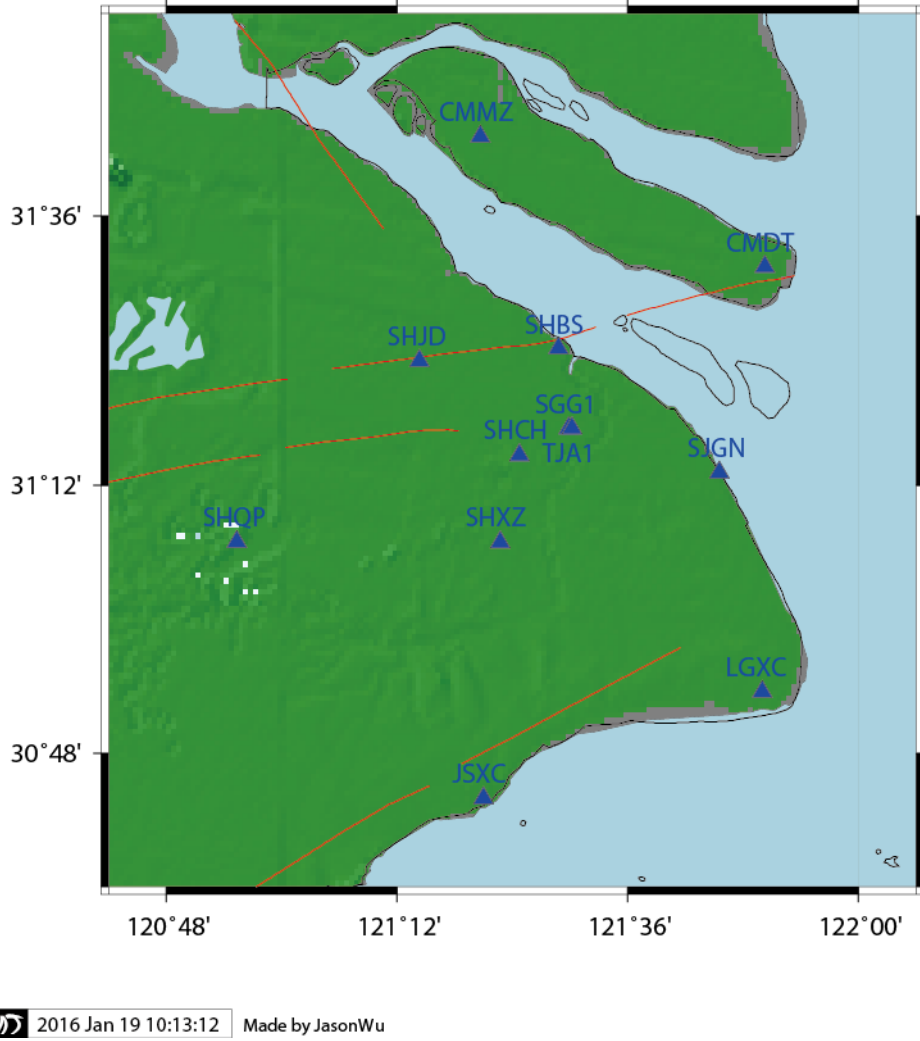


图 5.15 GPS 观测站（蓝色三角形）分布图

5.2.1 模型构建原理

(1) 观测方程

根据 2.2 节推导可知，利用伪距和相位观测的组合可求得高精度的电离层 TEC:

$$TEC_N = \alpha(L_1 - L_2)_N + \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \alpha[(P_2 - P_1)_t - (L_1 - L_2)_t] + \alpha \cdot (B_1 + B^k) \quad (5.6)$$

式中， $\alpha = \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)}$ ； B^k 、 B_i 分别为接收机和卫星伪距的硬件延迟； N 为观测历元。

多项式模型是依据某一时段中在某一区域内实际测定的电离层延迟采用数

学方法而拟合出来的一个模型。模型将垂直总电子含量 VTEC 看作是纬差 $\varphi - \varphi_0$ 和太阳时角差 $S - S_0$ 的函数，其具体表达式为：

$$\text{VTEC} = \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^m E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (S - S_0)^k \quad (5.7)$$

式中， $S - S_0 = (\lambda - \lambda_0) + (t - t_0)$ ； S_0 为测区中心点 (φ_0, λ_0) 在该时段中央时刻 t_0 时的太阳时角； (φ_0, λ_0) 为测区中心点的地理经纬度； (φ, λ) 为信号路径与单层的交点即穿刺点 IPP 的地理经纬度； t 为观测时刻； n, m 为泰勒级数展开的最大阶数； $E_{i,k}$ 为多项式模型系数。

测区中心点的地理经纬度取为 $(31.1598^\circ, 121.3447^\circ)$ ， n 取 2， m 取 3。则联合式 (5.6) 和式 (5.7) 可组成观测方程：

$$\sum_{i=0}^2 \sum_{k=0}^3 E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (S - S_0)^k = \frac{1}{F(z)} \left\{ \alpha(L_1 - L_2)_N + \frac{1}{N} \sum_1^N \alpha[(P_2 - P_1)_t - (L_1 - L_2)_t] + \alpha \cdot (B_i + B^k) \right\} \quad (5.8)$$

式中， $F(z)$ 为 MSLM 投影函数。基准站上每观测一颗卫星、一个历元就有一个这样的方程。卫星硬件延迟 B_i 根据 IGS 提供的结果，则相应的误差方程为：

$$V = A \cdot \hat{X} + B \cdot \hat{Y} - L \quad (5.9)$$

式中， $\hat{X}$ 为 VTEC 模型系数向量， $\hat{Y}$ 为接收机硬件偏差向量。按最小二乘法就可解得各待定参数 $E_{i,k}$ 和 B^k ，从而建立起该时段的区域性电离层模型。本文采用如下方式定权^[7]：

$$P = \frac{\sin E^2}{0.09} \quad (5.10)$$

(2) 精度估计

为了验证电离层 VTEC 模型及模型系数拟合的正确性和计算精度，可以通过内、外符合精度进行评价。内符合精度可以在建立模型的过程中根据残差计算出来，检核模型是否满足各自精度要求；外符合精度则是用模型估算出来的 VTEC 值与无关的外部数据估算出来的 VTEC 值进行比较后的较差而求得的^[3]。通常用差值的平均值、标准差 (standard deviation, STD) 及均方根误差 (root mean square errors, RMS) 来评价精度，具体公式如下：

$$\Delta \text{TEC}_{\text{mean}} = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^m r_i \quad (5.11)$$

$$\Delta \text{TEC}_{\text{std}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=0}^m (r_i - \bar{r})^2} \quad (5.12)$$

$$\Delta TEC_{rms} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=0}^m r_i^2} \quad (5.13)$$

式中, r_i 为 VTEC 差值, $\bar{r}$ 为其平均值, m 为样本个数。

5.2.2 模型定阶

采用上海 CORS 网 2015 年 6 月 9 日的观测数据, 计算上海地区区域电离层多项式模型在从 1 至 4 不同阶次的情况下的单位权中误差, 如表 5.5 所示。表 5.6 给出了残差绝对值在不同区间里的分布比例以及残差绝对值小于 3 TECU 的比例。

表 5.5 不同阶次多项式模型的标准差

m \ n		1	2	3	4
1	1	1.830	1.829	1.829	1.829
2	2	1.806	1.803	1.799	1.799
3	3	1.801	1.799	1.798	1.798
4	4	1.798	1.797	1.797	1.797

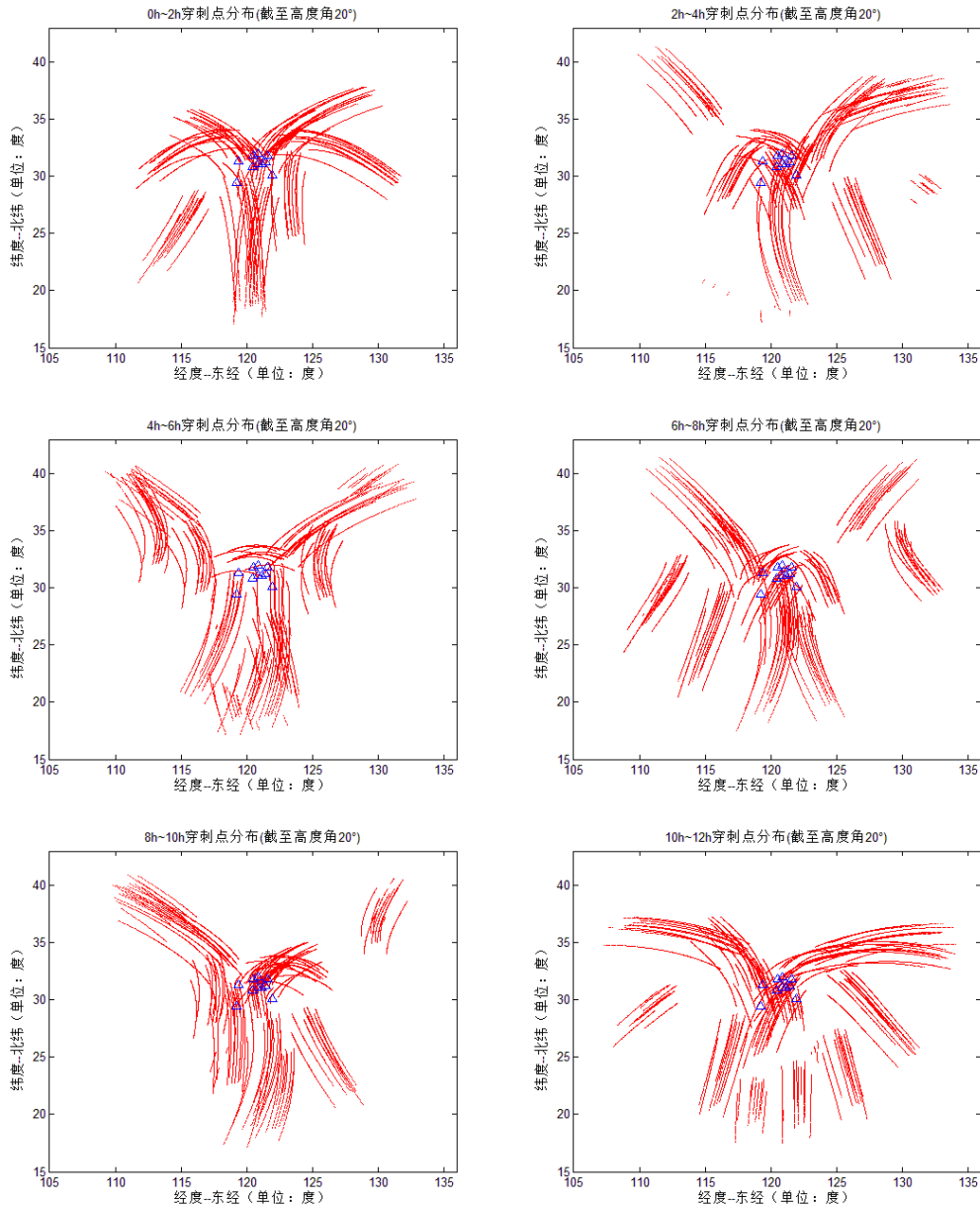
表 5.6 残差绝对值的区间分布比例

n,m	(0,1)	(1,2)	(2,3)	(3,4)	>4	<=3
1,1	51.67	24.24	9.96	4.78	9.35	85.87
1,2	50.70	24.36	16.48	4.80	3.66	91.54
1,3	49.74	20.66	17.78	4.13	7.69	88.18
1,4	40.88	24.47	16.78	5.80	12.07	82.13
2,1	52.46	25.02	9.80	4.64	8.08	87.28
2,2	52.18	25.02	9.85	4.77	8.18	87.05
2,3	52.48	30.23	9.79	4.72	2.78	92.50
2,4	51.98	25.36	9.72	4.66	8.28	87.06
3,1	51.38	24.62	11.10	4.03	8.87	87.10
3,2	52.10	24.35	10.72	4.44	8.39	87.17
3,3	53.26	24.62	9.66	4.42	8.04	87.54
3,4	45.24	26.09	12.50	4.66	11.51	83.83
4,1	49.60	25.42	13.86	5.72	5.40	88.88
4,2	39.72	33.68	9.25	2.77	14.58	82.65
4,3	53.34	24.50	9.80	4.44	7.92	87.64
4,4	53.14	24.80	9.31	4.42	8.33	87.25

从表 5.5 中可以看出, 对于不同阶次模型的标准差基本差不多均为 1.8 TECU 左右, 可见对于上海小区域范围, 区域电离层模型的精度基本不受到多项式阶次的影响。表 5.6 说明了对于不同阶次的多项式模型, 残差绝对值的区间分布存在较大的差异, 其中, 残差绝对值小于 3 TECU 所占的比例最大达 92.5%, 最小则为 82.1%, 比例超过 90% 的有两组, 相应的 n 和 m 的取值分别为 1 和 2, 2 和 3。本文取 $n=2$, $m=3$, 其模型残差绝对值小于 3 TECU 的比例有 92.5%, 小于 1 TECU 的比例高达 52.48%。

5.2.3 穿刺点分布

GPS 信号的传播路径与电离层单层模型的交点称为穿刺点 IPP，电离层监测区域是在测站上的接收机接收到某一高度角以上的所有 GPS 信号的穿刺点的理论分布区域。本文以实测数据为例分析上海区域及周边电离层穿刺点的实际分布，计算时采用 2015 年 6 月 9 日（年积日 160）的数据。为了分析一天中不同时刻卫星分布的差别，下面对一天的数据进行分解，以每两个小时为单位时间分别画出每 2 h 共 12 个穿刺点分布图，如图 5.16 所示，横轴表示经度-东经，纵轴表示纬度-北纬（单位：度）；画图区域红色的点表示穿刺点的位置（5 min 采样率），蓝色的小三角形表示测站的位置。其中电离层单层高度 H 取为 450 km，地球半径 R 取 6371 km，卫星截止高度角为 20° 。



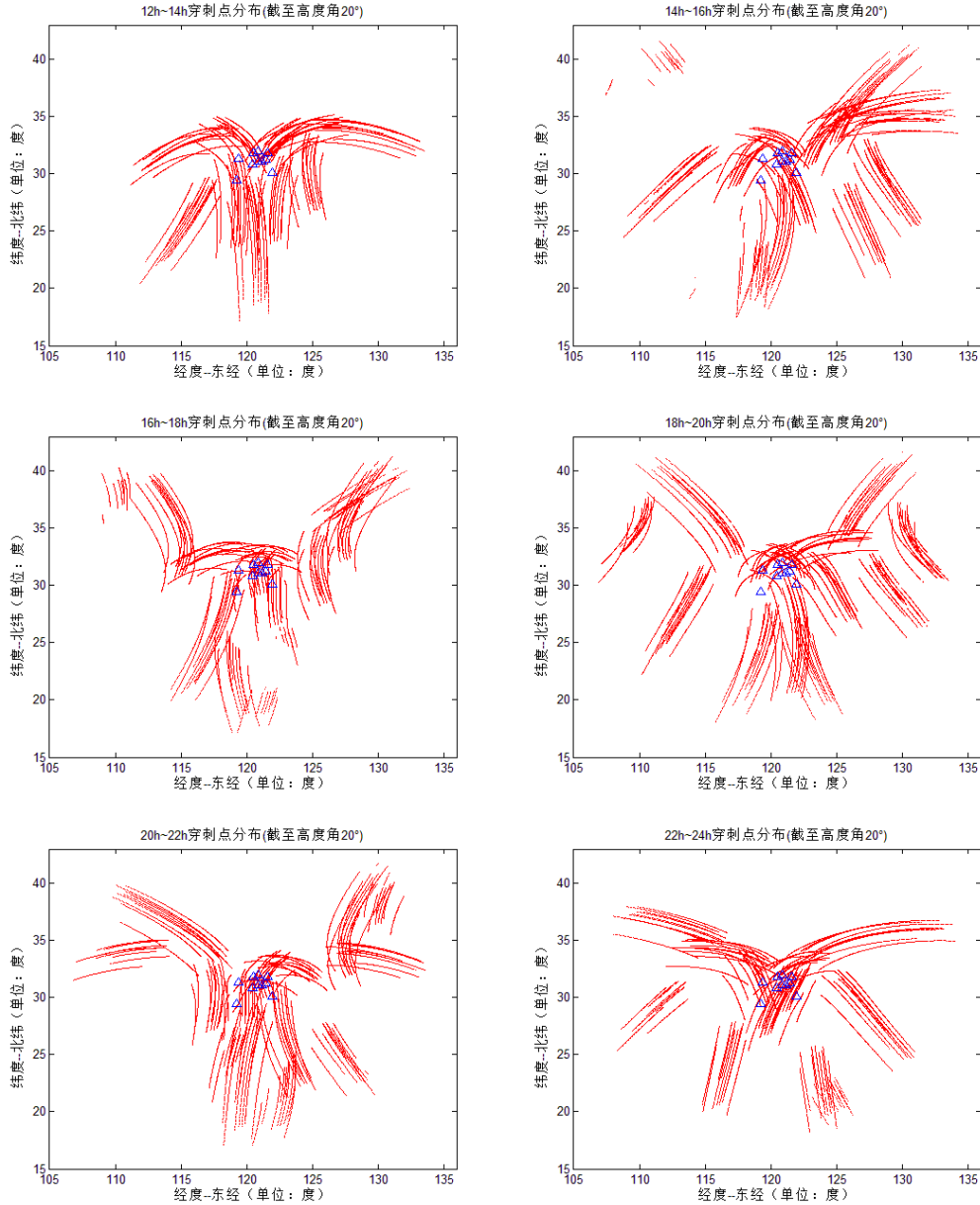


图 5.16 上海区域上空的电离层穿刺点每 2 h 分布

从图 5.16 中可以看出：在不同的时间段上海区域电离层穿刺点的分布不同，监测站电离层实际穿刺点 IPP 分布存在“明显空洞”现象，在面向极点一侧的一定区域内竟无卫星通过。但是穿刺点都能覆盖各测站的上方，从两个小时穿刺点分布来看，其分布大致关于测区中心经度对称。

为了分析观测时间段的大小对穿刺点分布的影响，以卫星截止高度角 20° 为例分别绘制 15 min、30 min、1 h 和 2 h 的穿刺点分布情况（30 s 采样率），如图 5.17 所示。从图 5.17 中可以看出，随着观测时段的减小，穿刺点的数量越来越少，并且其分布范围也会变得越小，不过可以看出 1 h 的数据即可完全覆盖测区的上空，因此，本文采用 1 h 为一个时段建立一个模型。

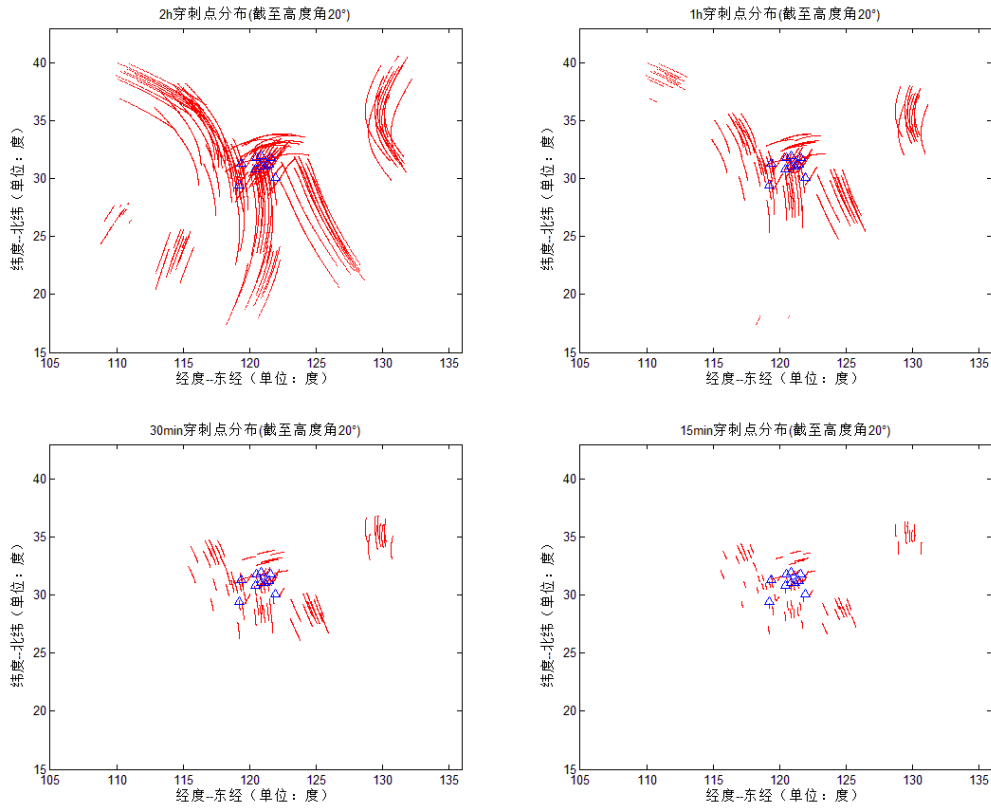


图 5.17 不同时段长度穿刺点分布

5.2.4 多站电离层模型

综合利用上海 CORS 网 10 个 GNSS 测站 2015 年 6 月 9 日全天数据，分段建立电离层模型。将其与 GIM 进行对比，表 5.7 给出了精度统计结果。从统计结果来看，多项式电离层 TEC 模型和 GIM 差别不大，均方根误差为 1.626 TECU。

表 5.7 上海区域多项式电离层图与 GIM 的统计对比

统计量	MEAN	STD	RMS
多项式-GIM	-0.552	1.516	1.626

利用位于同济大学校园内 GNSS 测站 TJA1 的实测数据，根据第四章介绍的单站接收机硬件延迟解算方法扣除该站的接收机硬件延迟，得到 TJA1 测站当天的 VTEC，将其与多项式电离层模型和 GIM 内插该站得到的结果进行对比，如图 5.18。图 5.19 给出了他们之间的互差。从图 5.18 和图 5.19 中可以看出，多项式模型与 GIM 之间差异在 UTC4: 00, UTC6: 00, UTC7: 00 时分别达到 3.7 TECU, 3.9 TECU, 3.6 TECU。而多项式模型比 GIM 更接近于 TJA1 测站的实测数据，全天的均值为 0.7 TECU，在 UTC12: 00 时差值达到最大，为 3.5 TECU。

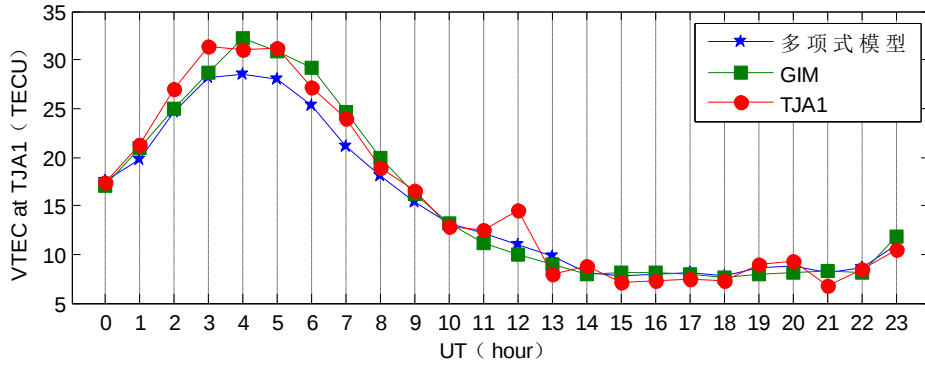


图 5.18 不同方案下 TJA1 测站的 VTEC

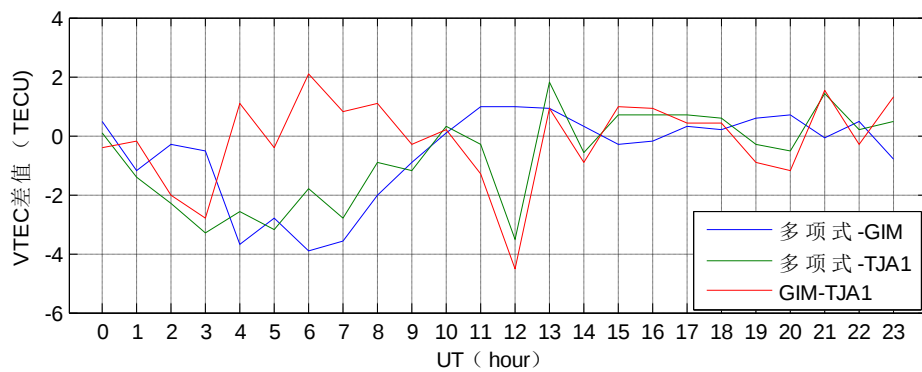


图 5.19 不同方案下 TJA1 测站 VTEC 的差值

5.2.5 单站电离层模型

以上分析结果表明利用上海 CORS 网 10 个 GNSS 测站的实测数据建立的多项式电离层模型在上海地区结果是可靠的。下面分别利用上海 CORS 网 10 个 GNSS 测站 (CMDT, CMMZ, JSXC, LGXC, SHBS, SHCH, SHJD, SHQP, SHXZ, SJGN) 2015 年 6 月 9 日全天数据, 且与多站电离层模型使用相同的空间展开点 (31.1598° , 121.3447°), 分段解算单层电离层模型系数, 分别用建立的单站电离层模型计算 TJA1 测站的 VTEC, 如图 5.20 所示, 并与 TJA1 实测数据得到的 VTEC 进行对比, 如图 5.21 所示。由图 5.20 和图 5.21 可以看出, 利用单站计算的多项式模型计算的 TJA1 站的 VTEC 与实测数据得到的 VTEC 值日变化曲线在趋势上基本相符, 数值也相差不大, 差值基本上在 4 TECU 以内, 表明对于测区范围较小的区域, 仅使用一个 GNSS 接收机即可建立较高精度的电离层模型。

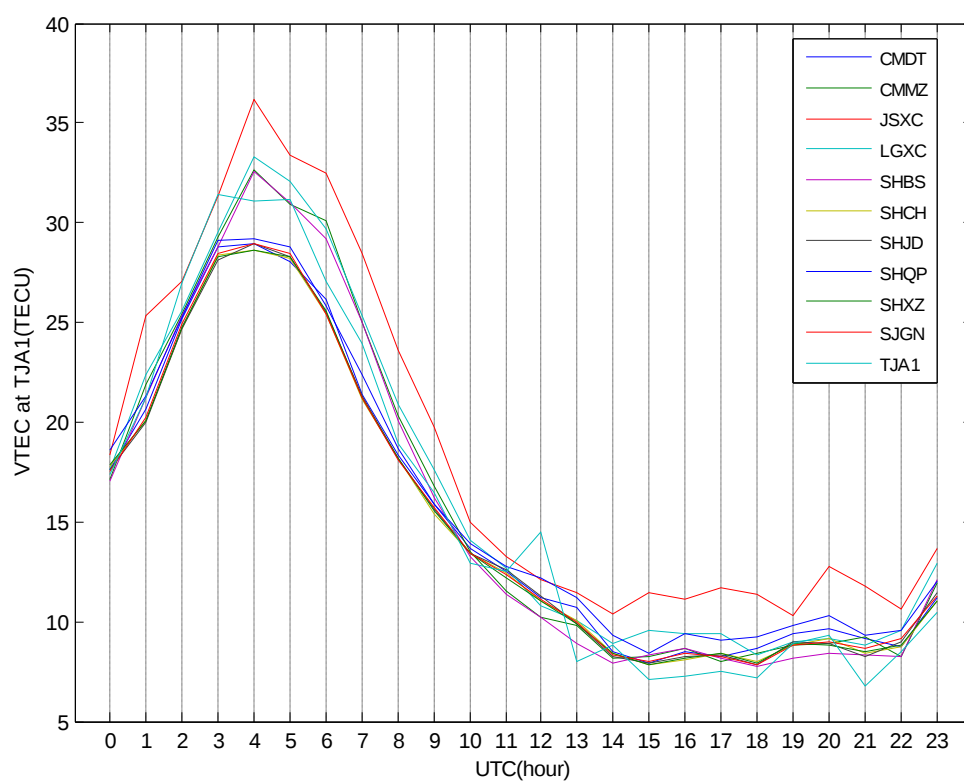


图 5.20 不同方案下 TJA1 测站的 VTEC

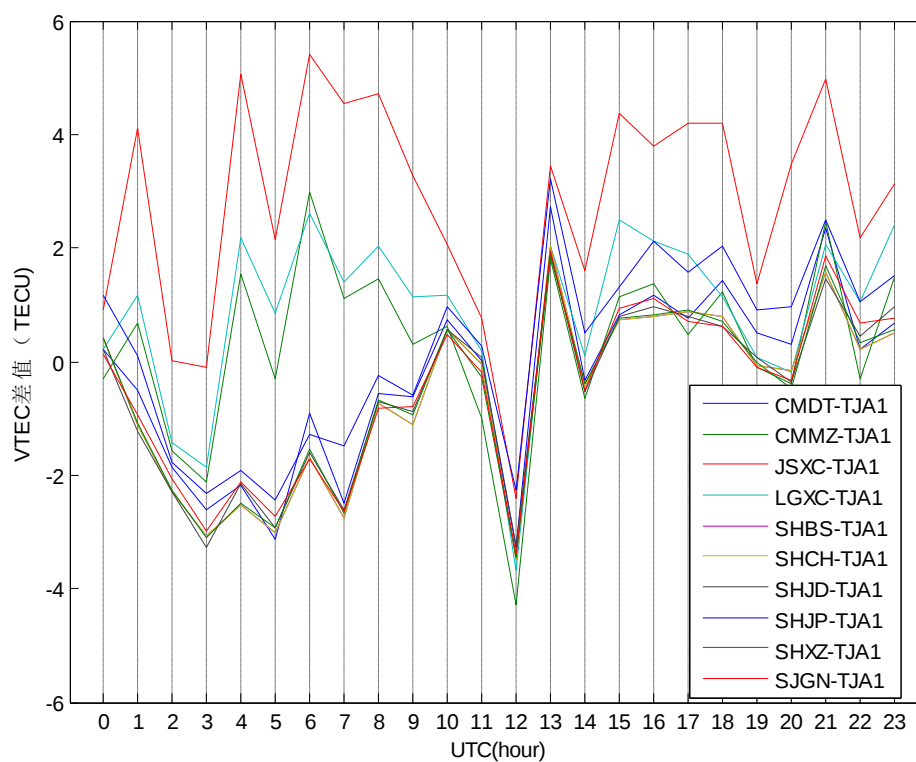


图 5.21 不同方案下 TJA1 测站 VTEC 的差值

但是, 距离 TJA1 站较远的 JSXC 站建立的电离层模型计算的差值比较大, 很多时段超过 4 TECU, 甚至接近 6 TECU, 且不稳定, 因此测站之间距离的不同会影响单站电离层多项式模型的求解精度。测站之间距离的不同, 则对应观测时段内用于计算模型系数的穿刺点的几何分布图形不同, 而且利用单站建立多项式电离层模型时, 使用的测区中心展开点和基于多站建立模型是相同的, 这样使得单站观测的穿刺点分布位于多站穿刺点空间分布的一侧, 因此卫星天空视图的变化和穿刺点几何构型的不同对于单站模型系数的解算产生了影响。

5.2.6 利用单站 GPS/BDS 数据建立上海区域多项式电离层模型

由于位于同济大学校园内的 GNSS 测站 TJA1 能同时接收 GPS 卫星和北斗卫星导航系统观测数据, 本文基于 TJA1 站, 分别仅采用 GPS 观测数据 (记为方案 1) 与同时使用 GPS 与 BDS 观测数据 (记为方案 2), 建立单站电离层模型。同时使用两个系统进行电离层建模须将其坐标系统、时间系统转换到同一基准, 本文以 GPS 系统作为基准设置。北斗系统采用的是 2000 中国大地坐标系 (CGCS2000), 其与 GPS 系统采用的坐标系统的差别很小, 在进行数据处理时忽略二者之间的差异; 北斗系统的时间基准为北斗时 (BDT), 其秒长为国际制秒, 采用周和周内秒计数, 起始历元为协调世界时 (UTC) 的 2006 年 1 月 1 日 00 时 00 分 00 秒, 而 GPS 系统采用的 GPST, 其与 UTC 时 1980 年 1 月 6 日 0 时相一致, 这样 BDST 与 GPST 的关系如下:

$$\text{GPST} - \text{BDT} = 14\text{s} \quad (5.14)$$

在进行联合 GPS/BDS 数据进行电离层建模的处理方法和策略与 GPS 单系统建模一样, 采用分段线性的策略, 1 h 为一段建立一个模型, 不同的是解算时使用赫尔默特方差分量估计进行重新定权迭代, 解算得 GPS 与 BDS 观测值的单位权中误差分别为 0.0932 TECU, 0.0912 TECU。生成的上海地区电离层 TEC 图与 GIM 和多站区域电离层多项式模型的结果对比如表 5.8 所示。

表 5.8 不同方案下上海区域电离层图的统计对比

统计量	MEAN	STD	RMS
方案 1 vs 多站多项式模型	0.766	1.555	1.732
方案 1 vs GIM	0.558	1.642	1.728
方案 2 vs 多站多项式模型	0.888	2.226	2.425
方案 2 vs GIM	0.768	1.681	1.824

由表 5.8 可以看出, 方案 1 与方案 2 计算得到的多项式模型均具有较高的精度, 如果假定 GIM 和所建立的多站多项式电离层模型是比较可靠的话, 则仅采用 GPS 观测数据建立的单站多项式模型的精度要优于同时采用 GPS 和 BDS 观测数据建立的模型, 这种情况可能和 BDS 观测数据及 BDS 卫星仅有广播星历有

关，而且北斗卫星中的 GEO 卫星观测数据比重占的比较大，而随着观测历元的增加，其并不会贡献更多的电离层 TEC 信息。采用方案 1 和方案 2 计算 TJA1 测站当天的 VTEC，并与 5.2.4 节的结果进行比较，如图 5.22 所示。

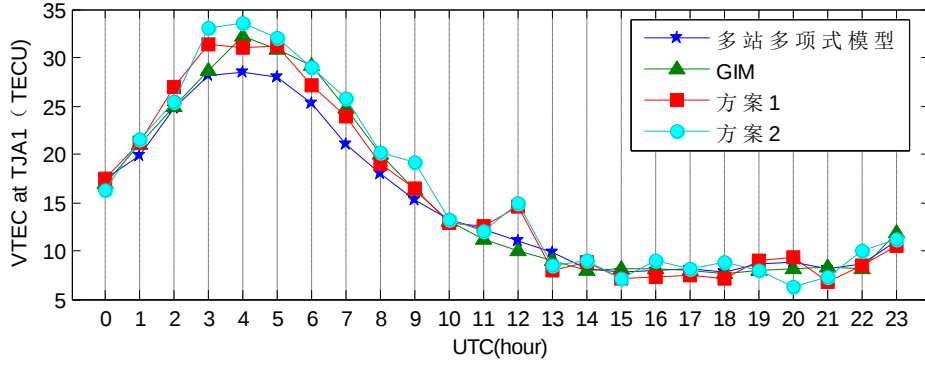


图 5.22 不同方案下 TJA1 测站的 VTEC

由图 5.22 中可以看出，采用 GPS 观测数据以及联合 GPS 与 BDS 观测数据建立的上海区域电离层 TEC 多项式模型与 GIM 和基于多站建立的多项式模型具有较好的一致性，随着 BDS 的不断完善，可尝试利用仅使用 BDS 观测数据即可建立高精度的电离层模型。

5.3 基于 GPS 单频 L_1 数据解算电离层 TEC

前文基于 GNSS 双频数据建立了高精度电离层 TEC 模型，其目的之一是为了提高测区内单频接收机的电离层延迟改正量的精度，进一步提高单频接收机的定位精度。而 2.2.6 节推导了基于单频 GNSS 观测数据确定电离层 TEC 的公式，这为解算单频接收机的电离层延迟值提供了另外一种方案。本节基于同济大学 GNSS 测站 TJA1 的观测数据解算单频电离层 TEC，并与双频电离层解算值进行比较，验证其合理性。

5.3.1 解算步骤

(1) 利用监测站坐标 $(x_r, y_r, z_r)^T$ 和卫星位置坐标 $(x_s, y_s, z_s)^T$ ，根据矢量乘法计算得到测站处信号路径方向的天顶距 z ，单位为“°”。

(2) 计算从卫星到接收机斜路径方向到天顶方向的投影函数 $F(z)$ ：

$$F(z) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+H} \sin(z) \right)^2}} \quad (5.15)$$

取电离层高度 H 为 350 km，地球平均半径 R 为 6378 km，则上式可简化为：

$$F(z) = 1.0 + 2.74 \times 10^{-6} (z + 6)^3 \quad (5.16)$$

(3) 计算伪距相位之差 Δ 。

(4) 组成误差方程组：

每个历元 VTEC 的初值和改正数分别取为 $VTEC_0$ 和 x_1 ，VTEC' 的初值和改正数分别取为 $VTEC'_0$ 和 x_2 ，则式 (2.39) 可化为：

$$\begin{cases} v_1 = -F_1' x_1 - F_1 x_2 - (F_1' VTEC_0 + F_1 VTEC'_0 - \Delta_1' / 0.324) \\ \dots \\ v_N = -F_N' x_1 - F_N x_2 - (F_N' VTEC_0 + F_N VTEC'_0 - \Delta_N' / 0.324) \end{cases} \quad (5.17)$$

解误差方程组 (5.16) 便可得到：

$$VTEC = VTEC_0 + x_1 \quad (5.18)$$

$$VTEC' = VTEC'_0 + x_2 \quad (5.19)$$

5.3.2 解算实例分析

根据上述算法利用同济大学 GNSS 测站 TJA1 在 2015 年 6 月 12 日的数据解算电离层 VTEC，时间分辨率为 15 min，并与扣除硬件延迟的双频电离层 VTEC 比较，如图 5.23 所示。

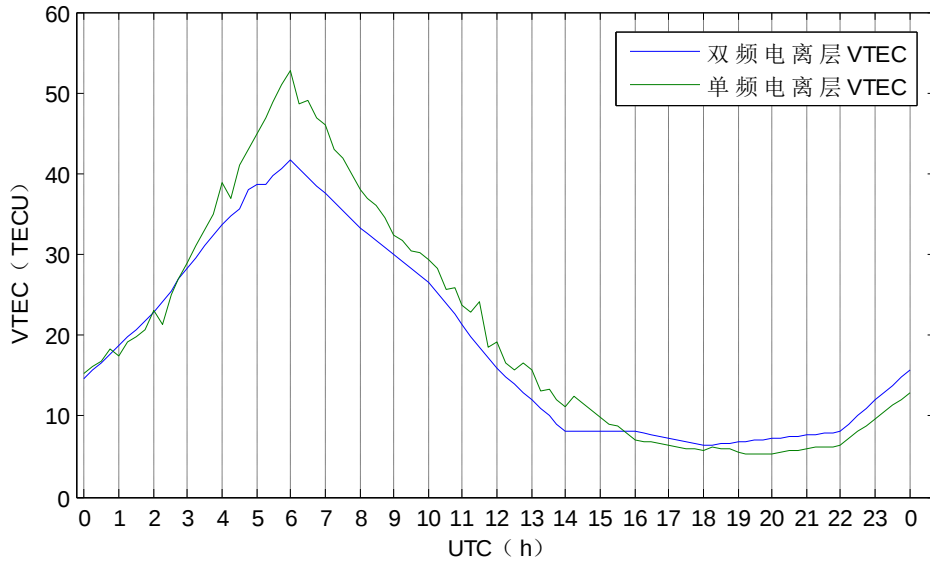


图 5.23 2015-06-12TJA1 站的单频电离层 VTEC 与双频电离层 VTEC

从图 5.23 中可以看出，基于单频数据解算的电离层 VTEC 和双频电离层 VTEC 变化趋势一致，具有明显的周日变化规律，符合电离层特性。但是单频电

离层 VTEC 的变化幅度较大, 且在当地时间 14 时前后两个小时内, 与双频电离层 VTEC 差值较大, 图 5.24 给出两者差值时间序列, 可以看出 UTC04:00~UTC08:00 两者的差值均在 4 TECU 以上, UTC6:00 两者差值最大, 达到 10 TECU 以上。其余时刻, 差值基本上在 3 TECU 以内, 尤其晚上两者的差值较小, 且变化稳定。因此, 除了午后时间, 上述算法可用于单频接收机进行电离层延迟值的解算, 进而提高单频接收机的定位精度。

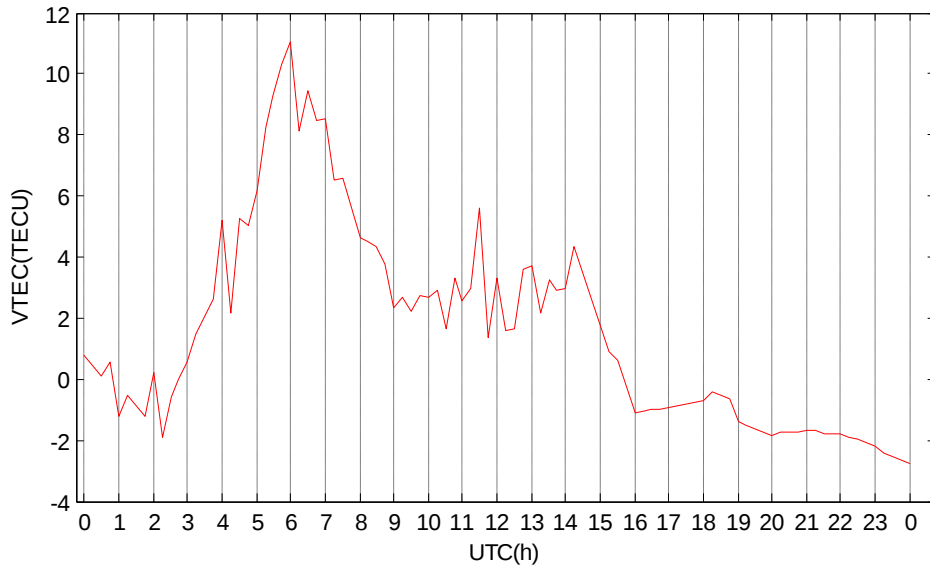


图 5.24 2015-06-12TJA1 站的单频电离层 VTEC 与双频电离层 VTEC 差值

5.4 本章小结

本章研究了区域电离层模型的建立:

(1) 利用中国陆态网数据建立了中国区域球冠谐电离层 TEC 模型, 数据处理的结果表明该模型具有较高的拟合精度, 拟合残差均值为-0.01 TECU; 并利用建立的模型研究了磁暴期间中国区域上空的电离层 TEC 的变化趋势; 与电离层电子探测仪的实测数据比较, 进一步验证了模型的正确性。

(2) 利用上海 CORS 网观测数据分别建立了多站电离层 TEC 多项式模型与单站电离层 TEC 多项式模型, 并利用同济大学 GNSS 测站 TJA1 的实测数据分别验证了模型的正确性; 利用 TJA1 站 BDS 数据, 联合 GPS/BDS 数据建立了上海区域电离层 TEC 模型, 与多项式电离层模型和 GIM 有较好的一致性;

(3) 给出了基于单频 GNSS 数据解算电离层 TEC 的方案, 利用同济大学 GNSS 测站 TJA1 验证了其合理性, 除了午后时间, 该算法均可有效估算单频接收机的电离层延迟值。

第6章 总结与展望

6.1 总结

本文主要研究目的是基于GNSS观测数据建立高精度的区域电离层模型，以期提高区域内单频单点定位用户的电离层改正精度并最终改善其定位精度。本文利用中国陆态网数据与上海CORS网数据及同济大学GNSS测站TJA1数据进行了区域电离层的相关研究，具体内容如下：

(1) 详细推导了基于GNSS双频观测数据，联合伪距和相位观测量解算高精度电离层TEC的公式；推导了基于GNSS单频观测数据解算电离层TEC的公式，为研究区域电离层模型奠定了理论基础；

(2) 概括了常用的几种全球/区域/局部电离层数学模型，评述了目前常用的电离层模型特点及其各自的使用范围；

(3) 提出了两种基于单站数据的接收机硬件延迟估算方法：基于多项式模型的硬件延迟估算方法、基于“VTEC 标准差之和最小”条件的硬件延迟估算方法，利用全球不同纬度的IGS站进行验证，对于中、高纬度地区，该算法解算的结果与IGS给出的结果具有很好的一致性，差值在1.0 ns以内，标准差在0.6 ns以内；

(4) 利用中国陆态网数据建立了中国区域球冠谐电离层TEC模型，数据处理的结果表明该模型具有较高的拟合精度，拟合残差均值为-0.01 TECU；并利用建立的模型研究了磁暴期间中国区域上空的电离层TEC的变化趋势；与电离层电子探测仪的实测数据比较，具有很好的一致性，进一步验证了模型的正确性；

(5) 利用上海CORS网观测数据分别建立了多站电离层TEC多项式模型与单站电离层TEC多项式模型，并利用同济大学GNSS测站TJA1的实测数据分别验证了模型的正确性；利用TJA1站BDS数据，联合GPS/BDS数据建立了上海区域电离层TEC模型，与多项式电离层模型和GIM有较好的一致性；

(6) 提出了基于单频GNSS数据解算电离层TEC的方案，利用同济大学GNSS测站TJA1验证了其合理性，除了午后时间，该算法均可有效估算单频接收机的电离层延迟值。

6.2 展望

本文主要研究了根据不同的函数模型，建立了中国区域电离层TEC模型和

上海区域电离层TEC模型，并对其进行了相关分析。但由于本人的理论知识及实践工作的匮乏，时间和精力的限制，本文存在很多不足之处以及一系列问题需要进一步研究，具体内容包括：

（1）电离层具有周期变化性，包括日、季、年等周期，因此，电离层模型验证的需要对不同周期内模型的适用性进行分析。本文构建上海区域电离层模型时，只利用了一周数据，并且具体只对一天的结果进行了详细分析，得出的结论不一定具备普适性，需采用更多观测数据进行实验分析，从而得出更为准确和可靠的评估结论；

（2）本文建立的电离层模型均为后处理模型，尚未涉及电离层延迟实时改正模型和预报模型的研究，因而实际应用方面存在很大不足；

（3）本文采用的GNSS数据采样率均为30 s，本文可进一步利用课题组架设在云南红河断裂带的GNSS接收机，提取高频数据，建立高频GNSS电离层模型，研究可能发生的地震期间的电离层扰动效应。

致谢

一日为师，终身为父。首先要感谢的是我的导师伍吉仓教授和副导师陈俊平研究员，两位恩师对我的恩情我会铭记终身。伍老师知识渊博，温文儒雅，对待我们总是和蔼可亲，他的人格魅力在潜移默化中感染着我，无论是做人还是做学问方面，伍老师给予我的教诲，都会使我受益终身。陈老师治学严谨，勤奋敬业，鼓励我不断探索，勇于创新，陈老师为我树立了学习典范，他是我一生中的楷模。

同时需要感谢的是学院的各位老师，特别是王解先老师、胡从玮老师，我的班主任李博峰老师等。他们在我的学业道路上给予了我细心的指导，耐心帮助我解决科研道路上的问题。

感谢课题组的各位同门，吴伟伟、张丽娜、徐克科、刘伟洲、谢益炳、郑二龙、赵静雯、吕志鹏、颜琼、郭林英、胡强、胡凤鸣、王恒、卢娟、张丽、王岩等以及410教研室其他同伴如王明华、王成、黄善琪、张益泽、段兵兵、韩玲、丁健洋、陈猛等的帮助，同时还要感谢上海天文台的同学以及读研期间认识的新朋友，他们让我的研究生生活增添了色彩。其中，尤其要感谢的是吴伟伟师兄，本论文在选题和撰写的过程中，他都无私地给予我最大的帮助。特别感谢韩玲师姐对于我程序学习的帮助。特别感谢邹俊平师兄提供的上海CORS网数据。

最后感谢生我养我的父母，他们无私的爱和殷切的期盼，才成就今天的我；感谢我的女友，她已经工作，谢谢她一如既往对我学业和生活上的支持与理解。

参考文献

- [1] 袁运斌. 基于GPS的电离层监测及延迟改正理论与方法的研究[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2002
- [2] 刘振兴. 太空物理学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005
- [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, 2002
- [4] 柳景斌. 基于地基GPS的区域电离层TEC球冠谐分析及预报[D]. 武汉: 武汉大学, 2008
- [5] J.A.拉特克利夫. 电离层研究五十年[M]. 北京: 科学出版社, 1983
- [6] Klobuchar, J.A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, no. 3 (1987): 325-331.
- [7] 章红平. 基于地基GPS的中国区域电离层监测与延迟改正研究[D]. 上海: 中科院上海天文台, 2006
- [8] Lanyi, G.E., Roth, T. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations [J]. *Radio Science*, 1988, 23(4): 483-492
- [9] Coco, D.S., C.Coker, S.R. Dahlke, et al. Variability of GPS Satellite differential group delay biases [J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 1991, (27):931-938
- [10] Mannucci, A.J., B.D. Wilson, and C.D. Edwards(1993a). A new method for monitoring the Earth's ionospheric total electron content using the GPS global network. *Proceedings of the Institute of Navigation GPS-93*, Salt Lake City, Utah, September, 1993
- [11] Wilson, B.D., and A.J. Mannucci. Instrumental biase in ionospheric measurement detrieved from GPS data. *Proceedings of the ION GPS-93*, Salt Lake City, Utah, USA, 1993: 22-24
- [12] Sardon E, Rius A, Zarraoa N. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observations[J]. *Radio Science*, 1994, 29(3): 577-586
- [13] Chao, Y. Real Time Implementation of the Wide Area Augmentation System for the Global Positioning System with an Emphasis on Ionospheric Modeling[D]. Dissertation, Stanford University, 1997
- [14] Stefan Schaer. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System[D]. Berne, Swiss: university of Berne, 1999
- [15] Hernández-Pajares M, Juan J M, Sanz J, et al. The IGS VTEC Maps: a Reliable Source of Ionosphere Information Since 1998[J]. *J Geod*, 2009, 83:263-275
- [16] Feltens, J., and S. Schaer. IGS product for the Ionosphere, *Proceedings of the IGS Analysis Centers Workshop*, Darmstadt, Germany, 1998, 9-11
- [17] Mannucci AJ, Wilson BD, Yuan DN, et al. A global mapping technique for GPS derived ionospheric total electron content measurements[J]. *Radio Sci*, 1998, 33:265-582
- [18] 王成. GNSS电离层模型及其应用与服务系统研究[D]. 上海: 同济大学, 2014
- [19] 刘经南, 陈俊勇, 张燕平等. 广域差分GPS原理与方法[M]. 北京: 测绘出版社, 1999
- [20] 许才军, 陈永奇, 刘炎雄. 确定卫星与接收机信号延迟偏差的新方法及应用[J]. *测绘学报*, 1999, 28(2):153—161

- [21] 袁运斌, 欧吉坤. GPS观测数据中的仪器偏差对确定电离层延迟的影响及处理方法[J]. 测绘学报, 1999, 28(2): 110-114
- [22] 常青, 张东和, 萧佐等. GPS系统硬件延迟估计方法及其在TEC计算中的应用[J]. 地球物理学报, 2001, 44(5): 596-601
- [23] 李强, 冯曼, 张东和等. 基于单站GPS数据的GPS系统硬件延迟估算方法及结果比较[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(1):149-156
- [24] 张小红, 李征航等. 用双频GPS观测值建立小区域电离层延迟模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001, 26(2), 140-143
- [25] 章红平, 平劲松, 朱文耀等. 电离层延迟改正模型综述[J]. 天文学进展, 2006, 24(1): 16-25
- [26] 柳景斌, 王泽民. 几种地基 GPS 区域电离层 TEC 建模方法的比较及其一致性研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版 33(005): 479-483
- [27] 袁运斌, 欧吉坤. 广义三角级数函数电离层延迟模型[J]. 自然科学进展, 2005, 15(8): 1015-1019
- [28] 邹玉华. GPS地面台网和掩星观测结合的时变三维电离层层析[D]. 武汉: 武汉大学, 2004
- [29] 闻德保. 基于GPS的电离层层析算法及其应用研究[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2007
- [30] 吴小成. 电离层无线电掩星技术研究[D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2008
- [31] 熊年禄, 唐存琛, 李行健. 电离层物理概论[M], 武汉: 武汉大学出版社, 1999
- [32] Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice[M]. New York: Springer-Verlag, 2000
- [33] Rolf Dach, et al. Bernese GPS software version 5.0[M]. Astronomical Institute, University of Bern, Bern, 2007
- [34] 李征航, 黄劲松. GPS测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005
- [35] Skone S H. Wide area ionosphere grid modelling in the auroral region[M]. 1999
- [36] Yang Gao, Zhizhao Liu. Precise Ionosphere Modeling Using Regional GPS Network Data[J]. Journal of Global Positioning Systems, 2002, Vol.1, No.1:18-24
- [37] Hatch R, Jung J, Enge P, Pervan B. Civilian GPS: the Benefits if Three Frequency[J]. GPS Solut2000, 3(4): 1-9
- [38] 刘西凤, 袁运斌, 霍星亮, 李子申, 李薇. 电离层二阶项延迟对定位影响的分析模型与方法[J]. 科学通报, 2010年, 第55卷, 第12期: 1162~1167
- [39] 伍岳. 第二代导航卫星系统多频数据处理理论及应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2005
- [40] 黄张裕, 赵义春, 秦滔. 电离层折射误差的多频改正方法及精度分析[J]. 海洋测绘, 2010年, 第30卷, 第2期
- [41] 李征航, 陈铠, 刘万科等. 顾及f3项的电离层延迟模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(2): 139-143
- [42] 王梦丽, 王飞雪. 三种电离层延迟多频修正算法比较[J]. 测绘科学, 2008, 33(4): 139-143
- [43] 王梦丽, 王飞雪. 三频电离层延迟改正中多路径误差和观测噪声的削弱算法[J]. 测绘学报, 2008, 37(4): 418-422
- [44] Stefan Schaer, Werner Gurtner(1988). IONEX: the IONsphere map exchange format version1. Proceedings of the 1988 IGS Analysis Centers Workshop, ESOC, Darmstadt, Germany,

February 9-11

- [45] 温晋, 万卫星, 丁锋, 乐新安, 余承莉, 刘立波. 电离层垂直TEC映射函数的实验观测与统计特性[J]. 地球物理学报, 2010, 53(1): 22-29
- [46] 袁运斌, 欧吉坤. 建立GPS格网电离层模型的站际分区法[J]. 科学通报, 2002, 47(8): 636-639
- [47] 章红平, 施闯, 唐卫明. 地基GPS区域电离层多项式模型与硬件延迟统一解算分析[J]. 武汉大学学报.信息科学版, 2008, 33(8): 806-809
- [48] Jakovvski N, Sardon E, Engler E, et al. Relationships between GPS-signal propagation errors and EISCAT observations[C]//Annales Geophysicae. Springer-Verlag, 1997, 14(12): 1429-1436
- [49] Kee C, Yun D. Extending coverage of DGPS by considering atmospheric models and corrections[J]. Journal of Navigation, 2002, 55(02): 305-322
- [50] Chen W, Hu C, Gao S, et al. Absolute ionospheric delay estimation based on GPS PPP and GPS active network[J]. 2004
- [51] Li Z, Yuan Y, Li H, Ou J, Huo X (2012) Two-step method for the determination of the differential code biases of COMPASS satellites. J Geod 86 (11): 1059-1076
- [52] Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P (2014) Differential Code Bias Estimation using Multi - GNSS Observations and Global Ionosphere Maps. Navigation 61 (3): 191-201
- [53] Ma G, Maruyama T. Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan[C]//Annales Geophysicae. 2003, 21(10): 2083-2093
- [54] 韩玲. 区域GPS电离层TEC监测、建模和应用[M]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2006
- [55] L. Ciralo, F. Azpilicueta, C. Brunini et al. Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS. J Geodesy, 2007, 81:111-120
- [56] A.M.Meza, C.A.Brunini, W.Bosch et al. Comparing Vertical total electron from GPS, BENT and IRI models with TOPEX-POSEIDON[J]. Adv.space Res, Vol.30, N0.2, pp:401-406, 2002
- [57] Radicella SM, Leitinger R(2001) The evolution of the DGR approach to model electron density profiles. Adv Space Res 27(1):35-40
- [58] Di Giovanni G, Radicella SM(1990) An analytical model of the electron density profile in the ionosphere. Adv Space Res 10(11):27-30
- [59] G.V. Haines.Spherical Cap harmonic Analysis[J].Journal of Geophysical Research, Vol.90, No.B3, 2583-2591. 1985
- [60] 李建成. 物理大地测量中的谱方法[D]. 武汉: 武汉大学, 1993
- [61] 蒋和荣, 杨征宇, 杨美华. 电离层参数的混沌特性及可预报的时间尺度闭[J]. 空间科学学报, 1994, 14(3): 221~22
- [62] 张景雄. 空间信息的尺度、不确定性与融合[M]. 武汉大学出版社, 2008
- [63] 毛田, 万卫星, 孙凌峰. 用Kriging方法构建中纬度区域电离层TEC地图[J]. 空间科学学报, 2007, 27(4):279~285
- [64] 王建平. 中国及周边地区电离层TEC短期预报方法研究[D]. 西安电子科技大学, 2008
- [65] 涂锐. GPS单频精密单点定位与区域电离层模型研究[D]. 长安大学, 2011
- [66] Zhang D H, Zhang W, Li Q, et al. Accuracy analysis of the GPS instrumental bias estimated from observations in middle and low latitudes[C]//Annales Geophysicae. European Geophysical Society, Max-Planck-Str. 13 Katlenburg-Lindau Germany, 2010, 28(8): 1571-1580
- [67] 陈俊平, 吴斌, 胡小工等. 上海天文台陆态网络数据分析中心[C]. 第三届中国卫星导航年会——S08卫星导航模型与方法, 2012

- [68] 刘大杰, 施一民, 过静珺. 全球定位系统(GPS)的原理与数据处理[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996
- [69] 许承权. 单频精密单点定位算法研究与程序实现[D]. 武汉: 武汉大学, 2008
- [70] 金双根, J. Wang, 章红平, 朱文耀. 实时监测和预报电离层电子含量[J]. 天文学报, 第45卷, 第2期, 2004年5月
- [71] MUHTAROV G and KUTIEV I. Autocorrelation method for temporal interpolation and short-term prediction of ionospheric data[J]. Radio Science, 1999, 34(2):459—464
- [72] MARIN D, MIRO G and MIKHAILOV A V. A method for foF2 short—term prediction[C]//4th COST 251 Workshop proceedings. Madeira, Portugal, 1999:214—222
- [73] CANDLER L R, MILOSAVLJEVIC M, STANKOVIC S, et al. Ionospheric forecasting technique by artificial neural network[J]. Electron, Lett., 1998, 34(6):1573—1 574
- [74] ARAUJO-PRADERE E A, FULLER-ROWELL T J and CODRESCU M C. Storm: An empirical storm-time ionospheric correction model, I, Model Description[J]. Radio science, 2002, 37(5):1070. Doi:10.1029/2001RS002467
- [75] RUSHM C M and Jr EDWARDS W R. An automated mapping technique for representing the hourly behavior of the ionosphere[J]. Radio Science, 1976, 11(11):931—937
- [76] LIU Ruiyuan, SMITH P A and KING J W. A new solar index which leads to improved foF2 predictions using the CCIR Atlas[J]. Telecommunication Journal, 1983, 50(VIII):408—414
- [77] SOJKA J J, THOMPSON D C, SCHUNK R W, et al. Assimilation Ionospheric Model: Development and testing with Combined Ionospheric Campaign Caribbean measurements[J]. Radio science, 2001, 36(2):247-259
- [78] J Caruana. The IPS monthly T index, Solar-Terrestrial Predictions [M]. Proceedings of a workshop at Leura, Australia October 16~20, 1989, 2:257~263, 1990
- [79] 王世凯, 焦培南, 柳文. 改进的克里格技术实时重构区域电离层foF2的分布[J]. 电波科学学报, 2006, 21(2): 166—171
- [80] 刘瑞源, 刘国华, 吴健等. 中国地区电离层foF2重构方法及其在短期预报中的应用[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 300—306
- [81] 张小红. 自回归移动平均模型的电离层总电子含量短期预报[J]. 测绘学报, 2014, 43(2):118-124
- [82] 李志刚, 程宗颐, 冯初刚等. 电离层预报模型研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2): 327—337
- [83] 万卫星, 宁百齐, 刘立波等. 中国电离层TEC现报系统[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1040—1045

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历：

张泽峰，男，1991年11月生。

2013年6月毕业于南京工业大学，测绘工程专业，获学士学位。

2013年9月入同济大学读硕士研究生。

已发表论文：

[1] 伍吉仓，张泽峰，陈俊平. 基于单站相位数据的接收机硬件延迟估算方法. 大地测量与地球动力学, 2016 (3) : 235-238