



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

GNSS 电离层建模及硬件延迟分析

姓名：谢益炳

学号：1130799

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：伍吉仓教授

副指导教师：陈俊平研究员

二〇一四年二月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Master of Engineering

**GNSS ionospheric model construction and
hardware delay analysis**

Candidate: Yi-Bing Xie

Student Number: 1130799

School/Department: College of Surveying and
Geo-Informatics

Discipline: Engineering

Major: Geodesy and Surveying Engineering

Supervisor: Prof. Ji-Cang Wu

Prof. Jun-Ping Chen

February, 2014

GNSS 电离层建模及硬件延迟分析

谢益炳

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，也是差分定位精度随用户与基准站距离增加而迅速降低的主要原因之一。随着美国取消 SA 政策后，电离层延迟对电磁波的影响以及监测电离层变化越来越成为人们关注的热点。目前国际 GNSS 服务组织（International GNSS Service）和一些全球 GNSS 分析中心，如 CODE（Center for Orbit Determination in Europe）、JPL（Jet Propulsion Laboratory）等已为用户提供全球电离层 TEC（Total Electron Content）时空变化信息的服务。而利用 GNSS 技术监测 TEC 不可避免地要考虑到系统硬件延迟（Differential Code Bias, DCB），其最大误差可达 7ns 或 9~30TECU。因此 DCB 的确定对于电离层 TEC 精确获取有着重要影响；同时对于观测卫星总数不足时，硬件延迟可以作为已知值来参与定位，减少必要观测数，增加多余观测值，从而提高卫星导航的可靠性、完好性和连续性。

本文从实际应用的角度，详细介绍了利用 GNSS 监测电离层的原理与方法，论述了几种常用的电离层模型，建立了全球和区域电离层模型算法和相应的软件系统，具体研究内容如下：

1. 简要介绍了电离层的研究及发展情况，详细介绍了几种电离层延迟改正模型；

2. 利用全球 IGS 观测跟踪网数据构建全球球谐函数模型，解算出垂直总电子含量 VTEC（Vertical Total Electron Content）、不同系统的卫星和接收机硬件延迟；通过与 CODE 事后提供的电离层产品进行比较，解算得到的垂直总电子含量 VTEC 的精度可达到 2~3 个 TECU，且联合解算 GPS 和 GLONASS 双系统精度较 GPS 单系统高；GPS 和 GLONASS 卫星硬件延迟相对与 CODE 精度优于 0.1ns，相对于 IGS 精度优于 0.2ns；测站硬件延迟相对与 CODE 和 IGS 精度精度优于 1ns。

3. 在球谐函数模型的基础上，利用不同的约束条件，分别采用全球 230 个 GPS 基准站和中国区域附近 11 个基准站连续一个月的双频实测数据，解算电离层电子含量和卫星与接收机的硬件延迟。将其结果与 CODE 提供的结果进行比较，表明电子含量、GPS 卫星与接收机的 DCB 组合不受约束条件的影响，且组合 DCB 精度优于 2ns，垂直电子含量相对于 CODE 公布的结果能改正 90%。

4. 针对中国区域，利用陆态网络数据构建不同的电离层模型，并与 CODE 事后产品进行对比分析。结果表明多项式、格网以及低阶球谐函数这三种模型对

于建立区域电离层模型是有效的，且精度相当。鉴于 CODE 在解算电离层时，利用中国区域测站较少，导致与区域模型之间存在一个系统偏差，当扣除偏差之后，三种区域模型的精度可达 1~2 个 TECU。

5. 提出利用 ARMA 模型对球谐系数前 13 项进行模型预报，再利用预报系数形成格网数据。将结果与 CODE 产品进行对比分析并用于实时导航定位中。结果表明预报 13 个系数已能满足相应的导航精度要求，与传统的 Klobuchar 模型相比，最大能提高 15% 的定位精度。

关键词： GNSS，电离层，垂直总电子含量，硬件延迟，预报

ABSTRACT

In GNSS measurements, navigation and positioning, one of the major error sources is Ionospheric delay, and it is also the main reason that differential positioning precision rapidly reduce with the increase of the distance between users and reference stations. As the SA is cancelled, the effect of ionospheric delay to radio propagation, and ionosphere monitoring draw more and more attention. At present, the IGS(International GNSS Service) and some of the global GNSS data analysis center, such as CODE, JPL, has provided users with information service of global ionospheric TEC spatio-temporal changes.

The ionospheric parameter is normally determined using the differential observations between different frequencies. Thus the Differential Code Bias(DCB) can reach 7ns or 9~30 Tecu. Hence, the determination of DCB has important effect for the precisely acquirement about the Ionospheric TEC. It can participate in positioning as the known values, reduce the necessary number of observations, and increase redundant observations when the total number of satellites is insufficient, thereby improving the reliability of satellite navigation, integrity and continuity.

This paper introduces principle and method of ionosphere monitoring using GNSS observations. Several conventional ionospheric models are discussed. Global and regional ionospheric models and the corresponding software are developed. The content of this thesis is as follows:

1. Introduction of the development of the ionosphere research; and introduction of some conventional ionospheric delay correction model.
2. Development of spherical harmonic function model and estimation of vertical ionosphere electron content(VTEC) and DCB of GNSS satellites and receivers using double-frequency measurements of IGS stations. Comparing with the results of CODE and IGS, the precision of estimated VTEC reach about 2~3TECU. The VTEC estimated from multi-GNSS observations has a better precision than GPS only estimates. DCB precision of GPS and GLONASS satellites are better than 0.1 ns comparing with results of CODE and 0.2ns comparing with that of IGS. DCB precision of GNSS receivers are better than 2ns comparing with that of CODE and IGS.

3. Investigation of the impacts of constrains on the VTEC and DCB estimation. Constrain is normally needed in the VTEC/DCB estimation process, the most used strategy is to constrain the sum of satellite DCBs to be zero. Dual-frequency measurement data of 11 GPS stations in the vicinity of China and 230 stations over global are used to calculate VTEC and DCBs. Spherical harmonic function model are developed. Results show that the VTEC and the combination DCBs of GPS satellites and receivers are not affected by the difference of constraints. The satellite/receiver combined DCB precision is better than 2 ns comparing with CODE, and the correction rate of VTEC reach 90 percentage.

4. Regional ionosphere models for China were developed using the GNSS data of CMONOC(CRUSTAL MOVEMENT OBSERVATION NETWORK OF CHINA). Results show that the polynomial, grid and low order spheric harmonic function model are effective for regional ionosphere modeling. Their precision reaches 1~2 TECU.

5. The prediction of ionosphere model. ARMA model is used to predict the first 13 coefficients of spheric harmonic function. Results show that the prediction of first 13 coefficients can meet the navigation accuracy, and improves the positioning accuracy by 15% comparing with the traditional Klobuchar model.

Key words: GNSS, ionosphere, VTEC, DCB, forecast

目录

摘要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 国内外研究现状	1
1.3 本文的研究意义及主要内容	3
1.3.1 研究意义	3
1.3.2 研究内容	4
第 2 章 GNSS 研究电离层原理与方法	5
2.1 电离层概况	5
2.2 电离层折射特性及折射指数的 A-H 公式	6
2.3 GPS 信号的电离层延迟误差	7
2.4 利用 GNSS 计算电子含量原理与方法	8
2.4.1 电离层单层模型	8
2.4.2 穿刺点 IPP 位置的确定	9
2.4.3 电离层坐标参考系	9
2.4.4 投影函数计算模型	10
2.4.5 利用 GNSS 双频观测量计算 TEC	11
2.5 本章小结	12
第 3 章 全球电离层模型与硬件延迟可靠性分析	13
3.1 经典电离层模型介绍	13
3.1.1 Bent、IRI 和 NeQuick 模型简介	13
3.1.2 Klobuchar 模型介绍及其原理	13
3.1.3 球谐函数模型	15
3.1.4 IGS 全球电离层研究	16
3.2 利用球谐模型解算全球总电子含量和硬件延迟	17
3.2.1 计算方法	17
3.2.2 全球 VTEC 建模流程	19
3.2.3 GPS/GLONASS 组合解算全球 VTEC 和硬件延迟结果	19
3.3 基于不同约束的电离层电子含量和硬件延迟分析	25
3.3.1 不同约束条件计算方法	25
3.3.2 不同约束条件下的法方程	25

3.3.3 计算结果分析.....	26
3.4 小结.....	36
第4章 中国区域电离层相关模型分析.....	37
4.1 中国大陆构造环境监测网简介.....	37
4.2 多项式模型介绍及结果分析.....	37
4.3 格网电离层延迟模型介绍及结果分析.....	41
4.4 中国区域球谐函数模型结果分析.....	45
4.5 小结.....	49
第5章 电离层预报.....	51
5.1 电离层预报简介.....	51
5.2 时间序列模型介绍.....	51
5.3 ARMA 建模及参数确定.....	52
5.4 计算结果分析.....	53
5.5 小结.....	58
第6章 总结与展望.....	59
6.1 总结.....	59
6.2 展望.....	60
致谢.....	61
参考文献.....	62
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	66

第 1 章 绪论

1.1 概述

地球电离层是高度约为 60~1000km 范围内的离子化大气层，其结构可用电离层的一系列特性参量来表征，包括电子密度、离子密度、电子温度、离子温度等。电子密度（或电子浓度）是指单位体积内的自由电子数，通常采用 el/m^3 或者 el/cm^3 来表示。由于不同高空区域上的大气成分、大气密度以及太阳辐射通量等因素的不同，使电子密度在垂直方向上具有分层特性，一般可以划分为 D 层、E 层和 F 层，F 层又可进一步划分为 F1 层和 F2 层，与各电离层分层最大电子浓度相对应的等离子体频率称为该层的临界频率，分别记为 f_0E ， f_0F1 和 f_0F2 ，各界临界频率的变化直接反映各层最大电子浓度的变化。其中 60km~90km 高度上 D 层浓度为 $7 \times 10^4/\text{m}^3$ ，90km~140km 高度上的 E 层浓度为 $1 \times 10^{11}/\text{m}^3$ ，而 140km 以上的 F 层，其浓度为 $3 \times 10^{11} \sim 10^{12}/\text{m}^3$ ，可见在电离层中，以 F 层的电子密度最高。

然而，电离层分层结构只是一种理想化的电离层状态描述，实际上，电离层总是随着纬度、经度呈现复杂的空间变化，并且昼夜、季节、太阳黑子等周期的变化也会影响电离层的变化。由于受到太阳活动的影响，电离层中的电子密度、稳定性和厚度等都在随时不断变化。太阳活动的剧烈程度通常用太阳黑字数来表示，高峰年周期为 11 年^[1]。当太阳活动趋于剧烈时，太阳黑字数增加，电离层中的电子数也相应增加。在太阳活动高峰年和低峰年间，其总电子含量可相差 4 倍左右^[1]。

电离层作为一种传播介质，会发生反射、折射、散射和吸收无线电信号，对电磁波传播产生很大的影响。二十世纪下半叶以来，伴随着现代通信科学、计算机科学、空间科学、海洋科学以及地球科学等学科在众多相关领域的交叉研究和集成应用的快速发展，特别是近几十年出现的以 GPS、GLONASS 和 DORIS 等为代表的几种基于无线电技术的卫星定位与导航系统，电离层对人类和生活产生了巨大的影响。随着中国探月工程和北斗工程等一系列现代科技手段的产生，掌握电离层的结构和规律，意义重大^[2]（李征航，2002）。

1.2 国内外研究现状

由于电离层的结构和活动的复杂性，深入研究电离层的活动机理显得十分重要和迫切，多年来，人们一直致力于对电离层活动规律、结构的观测与探测，以寻找到能有效消除电离层影响的方法。

以前最常用的探测电离层电子含量的方法包括：利用电离层垂直探测仪探测电离层电子含量；利用电离层探针测量电离层有关参数；利用法拉第旋转效应测量电离层的电子含量；利用多普勒效应测量电离层的电子含量等^[3]（袁运斌，2002）。

随着 GPS 系统建成后，由于其具有其他探测技术无法比拟的优点：第一，卫星轨道高度约为 2 万公里，能观测到的总电子含量不仅包括电离层电子密度，还包括 2000km 以上的等离子体中的电子密度；第二，GPS 星座的空间分布有利于对电离层活动的长期连续监测；第三，IGS 为研究电离层提供了宝贵的资源；第四，利用 GPS 测量电子含量是目前精度最高的手段，因此成为国内外电离层研究领域的主要方向之一^[4]（黄逸丹，2007）。

对于电离层的研究而言，GPS 是一种有力的工具，利用 GPS 数据精确的计算、分析区域或者全球电离层的结构及其分布特性。监测电离层的各种物理活动及其特性，发现并且对其进行解释、研究推演电离层的各种物理过程，在很大程度上取决于电离层电子密度的二维和三维时空分布的计算精度和可靠性。利用 GPS 确定电离层总电子含量意义在于^[5]（Lanyi G E, 1988）：一是通过测定电离层对 GPS 信号的延迟来确定电子密度，以建立全球的电离层数值模型，研究并揭示电离层电子密度的空间分布；二是利用计算得到的高时空分辨率的全球电离层电子含量来精化区域或全球的电离层延迟改正模型，进而改善 GNSS 用户特别是单频用户的实时导航定位精度。

对于模型的研究，可以分为理论模型和经验模型。理论模型通常较复杂，虽然可以定性地描述电离层的特征和变化规律，但其精度不够。而经验模型又可以分为两类，第一类包括 Kloubuchar 模型^[6]（Kloubuchar, 1996），国际参考电离层（IRI）模型，如 IRI1986、IRI2000 等^[7,8]（Bilitza.D, 2001; Erdem Turker Senalp, 2008）等。第二类是基于 GNSS 观测值建立的电离层模型。与第一类相比，其精度可大幅度提高，因此成为国内外研究的重点之一。如三角级数模型

（Georgiadiou, 1994），多项式模型^[9]（蔡昌盛，2009），球谐函数模型^[10,11]（G.Lanyi, 1986; Stefan Schaer, 1999）。

在此基础上，国内外学者对电离层进行进一步研究，Adela 等利用卡尔曼滤波估计等离子体电子含量，该方法能有效扣除电离层总电子含量中等离子体的含量^[12]（Sonya Todorova, 2007）；在计算总电子含量的基础上，Schmidt 等利用 B-Spline 函数来进一步精化^[13-16]（Adela Anghel, 2009; Michael Schmidt, 2007;

Michael Schmid, 2010; Zeilhofer.C, 2009)。早期 GPS 电离层研究主要是基于单层模型来研究的,但它无法揭示电离层垂直结构的分布及其时空变化特性。1986年, Austen 等首次提出联合应用无线电信标测量和 CT 技术反演电离层电子含量密度二维分布的设想;而 Andreeva 等首次给出了电离层层析的实验结果。20 世纪 90 年代中期前后,基于 GPS 的电离层层析技术逐渐兴起, Fremouw, Raymund, 吴雄斌等国内外学者对电离层三维层析模型进行了研究^[17-21] (Nohutcu.M, 2010; Fremouw.E, 1992; Raymund.T, 1994; Howe.B.W, 1998; 吴雄斌, 2001)。

IGS 早在 1988 年就意识到 GNSS 监测电离层活动的重要性,专门成立电离层工作组 (IonoWG),通过 GNSS 信号来恢复电离层^[22] (Feltens, 2003);到 2000 年,IGS 根据不同的分析中心处理结果,以纬度分辨率 2.5° , 经度分辨率 5° , 每两小时播发一次的方式向用户提供电离层电子含量图^[23] (Schaer, 1998)。随着地基 GNSS 电离层研究的开始,空基 GNSS 电离层的研究也逐步展开。20 世纪 90 年代开始,人们开始利用 GNSS 掩星技术进行大气探测,相继发射了 Orsted、CHAMP、SAC-C 和 GRACE 等低轨卫星^[24] (郭鹏, 2006)。而美国与中国台湾合作的 COSMIC 计划也已投入运行,为全球尺度的电离层监测开辟一条新途径^[25] (刘长建, 2011)。利用 GNSS 掩星技术探测电离层,极大改善反演结果的垂直分辨率,克服地基电离层层析实验的不足^[26-27] (邹玉华, 2004; Alizadeh.M.M, 2011)。

1.3 本文的研究意义及主要内容

1.3.1 研究意义

电离层作为地球大气层的一部分,对无线电波的传播有显著的影响,其具体表现为电离层的折射效应,而其引起的电离层时延是影响 GPS 测量、导航、定位与定轨精度的主要误差源之一,也是导致一般差分 GPS 定位精度随用户和基准站间距离的增加而迅速降低的主要原因之一。电离层引起的距离误差一般在白天可达 15m,夜晚可达 3m;在天顶方向最大可达 50m,在水平方向最大可达 150m,对于导航定位而言,这种误差是完全不能忽略的^[28] (周忠谟, 1997)。

局域差分 GPS 技术可以削弱电离层对相对定位的影响,但局部差分技术随着距离增加而精度下降。另外,广域差分 GPS 技术采用区域电离层模型,可以改善定位精度,但即使是利用较稠密的地面连续 GPS 跟踪网的双频观测数据建立起的区域电离层后处理模型,这种修正在赤道附近的效果也只能达到 86%。在

广域差分的实时电离层延迟改正中，像 WASS 这样利用格网模型校正动态用户电离层延迟的方法，其效果在中纬度地区也只能达到 80%，而在低纬地区，其效果更差。而 GIM 模型提供的球谐系数分辨率只有 5 度（经度） \times 2.5 度（纬度），在网格点其改正精度为 2TECU（约为 L1 频率上伪距 0.3m），而在其他插值点上精度则大大降低。

自上个世纪开始，我国开始建立起中国区域内的大陆构造环境监测网络，到目前为止，已建成 200 多个连续观测站。此项目的建成，对于电离层电子总含量变化的精化具有重要意义。由于 GIM 模型中中国区域 IGS 测站分布较少，GIM 模型对于中国区域精度较低，因此结合陆态网络实测数据建立电离层模型，对于提高中国区域内电离层电子含量精度，深入认识电离层结构和变化规律，推动相关学科的理论研究及工程应用的发展，意义重大。另外，随着我国北斗系统的运行，提高中国区域内电离层精度对于提高北斗定位精度具有重要影响。

1.3.2 研究内容

本文侧重于利用地基 GPS 和 GLONASS 测站数据，建立全球和区域电离层模型，对其进行精度分析，并对卫星硬件延迟和接收机硬件延迟的精度进行分析。以建立高精度的电离层模型为最终目的，同时提出根据球谐模型系数前 13 项进行预报，提供给单频用户用于导航定位，并与传统的 Klobuchar 模型进行对比分析。全文内容安排如下：

第一章：主要介绍电离层概况，国内外电离层研究状况，本文研究意义及主要内容。

第二章：介绍利用 GPS 监测电离层的原理与方法。

第三、四章：针对不同数据，编制相应程序。计算全球电离层模型系数和区域模型系数，并根据模型系数形成不同范围的格网电离层数据。同时利用不同的约束条件来对其模型系数和接收机与卫星硬件延迟进行分析。针对陆态网连续观测站实测数据，还利用多项式模型和格网模型进行建模，提出采用水平约束后，能有效提高中国边境区域的电离层精度。

第五章：提出对球谐函数系数前 13 项，利用 ARMA 模型进行模型系数预报。在此基础上，再利用预报系数形成格网数据，应用于实时导航定位中，并与传统的 Klobuchar 模型进行对比分析，得出相应的结论。

第六章：对本文做出总结，针对本文不足之处以及当前研究热点提出进一步的研究展望。

第 2 章 GNSS 研究电离层原理与方法

2.1 电离层概况

地球高层大气的分子和原子在太阳紫外线、X 射线和高能粒子的作用下，会产生自由电子和正负离子，形成从宏观上说仍然是中性等离子体区域，称为电离层^[29]（韩玲，2006）。无线电波在电离层中传播，会受到其中的带电粒子的影响。带电粒子受到外加电场和地磁场的影响，产生震动，出现二次辐射，而这种辐射削弱了传播的能量，进而又同原来的场矢量相加，最终对电离层折射指数产生影响。由于电子远远小于离子的质量，因此 GPS 信号的电离层延迟量主要取决于电子密度的大小^[30]（李卫国，2009）。

电离层电子密度时刻都在不断变化，这些变化主要是受太阳活动和各层大气密度的影响，由于大气密度上低下高，而宇宙射线辐射正好相反，导致电离层分层以及分层密度最大值的产生。按电子密度峰值区域高度垂直分层，一般可分为 D 层、E 层、F₁ 层和 F₂ 层，如图 2.1 所示。

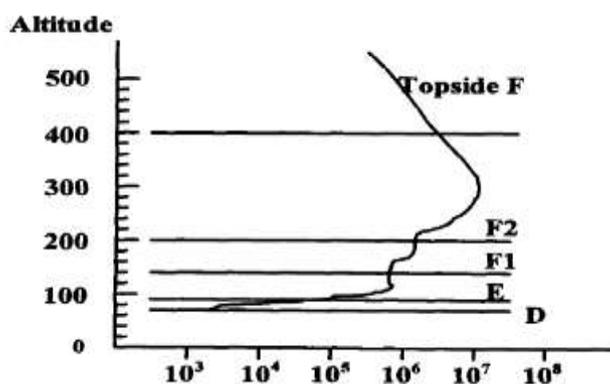


图 2.1 电子密度剖面图

由图 2.1 可见，各层间并没有明显的分界线，每一区域都有电子密度的最大值，整个电离层的电子密度最大为 F₂ 层，F₂ 层以上的电子密度随高度的增加而逐渐减少。另外，电离层中气体密度按高度有别，不同气体分子电离时需要的太阳辐射频率不同，导致不同电子密度峰值区域的出现，从而形成分层结构，电离层各层大气成分情况如下表 2.1 所示。

表 2.1 电离层各层大气成分情况

层名	D 层	E 层	F ₁ 层	F ₂ 层
高度范围 (km)	60~90	90~150	150~200	200~500
最大电子密度处高度 (km)	70	110	180~200	300
电子密度最大值 (个/m ³)	10 ³ ~10 ⁴	10 ³ ~10 ⁵	10 ⁵	10 ⁵ ~10 ⁶
中性分子密度 (个/m ³)	4x(10 ⁹ ~10 ²¹)	7x(10 ¹⁶ ~10 ¹⁹)	8.5x(10 ¹⁵ ~10 ¹⁶)	2x(10 ¹¹ ~10 ¹²)
大气成分	N ₂ 、O ₂ 、少量 NO	N ₂ 、O ₂ 、O	N ₂ 、O ₂ 、NO	
电离原因	X、黎曼射线电离，宇宙射线碰撞电力	X 射线及紫外线电离	λ ₀ =200~800A 紫外线电离	
基本特点	夜间消失	电子浓度白天大，夜间小	F ₁ 层夜间消失，常出现于夏季；F ₂ 层电子浓度白天大，夜间小，冬季大，夏季小	

除了上述正规层外，电离层还存在不均匀结构，如 Es 层和扩展 F 层。Es 层是一种较为常见的出现于 E 层的不均匀结构，有时是一片密集的不均匀体，有时是强电离的薄层电离区；而扩展 F 层是一种发生在 F 层的不均匀结构，它是 F 层电子密度不均匀体对电波散射的结果。

由于受到宇宙射线尤其是太阳紫外线辐射和大气相互作用的影响，电离层变化受到周日、季节以及太阳活动周期的影响。另外太阳的非周期性等异常变化(如日珥、耀斑)和地球磁场的变化有时也会影响电离层的变化。

2.2 电离层折射特性及折射指数的 A-H 公式

当电磁波信号穿过电离层时，由于受到电离层电子密度和本身信号频率的影响，其传播速度会发生变化，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的理论距离不等于从信号源到观测值间的几何距离。对 GPS 测量来讲，这种差异在天顶方向可达数米甚至十几米，对于低高度角的卫星信号，甚至超过数十米。因此，在 GPS 导航定位解算中，必须仔细加以改正^[2] (李征航，2002)。

电磁波在电离层中传播的速度 V_ρ 与电离层的折射率 n_ρ 之间存在反比关系，而折射率的表达式可以用 A-H (Appleton-Hartree) 公式来描述^[31] (章红平, 2006)。

$$n_\rho^2 = 1 - \frac{X}{1 - jZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - jZ)} \pm \sqrt{\frac{Y_T^4}{4(1 - X - jZ)^2} + Y_L^2}} \quad (2.1)$$

式中：

$$X = \frac{f_p^2}{f^2} = \frac{N_e e^2}{4\pi^2 \varepsilon_0 m f^2} = \frac{80.6}{f^2} N_e \quad (2.2)$$

$$Y_L = \frac{f_H}{f} \cos \theta = \frac{\mu_0 H_0 |e|}{2\pi m} \frac{1}{f} \cos \theta \quad (2.3)$$

$$Y_T = \frac{f_H}{f} \sin \theta = \frac{\mu_0 H_0 |e|}{2\pi m} \frac{1}{f} \sin \theta \quad (2.4)$$

$$Z = \frac{\nu_e}{\omega} \quad (2.5)$$

f_p 为等离子体频率， f 为电磁波频率， N_e 为电子数密度， e 为电子电荷， m 为电子质量， ε_0 为自由空间介电常数， θ 为地磁场与电磁波传播方向的夹角， H_0 为地磁场强度， f_H 为电子磁旋频率， μ_0 为自由空间磁导率， ν_e 为电子的有效碰撞频率， ω 为角频率，而 \pm 表示对每一频率同时存在两种传播模式。

2.3 GPS 信号的电离层延迟误差

GPS 信号穿过大气电离层时，会受到电离层色散效应的影响，产生折射效应而导致时间延迟，称为电离层时延效应。对于 GPS、GLONASS 和 DORIS 等无线电卫星导航系统用户来讲，电离层时延效应是最主要的影响。对 GPS 而言，其时延效应引起的测量误差在几米到几十米不等，因此，这种误差是不能被忽略的。

GPS 工作频率 $f_1 = 1.57542\text{GHz}$ ， $f_2 = 1.22760\text{GHz}$ ，由于其远远大于 A-H 公式中的 f_p 、 f_H 和 ν_e ，因此 A-H 公式可以简化为：

$$n = 1 - 40.28 \frac{N_e}{f^2} \quad (2.6)$$

上式即为简化的电离层折射指数公式，在忽略高阶影响后，取一阶近似，GPS 的载波相位传播速度（相速度 v_p ）和电磁波波速能量传播速度（群速度 v_g ）分别为：

$$\begin{aligned} v_p &= c \left(1 + 40.28 \frac{N_e}{f^2} \right) \\ v_g &= c \left(1 - 40.28 \frac{N_e}{f^2} \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

式中， c 为真空中的光速， N_e 为电子数密度， f 为电磁波信号频率。进行伪距测量和载波相位进行测量时，信号分别是以群速度和相速度在电离层中进行传播，因而，在仅顾及频率项的情况下，测码伪距观测值和载波相位观测值的电离层时延改正大小相等，方向相反^[32]（李征航，2005）。

一阶项的改正虽能近似达到 99%，而二阶项以上的残余误差一般小于几个厘米，在导航定位计算中往往不予考虑。但为了获取更高的折射精度，有许多学者考虑二阶项的影响^[33-35]（Pireaux.S, 2010; Datta-Barua.S, 2008; Mainul Hoque.M, 2008），甚至是三阶项的影响^[36-37]（伍约，2005；刘庆元，2008）。

2.4 利用 GNSS 计算电子含量原理与方法

2.4.1 电离层单层模型

电离层处于离地面约 100-1000Km 的高度范围内，通常在 350~450km 高度处，电离层的电子含量密度最高。为简化研究电子含量 TEC，假定某个单层模型来替代整个电离层，即认为所有的 TEC 都集中在某一高处的一个无限薄层球面上^[38]（Mannucci AJ, 1998），如图 2.2 所示。图中， H 是单层高度， R 为地球半径， z 为测站信号路径天顶距， z' 为电离层穿刺点 IPP（Ionospheric Perice Point）处的信号路径天顶距。单层高度一般取 350 或者 450Km，但也有学者认为层高会随着太阳活动和季节变动发生变化^[39]（Claudio Brunini, 2011）。

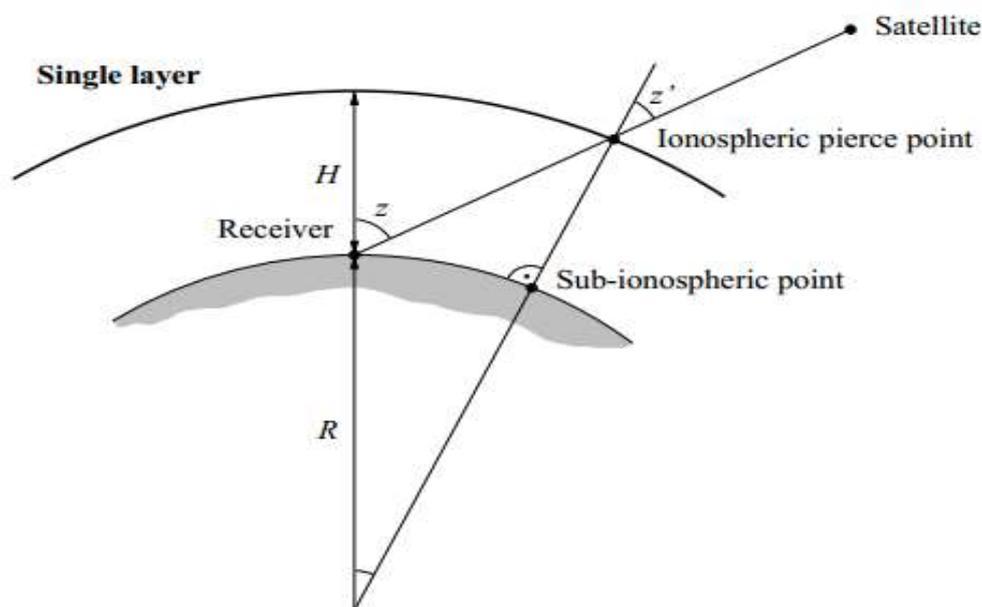


图 2.2 电离层单层示意图

单层模型是一种理想模型，计算较为简便，因此被广泛应用于：利用 GPS 电离层广播信息，结合算法来改正单频用户的观测量^[40] (Klobuchar JA, 1987); 计算电离层改正参数(例如 WAAS 系统中)^[41](Engel P, 1996); IGS 的 GIM(Global Ionosphere Mapping) ^[11] (Stefan Schaer, 1999)。

2.4.2 穿刺点 IPP 位置的确定

如图 2.2 所示，穿刺点为地面接收机与卫星连线与电离层单层的交点，其计算公式为：

$$\begin{aligned}\varphi_{pp} &= \arcsin(\sin \varphi \cos \psi_{pp} + \cos \varphi \sin \psi_{pp} \cos A) \\ \lambda_{pp} &= \lambda + \arcsin\left(\frac{\sin \psi_{pp} \sin A}{\cos \varphi_{pp}}\right)\end{aligned}\quad (2.8)$$

式中 λ_{pp} 和 φ_{pp} 分别为穿刺点的地理经纬度， λ 和 φ 分别为用户的大地经纬度， A 为卫星的方位角， ψ_{pp} 为地心张角，公式如下：

$$\psi_{pp} = \frac{\pi}{2} - E - \arcsin\left(\frac{R}{R+H} \cos E\right)\quad (2.9)$$

式中 R 为地球半径， E 为卫星高度角， H 为电离层单层的高度。

2.4.3 电离层坐标参考系

在科学研究中，选择适当的坐标系来表述结果，是极其重要的一个环节，同一组资料，在不同的坐标系下会出现不同的规律分布^[42](徐文耀, 2006)。就 GNSS 电离层研究而言，目前常采用的坐标系有^[3](袁运斌, 2002)：

- (1) 地固地理系：IPP 点的地理经纬度为电离层 VTEC (Vertical Total Electron Content) 模型变量；
- (2) 地固地磁系：IPP 点的地磁经纬度为电离层 VTEC 模型变量；
- (3) 日固地理系：IPP 点的地理纬度，地理经度与太阳地理经度的差值作为电离层 VTEC 模型变量；
- (4) 日固地磁系：IPP 点的地磁纬度，IPP 点的地磁经度与太阳地磁经度差值作为电离层 VTEC 模型变量。

以上四种坐标参考系实际上是日、地固与地理、地磁的两两组合，这种组合实际上考虑了抽象后单层模型在时间、空间上四维变化的特性。电离层 VTEC 的分布受到地球磁场的影响，地磁坐标系可以反映出这一特性，因而，利用其来描述并构造全球电离层的分布模型较适合^[31](章红平, 2006)。

2.4.4 投影函数计算模型

利用电离层投影函数 MF (Mapping Function)，可实现垂直方向与斜路径之间电离层延迟的转换，从而实现电离层模型参数化。一般的，投影函数为卫星高度角的函数。单层模型的投影函数主要有以下两种形式：

第一种投影函数是：

$$F(z) = \frac{1}{\cos z'}, \sin z' = \frac{R}{R + H} \sin z \quad (2.10)$$

式中，R 为地球半径，H 为单层高度；z' 为穿刺点处信号路径方向的天顶距；z 为测站处信号路径方向天顶距。

第二种投影函数为：

$$F(z) = \frac{1}{\cos z'}, \sin z' = \frac{R}{R + H} \sin(\alpha z) \quad (2.11)$$

当 α 为 0.9782，H 为 506.7km，R 为 6378km，该投影函数与 JPL 的扩展模型的投影函数符合较好^[2](李征航, 2002)。

目前，国内学者对电离层投影函数也做了许多研究，如欧吉坤提出分段取值的电离层投影函数模型^[31](章红平, 2006)。然而，在观测高度角大于 15~20 度时，各类投影函数计算效果无多大差异^[11](Stefan Schaer, 1999)。

2.4.5 利用 GNSS 双频观测量计算 TEC

在仅顾及 f^2 的情况下，电磁波在电离层中传播时所受到的电离层延迟改正量的大小可表示为^[43]（Hofmann-Wellenhof B, 2000）：

$$\Delta Ion = \frac{40.28}{f^2} TEC \quad (2.12)$$

在 GNSS 观测中，同历元时刻不同卫星由于传播路径不同，其 TEC 值也不同，在这些 TEC 值中有一个最小值，即天顶方向的总电子含量，通常用 VTEC 来表示，其单位取 TECU（1TECU=10¹⁶个电子/m²），VTEC 可以反映测站上空电离层的总体特征。

伪距观测方程为：

$$P = \rho - \Delta Ion + B^s - B_r + \Delta \quad (2.13)$$

式中， ρ 为接收机至卫星的几何距离， B^s 为卫星电路延迟偏差， B_r 为接收机电路延迟偏差， Δ 为其他改正项，包括：卫星钟差项，接收机钟差项，对流层延迟误差项，相对论改正项，多路径改正项，卫星与测站天线相位中心改正项等，它们与频率无关。

而相位观测方程为：

$$\lambda\varphi = \rho + \Delta Ion + B^s + B_r + \Delta - N\lambda \quad (2.14)$$

式中 λ 为波长， N 为整周模糊度。

采用伪距观测量进行 P4 组合，得到观测方程如下：

$$P_i - P_j = -\frac{40.28}{f_i^2} F(z) \bullet VTEC + \frac{40.28}{f_j^2} F(z) \bullet VTEC + (B_i^s - B_j^s) + (B_i^r - B_j^r), (i \neq j) \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} VTEC &= \frac{1}{40.28F(z)} \frac{f_i^2 f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \left((P_i - P_j) - (B_i^s - B_j^s) - (B_i^r - B_j^r) \right) \\ &= \frac{1}{40.28F(z)} \frac{f_i^2 f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} (\Delta P - \Delta B^s - \Delta B_r), (i \neq j) \end{aligned} \quad (2.16)$$

式中 ΔP 为伪距观测值差值， ΔB^s 为伪距观测值的卫星相对电路硬件延迟偏差（即卫星 DCB）， ΔB_r 则为接收机相对电路硬件延迟偏差（即接收机 DCB）。

上式通常被用来构建 GNSS 反演电离层电子含量的观测方程

采用相位观测量进行 L4 组合，可得到类似于（2.16）的观测方程：

$$VTEC = -\frac{1}{40.28F(z)} \frac{f_i^2 f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} (\Delta L + Amb - \Delta b^s - \Delta b_r) (i \neq j) \quad (2.17)$$

式中 ΔL 为相位观测量组合值, Amb 为模糊度组合常数, Δb^s 为相位卫星相对电路延迟, Δb_r 为相位接收机相对电路延迟偏差。

目前, 随着GPS BLOCK IIF和III卫星的发射, GPS频率在原来的 f_1 (1575.42MHz) 和 f_2 (1227.60MHz) 基础上增加了 f_5 (1176.45MHz)^[44] (El-Arini.M.B, 2009), 因此P4和L4组合方程大大增加。另外, GLONASS系统的完成, 使得GPS和GLONASS组合反演TEC成为可能。但由于GLONASS采用频分多址技术, 对其形成观测方程时需要注意其频率。其卫星信号的频率为^[45] (Rolf Dach, 2007):

$$\begin{aligned} f_1^n &= 1602.5625 + 0.5625n \\ f_2^n &= 1246.4375 + 0.4375n \end{aligned} \quad (2.18)$$

从公式 (2.16) 和 (2.17) 中可以看出, 利用伪距观测量可以得到电离层的绝对TEC值, 而利用相位观测量时, 由于模糊度参数的影响, 只能得到TEC变化的相对值。但由于多路径效应以及伪距观测量噪声的影响, 伪距观测量得到的TEC值随机误差较大, 其标准差在高仰角时可达10TECU, 因此利用伪距观测量计算TEC结果在分析具体电离层现象时具有一定的局限性^[2] (李征航等, 2002)。目前, 国内外学者采用平滑伪距的方法来提高精度, 如Hatch滤波^[46] (余明, 2004), 相位平滑伪距^[47, 48] (Ciraolo.L, 2007; F Arikan, 2008), 卡尔曼滤波^[13, 49, 50] (Adela Anghel, 2009; Charles S, 2009; Zhu Fuying, 2011) 等。

2.5 本章小结

本章首先回顾了电离层的大气成分以及各分层概况, 推导了由于电离层折射而导致GPS信号传播延迟误差。详细介绍单层模型、穿刺点的计算、坐标系以及投影函数的选择等问题; 最后着重推导如何利用GNSS双频观测数据来计算TEC。

第3章 全球电离层模型与硬件延迟可靠性分析

3.1 经典电离层模型介绍

3.1.1 Bent、IRI 和 NeQuick 模型简介

Bent 模型：Bent 模型是一种经验模型，由美国的 Rodney Bent 和 Sigrid Llewellyn 于 1973 年提出^[51]（A.M.Meza, 2002），其广泛应用于卫星跟踪中电离层折射改正。此模型可用于计算 1000km 以下的电子密度垂直剖面，将其电子密度看成是纬度、经度、时间、季节以及太阳辐射流量的函数。此模型中，电离层上部用 3 个指数层和一个抛物线层来逼近，而下部则用双抛物线层来近似。研究表明，当太阳黑字数小于 130 时，在中纬度地区 Bent 模型的误差大约为总量的 20%~30%。即使 Bent 模型利于方便使用，但不能满足各类高精度无线电定位的要求。

IRI 模型：IRI（International Reference Ionosphere）模型是在国际空间研究委员会（Committee On Space Research, COSPAR）和国际无线电委员会（International Union of Radio Science, URSI）的资助下，从 1960 年开始，由 IRI 工作组编制开发的全球电离层模型。该模型融汇了多个大气参数模型，引入太阳的月平均参数、地磁活动指数，描述无极光电离层在地磁宁静条件下的特定时间、特定地点上空的电子密度、电子温度、离子温度、离子成分、电子含量等月平均值^[31]（章红平, 2006）。IRI 最早给出的版本是 IRI-78，随着观测资料的不断积累，其后又不断推出 IRI-1986, IRI-90 和 IRI-2000 等，最新的版本为 IRI2011。

NeQuick 模型是由 Graz 大学的 ICTP 建立，该模型的第一版方案用于 EGNOS 项目中，为 Galileo 单频用户服务^[52]（Radicella SM, 2001），已被 International Telecommunication Union Radio communication Sector（ITU-R）采用^[53]。NeQuick 模型经过完善，发布第二版，可以根据太阳活动、UT 时、高度和地理坐标来计算电离层电子密度。从 90km 到 F₂ 顶端，该模型选用修订的 DGR 剖面公式，包括 5 个 Semi-Epstein 层参数^[54]（Di Giovanni G, 1990）。NeQuick（Fortran 77）源代码可以从 <http://www.itu.int/oth/R0A04000018-/en> 上下载。该模型提供了一种三维的电离层图像新方法。

3.1.2 Klobuchar 模型介绍及其原理

目前,对于双频用户来讲,通常可以采用双频或多频组合的方式来有效地消除导航定位中电离层的影响;而对于单频用户而言,采用有效的电离层延迟模型可以有效削弱该误差源的影响^[46](余明,2004)。单频 GPS 用户不能自行修正电离层的影响,一般采用 Klobuchar 模型进行相应改正。Klobuchar 模型有 8 个参数,可以日常更新和提前存储,使用简便,故称作 GPS 广播模型。

Klobuchar 模型是基于 Bent 电离层经验模型简化而来,是由美国科学家 J.A.Klobuchar 在 1987 年提出,它直观简洁地反映了电离层的周日变化特征。Klobuchar 模型采用三角余弦函数的形式,参数的设置考虑到电离层周日变化的振幅和周期的特性,从而基本上反映了电离层的变化特性。该模型把白天设置为振幅和周期都作为穿刺点地磁纬度的函数,而晚间设置成一个常数,具体表达式如下:

$$I_z(t) = \begin{cases} A_1 + A_2 \cos \left[\frac{2\pi(t - A_3)}{A_4} \right], & |t - A_3| < A_4 / 4 \\ A_1, & t \text{ 为其他值} \end{cases} \quad (3.1)$$

式中, I_z 是以秒为单位的垂直延迟; t 是以秒为单位的接收机至卫星连线与电离层交点处的地方时; A_1 为夜间的垂直延迟常数 (5×10^{-9} s); A_2 为白天余弦曲线的幅度,其可以根据 GPS 广播星历中的 α_n 系数计算得到,计算公式如下:

$$A_2 = \begin{cases} \alpha_1 + \alpha_2 \varphi_M + \alpha_3 \varphi_M^2 + \alpha_4 \varphi_M^3, & \text{当 } A_2 \geq 0 \\ 0, & \text{当 } A_2 < 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

φ_M 为电离层穿刺点的地磁纬度; A_3 为初始相位,一般取 50400 s (当地时间 14:00); A_4 为余弦曲线的周期,可根据广播星历中 β_n 求得:

$$A_4 = \begin{cases} \beta_1 + \beta_2 \varphi_M + \beta_3 \varphi_M^2 + \beta_4 \varphi_M^3, & \text{当 } A_4 \geq 72000 \\ 0, & \text{当 } A_4 < 72000 \end{cases} \quad (3.3)$$

该模型是 GPS 广播星历采用的预报模型,已可用于建立广域差分的实时模型^[31](章红平,2006)。虽然 Klobuchar 模型基本上反映了全球电离层的变化特性,既考虑到了电离层周日和周期变化,又考虑不同纬度上的差异,但由于受到模型自身参数设定的限制,其改正效果一般在 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^[31](章红平,2006)。

选取 COCO (-12.2° , 96.8°), KARR (-20.9° , 117.1°), TWTF (24.9° , 121.1°), BJFS (39.6° , 115.9°) 四个站, 根据 Klobuchar 模型计算测站上空的 VTEC, 如图 3.1。从图中可以看出, 不同纬度上空 VTEC 含量最大值出现在地方时 14:00 过后的 0~4 小时左右, 而 Klobuchar 模型定义为 14:00 确实引入了一定的模型误差。

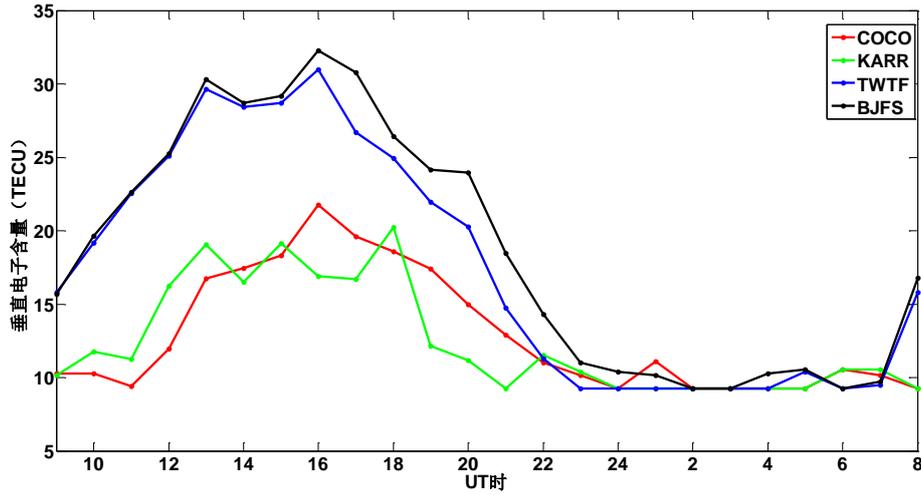


图 3.1 测站上空垂直总电子含量

3.1.3 球谐函数模型

采用球谐函数展开形式来描述全球电离层 VTEC 的时空分布及其变化, 具体函数模型及部分说明和计算公式为:

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

式中, $VTEC(\beta, s)$ 为垂直总电子含量, n_{\max} 为二维泰勒级数展开纬度方向的最大阶数; β 表示穿刺点的地理纬度或地磁纬度; s 为日固系中穿刺点经度, s 与地方时有关:

$$s = \lambda - \lambda_0 \approx UT + \lambda - \pi \quad (3.5)$$

UT 为世界时, λ 为穿刺点对应的地理经度, λ_0 是太阳的经度; \tilde{P}_{nm} 为 n 阶 m 次归一化缔合勒让德函数, $\tilde{P}_{nm} = \Lambda(n, m)P_{nm}$, 正则化函数 Λ 定义为:

$$\Lambda(n, m) = \sqrt{\frac{(n-m)!(2n+1)(2-\delta_{0m})}{(n+m)!}} \quad (3.6)$$

δ_{0m} 表示克罗内克函数; a_{nm} 和 b_{nm} 为待估球谐模型参数。

计算球谐模型函数系数个数的公式为：

$$N = (n_{\max} + 1)^2 - (n_{\max} - m_{\max})(n_{\max} - m_{\max} + 1) \quad (3.7)$$

式中， n_{\max} 和 m_{\max} 为球谐函数的最高阶数和最高次数，这两个参数表征了该模型的空间分辨率。

相关研究表明，完全可以利用球谐函数模型来模拟全球或区域电离层延迟的时空分布及其变化，且改正精度比 Klobuchar 模型高^[11] (Stefan Schaer, 1999)。在太阳-地球参考框架中用一阶球谐函数建模，解算结果可以达到类似于 WAAS 格网电离层模型的精度^[55] (王刚, 2000)。但是，球谐模型由于其平均性的弱点，导致在低纬度地区拟合效果不好^[56] (Brian D. Wilson, 1995)。

3.1.4 IGS 全球电离层研究

IGS 组织多年来一直关注着利用全球 IGS 连续运行的跟踪站提取电离层信息，自 1988 年开始提供电离层垂直总电子含量图，它是以二维格网形式表示的，以 2 小时为时间间隔的全球电离层图。这种电离层总电子含量数据交换格式文件 IONEX 由 Schaer 等人提出^[57] (Stefan Schaer, 1988)，其具体格式如图 3.2。

1988 年 5 月成立 IGS 电离层工作组 (Iono_WG)，该组织先后由 CODE、EMR、ESA、UPC、JPL 五个分析中心组成。其中 CODE、EMR、ESA、JPL 除了提供电离层产品外，还提供卫星和接收机频率间电路硬件延迟偏差 DCB 信息，以纳秒为单位，此外，CODE 还提供全球电离层层球谐函数模型 (GIM) 系数，用户可以根据它内插计算任意时刻任意经纬度处的 VTEC^[58]。

电离层工作组另一个重要的任务就是比较各分析中心产品，评定精度。第一个评定方法是基于统计学，取均值，各分析中心与均值比较；第二个评定方法是基于自洽性测试来定权进行组合；第三种评定方法是利用 TOPEX、ENVISAT 等获取的 VTEC 数据进行评估。

欧洲定轨中心 CODE 采用上述球谐函数模型，进行 15 阶展开来解算全球电离层总电子含量。CODE 将一天的电离层 VTEC 按两小时时间间隔分成 12 或者 13 个时段，分别求出一套球谐模型系数。对于任意时刻某穿刺点的 VTEC 求解，可以采用分段线性内插得到该时刻的模型系数，从而计算相应总电子含量。另外 CODE 还采用最小二乘配置的方法，对电离层模型参数进行时间序列分析，预报后两天的模型系数。

JPL 是在单层电离层球壳上用一个统一的三角格网描述全球电离层 VTEC 的分布和变化。它以 800 公里左右为空间间隔，将电离层球壳分成 1280 个球面三角形，对应于 642 个格网点。ESA 采用一个非线性的高斯型电离层指数模型；

EMR 将电离层薄壳分成若干像素，并认为每个像素单元内电离层 VTEC 不变；UPC 则是采用了类似的方法^[31]（章红平，2006）。

1.0	IONOSPHERE MAPS		GNSS	IONEX VERSION / TYPE
ADDNEQ2 V5.1	AIUB		02-JUL-11 20:14	PGM / RUN BY / DATE
CODE'S GLOBAL IONOSPHERE MAPS FOR DAY 179, 2011				COMMENT
Global ionosphere maps (GIM) are generated on a daily basis				DESCRIPTION
at CODE using data from about 150 GPS sites of the IGS and				DESCRIPTION
DIFFERENTIAL CODE BIASES				START OF AUX DATA
G01	-2.952	0.013		PRN / BIAS / RMS
G02	5.541	0.006		PRN / BIAS / RMS
G03	-2.708	0.006		PRN / BIAS / RMS
G04	-1.531	0.006		PRN / BIAS / RMS
G05	1.105	0.006		PRN / BIAS / RMS
G06	-2.435	0.006		PRN / BIAS / RMS
G07	1.415	0.006		PRN / BIAS / RMS
G08	-2.797	0.006		PRN / BIAS / RMS
G09	-2.018	0.006		PRN / BIAS / RMS
G10	-4.092	0.006		PRN / BIAS / RMS
G ABMF	97103M001	-12.622	0.040	STATION / BIAS / RMS
R ABMF	97103M001	-7.162	0.045	STATION / BIAS / RMS
G ADIS	31502M001	0.968	0.042	STATION / BIAS / RMS
R ADIS	31502M001	-11.425	0.047	STATION / BIAS / RMS
G ALBH	40129M003	10.219	0.035	STATION / BIAS / RMS
G ALGO	40104M002	4.697	0.033	STATION / BIAS / RMS
G ALIC	50137M001	12.600	0.038	STATION / BIAS / RMS
R ALIC	50137M001	-9.779	0.042	STATION / BIAS / RMS
G ALRT	40162M001	3.792	0.043	STATION / BIAS / RMS
G AMC2	40472S004	6.596	0.033	STATION / BIAS / RMS

图 3.2 IONEX 格式

3.2 利用球谐模型解算全球总电子含量和硬件延迟

3.2.1 计算方法

参照第 2 章利用 GPS 计算 VTEC 的原理与方法，采用电离层残差组合(GF)，形成观测方程：

$$\tilde{P}_4 = -\frac{40.28}{f_1^2} \cdot \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2} \right) F(z) \cdot VTEC + c \cdot \Delta b^S + c \cdot \Delta b_R \quad (3.8)$$

其中 \tilde{P}_4 为经过载波相位平滑后的伪距，具体平滑方法可参阅^[59]（Rolf Dach, 2007）。 Δb^S 为卫星的硬件延迟， Δb_R 为接收机的硬件延迟，VTEC 为接收机垂直方向的电子含量， $F(z)$ 为电离层投影函数， z 为卫星天顶距。本文采用的单层模型投影函数为：

$$F(z) = \frac{1}{\cos z'}, \sin z' = \frac{R}{R+H} \sin(\alpha z) \quad (3.9)$$

式中 H 取 450km； α 为改正系数，这里取 0.9782；而 VTEC 则采用球谐函数模型。

根据式 (3.4) 和 (3.8) 式, 最终形成方程:

$$\tilde{P}_4 = \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2} \right) F(z) \cdot \frac{40.3}{f_1^2} \cdot \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm} (\sin \beta) (a_{nm} \cos ms + b_{nm} \sin ms) + c \cdot \Delta b^s + c \cdot \Delta b_r \quad (3.10)$$

从上式右端可以看到, 解算时卫星和接收机硬件延迟的系数一样, 如果将其组合设为一个参数, 那么假如有 n 颗卫星和 m 个测站, 一个测站对应就有 n 个参数, 则硬件延迟总参数就为 $n \times m$ 个; 如果将其分开独立求解^[60] (Mannucci A J, 1998), 则参数个数大大减小, 变为 $n+m$ 个。然而分开求解在进行最小二乘估计时, 观测方程的法方程系数矩阵是秩亏的, 秩亏数为 1, 因而不能直接解算, 需引入一个约束条件。目前普遍采取的约束条件为:

$$\sum_{i=1}^n q^i = 0 \quad (3.11)$$

其中 n 为观测到的卫星个数, q^i 为第 i 颗卫星的硬件延迟。在解算 GLONASS 或北斗卫星和接收机硬件延迟时, 同样可以用上式作为约束条件来解算^[61]

(WenHai Jiao, 2012)。

当加入约束方程后, 观测方程的法方程变为:

$$\begin{cases} N_{BB} \hat{X} = W \\ G^T \hat{X} - W_G = 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

根据上式可解算最终参数 \hat{X} :

$$\hat{X} = (N_{BB} + GG^T)^{-1} \cdot (W + GW_G) \quad (3.13)$$

式中, N_{BB} 为法方程系数阵, W 为常数项阵; W_G 为约束值 0, G^T 为附加设计矩阵, 其形式如下:

$$G^T = [0, \dots, 0, 1, \dots, 1, 0, \dots, 0] \quad (3.14)$$

上式附加阵中 1 对应于 GPS 卫星 DCB 参数。

当加入 GLONASS 数据后, 这里也假定其卫星的硬件延迟和为零, 作为另一个约束条件, 得:

$$\begin{cases} N_{BB} \hat{X} = W \\ G^T \hat{X} = 0 \\ R^T \hat{X} = 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\hat{X} = (N_{BB} + GG^T + RR^T)^{-1} W \quad (3.16)$$

式中, N_{BB} 为法方程系数阵, W 为常数项阵, G^T 为 GPS 附加阵, 形式如式 (3.14), R^T 为 GLONASS 附加阵, 其形式如 G^T :

$$R^T = [0, \dots, 0, 1, \dots, 1, 0, \dots, 0] \quad (3.17)$$

上式附加阵中 1 对应于 GLONASS 卫星 DCB 参数。

在解算过程中, 假定 GNSS 卫星与接收机硬件延迟较稳定, 一天解算一次, 而球谐模型系数 a_{nm} 和 b_{nm} 两小时解算一组。

3.2.2 全球 VTEC 建模流程

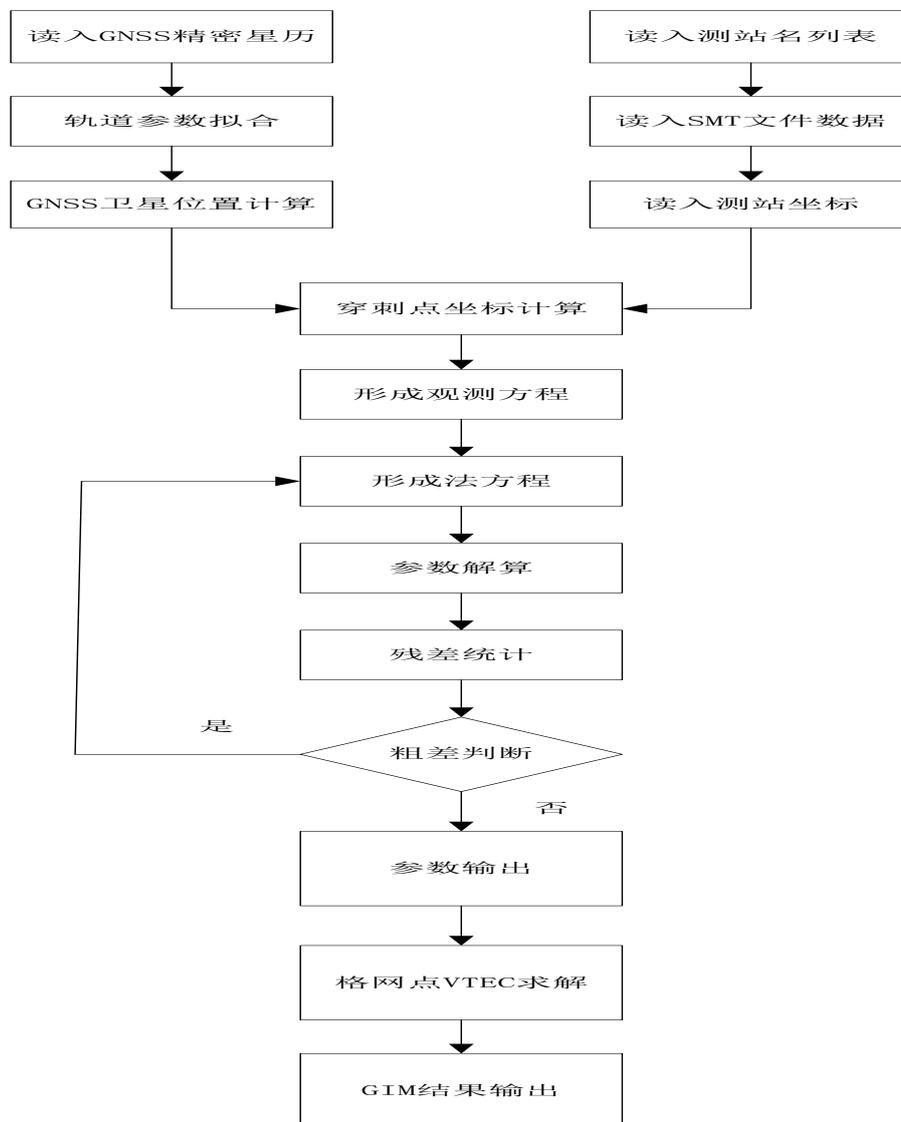


图 3.3 VTEC 建模流程图

3.2.3 GPS/GLONASS 组合解算全球 VTEC 和硬件延迟结果

目前, IGS 已在全球范围内布设 400 多个连续跟踪站, 这为本文研究全球 VTEC 提供了数据来源。本文选取 2012 年 6 月 28 日的 238 个测站进行建模, 测站分布图如图所示(图 3.4)。从图中可看出, 测站分布基本上实现了全球的覆盖, 只是海洋以及非洲北部的测站较差。

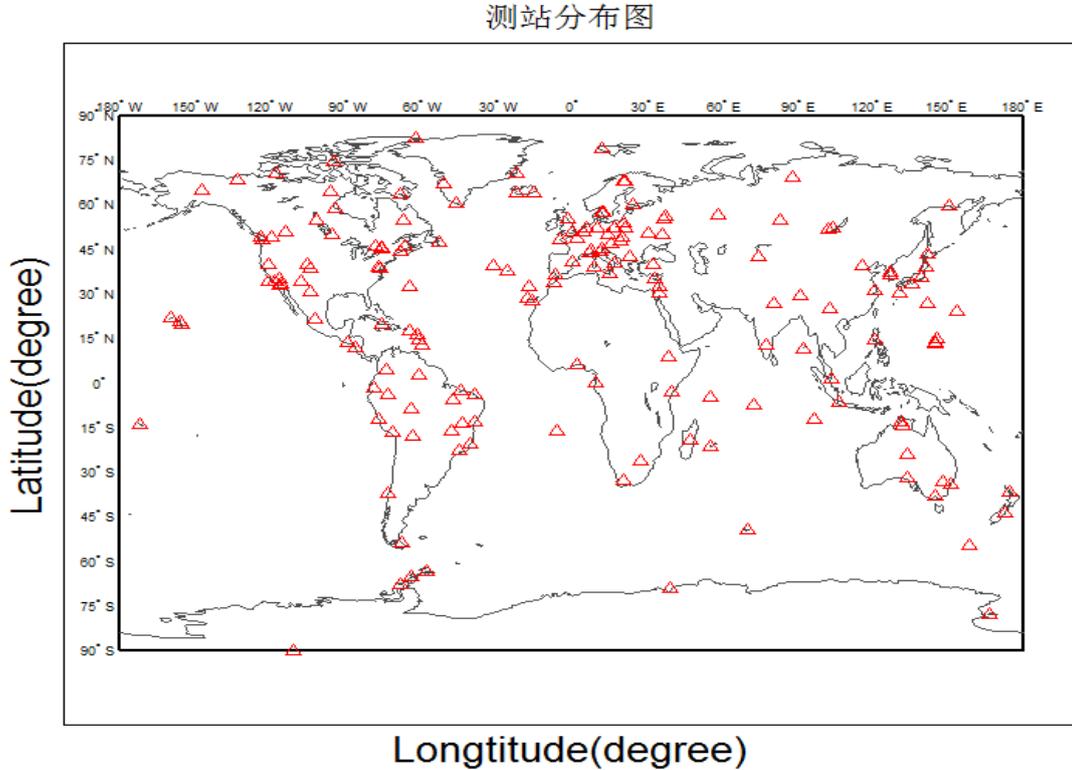


图 3.4 测站分布图

根据上述球谐模型解算得到的 DCB 值, 本文给出与 CODE 和 IGS 发布的卫星及测站 DCB 的比较值, 见图(图 3.5-图 3.10)所示。由图 3.5 可以看出本文解算得到的 GPS 卫星 DCB 与 CODE 吻合较好, 差值在 $\pm 0.2\text{ns}$ 以内, 其 RMS 为 0.05ns 。而相对于 IGS 的卫星 DCB 吻合较差, 其 RMS 为 0.19ns , 且存在一个系统偏差。分析其原因是由于在解算卫星 DCB 时, CODE 分析中心在解算时缺少 24 号卫星, 而 IGS 则利用全部 32 颗 GPS 卫星。图 3.6 是当天 CODE 与 IGS 的卫星 DCB 差值图, CODE 相对于 IGS 的卫星 DCB 的 RMS 为 0.19ns , 这正好能说明图 3.5 中存在的系统偏差。图 3.7 给出了本文解算的 GLONASS 卫星 DCB 与 CODE 和 IGS 的差值图, 而 CODE 和 IGS 发布的 GLONASS 卫星 DCB 值一样, 因此相对于两个分析中心差值都在 $\pm 0.5\text{ns}$ 以内, 其 RMS 都为 0.16ns 。图 3.8 给出了 GPS 测站 DCB 与 CODE 和 IGS 之间的差值图, 差值都在 $\pm 3\text{ns}$ 以内, 大部分都在 $\pm 1.5\text{ns}$ 以内, 其相对于 CODE 的 RMS 为 0.45ns , 相对于 IGS 的 RMS 则为 0.84ns 。图 3.9 给出的是 CODE 与 IGS 两个分析中心的 GPS 测站 DCB 差值图, 其 RMS 为

0.56ns，这同样是由于两者之间解算时卫星数不同，导致其测站 DCB 也存在一个系统偏差。图 3.10 给出的是 GLONASS 测站 DCB 与 CODE 和 IGS 之间的差值图，差值大部分也在 $\pm 2\text{ns}$ 以内，其相对 CODE 和 IGS 的 RMS 都为 0.57ns。

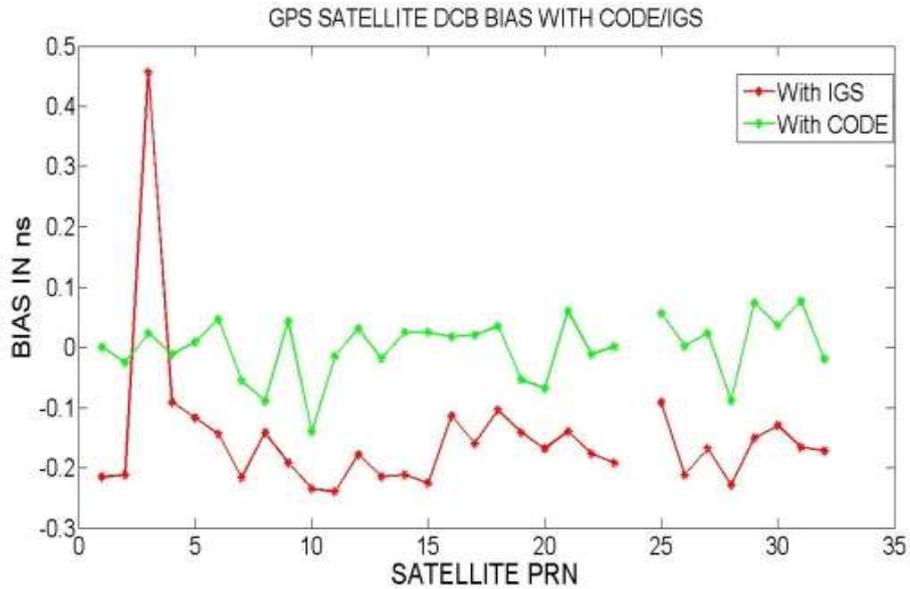


图 3.5 GPS 卫星 DCB 与 CODE/IGS 差值

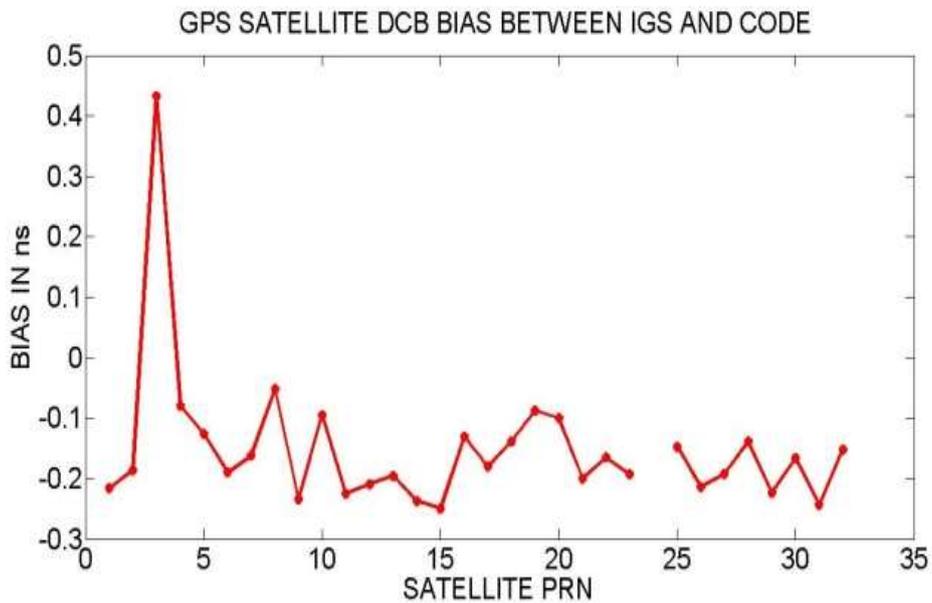


图 3.6 CODE 与 IGS GPS 卫星 DCB 差值

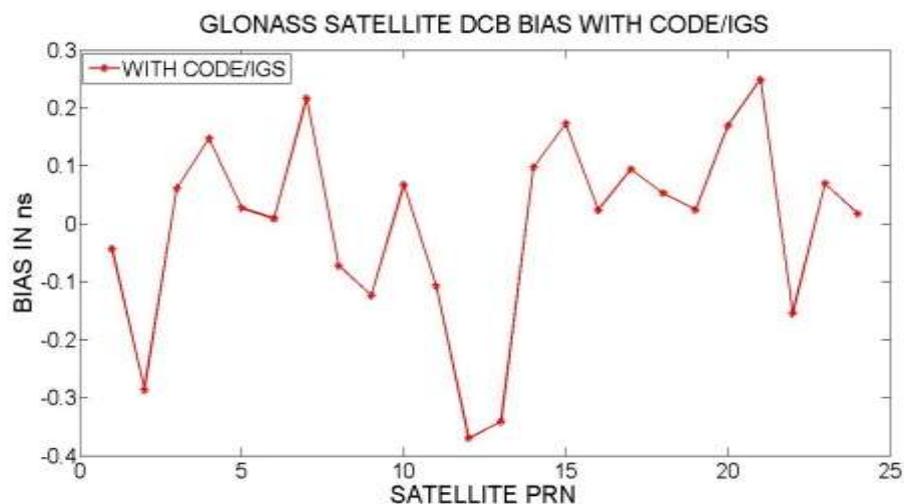


图 3.7 GLONASS 卫星 DCB 与 CODE/IGS 差值

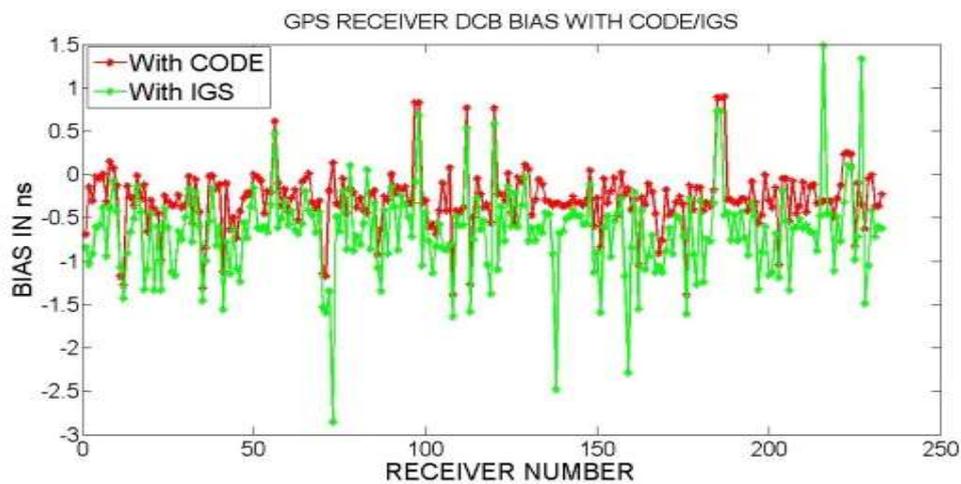


图 3.8 GPS 测站 DCB 与 CODE/IGS 差值

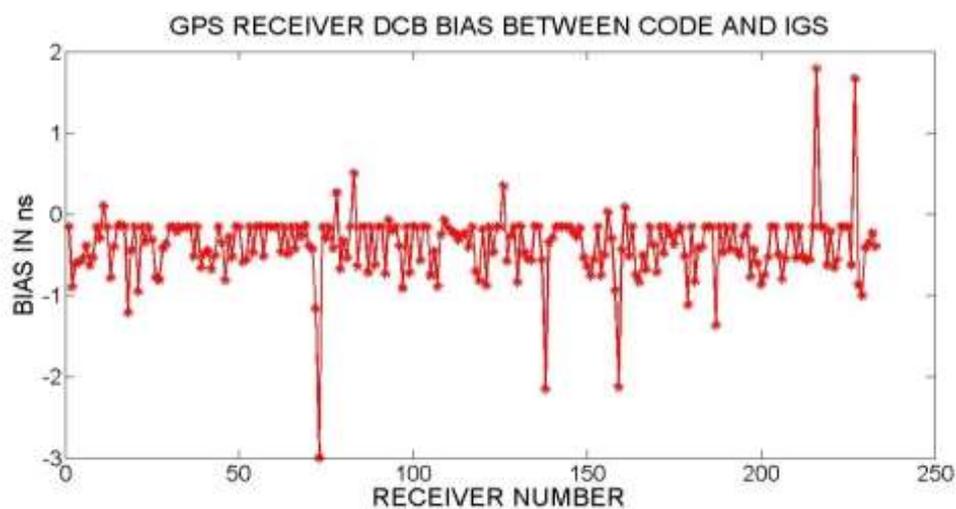


图 3.9 CODE 与 IGS GPS 测站 DCB 差值

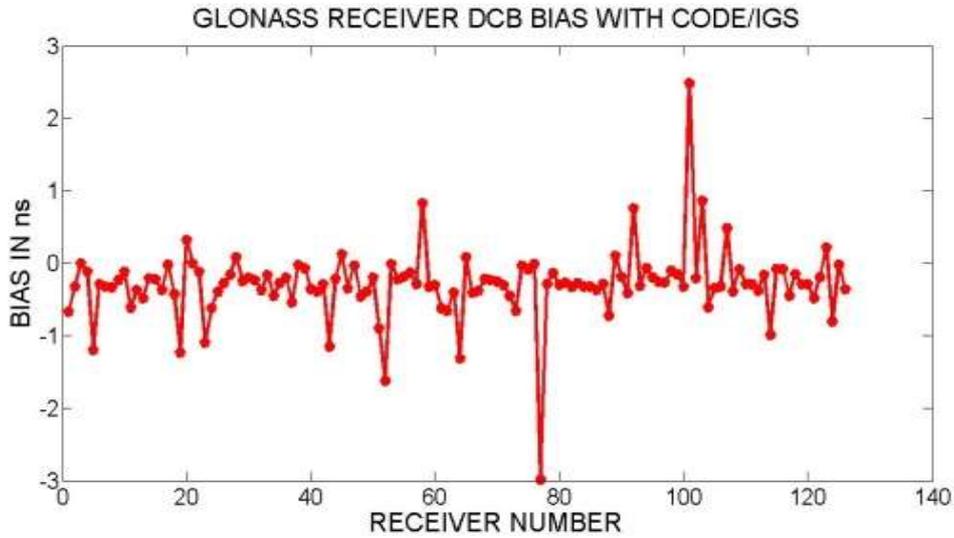
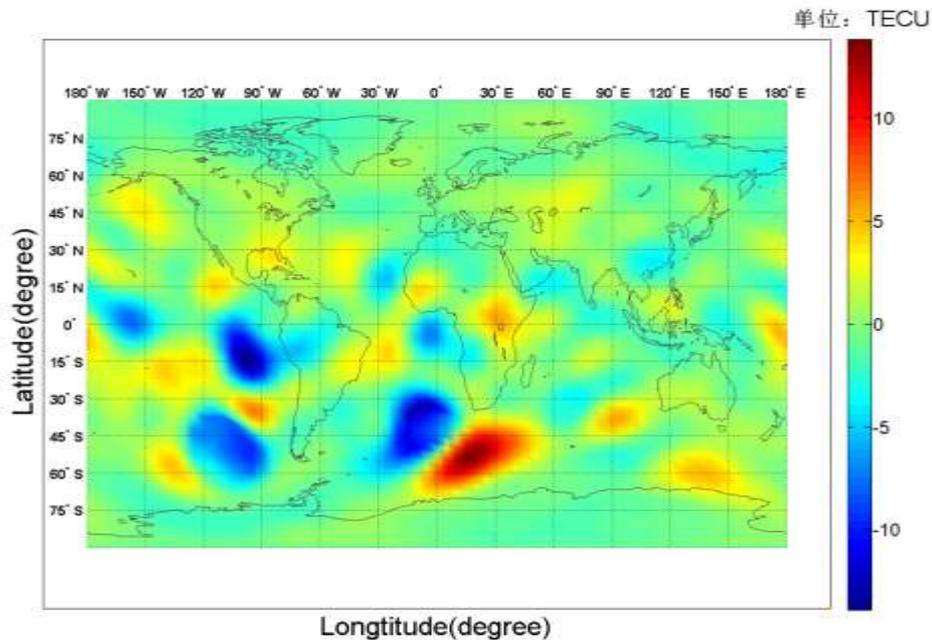
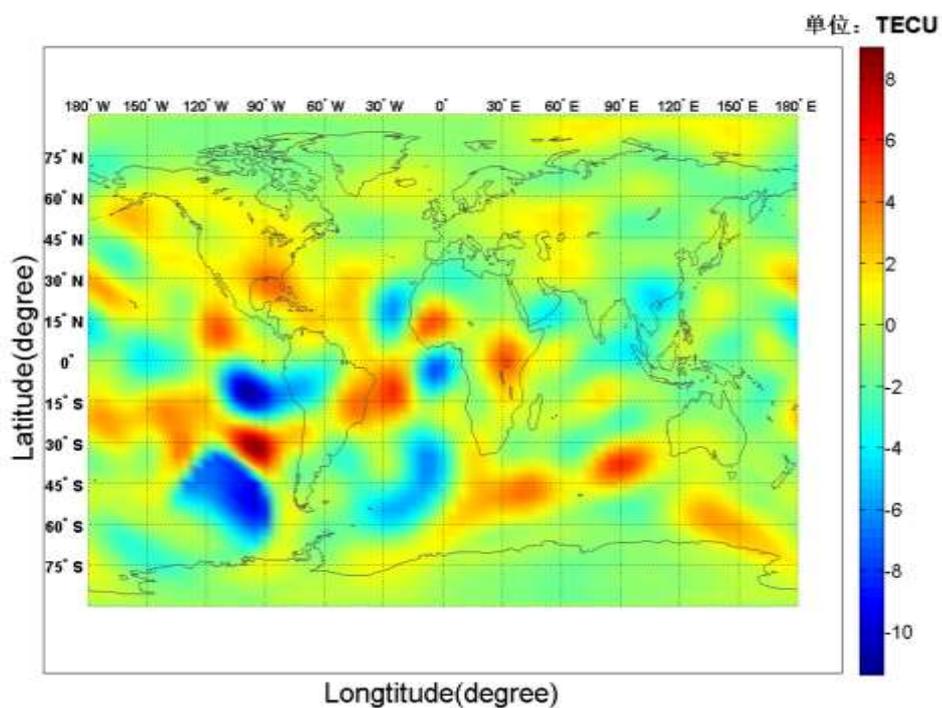


图 3.10 GLONASS 测站 DCB 与 CODE/IGS 差值

为比较方便, 本文根据模型参数生成纬度分辨率为 2.5° , 经度分辨率为 5° 的全球格网 VTEC 分布图。这里选取当天 16:00 的一幅 GIM 分别与 CODE 发布的 GIM 进行比较, 其差值图如图 3.11。图 3.11 (a) 为只利用 GPS 时得到的 GIM 与 CODE 差值图, 图 3.11 (b) 为利用 GPS/GLONASS 组合得到的 GIM 与 CODE 差值图。可以看出, 仅利用 GPS 和 GPS/GLONASS 组合时, 相对于 CODE, 其 RMS 分别为 2.5TECU 和 2.0TECU。图 3.12 给出组合解算 VTEC 与 CODE 差值的分布直方图, 可以看出, 差值基本集中在 2TECU 以内。



(a) GPS 模型 GIM 与 CODE GIM 差值



(b) 组合模型 GIM 与 CODE GIM 差值

图 3.11 球谐模型与 CODE GIM 差值

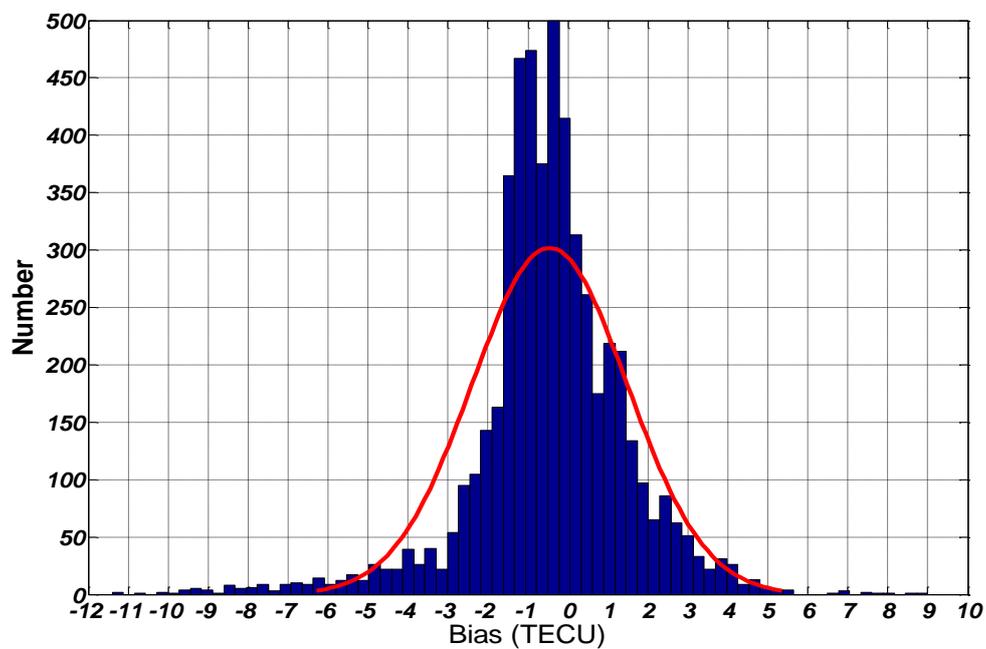


图 3.12 组合模型与 CODE GIM 差值直方图

从图 3.11 中可以看出, VTEC 模型值与 CODE 分析中心发布的情况大体一致, 在南半球海洋区域和赤道附近地区存在较大的异常。参照图 3.4 测站分布图可以看出, 这些区域基本上是没有测站或者测站较少的区域, 因此残差较大的原因是由于测站覆盖率低导致实测数据匮乏。

3.3 基于不同约束的电离层电子含量和硬件延迟分析

3.3.1 不同约束条件计算方法

GNSS 电离层电子含量会受到卫星与接收机硬件延迟的影响, 但它能与电子含量共同确定, 因此最终的电子含量精度受到硬件延迟的精度影响。卫星和接收机硬件延迟能达到数十纳秒, 能产生大约 100 TECU 的电子含量误差。因此, 硬件延迟的精确性必需加以考虑。

由上一节可知, 要独立解算卫星和接收机硬件延迟, 需引入一个约束条件, 而一般都采用所有卫星硬件延迟和为零的约束条件。本文在此基础上, 还设置了不同的约束值进行解算和分析。

- (1) 所有卫星硬件延迟和为 $\pm 100\text{m}$;
- (2) 固定 1 号卫星硬件延迟为 $\pm 100\text{m}$ 和 0。

首先对式 (3.8) 式进行变形, 可得:

$$c \cdot (\Delta b^S + \Delta b_R) = \tilde{P}_4 + \frac{40.28}{f_1^2} \cdot \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2} \right) F(Z) \cdot VTEC \quad (3.18)$$

当单站观测到 n 颗卫星时, 进行观测方程累加可得:

$$c \cdot \left(\sum_{i=1}^n \Delta b_i^S + \sum_{i=1}^n \Delta b_R^i \right) = \sum_{i=1}^n \tilde{P}_4^i + \sum_{i=1}^n \frac{40.28}{f_1^2} \cdot \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_2^2} \right) F(Z) \cdot VTEC^i \quad (3.19)$$

可见对于卫星和接收机的组合硬件延迟, 只取决于上式右端的值。因此卫星硬件延迟的和必然会影响到接收机硬件延迟, 但对于组合值是无影响。

3.3.2 不同约束条件下的法方程

对于不同的约束条件解算, 可以选择不同的附加设计矩阵来进行解算。当采用卫星硬件延迟和为 0, $\pm 100\text{m}$ 时, 其形式为:

$$G^T = [0, \dots, 0, 1, \dots, 1, 0, \dots, 0] \quad (3.20)$$

上式附加阵中 1 对应于 GPS 卫星硬件延迟参数, W_G 的值则分别为 0, $\pm 100\text{m}$; 当采用固定 1 号卫星为 0, $\pm 100\text{m}$ 时, 其形式为:

$$G^T = [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0] \quad (3.21)$$

上式附加阵中 1 对应于 GPS 1 号卫星的硬件延迟, W_G 的值则分别为 0, $\pm 100\text{m}$ 。

3.3.3 计算结果分析

本文分别采用 2012 年 6 月份全球分布的 230 余个 IGS 测站观测数据和中国区域附近 11 个 IGS 站数据。对各种约束条件进行解算, 对得到电子含量和硬件延迟组合值以及分离值与 CODE 的结果进行比较分析。

当采用全球多站数据时, 上述球谐函数模型取至 15 阶, 解算得到的卫星硬件延迟值和接收机硬件延迟与 CODE 进行比较。图 3.13 为采用全球 230 余个测站数据, 进行不同约束条件解算得到的卫星硬件延迟与 CODE 提供的卫星硬件延迟月均值的差值。图 3.14 为接收机硬件延迟的差值。从图 3.13 和图 3.14 中可看出, 不同约束条件下, 其差值整体趋势一致, 只是存在一个整体偏移。同时在同一约束条件下, 卫星硬件延迟偏移为正时, 接收机则为负方向近似等值偏移, 这正好符合其组合值固定不变。当固定 1 号星硬件延迟为某值时, 其余卫星都是基于 1 号星来解算, 因此其偏差是基于 1 号星的偏差。参考当月 CODE 提供的 1 号星的卫星硬件延迟为 -10.936ns , 因而当固定为 1 号星为 0, 100m, -100m 时, 其偏差值为分别为: 10.936ns , 344.5ns , 322.628ns 。当把卫星 DCB 和约束为某值时, 卫星硬件延迟设置为等权观测, 因此, 和会平均分配到所有观测到卫星, 即每颗卫星加上平均值, 因而在 100m 和 -100m 时其偏差值为 10.76ns 和 -10.76ns 。当扣除掉这些偏差值后, 则与 CODE 相比精度都在 0.1ns 以内。而接收机则刚好与卫星的偏差值符号相反, 同样扣除掉偏差后, 其与 CODE 相比的 RMS 在 1ns 以内。扣除偏差后与 CODE 结果比较的 RMS 可见表 3.1 第二和第三列。

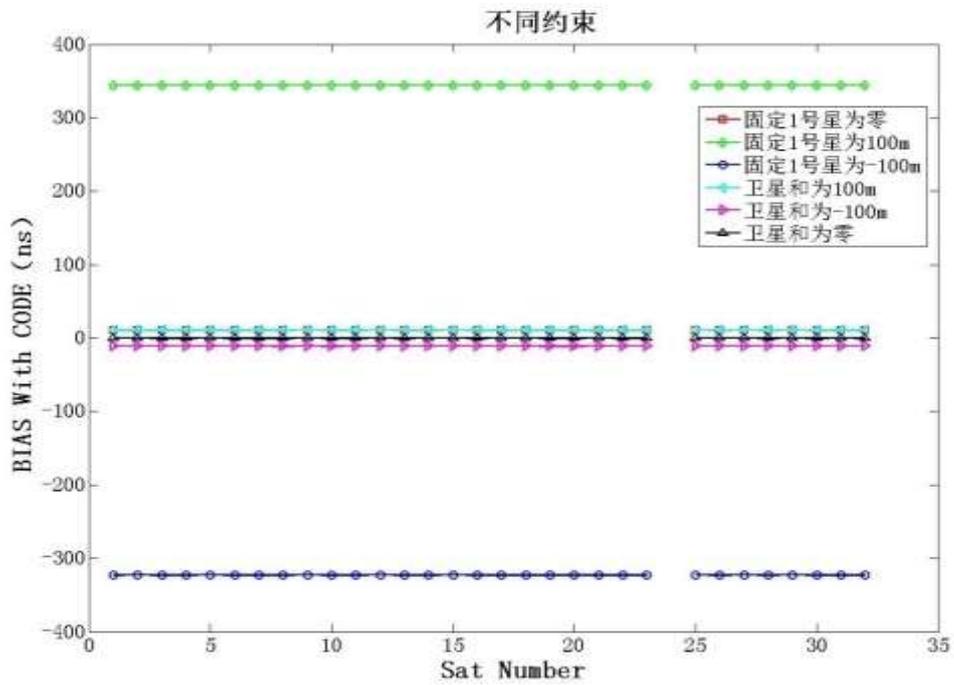


图 3.13 稠密站不同约束条件下卫星 DCB 差值

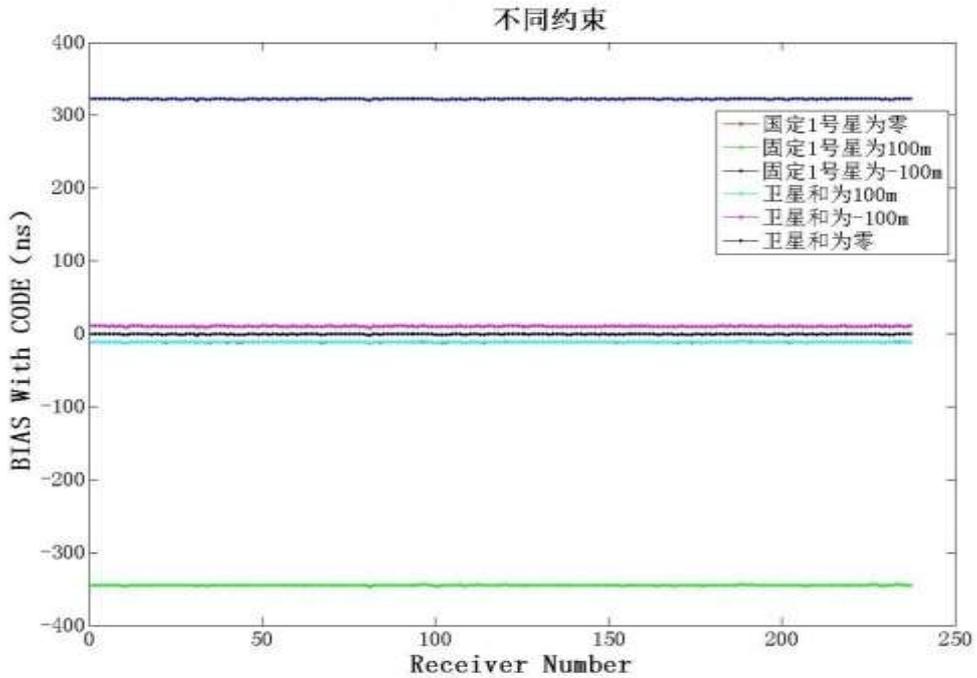
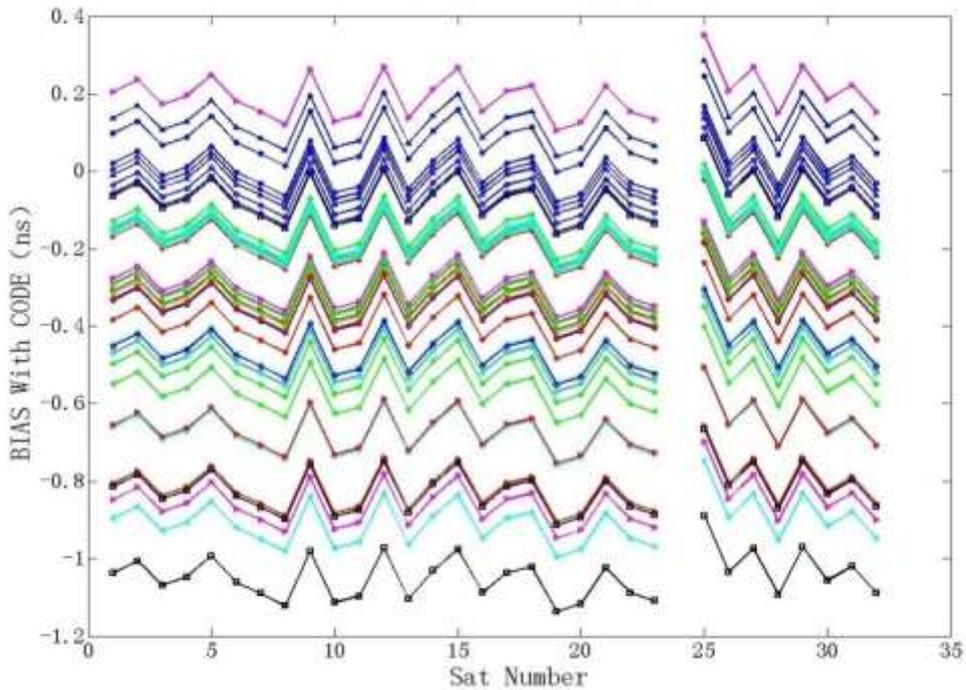


图 3.14 稠密站不同约束条件下接收机 DCB 差值

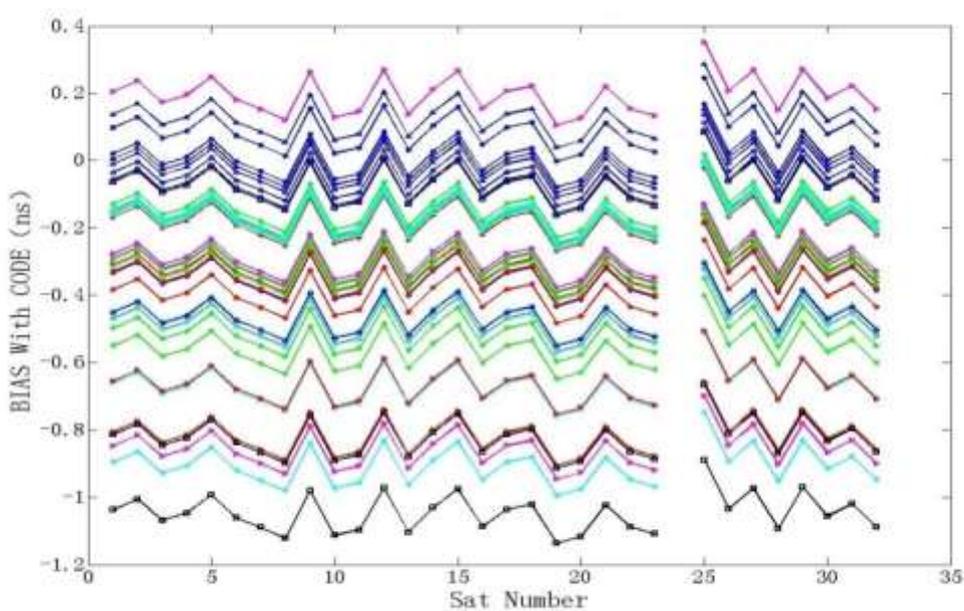
表 3.1 全球稠密站不同约束 RMS 值

不同约束条件	卫星扣除系统偏差 RMS (ns)	接收机扣除系统偏差 RMS (ns)
固定 1 号星为零	0.0576	0.5197
固定 1 号星为 100m	0.0576	0.5197
固定 1 号星为-100m	0.0576	0.5197
卫星和为 100m	0.0569	0.5261
卫星和为-100m	0.0569	0.5261
卫星和为零	0.0569	0.5261

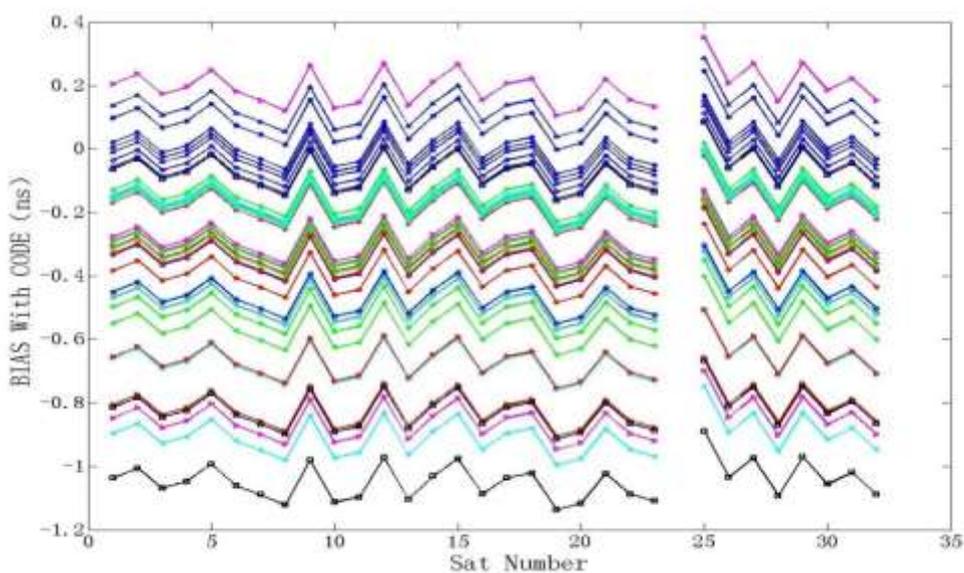
图 3.15 给出基于 3 种不同约束条件下，卫星与接收机组合的硬件延迟。图 3.15 (a) 为固定 1 号卫星 DCB 为 100m，图 3.15 (b) 为卫星 DCB 和为-100m，图 3.15 (c) 为卫星 DCB 和为 0。从 3 幅图中可看出，在不同的约束条件下，硬件延迟组合值一致。表 3.2 给出为 38 个 IGS 站上的硬件组合与 CODE 提供硬件组合差值的均值和标准偏差，可见解算得到的值较稳定可靠。



(a) 稠密站固定 1 号星为 100m 的组合 DCB 差值



(b) 稠密站卫星和为-100m 的组合 DCB 差值



(c) 稠密站卫星和为零的组合 DCB 差值

图 3.15 稠密站不同约束的组合 DCB 差值

表 3.2 不同站硬件组合偏差均值和标准偏差 STD

测站	Mean ± STD (ns)	测站	Mean ± STD (ns)
algo	-0.172 ± 0.065	mobj	-0.158 ± 0.064
amu2	-0.289 ± 0.078	nico	-0.064 ± 0.058
artu	-0.004 ± 0.057	not1	-0.465 ± 0.102

bjfs	-0.443 ± 0.099	pado	-0.380 ± 0.090
bogt	-0.830 ± 0.162	pbri	-0.492 ± 0.106
bshm	-0.043 ± 0.057	piel	-0.018 ± 0.057
cefe	-0.070 ± 0.058	pove	-0.878 ± 0.170
crar	-0.790 ± 0.155	qaq1	-0.278 ± 0.076
dhlq	-0.542 ± 0.114	rio2	-0.446 ± 0.099
fale	0.086 ± 0.059	scrz	-1.014 ± 0.194
func	-0.648 ± 0.131	sfer	-0.643 ± 0.130
gras	-0.463 ± 0.102	spt0	-0.314 ± 0.081
harb	-0.134 ± 0.062	tow2	0.011 ± 0.057
holm	-0.152 ± 0.063	ulab	-0.154 ± 0.063
invk	-0.165 ± 0.064	wsrt	-0.328 ± 0.083
kiru	-0.291 ± 0.078	wtzz	-0.293 ± 0.078
kosg	-0.332 ± 0.083	yar2	0.125 ± 0.061
mcm4	-0.798 ± 0.156	yell	-0.149 ± 0.063
mets	-0.308 ± 0.080	zeck	0.189 ± 0.067

当采用中国区域附近少站数据时，上述球谐函数模型取至 4 阶，解算得到的卫星硬件延迟和接收机硬件延迟与 CODE 进行比较。图 3.16 同样为不同约束条件解算得到的卫星硬件延迟与 CODE 提供的卫星硬件延迟月均值的差值。图 3.17 为接收机硬件延迟的差值。从图 3.16 和图 3.17 中同样可看出，在不同约束条件下，其差值整体趋势一致，只是存在一个整体偏移。同时在同一约束条件下，卫星 DCB 偏移为正时，接收机 DCB 则为负方向近似等值偏移，这正好符合其组合值固定不变。其 RMS 和扣除系统偏差后的 RMS 见表 3.3。

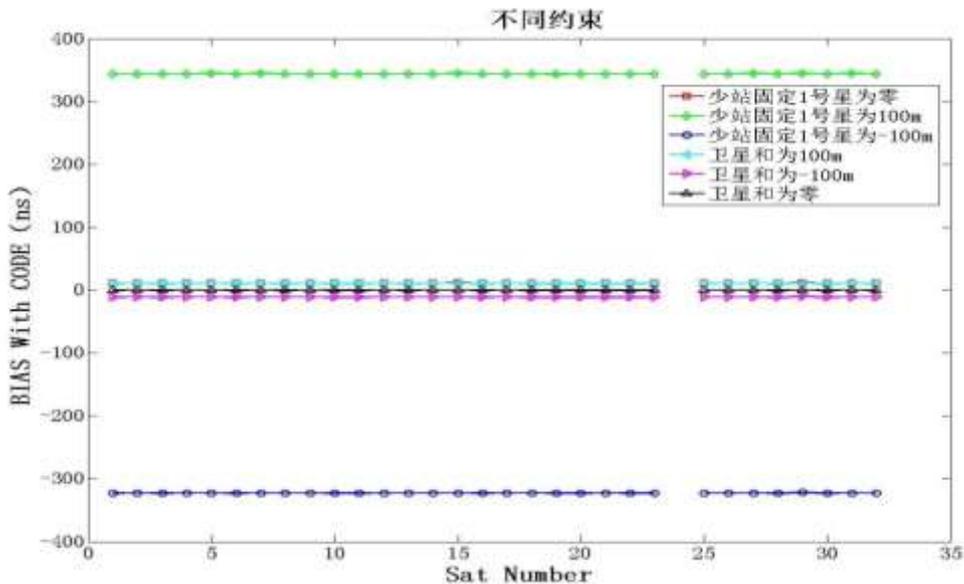


图 3.16 稀疏站不同约束条件下卫星 DCB 差值

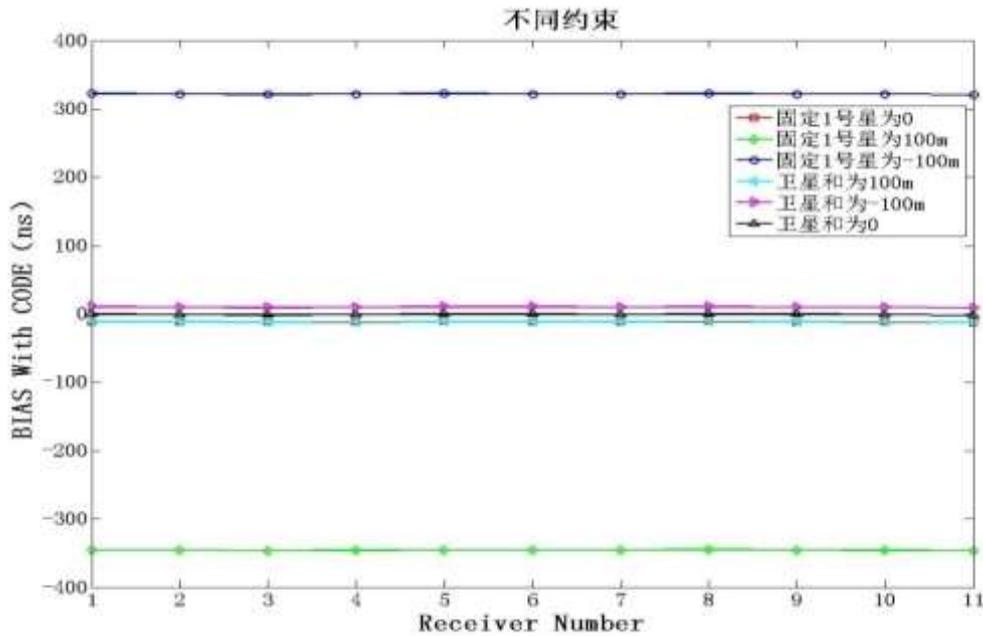
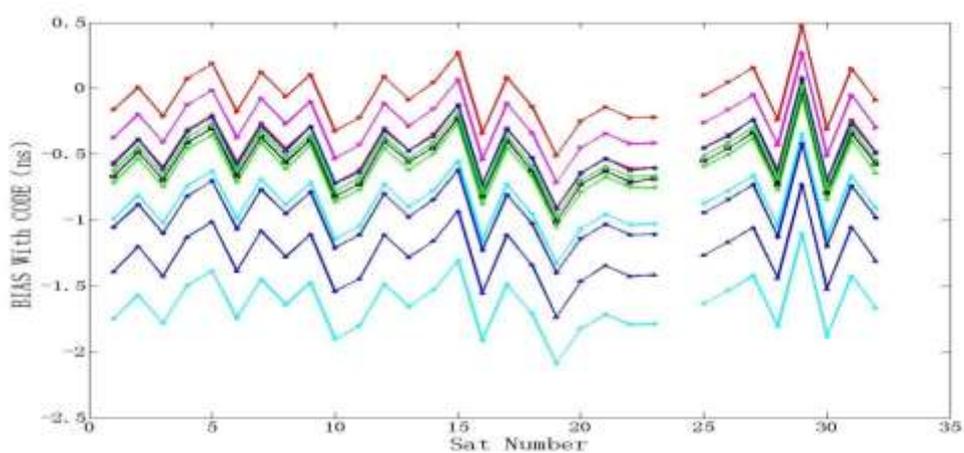


图 3.17 稀疏站不同约束条件下接收机 DCB 差值

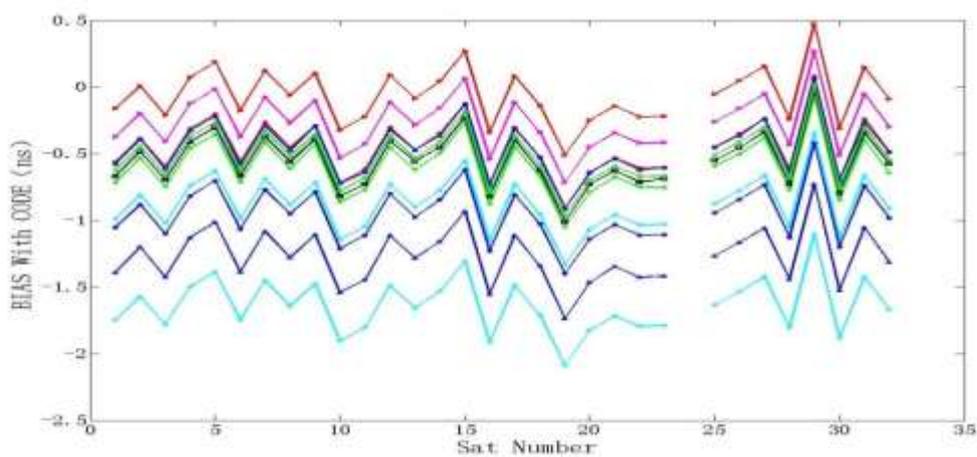
表 3.3 稀疏站不同约束 RMS 值

不同约束条件	卫星扣除系统偏差 RMS (ns)	接收机扣除系统 偏差 RMS (ns)
固定 1 号星为零	0.232	0.916
固定 1 号星为 100m	0.2322	0.916
固定 1 号星为-100m	0.232	0.916
卫星和为 100m	0.205	0.821
卫星和为-100m	0.205	0.821
卫星和为零	0.205	0.821

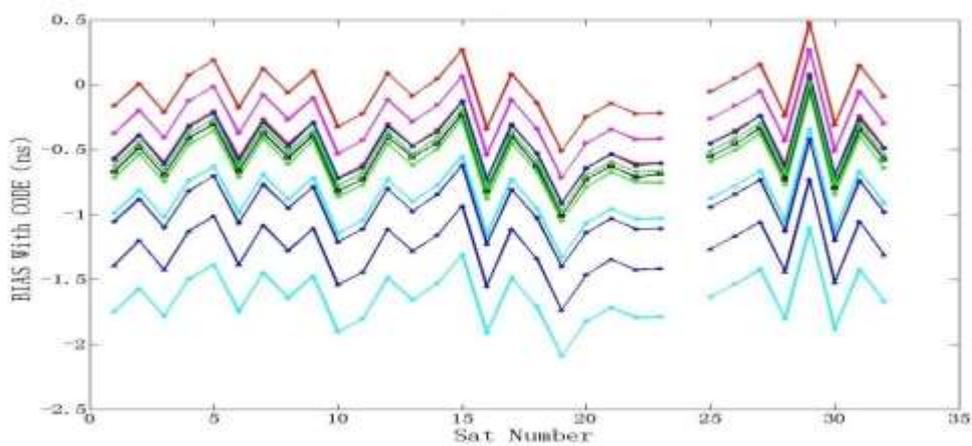
图 3.18 给出基于 3 种不同约束条件下，卫星与接收机组合的硬件延迟。图 3.18 (a) 为固定 1 号卫星 DCB 为 100m，图 3.18 (b) 为卫星 DCB 和为-100m，图 3.18 (c) 为卫星 DCB 和为 0。从 3 幅图中可看出，在不同的约束条件下，硬件延迟组合值一致。表 3.4 给出为 11 站硬件组合与 CODE 提供硬件组合差值的均值和标准偏差，可见其解算得到的值较稳定可靠。



(a) 稀疏站固定 1 号星为 100m 的组合 DCB 差值



(b) 稀疏站卫星和为-100m 的组合 DCB 差值



(c) 稀疏站卫星为零的组合 DCB 差值

图 3.18 稀疏站不同约束的组合 DCB 差值

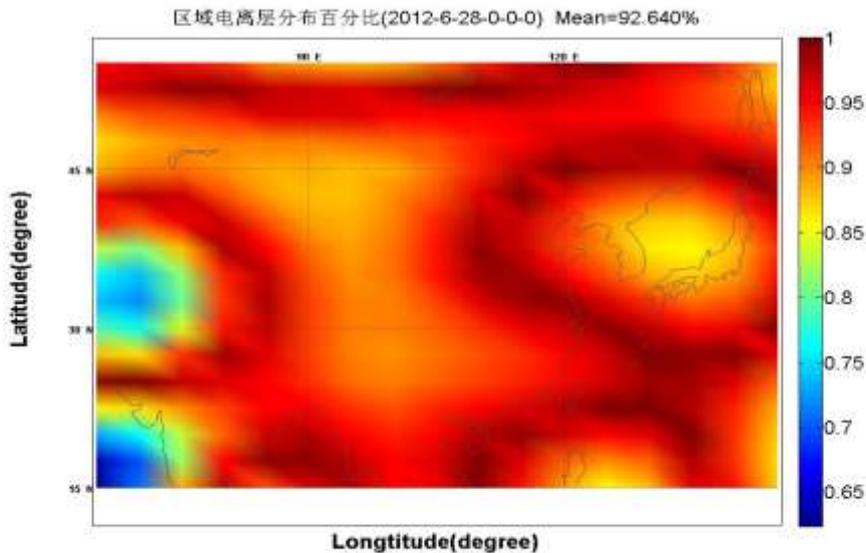
表 3.4 不同站偏差均值和标准偏差 STD

测站	Mean±STD (ns)	测站	Mean±STD (ns)
bjfs	-0.440±0.220	tskb	-0.536±0.227
iisc	-0.583±0.231	twtf	-0.061±0.206
Irkt	-1.232±0.308	usud	-0.500±0.225
pol2	-0.853±0.258	yssk	-0.923±0.266
shao	-0.258±0.211	zeck	-1.587±0.355
suwm	-0.450±0.220		

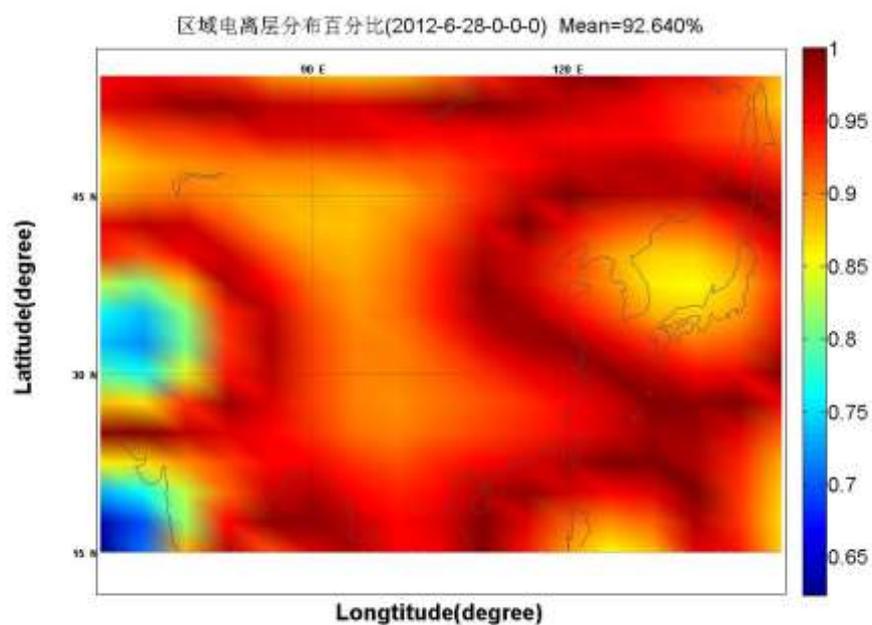
为了分析各约束条件对垂直电子含量的影响程度, 本文分析其相对于 CODE 的正确率, 公式为:

$$Cor = 1 - \frac{abs(VTEC_{cal} - VTEC_{GIM})}{VTEC_{GIM}} \quad (3.22)$$

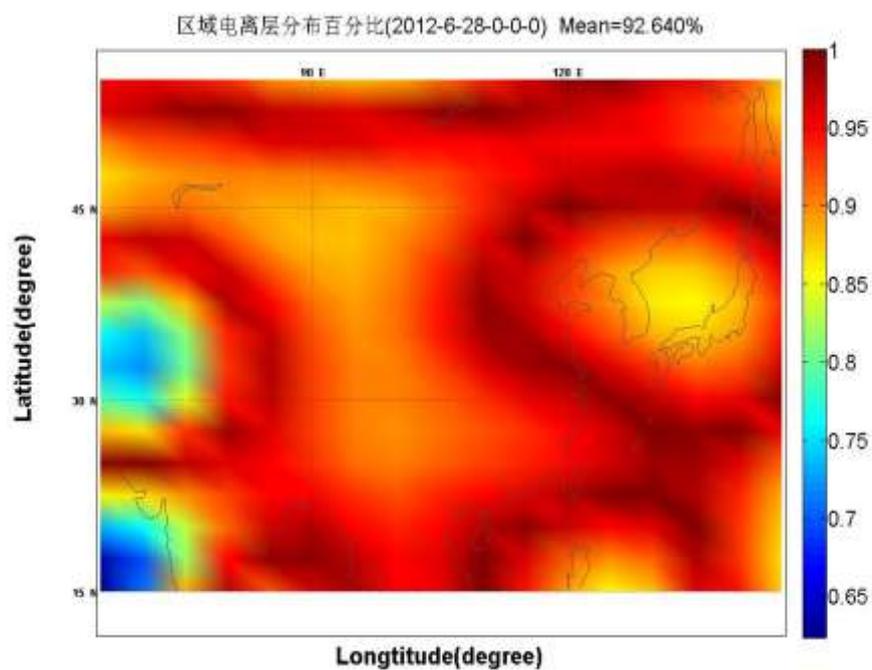
其中 $VTEC_{cal}$ 为本文模拟得到的垂直电子含量, $VTEC_{GIM}$ 为 CODE 形成的垂直电子含量。为比较方便, 图 3.19 和图 3.20 给出中国区域附件的电子含量正确率图。图 3.19 (a) -3.19 (c) 为稠密站时, 采用 3 中不同约束条件下得到的电子含量正确率图, 约束条件分别为: 固定 1 号星 DCB 为 100m, 卫星 DCB 和为 -100m, 卫星 DCB 和为 0。图 3.20 (a) -3.20 (b) 为相同 3 种约束条件下, 稀疏站得到的电子含量正确率图。从图 3.19 和图 3.20 可看出, 其在不同约束条件下, 电子含量改正率图相同, 稠密站时平均正确率可到 92.64%, 稀疏站时, 由于其可用数据量少, 较稠密站时略低, 平均正确率为 90.94%。



(a) 稠密站固定 1 号星为 100m

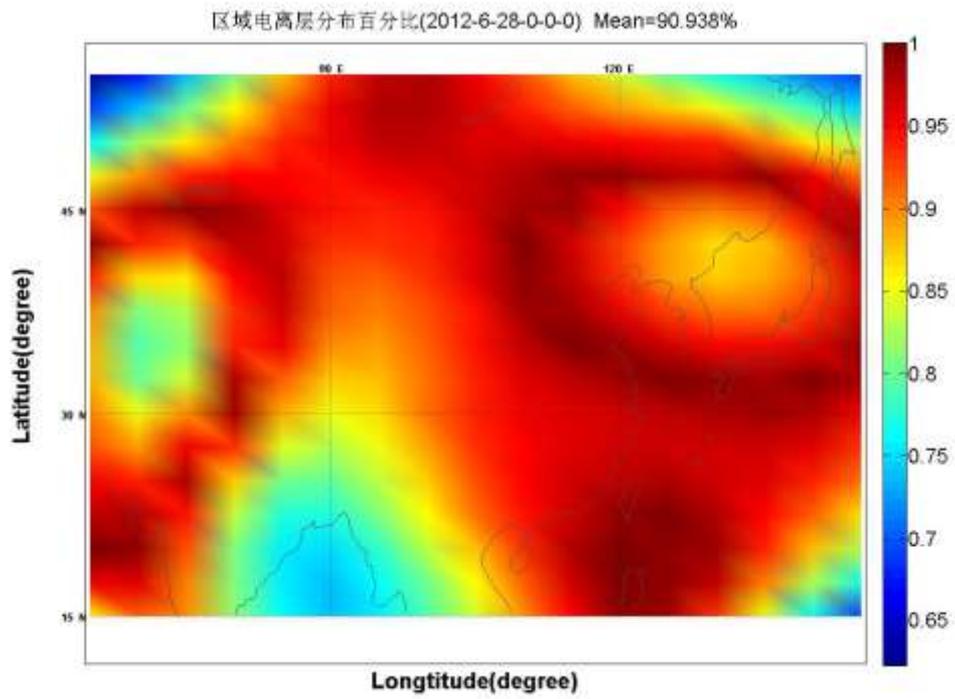


(b) 稠密站卫星和为-100m

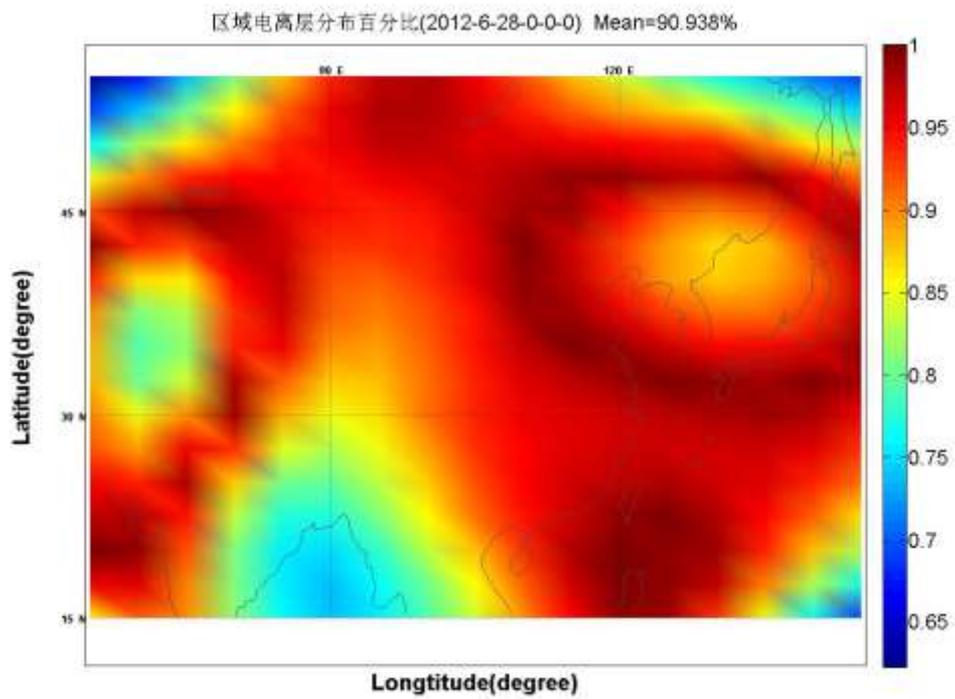


(c) 稠密站卫星和为零

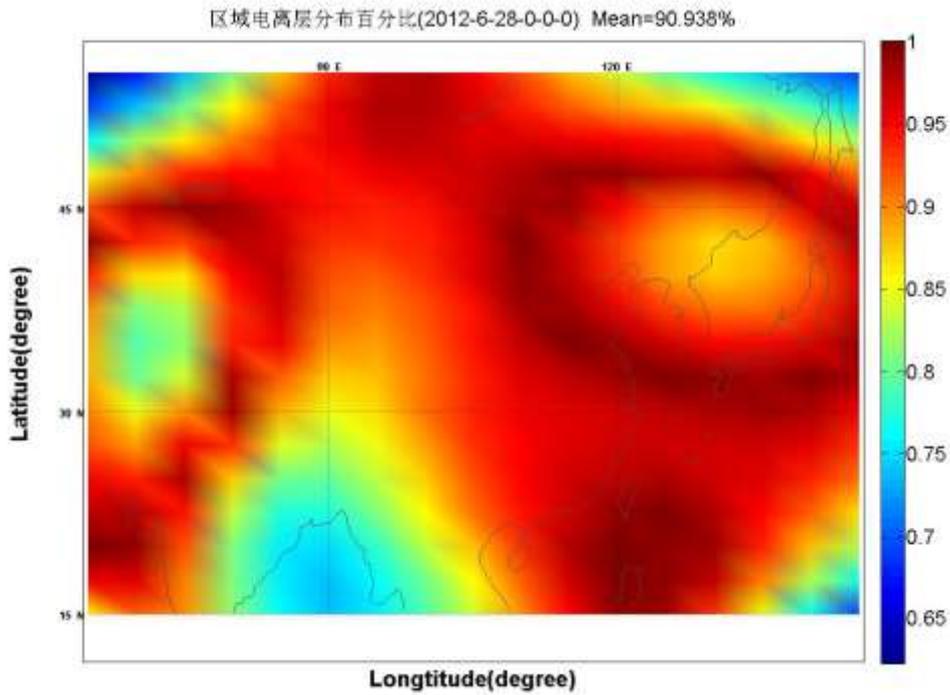
图 3.19 稠密站不同约束条件下的电子含量解的正确率



(a) 稀疏站固定1号星为100m



(b) 稀疏站卫星和为-100m



(c) 稀疏站卫星和为零

图 3.20 稀疏站不同约束条件下的电子含量解的正确率

3.4 小结

本章首先简要介绍了三种经典模型：Bent 模型、IRI 模型和 NeQuick 模型；详细介绍了 Klobuchar 模型和球谐函数模型的原理及计算方法，分析了各自的优缺点。在球谐函数模型的基础上，基于 GPS 和 GLONASS 组合观测数据，采用 15 阶展开计算全球电离层 VTEC，解算得到的结果与 CODE 和 IGS 分析中心相比基本一致，表明利用该方法建立的模型是可靠的。

在基于普遍采用所有卫星硬件延迟和为零为约束条件下，本文采用了不同的约束条件来进行解算电离层。结果表明在不同约束条件下，其卫星和接收机硬件延迟只存在整体偏移；当硬件延迟组合时，在不同约束条件下其值一致，表明其组合值不受约束条件的影响。同时，最终的电子含量也不受约束条件的影响。另外，在不同约束条件下，得到的组合硬件延迟组合值较稳定，在伪距定位时，将有利于提高导航的连续性和完好性。

第 4 章 中国区域电离层相关模型分析

4.1 中国大陆构造环境监测网简介

中国大陆构造环境监测网 CMONOC 是以 GNSS 观测技术为主,以甚长基线射电干涉测量 (VLBI) 和人卫测距 (SLR) 为辅,结合精密水准测量和重力测量构成的大范围、高精度、高时空分辨率的观测网^[62] (陈俊平, 2012)。

CMONOC 于 1999 年开始连续运作,至今观测测站数已达 250 余个,其观测数据不仅为我国地壳运动的监测和地震预报的研究作出重要贡献,同时也为我国上空的电离层变化活动监测提供了宝贵的资源。其连续测站分布图,如图 4.1。上海天文台作为陆态网的数据中心,积累了大量的观测数据,并基于这些数据实现了高精度的分析处理^[62] (陈俊平, 2012)。

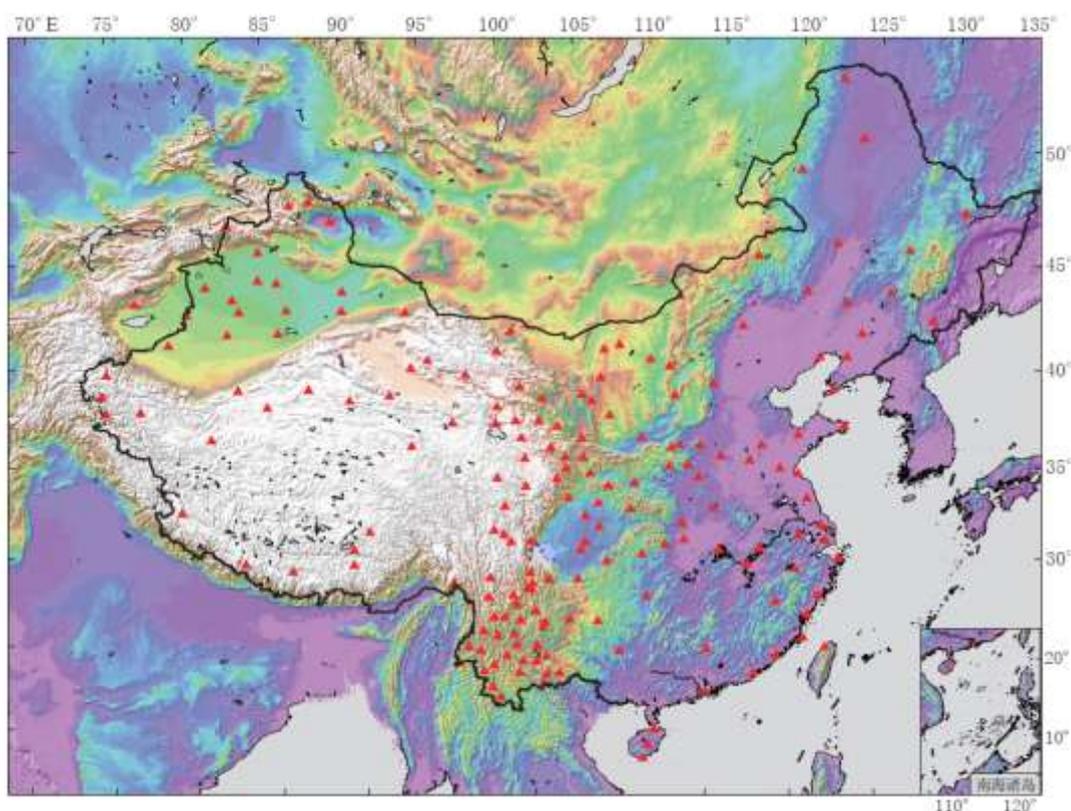


图 4.1 陆态网基准站 (红色三角形) 分布图

4.2 多项式模型介绍及结果分析

电离层多项式展开模型广泛应用于描述区域电离层电子含量，在 Bernese 软件中也有相应的模块。刘经南等已于 1999 年进行的中国区域分布式广域差分试验中采用了多项式展开模型^[63]（刘经南，1999）。此外，一些国内外作者也利用该模型解算电离层，并取得了较好的效果^[64-66]（Esther Sardon, 1997；常青，2001；章红平，2008）。该模型将 VTEC 看做是纬度差和太阳时角差的函数，具体表达式如下：

$$VTEC = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m E_{ij} (\varphi - \varphi_0)^i (S - S_0)^j \quad (4.1)$$

式中， φ_0 为测区中心点的地理纬度， S_0 为测区中心点在该时段中央时刻 t_0 的太阳时角：

$$S - S_0 = (\lambda - \lambda_0) + (t - t_0) \quad (4.2)$$

λ 为穿刺点的地理经度， t 为观测时刻。

同理，在求解多项式系数、卫星硬件延迟和接收机硬件延迟时，会出现法方程秩亏。为此，引入同样的约束条件，即卫星硬件延迟和为零。

对于多项式模型展开的阶数，在测区范围不大的情况下，可以取较低阶，如 $\varphi - \varphi_0$ 项取 1~2 阶，而 $S - S_0$ 取 2~4 阶。中国区域横跨 5 个时区，因而要采用较高阶数进行拟合。

本文采用 2013 年 3 月 31 日的 CMONOC 观测数据，以 4 小时为一个时段，将全天 24 小时分成 6 段进行建模。由于计算中国区域需要较高的展开阶数，本文对不同阶数的结果进行分析比较，见表 4.1，可知 12×13 阶展开较合适。

表 4.1 不同阶数展开计算结果(单位：TECU)

阶数	8*9	9*10	10*10	10*11	11*11	11*12	12*12	12*13	13*13	13*14
时段 1	4.096	4.116	4.027	4.022	4.039	4.027	3.924	3.949	4.021	4.122
时段 2	4.026	4.01	3.702	3.73	3.714	3.727	3.581	3.574	3.598	7.462
时段 3	7.329	7.333	6.832	6.829	6.662	6.653	6.437	6.431	6.611	7.202
时段 4	7.535	7.476	7.203	7.205	7.063	7.057	6.96	6.961	6.938	6.938
时段 5	5.377	5.189	5.071	5.503	4.929	4.935	4.847	4.838	4.989	5.008
时段 6	5.127	5.037	4.981	4.972	4.922	4.923	4.84	4.838	4.925	4.927

在选择 12×13 阶的基础上，为对解算得到的数据进行验证，利用卫星的硬件延迟与 CODE 提供的值进行比较。图 4.2 为卫星硬件延迟差值图，其精度为 0.35ns。但在解算时，本文相对于 CODE 少用了 30 号卫星，卫星硬件延迟精度存在一个系统偏差。这时 CMONOC 网解算卫星硬件延迟相对于 CODE 的偏差可以用下式计算：

$$BIAS = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (q_{CMONC}^i - q_{CODE}^i) = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^{n-1} q_{CMONC}^i - \sum_{i=1}^n q_{CODE}^i + q_{CODE}^n \right) = \frac{1}{n-1} q_{CODE}^n \quad (4.3)$$

可见，这个系统偏差是由缺失的那颗卫星硬件延迟引起的，当扣除掉这个系统偏差后，其精度为 0.28ns（相当于信号路径延迟的 9cm），因此，中国区域网解的卫星硬件延迟精度已基本能满足高精度导航定位的需要。

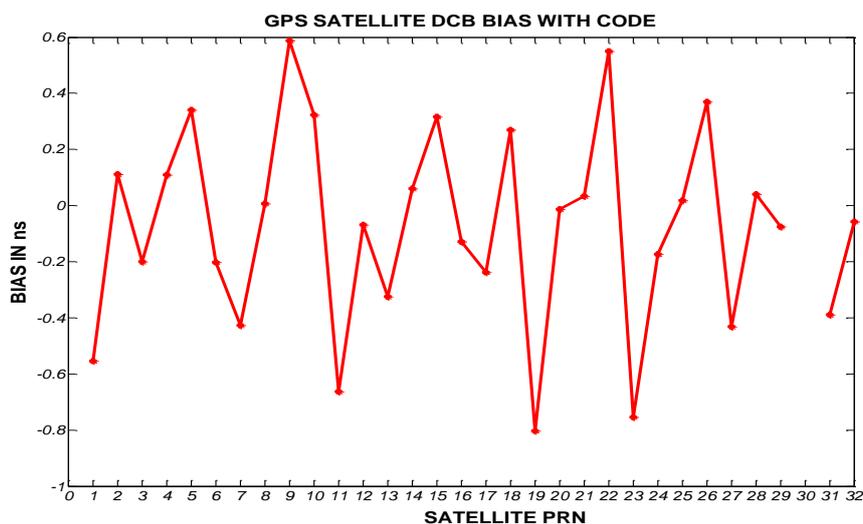


图 4.2 卫星硬件延迟差值图

在此基础上，给出中国区域及其附近的电离层电子含量图以及与 CODE 相比的差值图，如图 4.3 和 4.4 所示。另外其相对于 CODE 的正确率见图 4.5。

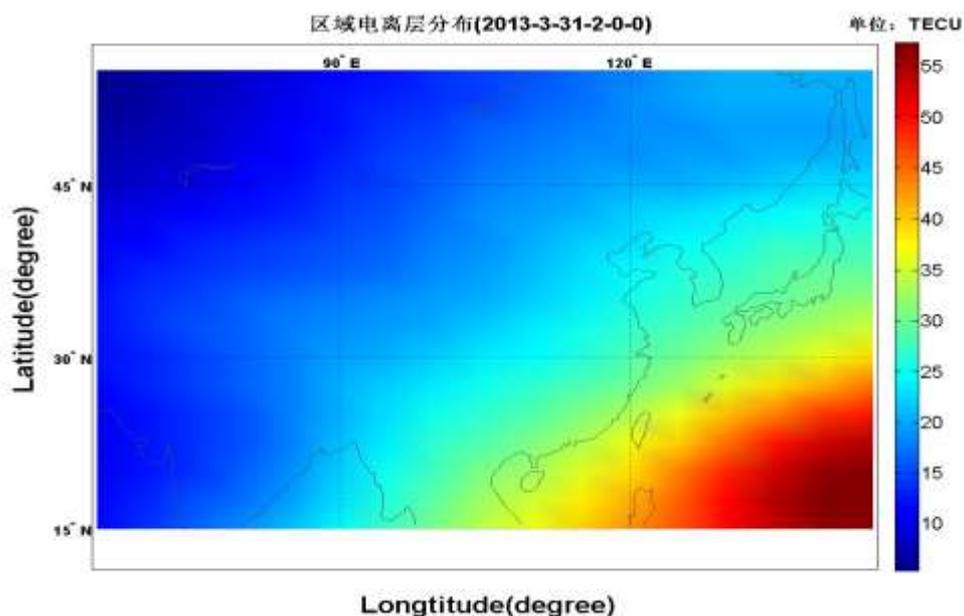


图 4.3 中国区域电子含量图

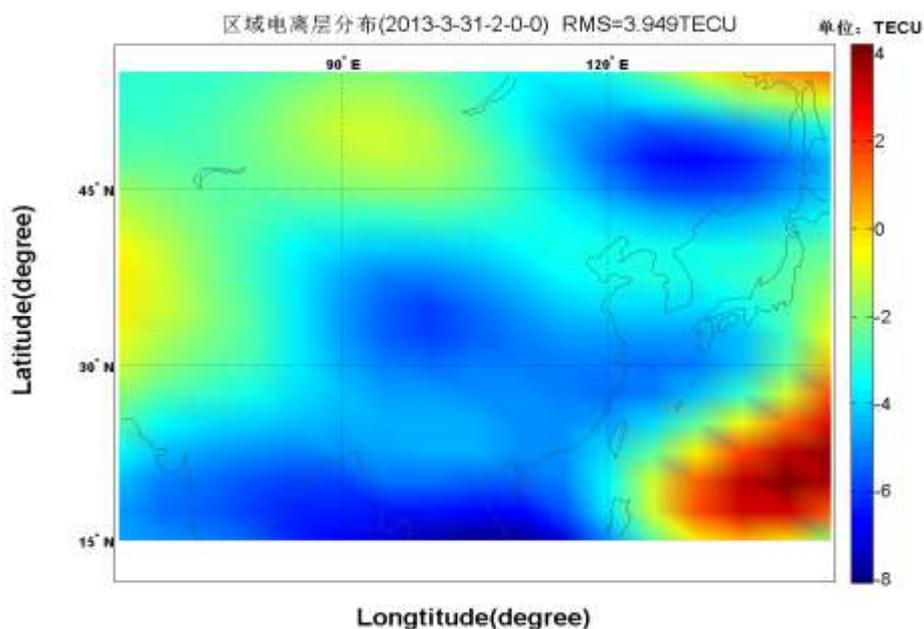


图 4.4 中国区域电离层电子含量差值图

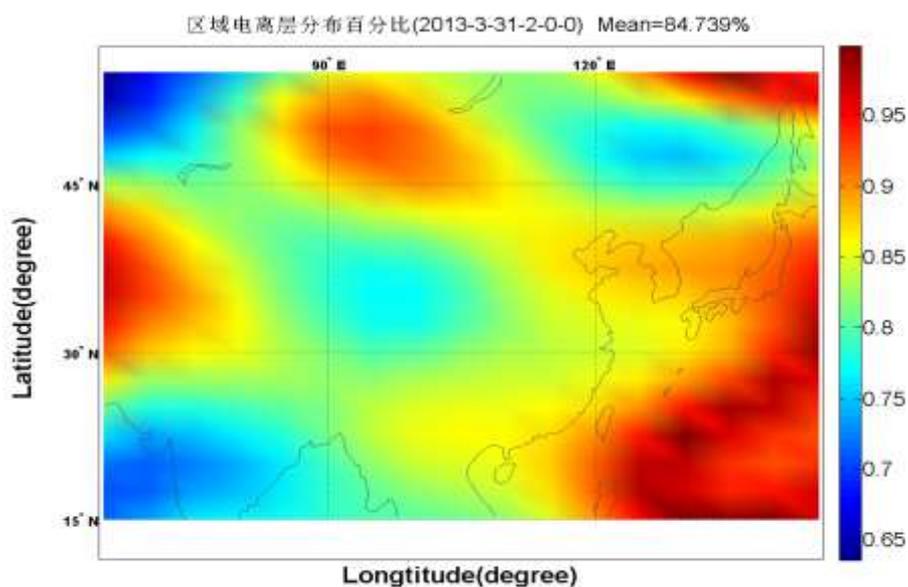


图 4.5 中国区域电子含量改正率

由于 CODE 在解算时，中国区域利用的测站较少，因而会存在较明显的系统偏差。从图 4.4 可见，系统偏差在 2-4 个 TECU 左右，计算其平均差值为 -3.3TECU。当扣除偏差后，其精度由 3.9TECU 提高到 2.1TECU，如图 4.6 所示。从图中也可看出，出现较大偏差的地方为海洋区域以及中国边境区域，以及中国境内西藏、四川和青海交界处，究其原因是由于这些区域测站分布较少，可参照

图 4.1。图 4.7 给出了扣除偏差后的电子含量差值分布直方图，其差值大多在 2TECU 以内，说明采用多项式模型来进行电离层区域建模是可靠的。

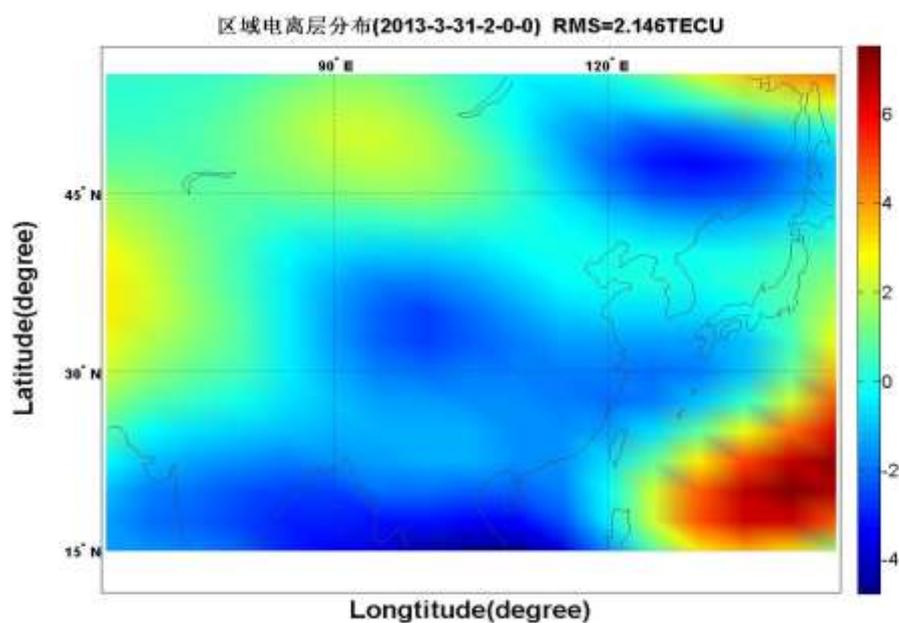


图 4.6 扣除系统偏差后电子含量差值图

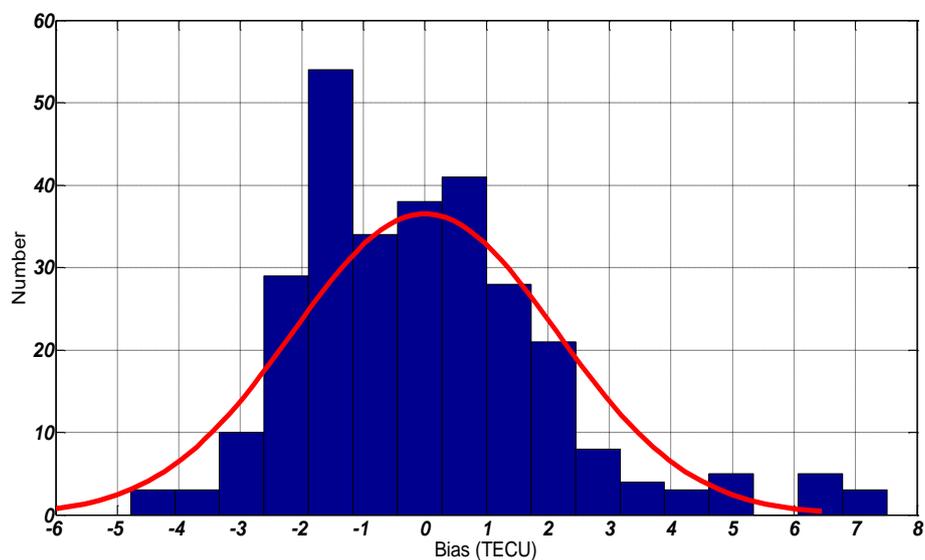


图 4.7 扣除系统偏差后差值直方图

4.3 格网电离层延迟模型介绍及结果分析

广域差分是主控站将卫星星历误差、卫星钟差和电离层误差等发布给用户，供用户使用的技术。为了尽可能消除电离层延迟的影响，提高导航性能，广域增强系统普遍采用网格校正法，向单频用户提供实时、精确的电离层修正值^[67]（詹先龙，2012）。

目前现有的电离层建模方法，一般是采用整体拟合大范围 GNSS 观测资料，确定电离层模型参数，但其忽略了电离层的局部特性，限制了建模精度，不利于分析建模方法对模型求解精度的影响^[68]（袁运斌，2002）。考虑到在我国建立类似于 WAAS 系统的差分系统，建立高精度的格网模型显得越来越重要。

电离层格网模型是一种把复杂的电离层描述为距离地面 350km 的一个薄层，并将其作为电离层参考面。在这个参考面上，经纬度线按 5° 或更密的间隔把参考面分割成一个个网格。各基准站根据 GNSS 观测资料，实时分离电离层延迟、卫星和接收机硬件延迟，精确提取穿刺点处的电离层延迟，并发给主控站。主控站综合各基准站的信息，计算出电离层参考面上每个格网点的 VTEC，从而建立格网电离层模型。同时，主控站以一定格式将电离层信息播发给用户，用户则根据相应算法获得电离层延迟量。

一般情况下，每一个格网点的垂直电离层延迟可以根据其四周的 4 个区域的穿刺点垂直延迟数据计算产生，通常采用距离加权最小二乘法将穿刺点处的电离层垂直延迟归算到格网点的垂直电离层延迟，如图 4.8 所示。

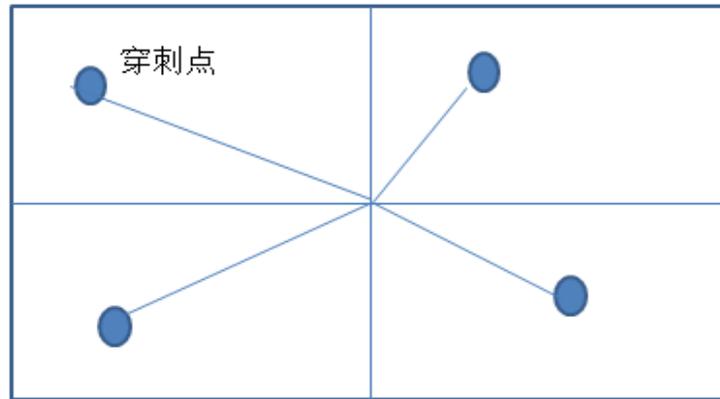


图 4.8 格网模型示意图

格网点处的垂直电离层延迟的距离加权最小二乘式为：

$$I_{GP} = \sum_{j=1}^n I_{IPP_j} P_j / \sum_{j=1}^n P_j \quad (4.4)$$

式中, I_{GP} 为格网点的垂直电离层延迟, I_{IPP_j} 为穿刺点处的垂直电离层延迟, P_j 则为相应的权。

权一般可以取穿刺点到格网点的球面距离的倒数, 即 $P = 1/d$ 。但这个定权方法是针对于地磁中纬的, 在我国的 GNSS 应用中还需进一步完善和修改。本文中采用根据美国国家卫星测试基地的实验数据和我国电离层的实际情况得到的经验曲线进行定权^[69] (孙桦, 2001):

$$P = 0.3 + 0.7 \times e^{-0.4d/D} \quad (4.5)$$

式中, d 为穿刺点与格网点距离, D 为网格间隔距离。

然而, 利用格网进行建模时, 往往存在没有观测值覆盖的格网, 即使延长观测时间, 也无法完全解决空格网的问题。这是因为地面 GNSS 观测网的几何构建和 GNSS 卫星在测区上空的不均匀分布很难提供均匀覆盖所有格网观测值, 致使某些格网没有观测值穿过。假设电离层电子含量在同一观测时段内分布是平稳的, 根据距离越近相关性越强的原则, 可以增加水平约束条件。从而将空格网与同一时段内其他格网建立关系, 将有观测信息的格网传递到空格网。通常水平约束采用高斯加权函数, 约束方程为:

$$HX = 0 \quad (4.6)$$

式中, H 为格网权重, 其元素的具体形式可以表示为:

$$h_{i,j,k}^{i_1,j_1,k} = \begin{cases} 1, & \text{when } i = i_1, j = j_1 \\ \frac{\exp\left(-\frac{d_{i_1,j_1,k}^2}{2\sigma^2}\right)}{\sum_{i_1=1}^n \sum_{j_1=1}^m \exp\left(-\frac{d_{i_1,j_1,k}^2}{2\sigma^2}\right)}, & \text{others} \end{cases} \quad (4.7)$$

式中 i, j, k 表示所计算的格网位置, i_1, j_1, k 表示其他格网位置, $d_{i_1,j_1,k}$ 表示其他格网到所计算格网的距离, σ 为平滑因子, 可根据平稳假设范围确定。

本文选取 2012 年 6 月 28 日的 CMONOC 观测数据, 以 30 秒为采样间隔, 形成中国区域上空的电离层参考面, 并与 CODE 进行比较分析。如图 4.9 和 4.10 所示。从图 4.9 中可以看出, 右下角的差值明显较大, 参照 CMONOC 测站分布图可知, 离这一区域最近的测站匮乏, 即使加入水平约束, 也出现较大的差别; 而在中国区域则吻合较好。另外从图 4.9 可看出格网模型与 GIM 存在 2-4 个系统偏差, 计算期偏差值为 -2 个 TECU; 另外由于格网模型不像多项式等模型可以根据系数来拟合中国边境以外的相邻区域, 因而格网范围较多项式小, 这也导致这个系统偏差值比多项式计算的小。当扣除系统偏差后, 其相对于 GIM 的精度为

2.5TECU。图 4.11 给出扣除偏差后的电子含量差值分布直方图，可见其主要分布在 2TECU 内，此模型也可有效地建立区域电离层模型。

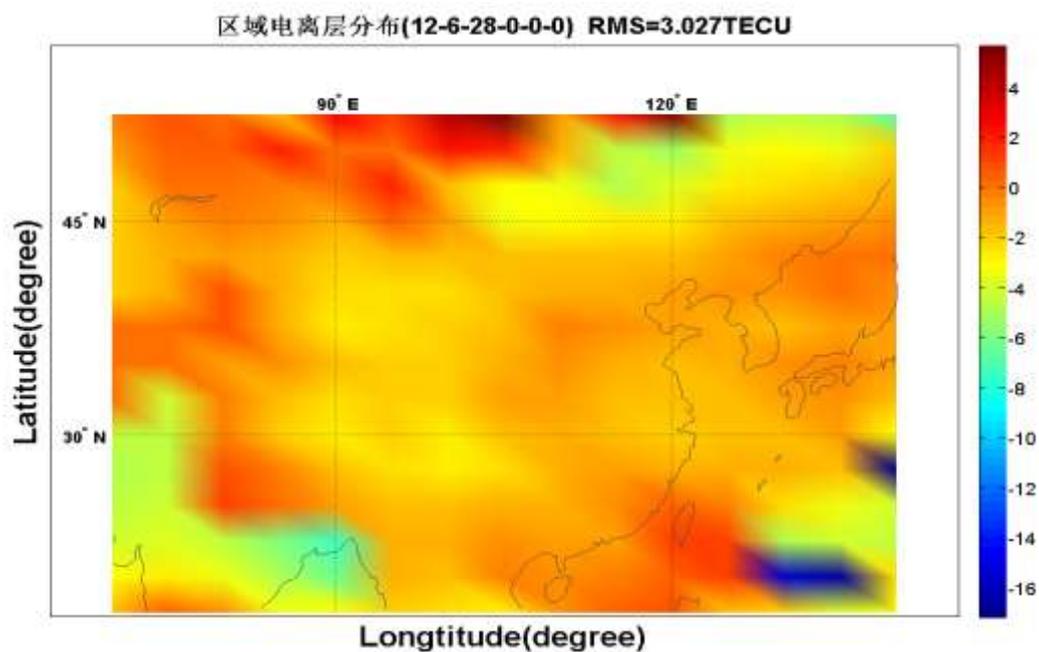


图 4.9 中国区域电子含量差值图

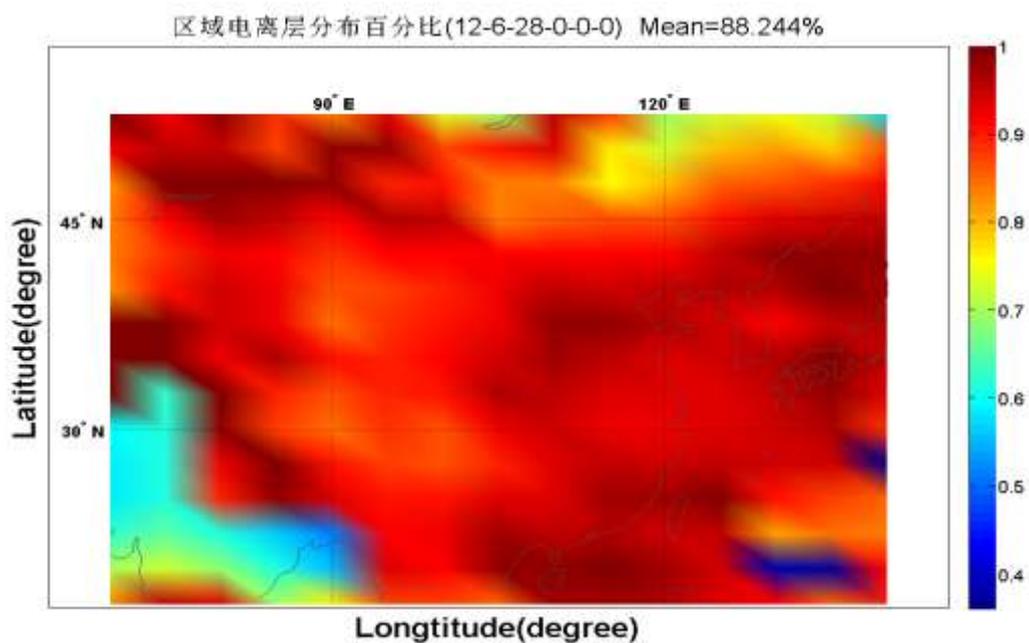


图 4.10 中国区域电子含量改正率图

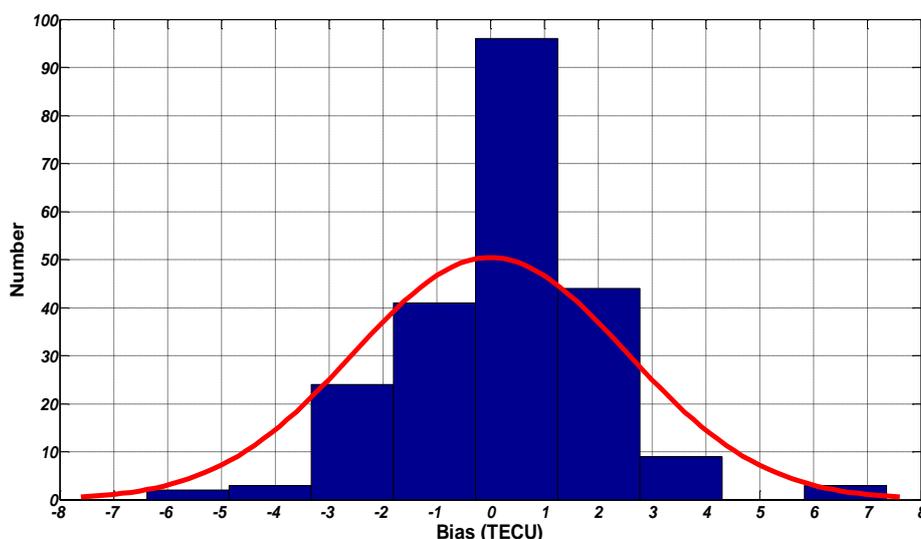


图 4.11 中国区域电子含量差值直方图

4.4 中国区域球谐函数模型结果分析

如第 3 章所述,可以利用球谐函数模型来模拟全球或区域电离层延迟的时空分布及其变化。因此,本节利用低阶球谐函数模型来建立中国区域的电离层模型。球谐函数模型的原理及计算方法已在第 3 章详细叙述,在此不再赘述。但在中国区域建模时,球谐函数模型阶次的选择需要考虑。目前普遍认为,中国区域建模时,取至 4×4 阶展开较为合适。解算时也将全天分为 12 时段,模型系数 2 小时计算一次,而卫星和接收机硬件延迟则为一天解算一次。

选取日固地磁系作为参考系,则电离层穿刺点在太阳-地磁坐标系中的坐标计算公式为:

$$\lambda' = (GHA + \lambda_{IPP}) = 15.0 \times (UT - 12) + \lambda_{IPP} \quad (4.8)$$

$$\varphi_m = \sin^{-1}(\sin \varphi_M \sin \varphi_{IPP} + \cos \varphi_M \cos \varphi_{IPP} \cos(\lambda_{IPP} - \lambda_M)) \quad (4.9)$$

式中, GHA 为任意观测时刻 t 的格林尼治时角, φ_M 和 λ_M 为地球磁北极在地理坐标系中的坐标,它随时间变化而变化的。

本文选取 2013 年 3 月 31 日的 CMONOC 数据,建立中国区域低阶球谐函数模型。同样的,为了验证解算是否正确,对解算得到的卫星硬件延迟与 CODE 进行比较,如图 4.12;同时对接收机硬件延迟与多项式解算得到的进行分析比较,如图 4.13。由图 4.12 可知,卫星硬件延迟与 CODE 相比,差值均在 1ns 以内,其精度为 0.33ns,与多项式解算得到精度基本一致;由图 4.12 可知,低阶球谐

模型与多项式模型解算得到的接收机硬件延迟总体差值在 1ns 以内，两者的相对精度为 0.63ns。

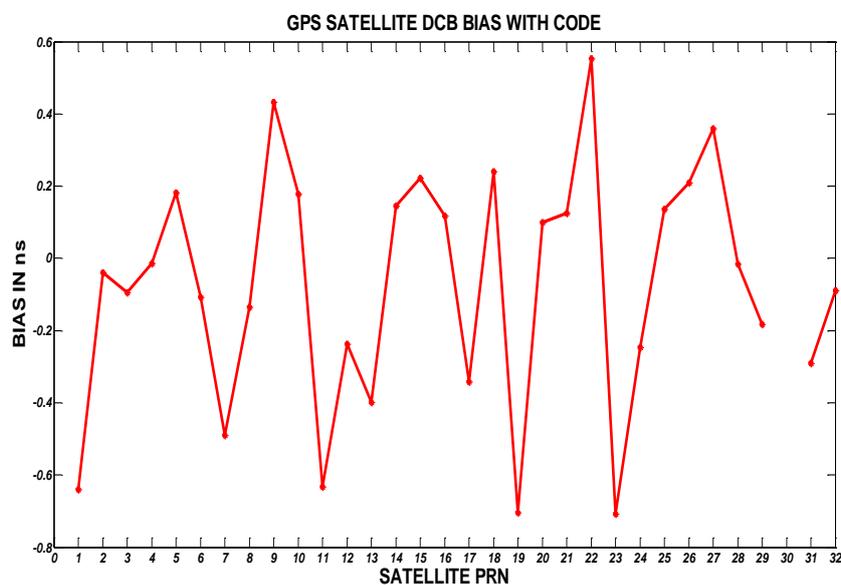


图 4.12 卫星硬件延迟差值图

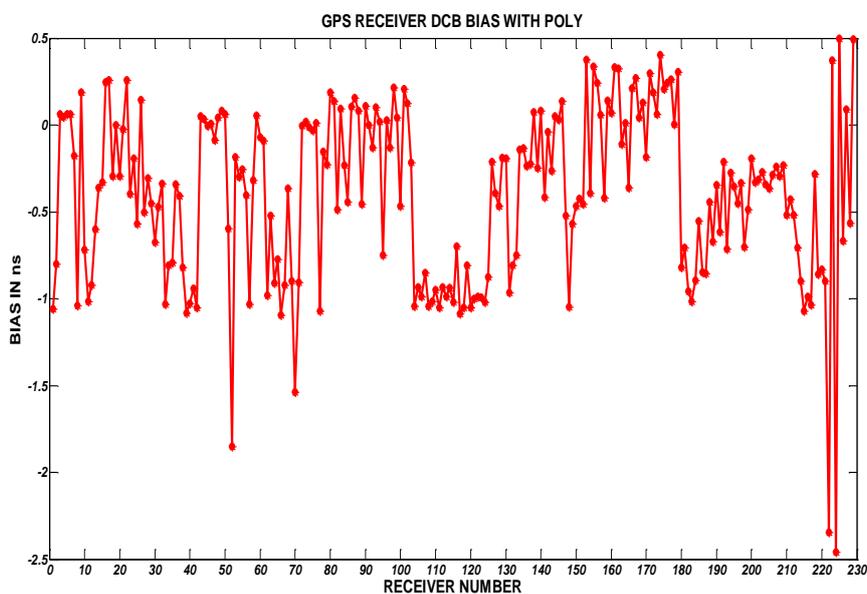


图 4.13 接收机硬件延迟差值图

根据低阶模型系数，拟合生成中国区域电离层格网，并与 CODE 进行比较，如图 4.14。

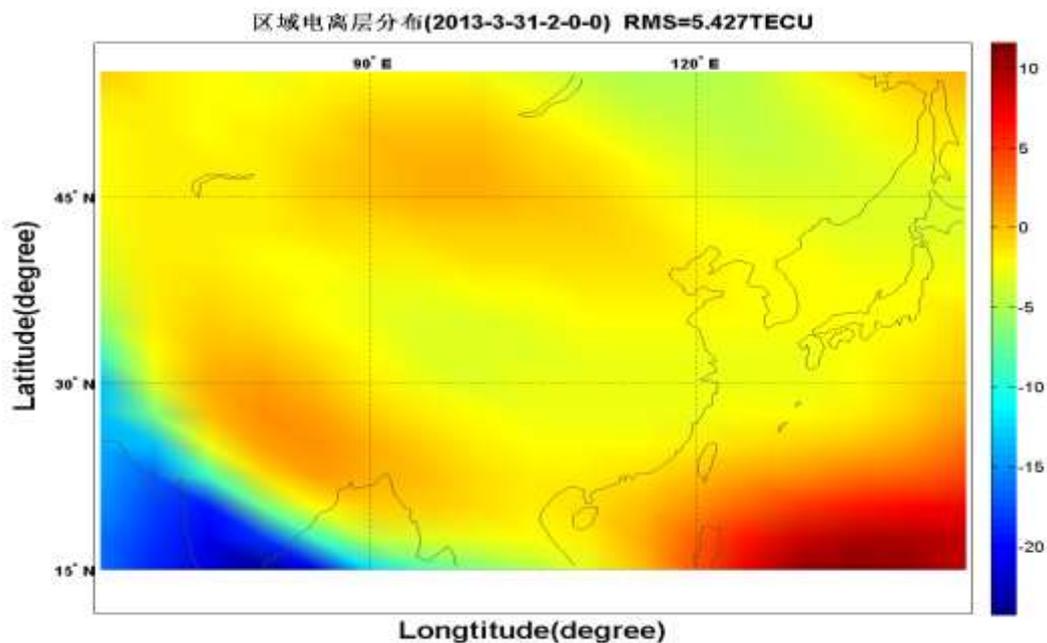


图 4.14 中国区域电子含量差值图

从上图中可以看出，左右下角出现较大的差值，这是因为在解算时测站分布匮乏，导致在该区域拟合效果较差。为了提高中国区域边境及附件区域的精度，引入周边 IGS 测站，与 CMONOC 网联合解算，结果如图 4.15 和 4.16 所示。

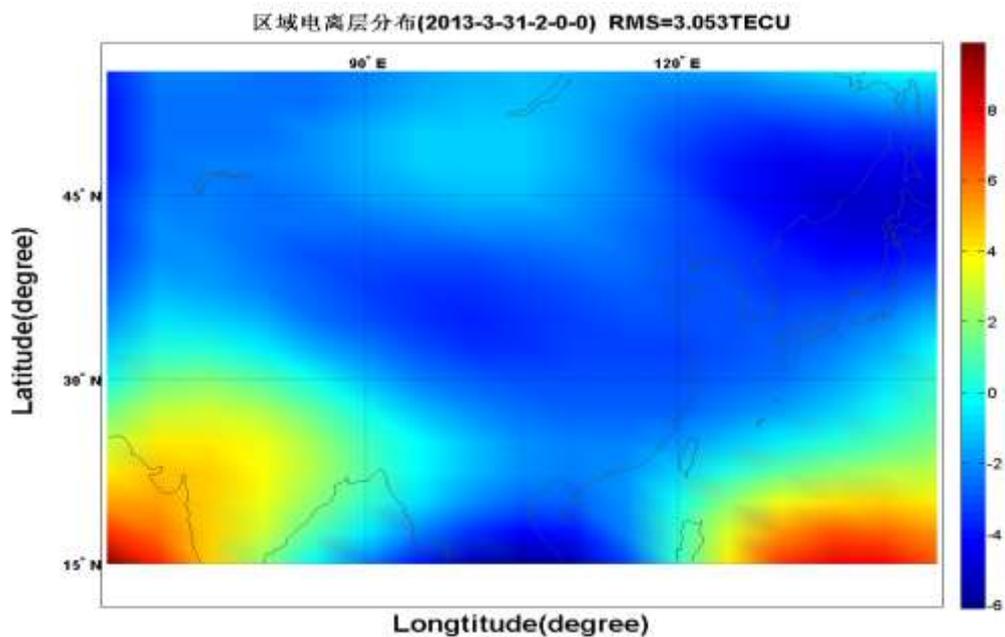


图 4.15 引入 IGS 测站电子含量差值图

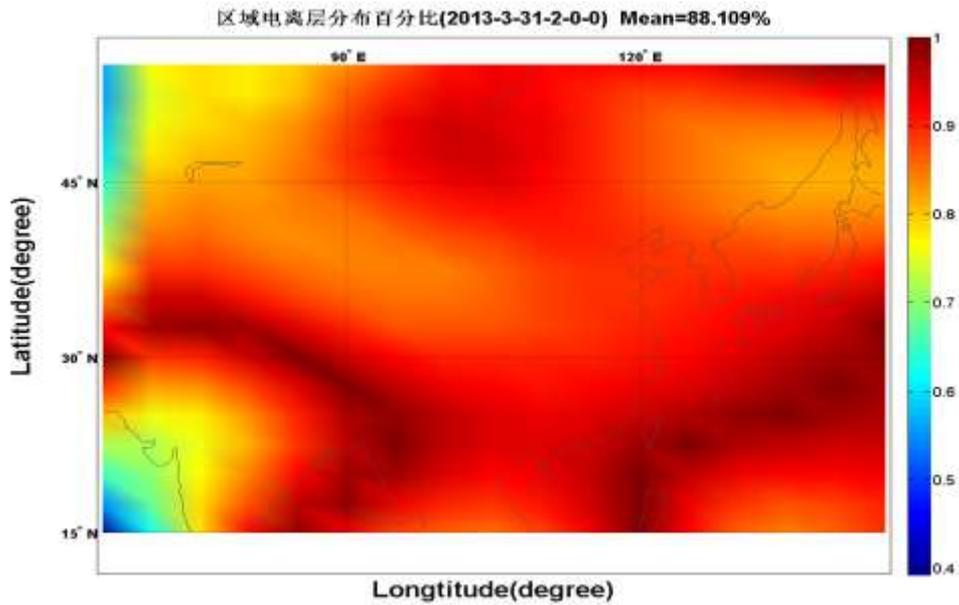


图 4.16 中国区域电子含量改正率图

由图 4.15 可知，当引入外部 IGS 测站数据后，中国边境及附近区域精度有明显提高，相对于 CODE 的精度由原来的 5.4TECU 达到 3TECU，平均改正率达到 88%。同样，从图 4.15 中可以看出其与 GIM 存在一个系统偏差，计算该模型与 GIM 的平均偏差为-3.2 个 TECU，当扣除掉偏差后，精度为 2.8TECU，如图 4.17 所示。从图可知，由于中国境外南部偏差过大导致整体精度提高不明显。图 4.18 给出了扣除偏差后电子含量差值分布直方图，可见利用低阶球谐函数模型建模也是可靠的。

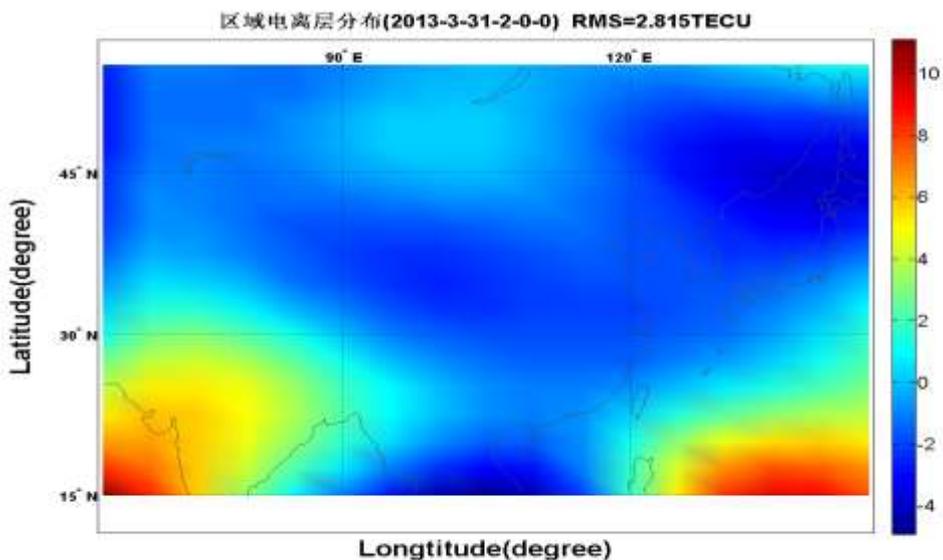


图 4.17 扣除系统偏差后电子含量差值图

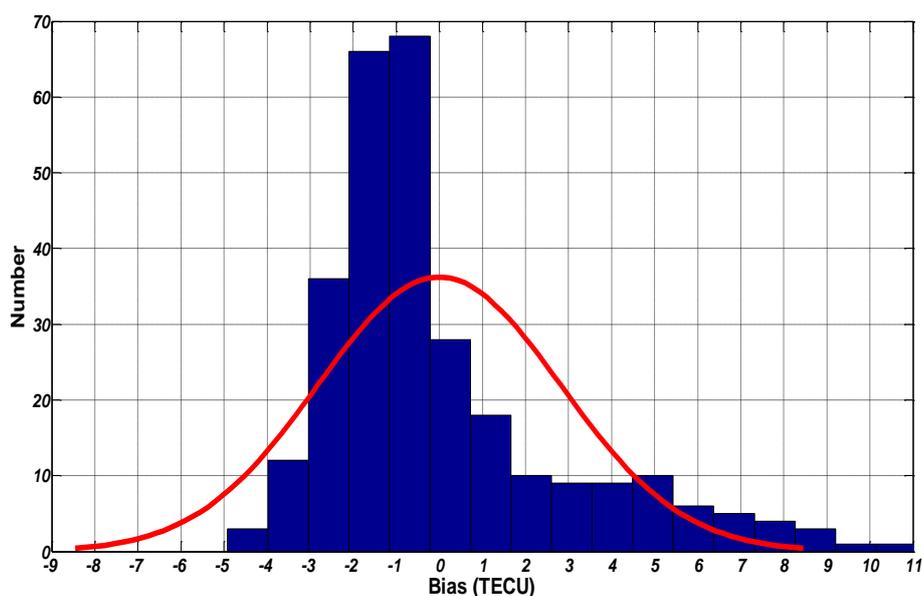


图 4.18 扣除系统偏差后电子含量差值直方图

4.5 小结

本章对建立中国区域电离层模型进行了初步探讨，分别采用多项式、格网和低阶球谐函数进行建模，并得到一定的结论，具体从以下几方面进行：

(1) 卫星和接收机硬件延迟解算精确与否，对于电离层电子含量的精度有着重要影响。在利用多项式和球谐函数模型时，硬件延迟需要作为参数与模型系数一起解算。两种模型得到的卫星硬件延迟与 CODE 提供的相比，最大偏差都在 1ns 以内，精度在 0.3ns 左右。相比于全球解算得到的卫星硬件延迟精度略差，分析认为是由于中国区域解算是局部区域采样，而全球解算属于全球采样，因而观测数据的覆盖面不同导致出现偏差。另外多项式与低阶球谐函数两种模型解算得到的接收机硬件延迟相差总体在 1ns 以内，相对精度为 0.6ns，由此说明两种模型在解算卫星和接收机硬件延迟时精度相当。

(2) 从多项式模型解算得到电子含量与 CODE 提供的 GIM 模型计算结果比较看，两者之间存在 2-4 个 TECU 的偏差，其相对改正率为 84.7%；从格网模型计算得到的电子含量与 GIM 相比，两者之间存在 2-4 个 TECU 的偏差，相对改正率为 88.2%；而从低阶球谐模型计算结果看，其与 GIM 之间同样存在 2-4 个 TECU 的偏差，相对改正率 88.1%。当扣除掉这个系统偏差后，其结果与 GIM 吻合较好。从上述不同时间，不同模型的结果来看，中国区域解算得到的电离层

电子含量与 GIM 存在一个系统偏差，这是因为 GIM 解算中，中国区域用到的测站较少，导致拟合效果不佳。

综上所述，利用多项式、格网和低阶球谐函数模型来建立中国区域电离层模型是可靠的，但由于模型误差以及数据处理的不完善，模型精度有待于进一步提高，特别是中国边境。

第5章 电离层预报

5.1 电离层预报简介

电离层的变化会受到太阳、风、磁层和大气的作用，除了存在昼夜变化、季节变化、太阳活动周年变化外，还明显存在逐日变化和暴时变化^[70]（周伟莉，2012）。常用的电离层电子含量预报是 Klobuchar 模型，但由于该模型是用长期的观测资料建立的，不能反映电离层的不规则变化，因而其改正精度只有 50%~60%。为了提高定位、导航等性能，需对电离层总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，目前在国际上开展电离层预报的主要有欧洲、澳大利亚、美国等国家^[71]（巩岩，2012）。目前采用较多的方法主要有自相关分析法^[72]

（Hanbaba R, 1999），神经网络法^[73]（Cander L, 1988），区域电离层预报的差值法^[74]（Rushm C M, 1976），电离层同化模型^[75]（Schunk R W, 2003），时间序列模型^[76]（刘军，2010）等。

鉴于很多国家都在积极进行电离层短期预报，并取得较好的成绩，我国也逐渐把电离层预报作为电离层研究的一个重点，目前已做了一些探索。李志刚等使用一种适合全球的电离层电子含量预报方法^[77]（李志刚，2007）；万卫星等创建了一种源于二维模型的方法应用在中国电离层电子含量预测系统^[78]（万卫星，2007）。总的来说，我国的电离层短期预报还处于探索阶段，还没有形成适合于我国的预测方法。

5.2 时间序列模型介绍

时间序列分析分为 AR (p)、MA (q)、ARMA (p, q) 和 ARIMA (p, q, d) 四种，其中 p 为自回归部分阶数，q 为滑动部分阶数，d 为差分阶数^[79 80]（归庆明，1996；杨叔子，2007）。

AR (p) 模型又叫自回归模型，它是描述序列某一时刻的值与前 p 个时刻序列值之间的相互关系，即：

$$x_t = \varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \cdots + \varphi_p x_{t-p} + \varepsilon_t \quad (5.1)$$

式中, x_t 为 t 时刻的值, ε_t 为噪声且与前时刻序列值不相关, φ_p 为模型系数。

AR (p) 模型参数估计时采用最小二乘估计法进行计算, 具体方法如下, 将时间序列代入 AR (p) 模型函数, 得到以下线性方程组:

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= \varphi_1 x_n + \varphi_2 x_{n-1} + \cdots + \varphi_n x_1 + \varepsilon_{n+1} \\ x_{n+2} &= \varphi_1 x_{n+1} + \varphi_2 x_n + \cdots + \varphi_n x_2 + \varepsilon_{n+2} \\ &\cdots \\ x_N &= \varphi_1 x_{N-1} + \varphi_2 x_{N-2} + \cdots + \varphi_n x_{x-n} + \varepsilon_N \end{aligned} \quad (5.2)$$

其中 X 为系数值, φ 为待估系数, 根据上述方程, 可得参数估计值。

当把 ε_t 作为白噪声序列时, 形成一个 MA (q) 移动平均模型, 并与 AR (p) 结合形成自回归滑动模型 ARMA (p, q)。其公式^[81] (龚光鲁, 2004) 为:

$$x_t = \varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \cdots + \varphi_p x_{t-p} + \varepsilon_t \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \cdots - \theta_q a_{t-q} \quad (5.4)$$

式中, x_t 为 t 时刻的球谐系数值, φ_p (p=1, 2, ...) 为自回归 AR 模型的系数, θ_q (q=1, 2, ...) 为滑动函数系数, $\{a_t\}$ 为白噪声序列。在模型中只要有一个滑动平均参数, 则无条件回归就是非线性的, 因而需要用非线性最小二乘法来解算。一般可以用极小化的一些算法如 Gauss 法和最速下降法, 梯形投影法等。根据所采用的球谐函数模型系数的特点和物理背景, 时间序列不需进行差分处理, 因而本文采用 ARMA 模型来进行球谐函数系数预报。

5.3 ARMA 建模及参数确定

一个动态系统特性主要是有两个量来表征, 一个是格林函数; 另一个是相关函数, 即以时间序列的样本自相关、偏相关函数的分析为基本出发点^[82] (张树侠, 1997)。而对于 ARMA 模型, 由于样本自 (偏) 相关函数不截尾, 不能提供阶数 (p, q) 的信息, 因此这类时间序列模型的拟合, 往往只能从低阶到高阶逐步试探。多数情况下, 利用 H.Akaike 1972 年提出的 AIC 准则来确定模型的阶数, 但此方法很繁琐, 不是简便宜行的办法。

本文利用美国威斯康辛大学吴贤铭教授和 S.M.Pandit 教授提出的方法, 从系统的观点出发, 把时间序列看成是具有独立随机输入的动态响应, 然后通过逐步增加 ARMA(n, n-1) 模型的阶数, 使得系统实际量测的输出可以用模型的输出来近似, 这种逼近的效果可以由模型残差平方和减少的程度来判别。如果残差平方

和无明显改善, 则不再增加阶数。在实际建模中, n 每次增加 1 的算法很不方便, 每次增加 2 显示了很大的优越性, 适合在计算机上实现。

建模的最后一个问题就是关于 n 的终止值, 系统建模的方法要点之一就是找出简单的适用性检验方法。在线性回归模型的检验中, 一般采用 F 检验准则来判别。若线性回归模型中有 r 个参数而我们根据 N 个观察值检验其中 S 个参数是否限定为零, 则这个准则为^[83] (盛骤, 2010):

$$F = \frac{A_i - A_0}{S} \div \frac{A_0}{N - r} \sim F(s, N - r) \quad (5.5)$$

式中, A_0 是无限制的模型残差平方和 (A_0 是阶数 n 变动后求得), A_i 是参数受限制的模型残差平方和 (A_i 为阶数 n 变动前的残差平方和), $F(s, N - r)$ 是自由度为 s 和 $N-r$ 的 F 分布

具体建模步骤如下:

(1) 拟合模型 ARMA (2n, 2n-1), 每次 n 增加 1, 利用 F 准则检验残差 a_t (噪声残差) 的平方和的改善情况, 当从 ARMA (2n, 2n-1) 到 ARMA (2n+2, 2n+1) 的 F 值不显著 (例如 5% 的置信水平) 时就停止, 并选定 ARMA (2n, 2n-1) 模型;

(2) 检查 φ_{2n} , θ_{2n-1} 值是否很小, 并且它们的置信区间是否包括零, 若不是, 则适用模型就是 ARMA (2n, 2n-1);

(3) 若 φ_{2n} , θ_{2n-1} 很小, 而其置信区间包括零, 则拟合 ARMA (2n-1, 2n-2) 模型并利用 F 准则将它和 ARMA (2n, 2n-1) 进行检验。如果 F 值不显著, 则舍弃小的滑动平均 MA 参数, 拟合 $m < 2n-2$ 的 (2n-1, m) 模型, 并用 F 准则检验, 直到得出具有最小参数的使用模型为止;

(4) 如果 F 值是显著的, 则只舍弃小的滑动平均参数, 根据第三步确定 $m < 2n+1$ 的 ARMA (2n, m) 模型;

(5) 如有必要, 可拟合所希望的模型形式, 对于阶数的增加用 F 准则作检验直到不能取得显著改进为止。

5.4 计算结果分析

为了验证基于 ARMA (p, q) 模型预报球谐系数的有效性和精度, 本文利用 CODE 提供的 2012 年 doy1~doy200 共计 200 天的球谐模型系数和 GIM 格网数据进行分析, 其中格网数据用于检验预报结果。CODE 提供的球谐系数每两小时公布一次, 每次 256 个, 如果这样进行预报则要建立 256×12 个时间序列, 而

且预报系数过多，不利于发布。因此本文寻找利用较少的模型系数来预报，以达到符合导航的精度要求。经分析，256 个模型系数中，前面 13~15 个解算得到的总电子含量占 256 个解算量基本上能达到 60%以上，如图 5.1 所示，红色线代表球谐模型系数解算得到的总电子含量占的比例；蓝色代表增加一个系数与不增加的变化情况。

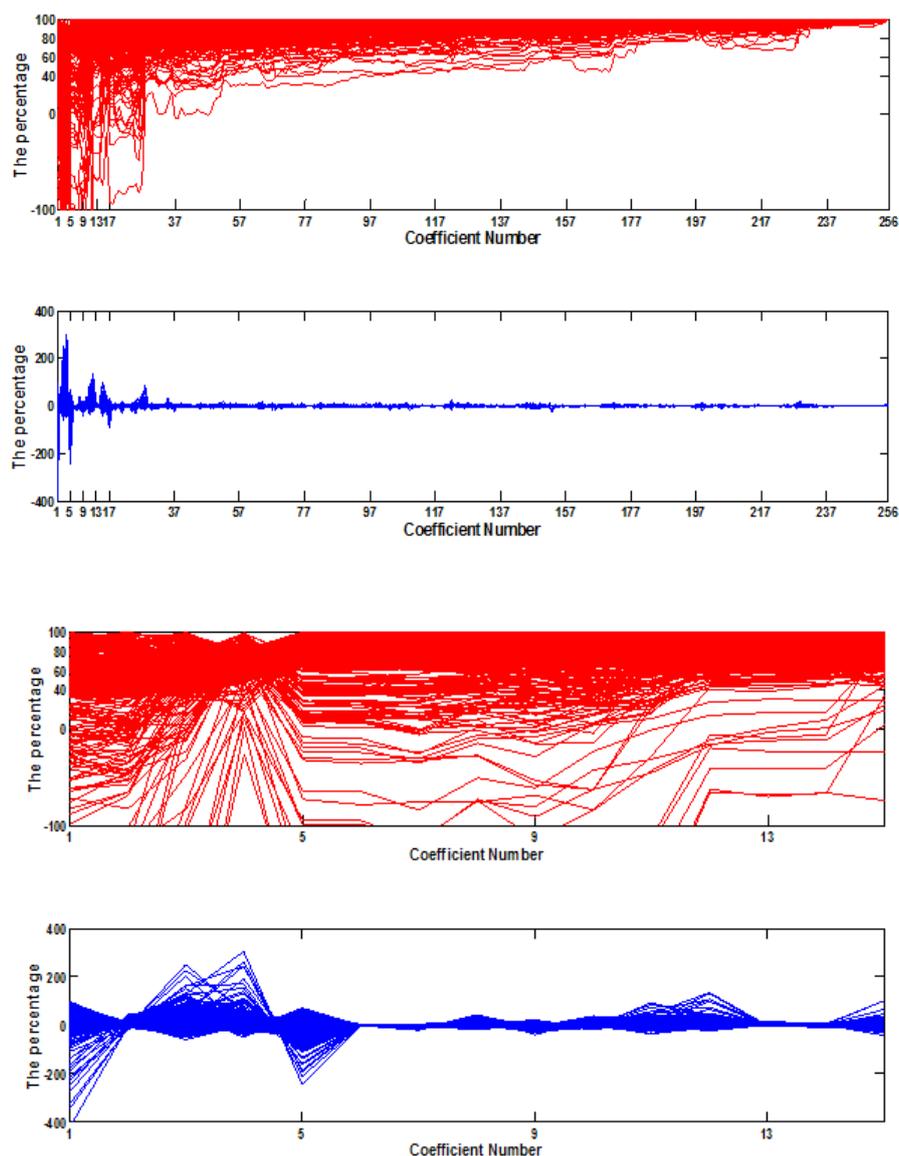
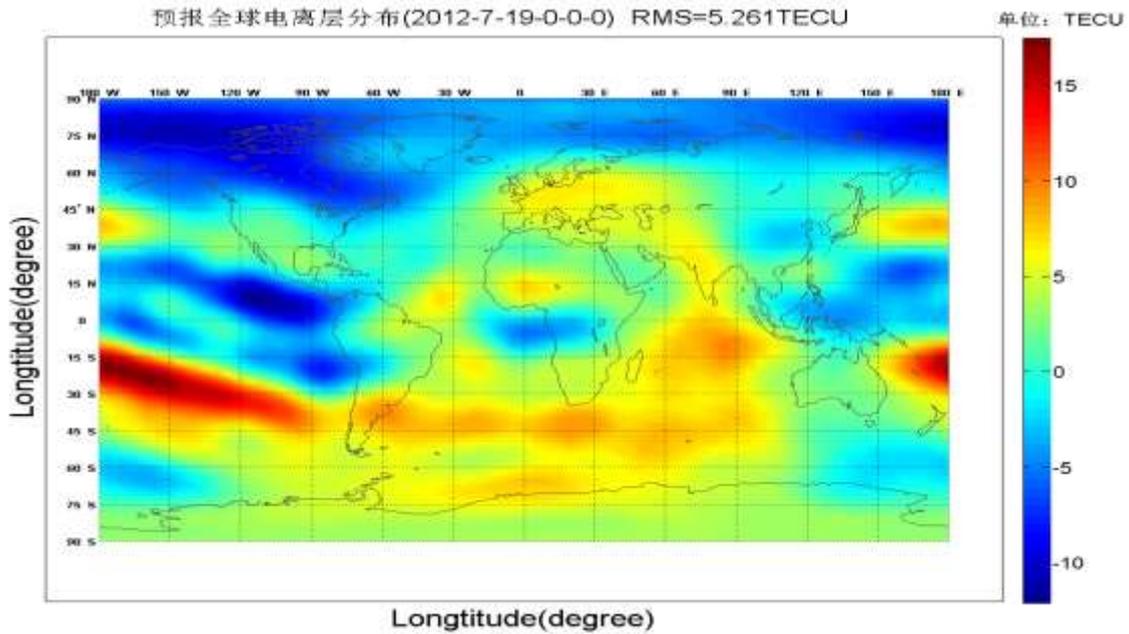


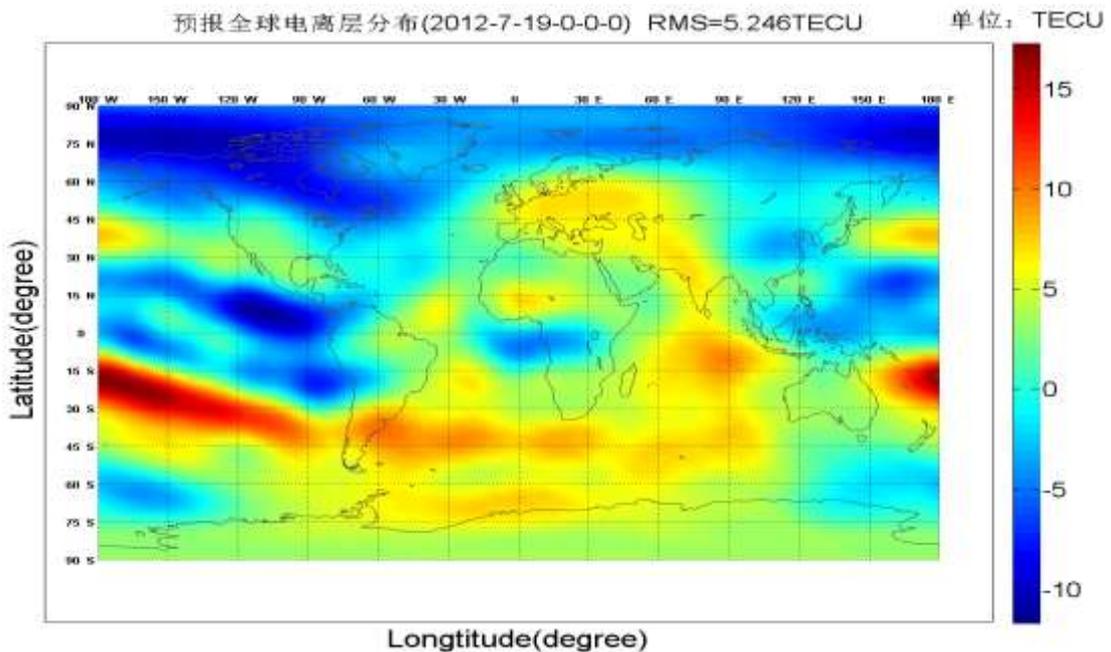
图 5.1 球谐模型系数解算总电子含量的相应比率

为进一步验证较少参数预报的准确性，利用 ARMA 模型进行前 13 和前 14 个球谐模型系数预报，根据预报系数生成格网电离层，再与 CODE 提供的 GIM 进行比较，结果表明其预报值与 CODE 相比，精度可达 5.3TECU，如图 5.2 所

示。同时比较图 5.2 (a) 和 5.2 (b) 可知, 13 参数和 14 参数解算得到的精度无明显改善, 因此本文认为预报 13 参数即能达到导航精度要求。图 5.3 给出电子含量差值的分布直方图, 从图可以看出差值基本上集中在 6 个 TECU 内, 换算到 L1 频率上距离向误差约为 1m 左右, 可见其能符合导航要求。



(a) 13 参数解算全球电离层与 GIM 之差



(b) 14 参数解算全球电离层与 GIM 值之差

图 5.2 全球电离层预报差值图

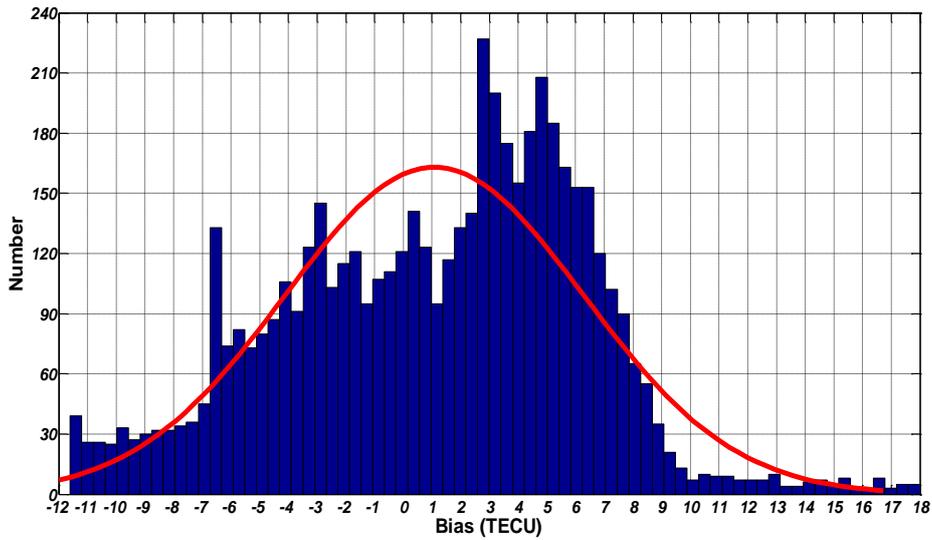
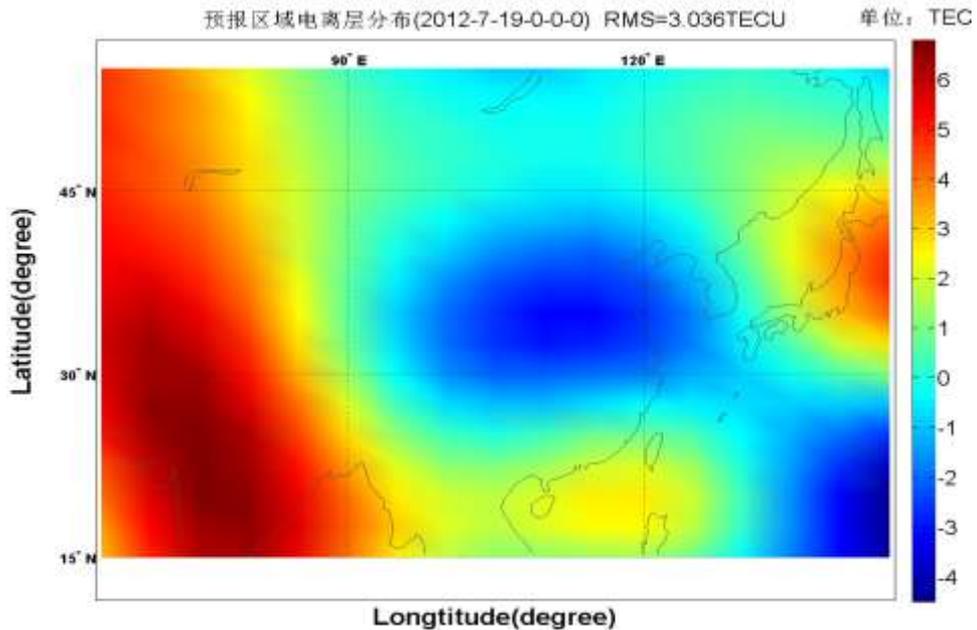
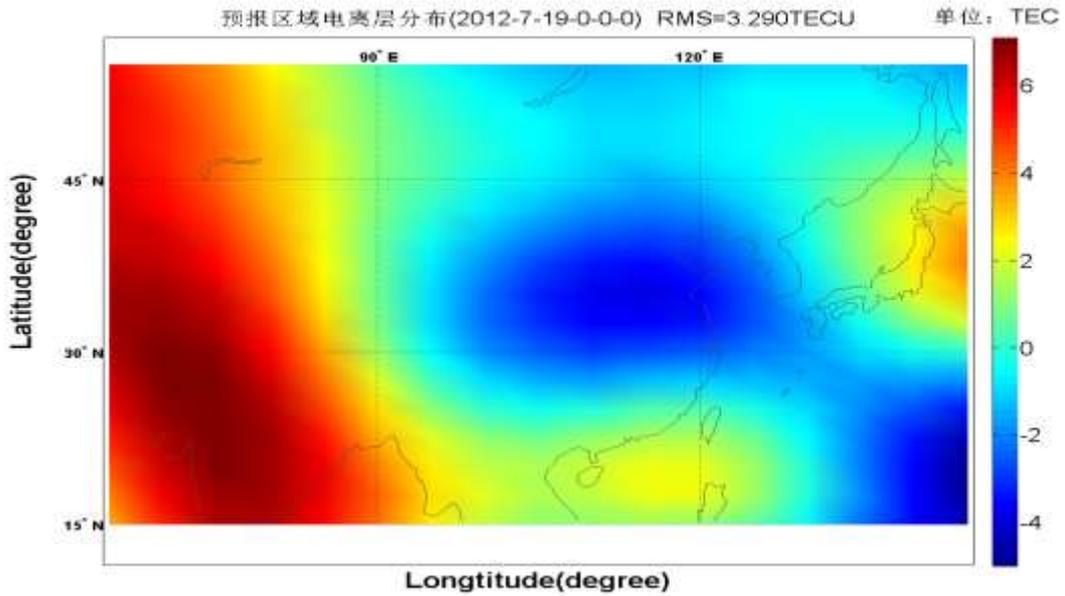


图 5.3 全球电离层预报差值直方图

目前,我国北斗卫星导航系统正逐步用于民用导航应用,对于单频用户来讲,高精度的电离层模型对于提高导航精度有着至关重要的作用。本文采用上述方法给出了中国区域附近的电离层电子含量预报精度,如图 5.4 所示。从图 5.4 中可看出,13 参数和 14 参数预报精度无大的区别,且 14 参数反而出现精度略微降低的情况,由此也说明 13 参数已能到达要求。



(a) 13 参数解算全球电离层



(b) 14 参数解算全球电离层

图 5.4 全球电离层预报

为验证预报模型与 Klobuchar 模型应用于单频动态定位的精度，选取 10 个 IGS 站数据进行定位实验，定位精度统计如图 5.5 所示。图 5.5 表明两种模型在水平方向的定位精度相当，而在高程方向，应用本文预报模型的中误差较 Klobuchar 模型小，说明本文提出的模型是可靠的。由表 5.1 可见，利用本文预报模型的定位精度比传统的 Klobuchar 有所改进，最大可提高 15%，证明本文提出的预报模型能替代 Klobuchar 模型，对于单频导航用户能有效提高定位精度。

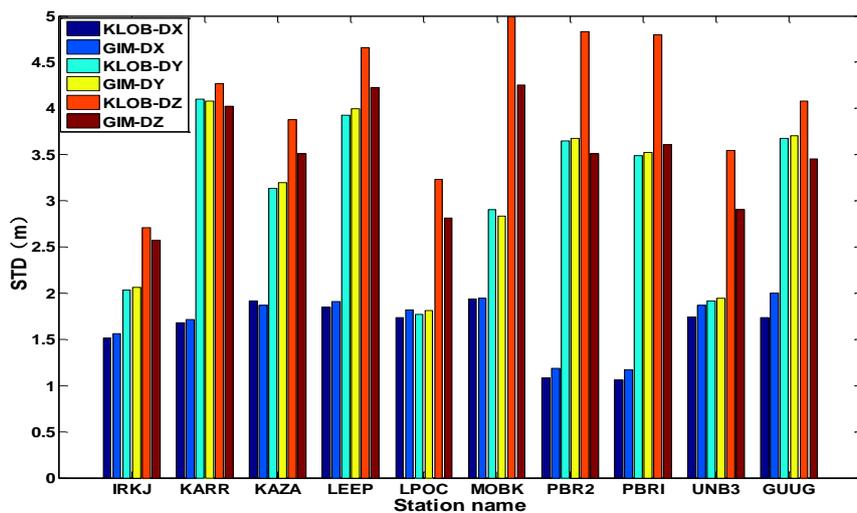


图 5.5 两种模型的动态单频解

表 5.1 预报模型的定位改进百分比

Station	IRKJ	KARR	KAZA	LEEP	LPOC
RMS(%)	1.8	2.8	4.5	3.8	6.3
Station	MOBK	PBR2	PBRI	UNB3	GUUG
RMS(%)	10.3	15.1	14.1	9.7	5.4

5.5 小结

北斗, GPS 等 GNSS 电磁波信号在大气中传播会受到电离层延迟的干扰, 其量级达到几米到几十米, 是影响 GNSS 定位精度的主要误差源之一。针对电离层特性, 我国北斗卫星系统和 GPS 系统均采用 Kloubuchar8 参数模型进行改正, 然而即使采用改进的 Klobuchar 模型, 实际应用中也未能达到理想的效果。本文根据球谐函数模型系数, 利用改进的 ARMA 模型对其进行预报, 集这两种模型优点于一体, 预报精度高、计算方便, 通过试算表明, 预报 13 个系数已能满足相应的导航精度要求。用于单频定位时, 与传统的 Klobuchar 模型相比, 最大能提高 15% 的定位精度。

第6章 总结与展望

6.1 总结

电离层作为地球大气层的一部分，对无线电波的传播有显著的影响，其具体表现为电离层的折射效应，而其引起的电离层时延是影响 GNSS 测量、导航、定位与定轨精度的主要误差源之一，也是导致一般差分 GNSS 定位精度随用户和基准站间距离的增加而迅速降低的主要原因之一，因而该误差不可忽略。GNSS 因其不间断监测、测量精度高等优点，成为研究电离层一个重要的手段。本文利用 IGS 连续运行站和中国陆态网有关资料进行了电离层的相关研究，具体内容如下：

(1) 首先介绍电离层的有关情况和研究内容，对利用 GNSS 研究电离层的原理和方法进行了介绍分析。利用 GNSS 数据开展这些与电离层相关内容的研究，对于提高测量定位精度、深入的认识电离层结构和变化规律、推动相关科学的理论研究及工程应用的发展，意义重大。

(2) 简要介绍了当前电离层的各种模型如传统的经验模型 Klobuchar、Bent 模型和 IRI 模型，并详细介绍了一些经验模型如多项式模型和球谐函数模型，并给出本文选取模型以及建模流程和相应的数据处理方法。

(3) 针对全球和中国区域，利用球谐函数进行电离层模型，对其精度和硬件延迟解算的可靠性进行了分析研究。在解算全球模型时，采用 GPS 与 GLONASS 组合解算；而中国区域由于受到模型自身限制和 GLONASS 测站较少，只采用 GPS 单系统。解算结果与 CODE 进行比较，结果显示比较可靠，GPS 卫星硬件延迟精度为 0.05ns，GLONASS 卫星硬件延迟精度为 0.16ns，GPS 的接收机硬件延迟精度为 0.45ns，而 GLONASS 的则为 0.57ns。无论从卫星还是接收机的硬件延迟可以看出，GPS 明显好于 GLONASS，这是由于 GLONASS 测站少，全球分布不如 GPS 测站好；解算得到的总电子含量与 CODE 的 GIM 相比，采用组合 GPS/GLONASS 后精度较采用 GPS 单系统好，精度分别为 2.0TEUC 和 2.5TECU，证明利用球谐函数进行建模是可靠的。

(4) 在解算电离层模型系数和卫星与接收机硬件延迟中，若要分离卫星与接收机的硬件延迟，目前普遍采用的约束条件是卫星硬件延迟和为零。本文采用了不同的约束条件进行解算电离层模型系数和分离卫星与接收机硬件延迟，得出了相应的结论。

(5) 为进一步研究建立中国区域电离层模型的可靠性, 本文还利用格网模型进行分析。利用陆态网 250 个测站, 按照距离加权建立格网模型, 同时考虑到陆态网 GPS 测站分布的不均匀性, 增加水平约束条件, 结果显示在那些测站分布较少的区域, 精度大大提高。

(6) 目前, 电离层的预报模型主要有 Bent 模型、IRI 模型、Klobuchar 模型、Geogiadiou 三角函数模型、低阶球谐函数展开模型等。而在这些模型中, Klobuchar 模型应用则较为广泛, 但它也只能预报出电子总含量的 50%~60%。即使是改进的 Klobuchar 模型也只能达到 70%左右。本文在电离层球谐函数模型的基础上, 采用时间序列分析中的 ARMA 模型进行模型系数预报, 选取电离层球谐函数模型系数的前 13 个参数进行预报, 既能减少预报模型参数, 又能达到相应的精度。

6.2 展望

本文主要研究了根据不同模型, 建立了全球电离层 VTEC 模型和中国区域 VTEC 模型, 并对其进行了相关分析。但由于本人的理论知识和时间的限制, 本文仍然存在一系列相关问题需要进一步研究, 具体内容包括:

(1) 建立电离层 VTEC 模型时, 采用的系统较少, 当前的北斗系统数据以及将来的伽利略系统数据需要进一步研究; 随着 GPS BLOCK IIF 和 III 的卫星的发射, GPS 观测数据类型将会出现 L1C/A、L1C, L2C、L5I 和 L5Q 等, 以及我国北斗的三频数据的出现, 需要进一步研究; 同时要对不同系统和不同频率间组合定权问题需要考虑;

(2) 目前进行球谐函数建模时, 采用的时间分辨率是 2 小时, 能否实现分辨率变为 1 小时需要进一步研究;

(3) 利用球谐系数前 13 项进行预报, 本文未考虑微小的周期项, 对于其预报模型的采用需要进一步研究;

(4) 目前采用的都是基于一阶项展开的模型, 而对于高阶项电离层模型有待于进一步研究

致谢

时光如梭，不觉间两年半时光稍纵即逝。两年半的科研生活使我的知识结构和科研能力都上了一个新的台阶。值论文完成之际，首先衷心感谢我的导师伍吉仓教授！伍老师治学之严谨，知识之渊博都在潜移默化中感染着我。伍老师那种遇事不急不躁，做事有条不紊时刻教育着我。两年半时间里，伍老师在学术上的耐心指导和在生活上的关心，令我终生难忘。

需要特别感谢的是副导师上海天文台陈俊平研究员。在天文台度过的两年时间里，陈老师在学习上给予了很大的帮助和指导，扩展了我的思维。本论文在选题和撰写过程中，无不倾注着陈老师的心血。陈老师负责的上海天文台 GNSS 分析中心为本文研究的开展提供了重要的数据。

同时需要感谢的是学院的各位老师，特别是胡丛玮老师、王解先老师。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路上的问题。

感谢各位同门张丽娜、徐克科、刘伟洲、陈杰、陈超、吕志鹏、颜琼、郑二龙、郭林英、赵静雯等以及 410 教研室同伴的帮助，同时感谢天文台的师妹们以及那些小伙伴们，他们让我的硕士生活增添了色彩。

感谢 B710 的那些兄弟们，回首望，曾经的那些点滴无不让我的生活多姿多彩，充满了喜悦，愿我们的友谊长存！

感谢我的家人，感谢他们一如既往对我学业和生活上的支持，对于他们，我无法用语言来表达内心深处的感激之情，只愿你们一生平安！

最后，感谢对本论文提供帮组的所有朋友们！

2014 年 2 月

参考文献

- [1] <http://www oulu.fi/~spaceweb/textbook/cycle.html>
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 黄逸丹. 区域电离层 GPS 监测及应用研究[D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2007
- [5] 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 Sci, 1988, 23(4): 483-492
- [6] Klobuchar, J.A. (1996) Ionospheric effects on GPS. In Parkinson & Spilker, Jr. (Eds.), Global positioning systems: Theory and applications. Progress in Astronautics and Aeronautics, Volume 163, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc
- [7] Bilitza, D. International reference ionosphere 2000, Radio Sci, 2001, 36(2): 261-275
- [8] Erdem Turker Senalp, Ersin Tulunay, Yurdanur Tulunay. Total electron content (TEC) forecasting by Cascade Modeling: A possible alternative to the IRI-2001[J]. DOI: 10.1029/2007RS003719, 2008
- [9] 蔡昌盛, 高井祥. 利用 GPS 观测值反演电离层总电子含量的时空变化[J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2009, 28 (5): 727-730
- [10] G. Lanyi. Total Ionospheric Electron Content Calibration using SERIES GPS Satellite Data[J]. TDA progress Report, 1986, 42-85
- [11] Stefan Schaer. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System[D]. Berne, Swiss: university of Berne, 1999
- [12] Sonya Todorova, Harald Schuh, et al. Global models of the ionosphere obtained by integration of GNSS and satellite altimetry data[J]. Vermessung & Geoinformation 2/2007, P. 80-89
- [13] Adela Anghel, Charles Carrano, Attila Komjathy et al. Kalman filter-based algorithms for monitoring the ionosphere and plasmasphere with GPS in near-real time[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2009, 71(1): 158-174
- [14] Michael Schmidt. Wavelet modeling in support of IRI[J]. Advances in Space Research 39(2007): 932-940
- [15] Michael Schmidt, Denise Dettmering, Matthias Mobmer et al. Comparison of spherical harmonic and B-spline models for the vertical total electron content[J]. Radio Sci, DOI: 10.1029/2010RS004609, 2011
- [16] Zeilhofer, C., Schmidt, C., Bilitza, D. et al. Regional 4-D modeling of the ionospheric electron density from satellite data and IRI[J]. Advances in Space Research, 2009, 43: 1669-1675
- [17] Nohutcu, M., Karlioglu, M.O., Schmidt, M. B-spline modeling of VTEC over Turkey using GPS observations[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2010, 72: 617-624

- [18] Fremouw.E.J,Secan.J.A,Howe.B.M. Application of Stochastic Inverse Theory to Ionospheric Tomography[J].Radio Sci, 1992,27(5):721-732
- [19] Raymund.T,Bresler.Y,Anderson.D.Model-assisted Ionospheric Tomography:A New Algorithm[J].Radio Sci,1994, 29(6):1493-1512
- [20] Howe.B.W,Runciman.K,Secan.J. Tomography of Ionosphere:Four-dimensional Simulations[J].Radio Sci,1998,33(1):109-128
- [21] 吴雄斌,徐菊生,马淑英等. 电离层 CT 数据采集和图像重建[J]. 遥感学报, 2001, 5 (1): 22-28
- [22] Feltens.J.2003. The International GPS Service(IGS) Ionosphere Working Group. Advances in space Research 31,635-644
- [23] Schaer .S, Gurtner. W, Feltens. J.1998. IONEX:The IONosphere map exchange format version-1. In: proceedings of the IGS AC Workshop
- [24] 郭鹏. 无线电掩星技术与 CHAMP 掩星资料反演[D]. 上海: 中科院上海天文台, 2006
- [25] 刘长建. GNSS 电离层建模方法与质量控制研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2011
- [26] 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
- [27] Alizadeh.M.M,Schuh.H,Todorova.S. Global Ionosphere Maps of VTEC from GNSS, satellite altimetry, and formosat-3/COSMIC data[J]. J Geod,2011,85:975-987
- [28] 周忠谟, 易杰军, 周琪. GPS 卫星测量原理及应用[M]. 北京: 测绘出版社, 1997
- [29] 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
- [30] 李卫国. 基于 GPS 观测值构建区域电离层延迟模型的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009
- [31] 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
- [32] 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.
- [33] Pireaux.S,Defraigne.P,Wauters.L, et al. Higher-order ionospheric effects in GPS time and frequency transfer[J]. GPS Solut(2010),14:267-277
- [34] Datta-Barua.S,Walter.T,Blanch.J,et al.Bounding higher-order ionosphere errors for the dual-frequency GPS user[J]. Radio Sci,DOI:10.1029/2007RS003772,2008
- [35] Mainul Hoque.M,Jakowski.N.Estimate of higher order ionospheric errors in GNSS positioning[J].Radio Sci,DOI:10.1029/2007RS003817,2008
- [36] 伍约, 孟泱, 王泽民等. GPS 现代化后电离层折射误差高阶项的三频改正方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30 (7): 601-603
- [37] 刘庆元, 王虎, 王潜心等. Galileo 改正电离层折射误差高阶项的方法[J]. 测绘工程, 2008, 17 (2): 9-12
- [38] 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.
- [39] Claudio Brunini, Emilio Camilion,Franciso Azpilicueta. Simulation study of the influence of the ionospheric layer height in the thin layer ionospheric model[J]. J Geod(2011),85:637-645
- [40] Klobuchar JA(1987) Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. IEEE Trans Aerosp Electron Syst 23(1):325-331
- [41] Enge P, Walter T,Pullen S, et al(1996)Wide area augmentation of the global positioning system. Proc IEEE 84:1063-1088

- [42] 徐文耀. 地磁与空间物理资料的组织和相关坐标系[J]. 地球物理学进展, 2006, 21 (4): 1043-1060
- [43] Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice[M]. New York: Springer-Verlag, 2000
- [44] El-Arini. M. B, Secan. J, Klobuchar JA, et al. Ionospheric effects on GPS signals in the Arctic region using early GPS data from Thule, Greenland[J]. Radio Sci, DOI:10.1029/2008RS004031, 2009
- [45] Rolf Dach, et al. Bernese GPS software version 5.0[M]. Astronomical Institute, University of Bern, Bern, 2007
- [46] 余明, 郭际明, 过静琚. GPS 电离层延迟 Klobuchar 模型与双频数据解算值的比较分析[J]. 测绘通报, 2004, 6: 5-8
- [47] Ciralo. L, Azpilicueta. F, Brunini. C, et al. Calibration errors on experimental slant total electron (TEC) determined with GPS[J]. J Geo(2007)81:111-120
- [48] F Arikan, H Nayir, U Sezen, O Arikan. Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC[J]. Radio Sci, DOI:10.1029/2007RS003785, 2008
- [49] Charles S. Carrano, Adela Anghel, Richard A. Quinn, et al. Kalman filter estimation of plasmaspheric total electron content using GPS[J]. Radio Sci, DOI:1029/2008RS004070, 2009
- [50] Zhu Fuying, Wu Yun, Fu Ningbo. Application of Kalman filter in detecting pre-earthquake ionospheric TEC anomaly[J]. Geodesy and Geodynamics, 2011, 2(2):43-47
- [51] 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, No. 2, pp:401-406, 2002
- [52] Radicella SM, Leitinger R (2001) The evolution of the DGR approach to model electron density profiles. Adv Space Res 27(1):35-40
- [53] ITU (2003) Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems. Recommendation, Geneva, pp 531-537
- [54] Di Giovanni G, Radicella SM (1990) An analytical model of the electron density profile in the ionosphere. Adv Space Res 10(11):27-30
- [55] 王刚, 魏子卿. 格网电离层延迟模型的建立与试算结果[J]. 测绘通报, 2000 年, 9: 1-2
- [56] Brian D. Wilson, Anthony J. Mannucci, Charles D. Edwards. Subdaily northern hemisphere ionospheric maps using an extensive network of GPS receivers[J]. Radio Sci, 1995, 30(3):639-648
- [57] Stefan Schaer, Werner Gurtner (1988). IONEX: the IONosphere map exchange format version 1. Proceedings of the 1988 IGS Analysis Centers Workshop, ESOC, Darmstadt, Germany, February 9-11
- [58] <http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/>
- [59] Rolf Dach, et al. Bernese GPS software version 5.0[M]. Astronomical Institute, University of Bern, Bern, 2007
- [60] Mannucci A J, Wilson B D, Yuan D N, et al. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements[J]. Radio Science, 1998, 33:565-582
- [61] WenHai Jiao, ChangJiangGeng, YinHu Ma, etc al. (2012) A Method to Estimate DCB of COMPASS Satellite Based on Global Ionosphere Map. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2012 (159) :347-353

- [62] 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学术年会电子文集——S08 卫星导航模型与方法, 2012
- [63] 刘经南, 陈俊勇, 张燕平等. 广域差分 GPS 原理和方法[M]. 北京: 测绘出版社, 1999
- [64] Esther Sardon, Nestor Zarraoa. Estimation of total electron using GPS data: How stable are the differential satellite and receiver instrumental biases[J]. Radio Science, 1997, 32(5):1899-1910
- [65] 常青, 张东和, 肖佐等. 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
- [66] 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
- [67] 詹先龙, 刘瑞华, 杨兆宁. 北斗系统格网电离层延迟算法研究[J]. 航天控制, 2012, 30 (1): 15-19
- [68] 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
- [69] 孙桦, 牛力. WAAS 电离层延迟误差校正的网格算法[J]. 弹箭与制导学报, 2001, 2 (11): 63-67
- [70] 周伟莉, 李素华, 蒋美霞. 基于球谐函数模型的电离层预报[J]. 测绘信息与工程, 2012, 37 (3): 3-5
- [71] 巩岩, 党亚民. 改进的方差分析在电离层 TEC 短期预报中的应用[J]. 测绘科学, 2012, 37 (3): 129:131
- [72] Hanbaba R. COST 251 Final Report, Improved quality of Service in Inospheric Telecommunication Systems Planning and Operation [R]. Warsaw: Space Research Centre, 1999, 127-142
- [73] Cander L. Ionospheric forecasting technique by artificial neural network[J]. Electron Lett, 1988, 34(6)
- [74] Rushm C M, Edwards Jr W R. An anthomated mapping technique for representing the hourly behavior of the ionosphere[J]. Radio Sci, 1976, 11:931-937
- [75] Schunk R W, Scherliess L, Sojka J J. Recent approaches to modeling ionospheric weather[J]. Adv Space Res, 2003, 31(4):819-828
- [76] 刘军, 柴洪洲, 刘先冬等. 基于 ARIMA(P,1,1)的电离层预报模型[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30 (3) :79~82
- [77] 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 年, 50 (2): 327-337
- [78] 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 年, 22 (4): 1040-1045
- [79] 归庆明. 随机过程[M]. 郑州: 解放军测绘学院, 1996
- [80] 杨叔子, 吴雅, 轩建平. 时间序列分析的工程应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007
- [81] 龚光鲁, 钱敏平. 应用随机过程教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [82] 张树侠, 吴简彤. 数据建模及预报[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1997
- [83] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

谢益炳, 男, 1988 年 11 月生。

2011 年 7 月毕业与安徽建筑大学, 测绘工程专业, 获学士学位。

2011 年 9 月入同济大学攻读硕士研究生。

已发表论文:

- [1] 谢益炳, 陈俊平, 伍吉仓. 一种确定单站接收机码间偏差的新算法, 大地测量与地球动力学, 2013, 33 (4)
- [2] 谢益炳, 伍吉仓, 陈俊平等. 芦山 Ms7.0 地震前后电离层电子含量扰动分析, 地震学报, 2014, 36 (1)
- [3] Junping Chen, Yize Zhang, Yibing Xie, et al. Improving Efficiency of Data Analysis for Huge GNSS Network, Lecture Notes in Electrical Engine, CSNC 2013
- [4] 陈俊平, 张益泽, 谢益炳, 周旭华. 超大观测网络及多 GNSS 系统的快速数据处理, 武汉大学学报. 信息科学版, 2014, 39 (3)

待发表论文:

- [1] 谢益炳, 伍吉仓, 陈俊平, 刘伟洲. GPS 和 GLONASS 组合的全球实测电离层 TEC 建模, 武汉大学学报. 信息科学版 (已录用)
- [2] 谢益炳, 陈俊平, 伍吉仓, 胡丛玮. 基于不同基准的电离层电子含量和硬件延迟分析, 武汉大学学报. 信息科学版 (已录用)
- [3] 谢益炳, 伍吉仓, 陈俊平, 胡丛玮. 基于改进 ARMA 模型的电离层球谐模型系数预报, 武汉大学学报. 信息科学版 (送审)

资助项目:

国家自然科学基金: 基于实时电离层估计的单频单站实时精密定位理论与方法研究 (41174024);

国家自然科学基金: GNSS 实时精密点定位的若干问题的研究 (40974018);

国家自然科学基金: 多卫星导航系统时空基准的统一 (11273046);

国家高技术研究发展计划 (863 计划): 北斗空间信号精度提升关键技术 (2013AA122402);

中科院百人计划以及上海市科学技术委员会资助。