



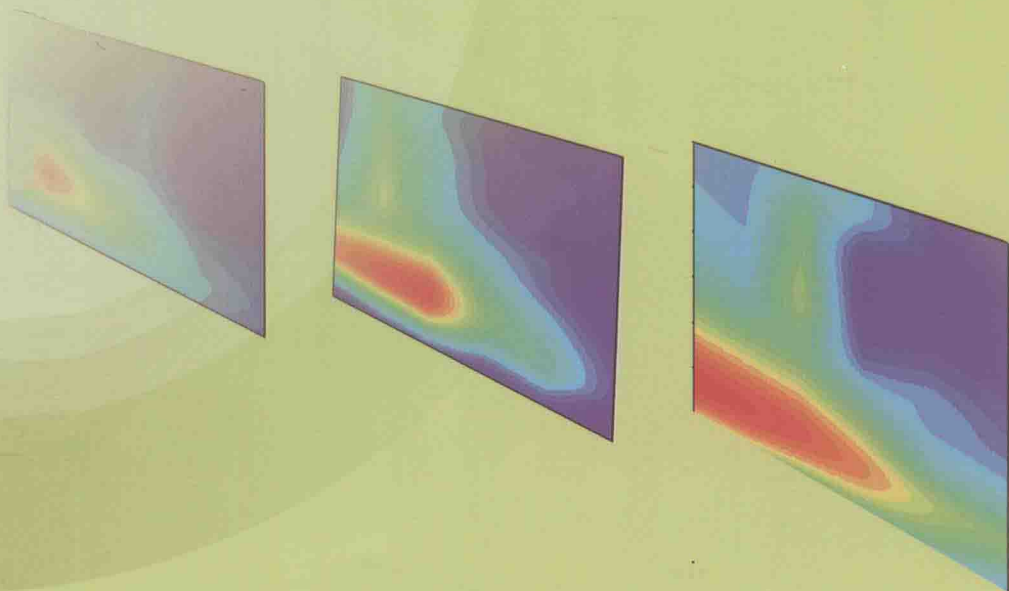
测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

GNSS-based Ionospheric Tomographic Algorithms and Applications

闻德保 著

基于GNSS的电离层 层析算法及其应用



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资助

基于 GNSS 的电离层层析算法及其应用

GNSS-based Ionospheric Tomographic Algorithms
and Applications

闻德保 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 闻德保 2013

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内 容 提 要

GNSS 电离层层析成像技术是近年发展起来的一种新的电离层监测手段,是空间大地测量、无线电科学和空间物理学等领域的一个研究热点和难点。本书首先介绍了基于 GNSS 的电离层层析成像原理,探讨了电离层电子密度层析反演过程中不适定问题产生的原因和机理,提出了解决不适定问题的反演算法。在此基础上,利用实测的 GNSS 观测资料反演了不同地磁条件下中低纬度地区电离层电子密度的周日变化特性,特别研究了空间天气发生期间电离层结构的扰动变化特性。

本书可供从事测绘、空间物理和无线电研究的人员参考,也可作为相关专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

基于 GNSS 的电离层层析算法及其应用/闻德保

著. —北京:测绘出版社, 2013.12

ISBN 978-7-5030-3214-1

I. ①基… II. ①闻… III. ①卫星导航—全球定位系
统一应用—电离层探测—研究 IV. ①P352.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 240752 号

责任编辑 吴 芸 封面设计 李 伟 责任校对 董玉珍 责任印制 喻 迅

出版发行	测绘出版社	电 话	010-83543956(发行部)
地 址	北京市西城区三里河路 50 号		010-68531609(门市部)
邮政编码	100045		010-68531363(编辑部)
电子信箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.chinasmp.com
印 刷	三河市世纪兴源印刷有限公司	经 销	新华书店
成品规格	169mm×239mm		
印 张	7.5	字 数	203 千字
版 次	2013 年 12 月第 1 版	印 次	2013 年 12 月第 1 次印刷
印 数	0001-1000	定 价	30.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-3214-1/P·673

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

电离层形态监测有助于加深认识电离层活动规律及其变化机制。长期以来,人们对电离层形态的监测与研究主要借助于电离层测高仪、雷达以及探空火箭等观测手段,并以电离层峰值电子密度($NmF2$)、峰值高度($hmF2$)以及临界频率(f_oF2)为研究对象。近二十年来,以美国全球定位系统(GPS)为代表的全球导航卫星系统(GNSS)观测技术的兴起以及全球分布的 GNSS 跟踪站连续观测的海量数据的累积,使得利用 GNSS 监测电离层时空变化规律成为可能。

电离层层析成像是计算机层析成像技术在电离层监测中的一种新的应用。该技术通过对电离层进行分层研究,不仅克服了薄层假设电离层层析模型的局限性,也克服了经验模型和传统地面探测手段的局限性,特别适合于监测大尺度电离层电子密度垂直分布及其扰动状态。基于 GNSS 的电离层层析成像是近十多年来发展起来的一种新的电离层探测手段,在电离层形态与扰动监测研究方面具有重大的科学意义和应用价值,是目前大地测量、空间物理和无线电科学等领域中的一个研究热点和难点。

目前,国内外关于 GNSS 电离层层析成像技术的专业书籍比较少,国内尚未发现这方面的专业书籍。国际上,俄罗斯莫斯科大学 Kunitsyn 教授编写的《Ionospheric tomography》一书主要从理论上论证了 GNSS 电离层层析成像的可行性,未涉及电离层电子密度反演过程中不适定问题。本书针对上述问题,立足于从电离层电子密度层析重构过程中不适定问题产生的原因和机理方面进行阐述,分析了已有的算法在实际反演过程中的局限性,提出了相应的解决方法。

为了帮助读者理解电离层层析成像理论,本书介绍电离层层析成像技术的发展过程,叙述电离层的基本特性,阐述了电离层层析成像的基本原理,系统地描述了几种新的电离层层析成像算法。

本书可作为高等院校测绘、空间物理和无线电科学等专业的研究生教材,也可作为相关的科研和产业部门科技人员的参考书。

本书由闻德保编写,中国科学院测量与地球物理研究所的许厚泽院士、欧吉坤研究员、袁运斌研究员,中国科学院物理与数学研究所的张训械研究员,武汉大学的王泽民教授等为本书提出了许多建设性的意见。国家自然科学基金(41174001)、湖南省杰出青年基金(14JJ1021)和教育部科学技术项目(213028A)也对本书的出版给予了支持,在此表示衷心的感谢。

在本书编写过程中,参考了许多文献,谨在此向所有参考文献的作者表示诚挚的谢意。由于编者水平有限,本书的不当与错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 电离层研究及其意义	1
§ 1.2 电离层探测技术与方法的发展	2
§ 1.3 CIT 技术的国内外研究历史及现状	5
§ 1.4 研究意义及主要内容	9
第 2 章 电离层的基本特性	10
§ 2.1 地球大气层结构	10
§ 2.2 电离层的形成与分层	11
§ 2.3 太阳黑子活动对电离层的影响	13
§ 2.4 地球磁场对电离层的影响	14
§ 2.5 电离层中的异常现象、不规则结构和扰动	14
§ 2.6 电磁波在电离层中的传播特性	17
第 3 章 反演问题与层析成像	20
§ 3.1 模型空间与数据空间	20
§ 3.2 反演问题的特定及求解方法	21
§ 3.3 计算机层析成像	22
第 4 章 基于 GPS 的电离层层析基本原理	24
§ 4.1 引 言	24
§ 4.2 GPS 概述	25
§ 4.3 GPS 观测量与观测方程	26
§ 4.4 双频 GPS 测量电离层 TEC 的基本原理	33
§ 4.5 GPS 码与相位观测联合解算电离层 TEC	35
§ 4.6 基于 GPS 的三维电离层层析技术	37
§ 4.7 GPS 无线电掩星技术	39
§ 4.8 电离层 CT 中的不适定问题	41
§ 4.9 基于 GPS 的电离层 CT 反演算法	42

第 5 章 一种改进的代数重构算法	47
§ 5.1 引 言	47
§ 5.2 新算法的基本原理	49
§ 5.3 新算法的数值模拟检验	50
§ 5.4 新算法的实测数据检验	56
第 6 章 基于选权拟合法的电离层电子密度反演	60
§ 6.1 引 言	60
§ 6.2 三维电离层电子密度分布的选权拟合反演方法	60
§ 6.3 数值模拟实验	66
§ 6.4 算法的实测数据检验	69
第 7 章 电离层层析的组合重构算法	72
§ 7.1 引 言	72
§ 7.2 组合重构算法的基本原理	73
§ 7.3 组合重构算法的数值模拟检验	74
§ 7.4 基于实测 GPS 数据重构的电离层电子密度分布	76
第 8 章 强磁暴期间电离层的时空变化	84
§ 8.1 引 言	84
§ 8.2 中国地壳运动观测网络简介	85
§ 8.3 2003 年 8 月 18 日磁暴的特性	86
§ 8.4 GPS 数据的选取与预处理	86
§ 8.5 磁暴期间电离层电子密度分布的 CIT 研究	87
§ 8.6 小 结	91
第 9 章 总结与展望	93
§ 9.1 总 结	93
§ 9.2 研究展望	94
参考文献	96
缩略语	108

Contents

Chapter 1	Introduction	1
§ 1.1	Research and Significance of the Ionosphere	1
§ 1.2	Development of the Techniques and Methods of Ionosphere Radio Probing	2
§ 1.3	History and Present Situation of the Domestic and Foreign Research of CIT Technique	5
§ 1.4	Research Significance and Main Contents	9
Chapter 2	Basic characteristics of the ionosphere	10
§ 2.1	Structure of Earth's Atmosphere	10
§ 2.2	Formation and Stratification of the Ionosphere	11
§ 2.3	Influence on the Ionosphere of Sunspot Activities	13
§ 2.4	Influence on the Ionosphere of Earth Magnetic Field	14
§ 2.5	Abnormal Phenomena, Irregular Structure and Disturbance in the Ionosphere	14
§ 2.6	Propagation Characteristics of Electronmagnetic Wave in the Ionosphere	17
Chapter 3	Inverse problem and tomography	20
§ 3.1	Model Space and Data Space	20
§ 3.2	Characteristics and Methods of Inverse Problem	21
§ 3.3	Computerized Tomography	22
Chapter 4	Principles or ionospheric tomography based on GPS	24
§ 4.1	Introduction	24
§ 4.2	GPS Overview	25
§ 4.3	Measurements and Observation Equations of GPS	26
§ 4.4	Basic Principle of Ionospheric TEC Measurement Using Dual- frequency GPS	33
§ 4.5	Combined Solution of Ionospheric TEC Based on the Code and Carrier Phase of GPS	35
§ 4.6	Three-dimensional Ionospheric Tomography Based on GPS	37
§ 4.7	GPS Radio Occultation Technique	39
§ 4.8	Ill-posed Problem of Computerized Ionospheric Tomography	41
§ 4.9	Inverse Algorithms of Computerized Ionospheric Tomography Based on GPS	42

Chapter 5	An improved algebraic reconstruction algorithm	47
§ 5.1	Introduction	47
§ 5.2	Principles of New Algorithm	49
§ 5.3	Simulation Test of New Algorithm	50
§ 5.4	Test of New Algorithm Using Actual Observations	56
Chapter 6	Inversion of ionospheric electron density based on the fitting method by selection of the parameter weight	60
§ 6.1	Introduction	60
§ 6.2	Fitting Method by Selection of the Parameter Weight of Three-dimensional Ionospheric Electron Density Distribution	60
§ 6.3	Simulation Test of New Algorithm	66
§ 6.4	Test of New Algorithm Using Actual Observations	69
Chapter 7	Hybrid reconstruction algorithm of ionospheric tomography	72
§ 7.1	Introduction	72
§ 7.2	Principles of Hybrid Reconstruction Algorithm	73
§ 7.3	Simulation Test of Hybrid Reconstruction Algorithm	74
§ 7.4	Reconstruction of Ionospheric Electron Density Distribution Based on Actual GPS Observations	76
Chapter 8	Ionosphere temporal-spatial variations during strong magnetic storm	84
§ 8.1	Introduction	84
§ 8.2	Introduction of Crustal Movement Observation Network of China	85
§ 8.3	Characteristics of the Strong Magnetic Storm on August 18, 2003	86
§ 8.4	Selection and Preprocessing of GPS Observations	86
§ 8.5	CIT Research of Ionospheric Electron Density Distribution During Magnetic Storm	87
§ 8.6	Summary	91
Chapter 9	Summary and Outlook	93
§ 9.1	Summary	93
§ 9.2	Outlook	94
References		96
Abbreviation		108

第1章 绪论

作为日地空间环境的重要组成部分,电离层对无线电通信、导航、卫星定位和人类的空间活动有着重要的影响。因此,研究电离层具有极为重要的意义。电离层研究不仅有利于认识电离层本身的时空变化规律,而且有利于推动地球科学领域相关电离层理论和应用问题的研究和发展。本章系统地介绍了有关电离层的基本概念、研究意义以及电离层探测方法,重点分析了电离层层析成像(computerized ionospheric tomography,CIT)工作的研究现状。

§ 1.1 电离层研究及其意义

电离层是日地空间环境的一个重要组成部分,处于地面以上约 60~2 000 km 范围内。这一范围内的地球大气由于太阳辐射与地球上层大气原子、分子的相互作用,使得大气发生电离,形成大量自由电子。在中低纬地区,大气的电离能量主要是太阳短波(即紫外线和 X 射线)电磁辐射,而极区起重要作用的还有高能粒子(质子和电子)。在整个日地空间,电离层是直接影响人类生活最重要的环节之一。电离层中的电离成分虽然比中性成分少得多,但这些电离成分的存在可显著地影响电磁波在电离层中的传播,造成电磁波的反射和能量损失(吸收),从而影响现代无线电通信工程和人类的空间活动。由于电离层的电离源主要来自太阳紫外辐射和高能粒子辐射,因此,电离层的状态随昼夜、季节以及太阳黑子活动期等产生周期性变化,同时也存在由于太阳非周期性活动而产生的非周期性变化(熊年禄等,1999)。

人类对电离层的研究历史已有一个多世纪。19 世纪 80 年代,Steward 为解释地磁观测中出现的规则日变化,提出了在高空可能存在一个电流体系的假想。20 世纪初,短波越洋传播试验成功后,人们再次提出高空存在一个导电的且能反射电磁波的层结。20 世纪 20 年代中叶,Appleton 和 Tuve 等先后接收到垂直发射的电磁脉冲的电离层反射回波,开创了人类主动探测电离层的先河。而且该探测原理一直被应用于电离层常规观测研究中。到 1929 年,“ionosphere”(电离层)这一名词被 Watt 正式引用。此后的若干年里,对电离层的周日、季节等电离层形态学方面的研究已成为电离层研究的主要内容。通过观测及理论研究,人们基本了解了电离层形态学方面的内容,并将其用于短波传播领域(张东和,2000)。

电离层不仅保护了地球上的生物免受太阳紫外辐射和宇宙高能粒子的直接作

用,而且对穿过其中的无线电波产生反射、散射、吸收和折射等效应。电离层各层对无线电波的影响有利也有弊。一方面,正常情况下的反射有利于远距离无线电通信的实现和发展;另一方面,电离层的剧烈变化对航空航天、通信和导航等产生严重的危害,可能导致航天器受损和失常、卫星和地面通信设备的中断等(刘瑞源等,1994;袁运斌,2002)。

近三十年来,电子与现代通信等现代科技手段的飞速发展,使许多科学技术的研究和应用与大气对无线电波传播的影响密切相关。目前,与人类生产和生活密切相关的无线电波主要在近地空间传播,它必然要穿过环绕地球的大气层。电离层对航天活动及无线电波传播的影响,已成为电离层乃至整个地球空间环境影响人类生产和生活的重要途径之一。与此同时,新的探测手段的不断出现与应用,极大地促进了电离层基本理论的发展。当前,电离层研究已成为综合各类学科知识的交叉学科,它的发展必将有助于众多基础研究的进步。电离层研究引起了世界各主要国家的关注,也已列为中国空间物理研究的战略主题内容之一。因此,利用卫星和飞船等现代科技手段,进行日地空间环境特别是地球空间环境的探测,掌握电离层的基本结构和变化规律,不仅有利于提高测速、定位、授时、通信和导航等系统的精度,而且对于研究日地空间环境及高空大气各层之间的相互关系和作用、认识和研究包括电离层在内的地球空间环境等方面均具有重要的科学意义(刘瑞源等,1994;袁运斌,2002)。

§ 1.2 电离层探测技术与方法的发展

电离层探测的目的是为了获取有关电离层物理参量如电离层总电子含量(total electron content, TEC)、电子密度、电子温度、离子密度、离子温度等以及它们的时空变化规律和特征,包括周日变化、季节变化、太阳周期变化以及全球分布、区域分布、垂直剖面 and 漂移运动等信息。通过对这些探测结果的研究,揭示电离层的形成过程、形态模式、电离输运、热能输运以及热平衡等物理和动力学机制。电离层探测的理论依据是电离层等离子体对穿过电离层的无线电波所表现出来的电磁现象,如部分反射、等离子体谐振、交叉调制、吸收、相干和非相干散射、多普勒频移、法拉第旋转等现象(熊年禄等,1999)。

电离层探测在电离层研究中有着重要的作用。电离层探测根据不同的分类方法有不同的分类结果。例如,根据探测的位置可以分为顶部探测和底部探测;根据探测仪器所搭载的平台又可以分为地基探测和空基探测两方面。地基探测主要是通过雷达向电离层发射信号和接收回波信号来实现。地基电离层探测主要是探测电离层电子密度最大峰值区(即 F2 层峰区)以下的电离层。空基探测是利用卫星和空间站上携带的探测仪器对电离层进行的探测。电离层探测对于全面了解电离

层的性质、形态、结构以及变化和扰动过程是非常重要的。同时,电离层的常规探测有利于实时监测空间天气的变化,研究空间天气的发生和发展过程,以便更好地对其进行预报。在人类的生产和生活中,电离层探测具有重要的实际和应用意义。

20世纪20年代中期至50年代中期,关于电离层物理特性的探测主要是使用地面测高仪,通过垂直入射方式获取。但这类技术不能进行电离层顶部探测,一般只能获得观测站所在的固定地理位置上电离层电子密度随高度和时间变化的信息,难以获得大尺度电离层的空间结构信息。另外,利用这种探测手段,难以精细地探测中性分子密度大而电子密度小的电离层D层、E层和F层的谷区,无法完全满足电离层研究的需要。

第二次世界大战后,火箭技术日臻完善,人们开始利用火箭携带各种仪器直接测量中性风、电离层、太阳紫外光谱和X射线强度,为电离层光化学过程的研究做出了贡献。但是,火箭测量的某些局限性在这一过程中也同时暴露出来了,例如火箭的费用较高、观测时间有限,难以测量诸如太阳耀斑对高层大气和电离层的效应等电离层短期行为。第二次世界大战期间,雷达技术的快速发展为后来用雷达方法研究电离层提供了一个非常好的手段(尤其是非相干散射雷达)。由于雷达观测可以得到电离层中等离子体的密度、电子和离子温度等物理量,是一种非常理想的电离层探测方法,在电离层物理研究中取得了很多有意义的成果。但是,由于雷达设备复杂,设备维护所需经费巨大,并且不能长时间连续观测,虽然其对电离层物理研究有很大贡献,但对电离层扰动研究并没有太大的意义。

20世纪50年代后期,人类第一颗人造卫星的成功发射,为电离层探测提供了强有力的探测工具,从而大大地促进了高层大气物理探测技术的发展,开辟了电离层物理等空间科学和地球科学研究的新时代。从此,卫星探测成为电离层和其他空间物理研究领域所需数据的主要来源(叶宗海等,1997)。这类探测主要是基于电离层对电波传播的效应,当卫星发射的无线信标穿过电离层时,其相位和振幅受电离层影响,产生多普勒频移或偏振面的旋转以及由传播路径上的不规则结构造成的信号闪烁等,从而实现了人们进行电离层顶部探测和直接测量电离层TEC的愿望。从此,开始了多普勒频移、差分多普勒、法拉第旋转效应以及基于同步卫星的无线电信标等技术在电离层探测中的应用(Bowhill,1974)。许多学者在上述领域进行了有益的研究(何劲等,1991;万卫星等,1998;吴健等,1998;万卫星等,2001;朱文耀等,2004;蔡昌盛等,2006;黄文耿等,2006;黄智等,2006;李强等,2006;沈铎等,2006;吴小成等,2006;章红平,2006;熊波等,2007;袁运斌,2002;Yuan et al,2007a,2007b,2007c;柳景斌等,2008;林剑等,2009;陈军等,2010;王虎等,2011;邓忠新等,2012)。

空间研究对电离层物理最大的贡献在于能直接将各种等离子探针送入电离区域(Bowhill,1974)。电离层探针具有很强的优越性。它具有较高的空间分辨率,

既可进行顶部探测,也可进行底部探测,还可探测到电离层的精细结构。研究电离层对电波传播影响最常用的设备是电子探针,它可测量电离层的电子密度和温度,还可探测到地面测高仪难以探测的 D 层、E 层和 F 层之间的谷区(黄捷,1999)。

信标探测的优点在于:费用低廉,连续性好;射线路径容易确定;同步卫星在特定纬度上具有很好的分辨率,而极轨卫星则在近似固定的经度上提供了很好的纬度覆盖。所以,尽管人们更愿意利用随后发展起来的非相干散射雷达技术代替上述方法测量电离层电子密度,但人们对利用轨道卫星或同步卫星无线电信号的闪烁测量更加感兴趣。在地面上对卫星信号振幅或相位的测量,可用于确定产生闪烁的电离层不均匀体的大小、形状、取向和位置。无线电的空间探测在哨声研究和甚低频与极低频的噪声研究方面所具有的优势,也是其他许多方法无法实现的。另外,卫星观测具有很好的全球覆盖,而非相干散射雷达技术只能获取有限地区的观测结果。作为非相干散射技术重要和有益的补充,卫星探测推动了人们对电离层、磁层、等离子体和中性大气之间的相互关系和所有这些区域的动力学过程的深刻认识(袁运斌,2002)。

近二十年来,许多新的地面和空间探测技术以及电子计算机等现代数据处理手段的出现、发展和应用,进一步推动了电离层研究的深入发展(熊年禄等,1999)。特别是利用卫星和飞船等现代科技手段,进行日地空间特别是地球空间的探测显示出重大作用。尤为引人注目的是,自从 20 世纪 70 年代末美国建立起新型全球定位系统(Global Positioning System, GPS)以来,电离层对无线电波传播的影响特别为人们所关注。电离层 GPS 探测技术的兴起,给电离层研究带来了飞跃式发展。一方面要求了解电离层形态,从而消除 GPS 观测量中电离层的影响,以保证 GPS 的定位精度。另一方面,利用 GPS 研究电离层,具有迄今为止已出现的其他卫星探测技术所无法比拟的许多优点:①GPS 卫星轨道高度约为 2 万千米,利用 GPS 观测所得的电离层 TEC 不仅包括了电离层电子密度,还包括了 2 000 km 以上等离子体层中电子密度的影响,而以往的技术很难做到;②GPS 有 20 多颗卫星均匀分布在天空,地球上绝大部分地区都能连续观测到 4 颗以上的 GPS 卫星,有利于长期连续地监测电离层活动;③目前国际大地测量学协会(International Association of Geodesy, IAG)建立的 GPS 服务网(international GPS service, IGS)已在全球布设了几百个长期观测站,且观测站的数目仍在不断地增加,该系统除了提供原始的观测数据外,还提供了电离层观测的各种资料和产品,是研究电离层的宝贵资源;④利用 GPS 测量电离层 TEC 是目前所有的电离层 TEC 测量手段中精度最高的一种;⑤容易形成地面与空间的观测网络,从不同时间和空间方向获得电离层信息(邹玉华,2004)。

利用 GPS 测量电离层 TEC,一直是近年来电离层探测的一种主要手段。从 GPS 观测导出的电离层 TEC 随时间和空间的变化虽然可以获得对某些电离层结

构的形态特征和位置的估计,但无法得到电离层电子密度的时空分布。而准确的电离层电子密度分布信息,有助于人们了解电离层对磁暴和亚暴的响应以及驱动力变化时电离层响应的时空间尺度等问题,有利于对空间天气现象建模的改进。此外,从电离层电子密度随时间的变化还可以推断有关热层和磁层的信息。1986年美国伊利诺伊大学的 Austen 等在国际上首先提出了电离层层析成像(computerized ionospheric tomography, CIT)的概念,利用该思想并结合极轨卫星的观测信息可重构出电离层电子密度的二维分布图像。由于电离层层析技术适合监测电离层电子密度的大尺度时空分布,且建造和运行费用相对低廉,所以立刻受到了国内外广大电离层研究者的关注(Na et al, 1991; Afraimovich et al, 1992; Andreeva et al, 1992; Fremouw et al, 1992; Kunitsyn et al, 1992; Pryse et al, 1992, 1993, 1995; Kersley et al, 1993; Bust et al, 1994; Foster et al, 1994; Kersley et al, 1994; Fougere, 1995; Kunitake et al, 1995; Kunitsyn et al, 1994a, 1994b, 1995; Markkanen et al, 1995; Mitchell, 1995; Mitchell et al, 1995; Raymund, 1995; Leitinger, 1997; Xu et al, 1997)。

§ 1.3 CIT 技术的国内外研究历史及现状

1.3.1 二维 CIT 技术的研究历史与现状

早期的 CIT 实验主要借助于快速飞行的轨道卫星发射的 VHF 和 UHF 频段的无线电信号,在短时间内实现对待探测电离层区域的一次断层扫描,利用地面上布设的某条经度链上的接收机接收到的卫星信号,求出电离层斜距 TEC,进而反演出待成像区域内的电离层电子密度。这种实验称为地基 CIT 实验。

20 世纪 80 年代末期起,在俄罗斯、西北欧、北美和日本相继设立了实验性的 CIT 台链,这些台链均分布在中高纬地区,主要目的是监测电离层中纬谷的时空变化。

俄罗斯开展 CIT 研究较早,实验工作于 1990 年以来一直持续进行。1990 年和 1991 年实验在俄罗斯境内的一条包含有 3 个测站的台链上进行,3 个测站依次为 Moscow、Kem 和 Verkhnetulomsky。Andreeva 等(1990)利用 3 个测站接收到的 Tsikada 卫星信号导出电离层 TEC,成功地重构了电离层电子密度的二维分布图像。1993 年,实验观测改在斯堪的纳维亚半岛的一条包含 4 个测站的台链上进行,4 个测站依次为 Nurmijarvi、Kokkola、Esrange 和 Tromso。采用同时迭代重构算法(simultaneous iterative reconstruction technique, SIRT)联合实测数据,对电离层电子密度的分布图像进行了 CIT 重构,得到了电离层平静和扰动两种状态下电离层中纬谷形态及其运动变化的二维图像(Afraimovich et al, 1992; Kunitsyn et al, 1995; Markkanen et al, 1995)。

西北欧的 CIT 实验以英国威尔士大学的一个电离层研究组为主进行,最早的实验尝试是在 1986 年秋,即在 Austen 等(1986)提出 CIT 设想之后不久,目的在于利用实测的实验数据验证 Austen 等人的设想。实验只用了两个测站,且只获得了一次卫星通过的记录。尽管如此,借助于同时段的欧洲非相干散射雷达测量,仍重构了一个合理的电离层二维图像。1990 年 12 月,该研究组在英国本土建立了一个包含 4 个测站的 CIT 台链,4 个测站依次为 Aberystwyth、Hawick、Aberdeen 和 Leiwick,并进行了几天的实验观测。1991 年和 1992 年,为了利用欧洲非相干散射雷达和电离层测高仪(ionosonde)数据验证 CIT 结果的可靠性,实验移到斯堪的纳维亚半岛进行。实验过程中共设置了 4 个测站,这 4 个测站依次为 Uppsala、Lycksele、Kiruna 和 Tromso。1995 年又将台链延长到极盖区(Pryse et al,1997)。然后利用乘法代数重构算法(multiplicative algebraic reconstruction technique,MART),重构了该台链上电离层电子密度随纬度和高度变化的二维图像。并将重构的结果与欧洲非相干散射雷达的结果进行了比较,比较结果显示 CIT 重构结果与雷达观测结果符合得很好(Kersley et al,1993;Kersley et al,1994),从而证实了 CIT 结果的可靠性(徐继生 等,1998)。

美国开展 CIT 研究的小组较多。Kunitake 等(1995)介绍了 1992 年 11 月在北美进行的一项 CIT 实验。实验台链上设置了 5 台接收机,并用代数重构算法(algebraic reconstruction technique,ART)对 5 个测站的实测数据进行了反演,反演所得到电离层电子密度剖面与 Millstone Hill 处非相干散射雷达的观测结果进行了比较,比较结果显示两者整体上符合得较好。1993 年末,美国和俄罗斯有关研究单位联合开展了一次 CIT 实验,该实验利用东经 288° 台链上每一测点上设置的 2 台接收机分别采集海军导航卫星系统(navy navigation satellite system, NNSS)和 Cicada 卫星信号。采集的实验数据分别用差分 TEC 法和 MART 重构算法对电离层电子密度的分布图像进行了重构,并将反演结果与同一时段非相干散射雷达所得的电离层剖面进行了比较,特别是 1993 年 11 月 4 日磁暴急始后不久重构的电离层电子密度剖面,显现出与非相干散射雷达的探测结果具有很好的 consistency(徐继生 等,1998)。

在我国,为了研究赤道异常区和低纬地区电离层电子密度的时空变化,武汉大学联合美国伊利诺伊大学以及台湾的中山大学和中央大学,沿着北半球东经 120° 经度链,在低纬地区布设了一条包含 6 个观测站的(徐继生 等,1995)CIT 实验台链,并持续采集了 NNSS 卫星观测数据,然后采用 MART 算法重构了低纬地区电离层电子密度剖面。重构的结果表明,CIT 技术能够较好地显现电离层的赤道异常结构,有利于监测和了解低纬地区大尺度的电离层扰动结构。

在基于极轨卫星的电离层层析中,除了前述的研究者利用的 ART、MART 和 SIRT 算法以外,不同研究者还针对电离层层析的特点分别提出了不同于以往迭

代算法的新的重构算法(Na et al,1991;Markkanen et al,1995;Pakula et al,2012;Fehmers,1996;Na et al,1996;Sutton et al,1996a,1996b;Biswas et al,1998)。Mitchell(1995)、Kunitsyn 和 Tereshchenko(2003)分别对已有的电离层层析算法的特点进行了综合评论。Raymund(1995)和 Frey 等(1998)则利用实测数据对不同算法的反演结果进行了比较和评价。

由于地面观测站分布的几何条件以及电子密度分布的物理性质对地基 CIT 实验的重构过程和所得图像有着严重的影响。一些学者对此进行了深入的研究(Yeh et al,1991;Na et al,1996;Na et al,1994;孙晓安 等,1993;Na et al,1995),并分析了影响电离层图像重构质量的因素,归纳起来有以下几方面:①有限视角;②有限接收机密度,导致谱混迭效应和空间分辨率损失;③有限探测孔径,导致垂直分辨率下降;④非均匀投影样本间隔,将影响重构图像质量(徐继生 等,1998)。

1.3.2 基于 GPS 的三维 CIT 研究现状

基于极轨卫星的电离层层析成像技术只能重构某个固定经度链上电离层电子密度的二维分布图像。实际研究和应用中,无论是电离层时空结构变化的精细监测还是空间大地测量、卫星导航与定位以及网络 RTK 技术,通常都需要高精度的电离层延迟改正信息(Yuan et al,2001a,2002,2004;罗孝文,2007),这就要求我们更全面地了解电离层电子密度的时空分布。

近十多年来,基于 GPS 的电离层层析技术逐渐发展起来。由于 GPS 的前述优点,基于 GPS 的电离层层析技术可以实现三维甚至四维电离层结构的重构(Howe et al,1998),从而克服了二维电离层层析模型的局限性,并逐渐成为一种新的电离层监测手段。随后,国内外研究者先后从理论和方法上对基于 GPS 的电离层层析成像技术进行了深入的研究(Hansen et al,1997;Kunitsyn et al,1997;Leitinger et al,1997;Rius et al,1997;Ruffini et al,1997,1998,1999;Hansen,1998;Howe et al,1998;Hernandez-Pajares et al,1998,2000;Bust et al,2000;Colombo et al,1999,2002;Liu et al,2001a,2001b,2002;Garcia-Fernandez et al,2003;Mitchell et al,2003;Stolle et al,2003;徐继生 等,2003,2005;邹玉华 等,2003;Yin et al,2004,2006;Ma et al,2005;Yizengaw et al,2004;Yuan et al,2005;Fridman et al,2006;Wang et al,2007;Pokhotelov et al,2011;Hirooka et al,2012)。概括地讲,目前使用的电离层层析模型大致可以分为两类:一类是函数基电离层层析模型(Hansen et al,1997,1998;Howe,1998;Liu et al,2001a,2001b);另一类是像素基电离层层析模型(Hernandez-Pajares et al,1998,2000;Rius et al,1997;Ma et al,2005;徐继生 等,2003)。函数基电离层层析模型通常利用一组函数(如球谐函数和经验正交函数等)来描述电离层电子密度的空间分布,而像素基电离层层析则是将待反演的电离层空间离散化成一系列小的像素,然后在所选择

的参考框架和反演时段内,假定每个像素内的电离层电子密度为一常量,从而进行电离层电子密度反演。

Hansen 等(1997)最早明确给出函数基电离层层析公式,并利用随机反演方法和美国 WAAS 系统的 GPS 观测资料联合反演了 80~580 km 高度范围内电离层电子密度分布,在不考虑仪器偏差影响的条件下,反演结果的误差约为 10.4 TECU。随后,Howe 等(1998)将函数基电离层层析模型的反演高度范围扩展到整个电离层高度,借助卡尔曼滤波和模拟的 GPS 观测资料重构了电离层的四维结构。模拟结果显示,在顾及仪器偏差的情况下,利用该四维电离层层析模型能够得到比较好的重构结果。Liu 和 Gao(2001a,2001b)通过把电离层 TEC 平滑模型和函数基层析模型统一起来,提出了一种实时的函数基电离层层析模型,相对于已有的函数基电离层层析模型,该模型计算效率更高。

自从 Kunitsyn(1997)在国际上首次证实了基于高轨卫星系统(如 GPS)的电离层层析技术的可行性以来,像素基电离层层析模式和函数基电离层层析模式一直是平行发展的。Rius 等(1997)在日固系下将电离层离散化为一些小的像素,利用 IGS 站提供的 GPS 资料,首次反演了全球电离层电子密度的时空分布。Hernandez-Pajares 等(1998)针对 Rius 反演结果时空分辨率较低的问题,利用更高的分辨率分别反演了电离层平静状态下和扰动状态下全球电离层电子密度的分布,并获得了磁暴发生期间电离层的层析响应结果。随后,Yin 等(2004,2006)利用实测的 GPS 资料反演了不同强度磁暴发生时电离层电子密度的分布情况。Bust 等(2001)和 Jin 等(2006)将基于 GPS 的像素基电离层层析成像的结果、IRI 模型给出的结果分别与电离层测高仪的观测结果进行了比较。比较结果显示,层析反演所得到的电离层电子密度剖面更加接近电离层测高仪所得的剖面。

在我国,该研究方向刚刚起步。武汉大学的徐继生教授和邹玉华博士(2003)首先在理论上探讨了时变三维电离层层析的数学基础,进而建立了结合地基 GPS 与空基掩星观测的时变三维电离层层析成像重构公式,然后提出了利用相对 TEC 数据和绝对 TEC 资料实现时变三维电离层层析成像的方法(邹玉华等,2003)。

利用电离层层析成像技术反演电离层电子密度过程中,一个比较棘手的问题是可利用的 GPS 观测数据的不充足性,从而导致待研究的电离层空间离散化后部分像素没有任何观测信息,这也就意味着基于 CIT 技术的电离层电子密度的反演问题是一个秩亏问题。在反演问题中,通常认为不满足下述三个条件中的任何一个:①解存在;②解唯一;③解稳定(Tikhonov et al,1997;王宏禹,1988;王振杰,2003)——即为不适定问题。由于电离层电子密度反演过程中秩亏问题的存在,导致电离层电子密度的反演结果不唯一,不满足上述三个条件中的第二个,即电离层电子密度的反演问题是一个不适定问题。为了克服不适定问题给反演结果带来的不利影响,Ruffini 等(1999)提出了一个参数化电离层模型(parameter ionospheric

model, PIM)辅助的卡尔曼滤波法; Bust 等(2001)提出了三维可变数据同化算法(three-dimensional variational data assimilation technique, 3DVAR); Bhuyan 等(2002)提出了广义奇异值分解算法; Stolle 等(2003)提出了基于约束的乘法代数重构算法; Ma 和 Maruyama(2005)提出了一种神经网络重构算法。这些方法虽然都在一定程度上解决了观测数据不足引起的重构图像失真问题, 比较有效地反映了电离层电子密度的时空变化。但是, 为了获取高精度的电离层延迟改正信息, 仍需进一步研究能够更加有效地解决不适定问题的新的电离层层析算法。

§ 1.4 研究意义及主要内容

电离层中存在着复杂的物理现象, 这些复杂现象有着显著的区域特征。在不同的地磁活动和太阳黑子活动条件下以及不同的太阳黑子活动周内, 不同区域的电离层特性表现则不同。虽然人们已经对电离层进行了大量的研究工作, 取得了一些重要的研究结果, 了解了一些电离层现象的发生和发展过程。但对于从科学上认识电离层中发生的复杂现象, 掌握其发展变化规律, 研究空间天气事件对在轨运行的航天器的影响, 为我国的国防建设、航天事业和国民经济服务, 还有待人们进一步深入研究。基于 GPS 的电离层层析成像技术的出现, 为我们利用全球不同 GPS 网络尤其是中国地壳运动观测网络的 GPS 观测数据, 研究电离层的三维时空结构奠定了坚实的基础。

本书充分考虑电离层层析中的实际, 对电离层电子密度反演过程中的不适定问题予以特别关注。针对电离层层析中由于 GPS 观测数据的不足而引起的不适定问题, 展开了深入的研究, 提出了相应的解决方法。在此基础上, 对不同地磁活动条件下电离层电子密度的时空分布特征进行了研究。