



测绘 技术

焦明连 著

发展与教育创新探索

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

江苏高校优势学科建设工程资助项目

江苏高校品牌专业建设工程资助项目

测绘技术发展与教育创新探索

焦明连 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

焦明连教授从事高校测绘教育教学 30 年,以第一作者身份发表学术论文 120 余篇。《测绘技术发展与创新探索》汇集了焦明连教授具有代表性的科研和教学研究论文共 55 篇,内容涉及测绘理论与综述、现代工程测量、变形监测技术、3S 及其集成技术、合成孔径雷达干涉测量、测绘教育创新等,反映了他在上述领域进行理论研究、方法探索及工程实践取得的重要成果,展示了他为测绘事业发展和测绘教育创新所作出的贡献。

图书在版编目(CIP)数据

测绘技术发展与创新探索/焦明连著. —徐州:
中国矿业大学出版社, 2015.12
ISBN 978-7-5646-2916-8

I. ①测… II. ①焦… III. ①测绘学—文集 IV.
①P2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 270846 号

书 名 测绘技术发展与创新探索
著 者 焦明连
责任编辑 史凤萍
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83884895 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 16.75 字数 418 千字
版次印次 2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷
定 价 36.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

序

当今世界科学技术日新月异,竞争日益激烈。国家的发展,经济的繁荣,越来越取决于劳动者的素质,取决于各类人才的数量和质量。站在承前启后、继往开来的新起点上,我们必须审时度势,抢抓机遇,攻坚克难,奋发有为,全力以赴推进高等教育改革。要从惯性思维中解放出来,克服传统路径的依赖,推进观念更新和方式转变,在解放思想中集中智慧、凝聚共识,推动教育创新,着力提高人才培养质量。因此,高校教师必须适应时代的要求,承担起历史赋予我们的责任与使命。

首先,做学习型教师。“问渠哪得清如许,为有源头活水来”,要成为学生的良师益友,就应该具有良好的素质和深厚的知识。只有学习型的教师,才能不断充实自己,不断超越自我。为适应人类的知识快速增长和加速更新,教师不能再把单纯的知识传递作为教学的主要任务,而应把形成学生正确的学习态度、方法以及灵活的知识迁移的能力作为主要任务,教师对学生获取知识过程的关心应甚于对他们掌握知识结果的关心。要在学习中与学生共同成长,让教育充满思想,让思想充满智慧,让生活充满人性的光辉。

其次,做研究型教师。研究型教师首先应具有较强的研究意识和研究能力,在教育教学中勤于反思、善于反思,能不断地发现问题、提出问题、分析问题、解决问题,并能自觉地运用先进的教育思想和方法指导实践,改进自己的实践行为,积极探索创新,提高教育教学效果。研究型教师在教育领域中,能积极主动地反思自己的教育教学行为,具有职业敏感性、反思意识、合作精神和科研意识,及时发现教育教学工作中的问题,针对问题积极探索研究,主动吸收教育科学理论和同行经验,提出新的切实可行的改进方法,不断地改进自己的教育教学。

第三,做智慧型教师。智慧是个体生命活力的象征,是个体在一定的社会文化心理背景下,在知性、理性、情感、实践等多个层面上生发,在教育过程和人生历练中形成的应对社会、自然和人生的一种综合能力系统。它不是一般意义上的聪明,甚至也不只是心理学概念中的智商,它是每个个体安身立命、直面生活的一种品质、状态和境界。我见识过许多教育的名家大师,也感受到了许多同事在教学实践中的睿智。智慧型教师应该是每一个从事教育人毕生的追求,但他不是心血来潮时的一蹴而就,需要我们专心学习,成为“学者”;用心创造,

成为智者;潜心研究,成为行家;精心反思,成为专家。

我和焦明连教授相识多年,在教育部高等学校测绘学科教学指导委员会组织的诸多活动中合作共事并成为相知相契的益友,是测绘教育界最活跃最值得尊重的学者之一。他是一个善于学习的教师,具有开阔的人文视野、精深的专业知识和一定厚度的教育理论修养。他是一个刻苦钻研的学者,在测绘地理信息学科和测绘高等教育领域的研究成果和学术观点,具有一定的指导性和影响力。他是一个充满智慧的挚友,心灵通透和光明,待人爽直而诚挚,心胸宽广,乐于助人,善于交流,深得“测绘圈”朋友的喜爱和尊重。《测绘技术发展与创新探索》一书是他从教30年学习、研究和智慧的结晶,凝聚了他辛勤耕耘、潜心学问的点点心血,映现出他求索、奋进、创新的风采。我衷心地祝愿并坚定地相信焦明连教授的不懈追求与勤奋创新一定會在高等测绘教育事业上再出佳绩。

翟翔

中国测绘地理信息学会测绘教育委员会秘书长
教育部工程教育专业认证专家
教育部测绘领域卓越工程师教育培养计划专家组成员
解放军信息工程大学教授

2015年4月

目 录

测绘理论与综述

GNSS 掩星探测大气的研究现状及进展	3
基于 GNSS 的电离层模型研究进展	7
基于聚类分析的多子波优化重定算法	12
地理信息系统的技术发展及应用	16
推进智慧城市建设的战略思考——以连云港市为例	21
现代测绘技术的内涵与发展	26
信息化测绘体系的内涵与建设	30
中国 2000 大地测量基准及其实施	36

现代工程测量

全站仪圆柱偏心测量的原理及精度分析	43
全站仪自由设站应用于航道控制测量的图形研究	46
应用全站仪对边测量功能进行线路横断面测量的方法和精度	49
数字城市基础测绘框架构建方案——以连云港市为例	53
数字城市基础地理信息平台的构建——以连云港市为例	58
论井下 EDM 导线的等级和精度标准	63
论低等 EDM 导线的技术标准	68
基于灰色聚类分析的矿山环境质量评价	73

变形监测技术

AR 模型在建筑物沉降监测中的应用研究	83
基于全站仪的圆形建筑物倾斜观测的方法和精度	89

基于小波的灰色预测理论在大坝安全监测中的应用	93
矿区 GPS 控制网投影变形的处理	97
矿区地面沉降预测预警系统开发	101
三维激光扫描技术在地铁隧道变形监测中的应用	106

3S 及其集成技术

GNSS 气象探测技术及其应用	111
GPS RTK 高程用于航道测量的研究	115
GPS RTK 技术在临海产业区测量中的应用	119
POS 技术在数码航摄影像制作 DOM 中的应用	123
基于 GIS 的公交线路优化分析	127
基于 GPS/PDA 技术的土地调查系统设计与实现	132
基于小波方法和 Kriging 估计的 GPS 高程转换方法	138
连云港海域赤潮灾害识别研究	143

合成孔径雷达干涉测量

GPS 与 InSAR 数据融合方法及其应用	149
用 PS InSAR 技术进行形变监测的研究	153
基于 GPS-InSAR 集成技术地表形变的监测	157
基于 InSAR 技术的煤矿区数字高程模型的建立	162
基于幅度信息的影像配准方法	166
星载 ScanSAR 干涉测量研究	170
星载 ScanSAR 模式成像算法分析	174

测绘教育创新

“卓越计划”视域下校企联合培养测绘人才的机制研究	181
CDIO 理念下大地测量学基础教学改革与实践	184
GIS 专业大学生职业生涯设计问题的探索	189
测绘工程专业产学研结合毕业设计模式的探索与实践	192

测绘工程专业大学生综合技能竞赛的实践与创新·····	195
测绘工程专业卓越工程师教育培养模式的研究·····	199
产学合作教育培养测绘应用型创新人才的探索·····	203
从注册测绘师制度谈测绘教育的改革·····	207
关于“测量学”多媒体教学的辩证思考·····	210
基于就业导向的“双证书”教育的实践与思考·····	213
基于卓越测绘工程师培养的“双师型”教学团队的打造·····	218
美国密苏里大学堪萨斯分校考察总结与启示·····	222
全天候多功能测量实验场的建设研究·····	229
数字地球背景下测绘专业人才培养模式的构建·····	233
谈测量学教材建设的辩证分析·····	236
专业认证背景下测绘工程专业建设研究·····	239
卓越测绘工程师企业培养方案研究·····	245
“卓越计划”视域下高校立德树人的现实途径·····	249
参考文献·····	253



测绘理论与综述

GNSS 掩星探测大气的研究现状及进展

摘要: 与传统的无线电探空、雷达探测等手段相比,GNSS 掩星技术为大气探测提供了一个强有力的工具,其具有无校准、全天候、精度高、垂直分辨率高、全球均匀覆盖等特点。本文介绍了利用 GNSS 掩星技术获取地球大气温、压、湿等相关参数大小的研究现状,同时,提出了 GNSS 掩星技术在气候研究领域的发展方向,将拓宽 GNSS 掩星技术在全球气候变化研究中的应用。

关键词: GNSS;掩星技术;大气探测;雷达

GNSS(包括 GPS、GLONASS 和 Galileo 等导航系统)掩星技术自被(美国)国家航空和宇宙航行局采用研究行星大气和电离层以来,已有 40 多年的发展历史。掩星技术是利用低轨卫星(Low Earth Orbit,LEO)上安置的 GNSS 接收机接收信号的幅度、伪距和相位数据。随着 GNSS 和 LEO 卫星的相对运动,电磁波将完成从大气顶部直至地面的垂直扫描过程。结合 GPS 掩星观测数据和卫星精密轨道资料,可反演出中性大气参数(大约 0~60 km 的密度、温度、压力、位势高度和水汽含量等)。与传统的卫星探测、无线电探空、雷达探测等手段相比,GPS 掩星探测具有精度高、垂直分辨率高、全球均匀覆盖等优点。目前,已发射进行 GNSS 掩星技术研究的低轨小卫星有:美国 GPS/MET、德国 CHAMP 计划、阿根廷 SAC-C 计划、丹麦的 Orsted 计划、美国和中国台湾联合的 COSMIC 计划、澳大利亚 FedSat 计划,即将发展的是欧洲 ACE+ 计划。这些研究计划主要目的是遥感中性大气的气象场,尤其是水汽的全球分布,为全球数值天气预报服务。随着欧洲 Galileo 计划的执行、俄罗斯 GLONASS 系统的完善、中国北斗导航系统的发展、现在 GPS 的运行良好以及其他国家导航系统的提出,届时空中将会出现 100 多个 GNSS 卫星,同时伴随 LEO 卫星的增多且每个低轨卫星跟踪 GNSS 卫星能力增强,则全球一天发生的掩星事件会更多,空间分辨率会更大,无疑这海量的掩星观测数据将极大提升空间环境预报的水平,促进空间物理学研究的发展。

1 GNSS 掩星探测大气的基本原理

GNSS 掩星技术是利用安装在低轨卫星上的 GNSS 接收机来接收 GNSS 卫星信号,当卫星信号与 LEO 卫星上 GNSS 接收机经过地球上空对流层时,卫星信号会发生折射,这一测量大气折射的方法叫做掩星法。

GNSS 高精度测量中,最基本的观测量是 GNSS 卫星至接收机天线无线电信号的传播时间,这一传播时间受大气影响而产生额外延迟,这种延迟主要是电离层和中性层大气层作用的结果,其中电离层延迟可以利用双频信号将其影响消除,根据大气中电磁波折射与大气的温、压、湿等参数的关系,用 GNSS 接收机观测到的 Doppler 频移加上接收机本身和 GNSS 卫星的位置和速度信息,反演大气折射率,最终得到温、压、湿等相关参数。通过对含有折射信息的数据进行处理,可计算出大气折射量而估计出我们需要的气象元素的大小。

2 研究成果及进展

2.1 影响反演大气参数的误差

欲通过 GNSS 掩星技术得到正确或接近的大气参数,则必须考虑与 GNSS 卫星、LEO 以及无线电信号所通过的路径等引起的误差。

(1) 与硬件环境相关的误差,如接收机和发射机的钟差、卫星轨道误差、相对论效应、周跳及信噪比等。在进行 GNSS 数据处理时,经常采用差分法(单差法、双差法和三差法)来消除接收机和发射机的钟差和周跳等,但是无论用何种方法,都会引入新的误差源,如每条差分链上的热噪声等。卫星轨道误差主要包括卫星径向位置误差和沿信号路径方向速度误差,通过模拟研究,在对 0~30 km 的地球大气反演中,50 m 以内的 LEO 卫星径向误差引起的温度误差绝对值小于 0.2 °C,气压反演误差的绝对值小于 6 mbar,而径向速度误差达 1 mm/s 时,其对气压误差的绝对值在 0.5 mbar 以内,实际上现在 GPS 卫星的综合轨道误差在 cm 级范围内,故认为轨道误差对大气反演结果的影响是可忽略的。对于周跳,可用 GNSS 测地软件进行修复,也可用一些简化的方法进行修整。相对论效应可分成动力学和几何测距两部分,前者可在定轨过程中改正,后者在测距中改正。对于信噪比,则是通过硬件制作来进行降低,如在 LEO 接收机上采用锁相环、开环技术和飞轮技术,如 COSMIC 计划。

(2) 与传播路径相关的误差,如电离层误差、超折射现象以及多路径误差。电离层误差是利用 GNSS 双频或折射角组合法来进行改正的,但效果不好,主要是因为该方法只能消除电离层效应的频率倒数的二次项,其引起的残余误差对反演折射角廓线的影响随着高度增加而变大。超折射现象是 GNSS 掩星技术的困难问题之一,主要发生在低对流层,主要是因为大气折射率的垂直梯度太大以至于信号路径的曲率小于大气的曲率半径,信号弯曲落入地面。为降低超折射现象对大气反演的影响,建立了相应的广义 Abel 变换,有效地改进了超折射层下部的折射率剖面,但在超折射层内效果不理想,关键在于不知道超折射层的具体位置以及超折射层内的大气垂直梯度物理模型。多路径误差主要发生在低对流层中,主要包括由接收机附近的物体(如水面)对 GNSS 信号的反射所引起的误差,以及从同一发射出的多条信号通过地球大气同时到达接收机的误差。

2.2 几何光学反演

在 GNSS 掩星探测大气中,几何光学反演是由于 GNSS 信号的波长相对于地球大气太小而假设 GNSS 信号波长近似为零,且其衍射效应可忽略,在此条件下,可用 Abel 逆变换来得到大气反演参数,其实,几何光学反演方法是对菲涅耳衍射的一种近似,近似认为 GNSS 卫星信号波长远远小于介质尺度,LEO 收到的信号仅仅来自于理想、稳定、单一的电磁波束,接收机处没有散焦与聚焦现象产生,但在实际情况中,中低纬度低对流层区域水汽含量丰富,且分布不均,造成信号急剧变化,GNSS 信号穿过大气时往往产生多路径效应,衍射、散射、超折射等现象影响信号的传播与接收,导致信号捕获困难,甚至跟踪丢失而信号中断,从接收机接收到的数据来看,相位和振幅在低对流层出现闪烁。总之,几何光学反演难

以区分出多条不同的信号路径,因而无法准确地计算出信号弯曲角与对应的切点高度,温度与水汽的模糊关系造成反演困难,此时 Abel 积分变换就勉为其难。

2.3 物理反演

针对反演中的多路径问题,与几何光学反演方法对应,Gorbunov 等人提出了物理光学反演方法,其中包括:全息方法、后向传播方法、正则变化方法、菲涅耳衍射方法及全谱方法,其中后向传播方法是基于二维 Helmholtz 方程边值问题提出,该法能分离多路径效应,但不足在于必须在单路径区域内找出辅助轨迹的值。正则变换法则是直接把观测场映射到碰撞参数上,该法能更精确地反演剖面。与正则变换法相似的是全息方法,其特点是直接从完整的复信号进行单一的 Fourier 变换得到瞬时频率,与正交变换法的区别在于全息方法是直接沿 LEO 的轨迹对观测信号进行操作。菲涅耳衍射方法则是把地球大气看成是一个薄屏近似,是以菲涅耳衍射理论为基础,通过菲涅耳变换求解相位屏上的复数信号,将重叠的第一菲涅耳带分开,消减多路径影响,同时提高反演廓线的垂直分辨率,通过算例,发现菲涅耳衍射方法在一定程度上可以减少多径效应带来的误差,其结果与无线电探空对比更为接近。总之,物理反演有效地改进了低对流层的反演精度。

2.4 资料同化

资料同化即是利用物理上的约束和时间连续性的约束,将各种时空上不规则的零散分布的观测数据融合到基于物理规律的模式中去。最早的资料同化方法是比较简单的插值方法,比如多项式插值、线性插值、逐步订正法等,这些方法都没有充分利用资料和模式结果的误差信息,同时也缺乏理论基础,直到 1963 年 Gnadni 提出了最优插值法,资料同化方法才有了基于统计估计理论的基础。目前的资料同化方法根据其理论可以分为两类:一类是基于统计估计理论的,如最优插值、卡尔曼滤波、卡尔曼光滑、集合卡尔曼滤波等;另一类是基于变分方法的,如三维变分、强约束四维变分和弱约束四维变分等,一般变分方法的思想:在给定的约束条件下,使分析场与观测场的差值的平方和达到最小。从 LEO 卫星观测的掩星数据能反演地球大气的水汽、温度和气压剖面,而这些资料对大气预报而言,是十分重要的数据资源,其途径是资料同化技术。一维变分同化可将 GNSS 掩星资料进行有效的改进,得到更准确的大气剖面,Matsumura 和 Zou 等人研究了掩星数据的三维变分同化,得到了有价值的结论。

3 存在问题及发展方向

(1) 一维变分同化是 GNSS 掩星数据服务于大气预测的主要途径,同时由于 L_1 和 L_2 原始相位和振幅同化不需要预处理且不包含物理假设,同时仅需精密轨道和电离层模型的附加资料,随着精密定轨和电离层模型方法的改进,这些将得到很大提高,面临的难题是映射算子的选择和耗费机时。

(2) 四维变分方法是三维变分方法的推广,所不同的是观测具有时间分布,其目标泛函具有下列形式

$$J(\mathbf{x}) = J_b(\mathbf{x}) + J_o(\mathbf{x})$$

$$= (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \sum_{i=0}^n (\mathbf{y}_i - \mathbf{H}_i [\mathbf{x}_i])^T \mathbf{R}_i^{-1} (\mathbf{y}_i - \mathbf{H}_i [\mathbf{x}_i])$$

其梯度为:

$$\nabla J(\mathbf{x}) = \nabla J_b(\mathbf{x}) + \nabla J_0(\mathbf{x}) = 2\mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) - 2 \sum_{i=0}^n \mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} (\mathbf{y}_i - \mathbf{H}_i [\mathbf{x}_i])$$

其中下标 i 表示任意给定的时刻, 分布于时间段 $[0, T_N]$, $\mathbf{x}$ 为控制向量, $\mathbf{x}_b$ 为背景场, $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{R}_i$ 分别为背景误差协方差矩阵和观测误差协方差矩阵, $\mathbf{H}_i$ 为观测算子, $\mathbf{y}_i$ 和 $\mathbf{x}_i$ 分别为 i 时刻的观测和状态预报向量。状态预报向量 $\mathbf{x}_i$ 满足模式控制方程

$$\forall i, \mathbf{x}_i = P_{0 \rightarrow i}(\mathbf{x})$$

其中 $P_{0 \rightarrow i}$ 为从起始时刻 0 预报到 i 时刻的模式预报算子, 因此四维变分同化是一个非线性约束的最优化题, 一般情况下非常难以求解, 想法使之成为一个无约束二次型的最优化问题, 数值求解相对容易得多, 但是在这种情况下, 使用四维变分方法最大的障碍就是控制空间的维数。如果达到了这一目的, 则能有效将四维变分方法引入 GNSS 掩星探测大气中, 随着 LEO 卫星掩星事件的增多, 那么就能真正实现全球化实时天气预报的目的。

(3) 无线电探空仪能提供很好的空间分辨率, 水汽辐射计(WVR)能得到水汽结构, 但两者都昂贵, 而 LEO 卫星多个掩星数据能提供水汽、温度的三维空间分布, 且能为许多环境应用(如气象、水文和气候监测)所需要的短暂天气变化情况, 此时可考虑利用无线电探空仪和水汽辐射计得到的观测值通过各种变换(如 Niell 映射函数)得到不同角度的斜延迟, 然后结合水汽、温度的三维空间分布, 利用层析方法可得空间点的大气参数分布。

(4) 由上述可知, 广义 Abel 变换可有效地改进超折射层下部的折射率剖面, 但在超折射层内效果不理想, 关键在于不知道超折射层的具体位置以及超折射层内的大气垂直梯度物理模型, 故此也是一个需要研究的课题。

基于 GNSS 的电离层模型研究进展

摘要: 在利用全球导航卫星系统 GNSS(GPS、GLONASS、Galileo 等卫星定位系统)进行精密定位和导航时,电离层延迟误差是影响其精度和准确度的主要误差源之一,故对电离层模型研究至关重要。本文将电离层模型分成了经典电离层模型和现代电离层模型,并对经典电离层模型进行了比较,重点介绍了目前全世界电离层模型的研究热点、存在问题及研究方向。

关键词: 全球导航卫星系统;电离层;模型;定位;导航

1 引言

电离层是离地球表面约 60~1 000 km 范围内的地球大气。在太阳紫外线、X 射线、 γ 射线和高能粒子等作用下,大气分子随高度逐渐电离而导致大量自由电子和离子产生,呈现混沌状态,即电离层在时间域和空间域的分布具有随机性、不平衡性、无序性和非线性等特征。全球导航卫星系统 GNSS(GPS、GLONASS、Galileo 等卫星定位系统)信号穿过电离层时,其传播速度会发生变化,变化程度主要取决于电子密度和信号频率。对 GNSS 测量而言,这种延迟误差在天顶方向可达十几米,在高度角为 5° 时可达 50 m,故电离层的延迟改正模型研究对 GNSS 导航定位是不可忽略的,是必须研究的课题之一。

目前,为了满足现代空间大地测量,人们根据电离层的各种物理性质和统计性质建立了许多的电离层模型,如国际参考电离层模型(IRI)、Klobuchar 模型等。尽管电离层延迟改正模型如此之多,但是尚有许多不足之处,如许多模型修正效果只能达到 80%。随着空间需求的不断提高,随着大规模的 GPS 跟踪网的建立、低轨卫星的发射(如 COSMIC 计划),有必要对电离层更加精化,为此,学者们正在研究建立区域型、全球型、多维的和实时的高精度电离层模型。本文基于此,将电离层模型分成了经典电离层模型和现代电离层模型,对经典模型进行了比较,重点介绍目前全世界电离层模型的研究热点、存在问题及研究方向。

2 经典电离层模型

经典电离层模型分为统计性、经验性和物理性的三种类型,主要包括国际参考电离层模型(IRI)、Bent 模型, GPS 采用的 Klobuchar 模型, Galileo 系统采用的 Nequick 模型和 VTEC 模型。表 1 对经典电离层模型做了比较。

从表 1 可看到,经典电离层模型能建立全球性或区域性的电离层模型,但经典电离层模型只能反映平静电离层的平均状态,其修正效果大都在 80%左右,无法反映电离层的瞬时变化如磁暴现象、电离层扰动和不规则体的发生,同时无法融合利用 GNSS 掩星技术得到垂直尺度的电离层信息。

表 1 经典电离层模型比较

性质 模型	提出者	提出时间	优点	缺点	改正效果
IRI 模型	IRI 工作组	1960	1. 全球电离层模型; 2. 数据源多,采用了多个大气参数模型; 3. 适合单频用户	1. IRI 是一种统计预报模型,只反映电离层的平均状态; 2. 较少或没有采用中国区域的电离层资料	约 80%
Bent 模型	Bent	1978	适合单频用户	1. 统计经验模型; 2. 由于描述全球电离层特征的 6 个系数不是每天更新,故其不能满足各类用户的高精度定位要求	70%~90%
NeQuick 模型	ARPL And IGAM		1. 适用于 Galileo 系统的单频用户; 2. 提供一种描述三维电离层图像新方法	1. 在低纬度地区偏差较大; 2. 采用太阳活动参数都是月平均值	约 85%
Kolbuhcar 模型	Kolbuhcar	1987	1. 适合 GPS 用户,方便; 2. 可建立全球电离层延迟模型	1. 统计经验模式; 2. 全球的平均改正效果较差	50%~85%
VTEC 模型	Hardy	1977	1. 目前广泛应用的局部电离层模型; 2. 在时间更新率和改正精度等方面都满足 WAAS 规范	1. 在统计意义上描述平静状态的电离层状态; 2. 不能反映电离层赤道异常现象	80%~90%

3 现代电离层模型

3.1 层析模型

电离层 CT 技术是一个利用 GNSS 信号来估计电离层电子密度的方法,其基本原理是建立在 Radon 变换和傅立叶切片原理的基础上,利用 GNSS 观测数据重建电离层电子密度,方法主要有变换法和级数展开法。由于电离层层析可能具有实现全球尺度上电离层时空演变的优势,所以立刻为电离层研究、无线电通信和射电天文学等领域的众多工作者所关注。电离层 CT 技术不仅适用于测量电离层的异常变化如赤道异常等现象,以及大尺度电子浓度的分布和时空变化,而且能在使用相对简单和廉价仪器设备基础上进行全球电离层

监测。电离层 CT 技术推动了电离层研究的发展,现在已有一些成果,如 E. Yizengaw 等对 GPS 总电子含量利用层析技术获得了平均电离密度剖面,Orhan Arikan 等则利用层析技术对 IRI 模型进行了改善。

在层析技术中,观测量是模型参数沿信号射线路径的积分,电离层层析解空间的模型参数是总电子含量 TEC,其物理方程可广义地写成:

$$\text{TEC}_i(\mathbf{r}, t) = \int_l N(\mathbf{r}, t) dl + \epsilon_i(\mathbf{r}, t) = \sum_j x_j(t) \int_l \varphi_j(\mathbf{r}) dl + \epsilon_i(\mathbf{r}, t) \quad (1)$$

上式中, $\mathbf{r}$ 是位置矢量, t 是时间, x 是时间相关的系数, φ 是位置相关的基函数, ϵ 是量化误差,下标 i 是观测射线的序号, l 是斜向信号路径。

(1)式可写为矢量形式,则为:

$$\text{TEC} = \mathbf{A}\mathbf{X} \quad (2)$$

通过求解该方程,可求空间各网格内的电离层电子密度。

从层析技术的数学基础 Randon 变换来看,一般要重建图像,需要完全投影数据,而完全投影数据指投影角度均匀分布在 180° 内,在每个角度下射线都要覆盖整个探测区域而且均匀采样。由于受观测条件的限制,电离层 CT 显然不满足完全投影数据的条件:首先,测站数目有限且分布不均;其次,由于折射的影响以及地球曲率的关系,要删除精度不够的低仰角射线。近年来兴起的 GPS 无线电掩星技术在电离层电子密度水平梯度可以忽略的条件下,可以获得高分辨率的电子密度垂直分布剖面,将之与 GPS 地面台网观测结合起来,可以改善但不能消除数据不完全的问题。因此,对于不完全投影数据的电离层重建图像,是一个需要研究的问题,此时可考虑利用内插法、压缩恢复法或投影域法来改善重建图像的质量。

3.2 神经网络模型

神经网络是由人工建立的以有向图为拓扑结构的动态系统,它通过对连续或间断连续的输入状态作相应处理,目前在神经网络研究方法上已形成多个流派,最富有成果的研究工作包括:多层网络 BP 算法、Hopfield 网络模型、自适应共振理论和自组织特征映射理论等。神经网络能充分逼近任意复杂的非线性关系,采用并行分布处理方法,可学习和自适应不知道或不确定的系统,具有高速寻找优化解的能力,同时具有很强的鲁棒性和容错性。

电离层在时间域和空间域具有随机性、不平衡性、无序性和非线性等特征,尤其电离层抖动及不规则体参数反演,经典模型经常无能为力,而神经网络是一种非线性映射函数,故现在已用于电离层模型中。Lee 将神经网络用于高纬度和电离层低层,以日期、时间、当地电磁 K 指数、AP 指数、太阳高度角和压力为输入参数,电子密度为输出参数建立了电离层的神经网络模型(图 1),效果较理想。Elijan 应用神经网络建立了 M(3000)F2 的全球预测模型,并与 IRI 模型进行了对比,结果显示了神经网络具有很大潜力。John Bosco Habarulema 利用神经网络在南非建立了区域性的电离层模型,M. Friedrich 建立了一个经验性的、基于单站的电离层模型。

尽管神经网络模型在电离层方面取得了一些初步效果,但也存在一些问题,如电离层的输入参数选择、神经网络算法优化、神经网络模型和传递函数的选择以及模型结果的检验方法等,解决的方法是将小波方法引入神经网络,即基于小波神经网络的电离层模型,或将遗