

· 学科进展与展望 ·

## 电离层层析成像技术的研究进展\*

闻德保

(长沙理工大学交通运输工程学院, 长沙 410004)

**[摘要]** 作为日地空间环境的重要组成部分,电离层对无线电通讯、卫星导航与定位以及人类的空活动有着重要的影响。电离层层析成像技术的出现,为探测电离层的时空结构开辟了广阔的前景。目前,层析成像(Computerized Tomography,简称为CT)技术在电离层探测上的应用还很薄弱,很多具体工作还没有开展。为了对CT技术在电离层探测上的应用有个全面、系统的了解,本文对近年来CT技术在电离层领域的研究及进展进行综述,并对电离层CT技术中存在的问题进行了分析,同时对未来待开展的工作进行了展望。

**[关键词]** 电离层,层析成像,GPS,研究进展

### 1 引言

电离层是日地空间环境的重要组成部分,当电磁波信号穿过其中时,会产生延迟现象。为了提高电离层延迟改正的精度,需要了解电离层电子密度分布的时空变化信息。为此,国内外研究者先后采用了电离层测高仪和雷达等技术对电离层进行研究,利用上述技术,由于观测设备探测高度和费用的局限性,难以形成大尺度的电离层监测网络。卫星技术尤其是全球导航卫星系统(Global Positioning System,简称为GPS)的出现,为监测大尺度电离层时空结构提供了前所未有的发展机遇。利用GPS测量电离层总电子含量(Total Electron Content,简称为TEC),一直是近年来电离层探测的一种主要手段。由于计算电离层TEC的模型是一种薄层假设模型,因而,电离层TEC变化信息只能反映电离层水平结构的变化情况,而不能给出电离层垂直结构的变化信息。1988年,美国伊利诺伊大学的Austin等<sup>[1]</sup>在国际上提出了电离层层析成像(Computerized Ionospheric Tomography,简称为CIT)的思想。该思想是利用现代卫星资源,在地面设置一系列接收站网,实现对广大电离层空间区域的断层扫描,进而用CT技术反演测量数据,得到电离层电子密度等物理量的空间分布图像,重构图像不仅能够

反映电离层水平结构的变化,而且能够准确地反映电离层垂直结构的变化。这种技术由于克服了前述的电离层探测手段的局限性,在近20余年来逐步受到关注并发展起来,正在逐渐成为监测大尺度电离层结构的一种强有力工具。本文对近年来CT在电离层研究方面的进展进行综述,对存在的问题进行了分析,并对未来工作加以展望。

### 2 电离层CT技术发展的两个阶段

按照研究所用卫星信号的不同,电离层CT技术的发展可以分为:基于极轨卫星的电离层CT和基于高轨卫星的电离层CT两个阶段。

早期的CIT研究主要利用快速飞行的极轨卫星发射的无线电信号,在短时间内实现对待探测区域内的电离层进行一次断层扫描,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,进而反演出电离层电子密度。利用极轨卫星观测虽然能够反演大尺度电离层结构的变化,但由于地面用以接收极轨卫星的接收机通常沿着固定的经度链布设,因此,基于极轨卫星的电离层CT技术只能反映电离层随纬度和高度的变化,经度方向上的变化难以反映出来。

GPS技术出现以后,随着全球IGS站和各个区域地面观测站的建立,基于GPS的电离层层析技术

\* 国家自然科学基金和湖南省教育厅优秀青年基金资助项目。  
本文于2009年9月1日收到。

在上个世纪90年代后期逐渐兴起。由于GPS卫星是一种全天候的高轨卫星系统,因此,利用密集的GPS观测站接收到的卫星信号并借助CT技术,不仅能够反映大尺度电离层水平结构的变化,而且能够反映电离层垂直结构的变化信息,并逐渐成为一种新的电离层探测手段。

### 3 国际电离层CT技术的研究进展

#### 3.1 基于极轨卫星观测的电离层CT技术的研究进展

自Austen等提出电离层CT设想不久,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<sup>[2,3]</sup>。

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。实验最初在俄罗斯境内的一条布设了3台测站的台链上进行,1993年,实验观测改在斯堪的纳维亚半岛的一条包含4站的台链上进行,并利用同时迭代重构算法对电离层电子密度的分布图像进行了重构,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<sup>[4]</sup>。

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等提出CIT设想不久,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2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的测量数据,仍然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,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数据验证CIT结果的可靠性,实验移至斯堪的纳维亚半岛进行。实验过程中共设置了4个测站,1995年又将台链延长到极盖区<sup>[5]</sup>。然后利用乘法代数重构算法,重构了该台链上电离层电子密度随纬度和高度变化的2维图像。并将重构的结果与欧洲非相干散射雷达的实测结果进行了比较,比较结果显示CIT重构结果与雷达观测结果符合得很好<sup>[6]</sup>,从而证实了CIT结果的可靠性。

美国开展CIT研究的小组较多。Kunitake等<sup>[7]</sup>介绍了在北美进行的一项CIT实验。实验台链上设置了5台接收机,并用代数重构算法对5个测站的实测数据进行了反演,并将反演所得到电离

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<sup>[8]</sup>,该实验利用东经288度台链上每一测点上设置的两台接收机,分别采集NNS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一致性。

在实验过程中,地面测站分布的几何限制以及电离层电子密度分布的物理特性对重构过程和重构图像有着严重的影响,同时,由于电子密度分布的动力学特性,基于电子密度静态分布假设设计的算法重构的图像可能发生畸变。针对上述问题,Raymund等<sup>[9]</sup>学者定性地分析了限制电离层CT成像能力和影响重构图像质量的因素并提出了相应的解决办法。

#### 3.2 基于GPS观测的电离层CT技术的研究进展

近10多年来,基于GPS的电离层层析技术逐渐发展起来。Kunitsyn<sup>[10]</sup>在国际上率先证明了利用GPS和CT技术结合可以实现3维甚至4维电离层结构的重构,从而克服了2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模型和方法上对基于GPS的电离层层析成像技术进行了深入的研究。

Hansen等<sup>[11]</sup>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<sup>[12]</sup>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,并借助于卡尔曼滤波和模拟的GPS观测资料,重构了电离层的4维结构。模拟结果显示,在顾及仪器偏差的情况下,利用该4维电离层层析模型能够得到比较好的重构结果。Liu和Gao<sup>[13]</sup>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GPS基层析技术兴起以来,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<sup>[14]</sup>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<sup>[15]</sup>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<sup>[16]</sup>和 Andreeva 等<sup>[17]</sup>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<sup>[18]</sup>和 Jin 等<sup>[19]</sup>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,GPS 基电离层 CT 技术反演所得到的电离层电子密度剖面更加接近于电离层测高仪所得的剖面。近期, Lee 和 Kamalabadi<sup>[20]</sup>、Garcia 和 Crespon<sup>[21]</sup>及 Hobiger 等<sup>[22]</sup>针对电离层层析过程中由于观测数据稀少引起的不适定问题,分别提出了相对应的解决方法,有效地克服了层析反演过程中的不适定问题。

#### 4 电离层 CT 技术在中国的研究近况

我国电离层 CT 技术的研究起步相对较晚。1994 年,为了研究赤道异常区和低纬度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 度经度链,在低纬地区布设了一条包含 6 个观测站的 CIT 实验台链<sup>[23]</sup>,并持续采集了 NNSS 卫星观测数据,然后采用乘法代数重构算法重构了低纬地区电离层电子密度的时空分布,重构的结果较好地显现电离层的赤道异常结构。针对传统 CIT 算法将相位积分常数和迭代初值在迭代之前予以确定导致的重构图像不理想的问题,吴雄斌等<sup>[24]</sup>提出了一种联合使用差分多普勒相位和差分多普勒频率数据,将迭代初值的确定以及相位积分常数的计算与图像的重构过程联系起来的新的算法,该算法最大限度地利用了实测数据信息,明显提高了计算相位积分常数的准确性和一致性,初值的选择也更加合理,提高了重构结果的可靠性。

基于 GPS 的电离层 CT 技术出现以后,徐继生和邹玉华<sup>[25]</sup>在国际上率先推导了结合地基 GPS 与掩星观测的时变 3 维电离层层析成像重构公式,为进一步研究时变 3 维电离层层析的具体实现算法提供了理论依据。在此理论基础上,两位学者联合提出了一种时变的 3 维电离层 CT 算法,得到了电子

密度在一小时内随时间和空间变化的图像。通过与 IRI90 模式直接得到的电子密度分布图像进行比较,证明该算法能重现原始模型中的特征,其重建质量较好。闻德保等<sup>[26-29]</sup>针对 GPS 基电离层 CT 中的不适定问题,先后提出了多种解决不适定问题的层析算法,并取得了较好的反演结果。在此基础上,利用中国地壳运动观测网络的数据反演了中国区域上空电离层电子密度在磁静和扰动状态下中国区域电离层电子密度的 3 维时空分布,初步获得了一些有意义的反演结果。此外,解放军理工大学、中国科学院上海天文台、中国地震局地震研究所以及西北工业大学等单位的相关研究小组也在进行 GPS 基电离层 CT 方面的研究工作。

#### 5 结束语

已有的电离层研究结果表明,电离层 CT 技术是监测大尺度电离层结构与扰动的一种强有力的手段,具有巨大的潜力和发展前景。它不仅可以用来监测全球范围内的电离层结构,而且可以用来监测区域性电离层的不规则结构。电离层 CT 技术的出现,为电离层研究提供了前所未有的发展机遇,也为全球大气监测和其他空间区域的遥测技术提供了必要的和有益的补充,在通讯、导航定位、导弹发射监测以及地震预报等方面,电离层 CT 技术也具有潜在的应用前景<sup>[2]</sup>。

虽然电离层 CT 技术已经逐渐成为大尺度电离层监测的一种有效手段,但电离层 CT 的实验系统和算法都还需改善,仍有一些问题需要探索和证明,如:电离层反演过程中等离子体层对反演结果的影响、电离层扰动状态下如何构建一个合理的时空分离模型以及反演结果中电离层现象产生的物理机制的解释等。

在电离层 CT 研究中,研究者们提出和使用了不同的重构算法,但这些算法在实际反演过程中仍存在一定的局限性,因而,新的重构算法的探讨和已有算法的改进和优化仍需继续进行。在研究新的重构算法时,需仔细地对原有的重构算法存在的问题进行分析,提出相应的改进措施,同时在严格的和接近实际的条件下对算法进行必要的检验。鉴于地基电离层 CT 实验因其简便易行而被广为采用,但所采集的数据严重不完整,在设计新的重构算法时,必须尽可能利用对电离层结构的已有认识和多种导航卫星资源,同时引入其他探测手段的实测数据,为电离层电子密度的重构过程提供合理且必要的约束。

## 参 考 文 献

- [1] Austen J R, Franke S J, Liu C H. Ionospheric imaging using computerized tomography. *Radio Sci*, 1988, 23 (3): 299—307.
- [2] 徐继生, 马淑英. 濮祖荫主编. 空间物理前沿进展. 北京: 北京大学出版社, 1998, 193—205.
- [3] Leitinger R. Tomography. In: Kohl H, Ruster R, Schlegel K. editors. *Modern Ionospheric Science*. European Geophysical Society, Klatlenburg-Lindau, German.
- [4] Markkanen M, Lehtinen M, Nygren T et al. Bayesian approach to satellite radio tomography with applications in the Scandinavian sector. *Ann Geophys*, 1995, 13: 1277—1287.
- [5] Pryse S E, Kersley L, Williams M J et al. Tomographic imaging of the polar-cap ionosphere over Svalbard. *J Atmos Terr Phys*, 1997, 59: 1953—1959.
- [6] Kersley L, Heaton J A T, Pryse S E et al. Experimental ionospheric tomography with ionosonde input and EISCAT verification. *Ann Geophys*, 1993, 11 (11—12): 1064—1074.
- [7] Kunitake M, Ohtake K, Maruyama T et al. Tomographic imaging of the ionosphere over Japan by the modified truncated SVD method. *Ann Geophys*, 1995, 13: 1303—1310.
- [8] Foster J C, Buonsanto M J, Holl M J et al. Russian-American tomography experiment. *Int J Imaging Sys Tech*, 1994, 5: 148—159.
- [9] Raymund T D, Austen J R, Franke S J et al. Ionospheric tomography: Its limitations and reconstruction methods. *J Atmos Terr Phys*, 1994, 56(5): 637—657.
- [10] Kunitsyn V E, Andreeva E S, Razinkov O G. Possibilities of the near-space environment radiotomography. *Radio Sci*, 1997, 32(5): 1953—1963.
- [11] Hansen A J, Walter T, Enge P. Ionospheric correction using tomography. In: *Proceedings of Institute of Navigation ION GPS-97*, Kansas City, Missouri, USA, September 16—19, 1997, 249—260.
- [12] Howe B M, Runciman K, Secan J A. Tomography of Ionosphere: Four-dimensional simulations. *Radio Sci*, 1998, 33 (1): 109—128.
- [13] Liu Z Z, Gao Y. Optimization of Parameterization in ionospheric tomography. In: *Proceedings of Institute of Navigation GPS 2001*, Salt Lake City, Utah, USA, September 11—14, 2001, 2277—2285.
- [14] Rius A, Ruffini G, Cucurull L. Improving the vertical resolution of ionospheric tomography with GPS occultations. *Geophys Res Lett*, 1997, 14(18): 2291—2294.
- [15] Hernandez-Pajares M, Juan J M, Sanz J. Global observation of the ionosphere electronic response to solar events using ground and LEO GPS data. *J Geophys Res*, 1998, 103 (A9): 20 789—20 796.
- [16] Yin P, Mitchell C N, Spencer P S J et al. Ionospheric electron concentration imaging using GPS over the USA during the storm of July 2000. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, L12 806, doi:10.1029/2004GL019 899.
- [17] Andreeva E S, Kunitsyn V E, Leonyeva E A et al. The ionosphere over Alaska during a storm period in October 2003: Radio tomography and data obtained with GAIM/IFM ionospheric models. *Moscow University Physics Bulletin*, 2009, 64(1): 84—88.
- [18] Bust G S, Coco D, Makela J J. Combined Ionospheric campaign 1: Ionospheric tomography and GPS total electron content (TEC) depletions. *Geophys Res Lett*, 2000, 27(18): 2849—2852.
- [19] Jin S G, Park J U. A comparison with the IRI-2001 model over South Korea. *Earth Planets Space*, 2007, 59: 287—292.
- [20] Lee J K, Kamalabadi F. GPS-based radio tomography with edge-preserving regularization. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2009, 47(1): 312—324.
- [21] Garcia R, Crespon F. Radio tomography of the ionosphere: Analysis of an underdetermined, ill-posed inverse problem, and regional application. *Radio Sci*, 2008, 43, RS2014, doi: 10.1029/2007RS003714.
- [22] Hobiger H, Kondo T, Koyama Y. Constrained simultaneous algebraic reconstruction technique (C-SART)-a new and simple algorithm applied to ionospheric tomography. *Earth Planets Space*, 2008, 60: 727—735.
- [23] 徐继生, 马淑英, 阳其罕等. 东亚赤道异常区电离层 CT 诊断——实验及初步结果. *地球物理学报*, 1995, 38: 553—562.
- [24] 吴雄斌, 徐继生. 一种改进的电离层层析成像算法. *地球物理学报*, 2000, 43(1): 19—28.
- [25] 徐继生, 邹玉华. 时变三维电离层层析成像重建公式. *地球物理学报*, 2003, 46(4): 438—445.
- [26] Wen D B, Yuan Y B, Ou J K. Three-dimensional ionospheric tomography by an improved algebraic reconstruction technique. *GPS Solut*, 2007, 11: 251—258.
- [27] Wen D B, Ou J K, Yuan Y B. A hybrid reconstruction algorithm for three dimensional ionospheric tomography. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2008, 46(6): 1733—1739.
- [28] Wen D B, Yuan Y B, Ou J K. Monitoring the three-dimensional ionospheric electron density distribution using GPS observations over China. *J Earth Syst Sci*, 2007, 116 (3): 235—244.
- [29] Wen D B, Yuan Y B, Ou J K. Ionospheric temporal and spatial variations during the 18 August 2003 storm over China. *Earth Planets Space*, 2007, 59: 313—317.

## THE RESEARCH PROGRESS OF COMPUTERIZED IONOSPHERIC TOMOGRAPHY TECHNIQUE

Wen Debao

*(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004)*

**Abstract** As the important constitution of solar-terrestrial space environment, ionosphere impacts on radio communication, satellite navigation and positioning and the human's space activities. The computerized ionospheric tomography (CIT) technique provides expansive prospects for sounding the ionospheric temporal-spatial structure. Nowadays, the application of computerized tomography technique to ionospheric sounding has its weakness. Many researches have not been carried out. The research progress of CIT is summarized in this paper. Meanwhile, the existed problem of CIT is analyzed, and the future research is forecasted.

**Key words** ionosphere, tomography, GPS, research progress