

电离层 CT 模型和算法研究进展^{* 1}

闻德保 吕慧珠 张 啸

(长沙理工大学交通运输工程学院,长沙 410004)

摘 要 全面系统地分析了国内外电离层 CT 模型和算法的研究现状及最新进展,展望了电离层 CT 成像技术的未来发展趋势及广阔应用前景。

关键词 电离层 CT;模型;算法;电子密度

中图分类号:P228.42

文献标识码:A

PROGRESS OF THE RESEARCH ON MODELS AND
ALGORITHMS OF IONOSPHERIC CT

Wen Debao, Lü Huizhu and Zhang Xiao

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University
of Science & Technology, Changsha 410114)

Abstract In the paper, the author summarized the progress of the research on models and algorithms of ionospheric CT, and discussed the future development trend and its application prospect of ionospheric CT technique.

Key words: ionospheric CT (computerized tomography); model; algorithm; electron density

当电磁波通过电离层时,电离层对电磁波产生反射、折射、散射和吸收^[1-5],给地面用户带来较大的延迟误差。GNSS 电离层 CT 成像技术的出现,为了解和掌握大尺度电离层的三维时空结构提供了机遇。该技术可以通过对三维电离层空间进行分层,克服薄层假设电离层 TEC 模型不能有效反映电离层垂直结构的局限性,较好地展示电离层三维结构的时空变化^[6]。目前,GNSS 电离层 CT 的研究主要集中在模型和算法两个方面,本文对此进行综述,并对未来工作进行了展望。

1 电离层 CT 模型研究进展

电离层 CT 成像技术的基本思想^[7]是利用射线

传播路径上的电离层斜 TEC 值与电子密度线性积分的关系,通过对非线性问题线性化,重构电离层电子密度的分布状态。为了获得真实的电子密度分布,建立具有物理意义的电离层 CT 模型尤为关键。Fremouw^[8]提出一种函数基电离层 CT 模型,用经验正交函数描述电离层垂直结构,水平结构则用球谐函数表示。1998 年, Hansen^[9]给出了函数基电离层 CT 模型的公式,并利用该模型和美国 WAAS 系统的观测数据,有效地重构了 80~800 km 高度范围内的电离层电子密度分布状态。随后, Howe 等^[10]进一步将函数基模型拓展应用到整个电离层空间,应用模拟的 GPS 数据和卡尔曼滤波法获得了时变的三维电离层结构。Ruffini 等^[11]在此基础上提出一

* 收稿日期:2014-06-16

基金项目:湖南省杰出青年基金项目(14JJ101);国家自然科学基金项目(41174001);国家教育部科学技术项目(213028A);湖南省教育厅重点项目(12A0020)。

作者简介:闻德保,男,1974 年生,博士,副教授,主要从事 GNSS 电离层、GNSS 气象学和空间天气的研究。E-mail: iontomography@163.com。

种相关函数模型,率先重构了全球电离层电子密度的分布状态。2002 年,Gao 和 Liu^[12]提出一种实时的函数基 CT 模型,并和电离层 TEC 平滑模型组合,有效提高了电离层电子密度反演的效率。在电离层 CT 研究中,函数基 CT 模型和像素基 CT 模型一直是平行发展的。1988 年,Austen 等^[7]在验证 CT 技术在电离层电子密度分布重构中的可行性实验中,首次利用模拟 TEC 数据和像素基电离层 CT 模型联合反演了电离层电子密度随纬度和高度的时变特性,证实了像素基 CT 模型在电离层电子密度重构中的可行性,但实验所采用的数据来自于低轨卫星,采集数据的地面接收机通常沿着固定的经度链进行排列,重构结果只能反映电离层电子密度随纬度和高度的变化情况,无法反映电离层的经度效应。1997 年,Kunitsyn^[13]首次证实了基于 GNSS 的像素基电离层 CT 成像模型能够有效地反映电离层的三维时空结构。随后,Rius 等^[14]在日固系下利用三维像素基 CT 模型和国际 IGS 组织提供的 GPS 资料,首次反演了地磁静日全球电离层电子密度的三维时空分布。Hernandez-Pajares 等^[15]针对 Rius 三维像素基 CT 模型反演结果分辨率较低的问题,发展了一种更高分辨率的三维像素基 CT 模型,反演了扰动状态下全球电离层电子密度的分布,并获得磁暴发生期间电离层的 CT 响应结果。

然而,利用像素基电离层 CT 模型重构电离层电子密度分布时,为了获得较高的空间分辨率,通常将电离层空间离散为一系列较小的像素,并假定每个像素内的电子密度在所选择的反演时段内固定不变,这种假设与电离层的真实变化存在一定的偏差。针对上述问题,徐继生和邹玉华^[16]推导了结合地基 GPS 与掩星观测的时变三维电离层 CT 成像重构公式,将电离层电子密度与时间之间的关系近似为线性形式,为进一步研究时变三维电离层 CT 的具体算法提供了理论依据,克服了离散静态假设电离层 CT 模型的缺陷。Mitchell 等^[17]进一步提出一种更加符合实际的时变电离层 CT 模型,并重构了极盖地区的电离层电子密度分布。近年来,姚宜斌等^[18]提出了一种组合电离层 CT 模型,有效克服了函数基 CT 模型阶数选择困难和像素基 CT 模型反演参数多、计算效率低的问题。

2 电离层 CT 算法研究进展

由于电离层 CT 本身所具有的局限性(如地面 GNSS 接收机布设不均匀、待重构区域内地面 GNSS 接收机数量稀少以及观测视角有限),导致电离层 CT 问题不适定。尽管在反演过程中引入空基掩星

数据(如 CHAMP 掩星数据)能够在一定程度上弥补地基 GNSS 观测信息的不足,然而由于空基掩星观测时间和空间分布的有限性,在电离层电子密度反演中添加空基掩星数据后,仍有部分像素没有任何观测信息。为了克服不适定问题引起的解的不稳定性和非唯一性,国内外学者先后提出和使用多种算法。Austen 等^[7]利用加法代数重构算法并附加先验信息约束来克服反演过程中的不适定问题,Pryse 和 Kersley^[19]则用乘法代数重构算法来解决上述问题。相对于加法代数重构算法,乘法代数重构算法的计算效率更高。与此同时,Fougere^[20]则提出一种同时迭代重构算法来重构电离层电子密度随纬度和高度的变化情况。上述 3 种算法都是通过附加先验信息来克服反演过程中的不适定问题,所需要的初值来源于经验电离层模型,而经验电离层模型只能反映电离层的月平均效应。对于那些没有任何先验信息的像素,迭代结果与经验模型给出的初值则完全相同,严重制约了反演的精度,尤其是在空间天气异常的情况下。针对上述问题,Wen 等提出附加约束的加法代数重构算法和附加约束的乘法代数重构算法^[21-22],Hoiger 等^[23]则提出一种附加约束的同时迭代重构算法。上述算法通过给电离层 CT 系统附加约束条件,有效解决了原有算法对初值的过度依赖。为了减弱因可利用观测数据不完备引起的不适定问题,一些学者先后提出多种基于多源信息融合的电离层 CT 算法^[24-27],提高了电离层电子密度反演的精度。

3 结 语

在前述研究中,相关成果没有顾及等离子体层电子密度分布对射线传播路径上的电离层斜 TEC 的影响。尽管等离子体层电子密度比电离层中电子密度要低 3~4 个量级,但 GPS 信号在等离子体层中传播的路径比较长,因此需要加以考虑,尤其是在太阳活动低年和夜间。如何结合等离子体层模式消除电离层 CT 模型中等离子层电子密度分布对 TEC 数据的影响,是未来的研究工作之一。

在电离层 CT 算法研究中,国内外学者先后提出多种重构算法来解决电离层 CT 系统中的不适定问题,但这些算法在反演效率上需要进一步改进和优化,以便于实现电离层天气的实时预报预警研究。在研究新的重构算法时,需要考虑电离层变化的物理机制,使得新算法的结果更加符合电离层变化的物理实际。在严格的和接近实际的条件下对算法进行必要检验,同时引入其他实测数据,为电离层电子密度的重构提供合理且必要的约束。

参 考 文 献

- 1 章红平,平劲松,朱文耀,等. 电离层延迟改正模型综述[J]. 天文学进展,2006,24(1):16–25. (Zhang H P, Ping J S, Zhu W Y, et al. Brief review of the ionospheric delay models[J]. Progress in Astronomy,2006,24(1):16–25)
- 2 袁运斌. 基于 GPS 的电离层监测及延迟改正理论与方法研究[D]. 武汉:中国科学院测量与地球物理研究所,2002. (Yuan Y B. Investigation of the theory and methods of ionospheric monitoring and delay based on GPS [D]. Wuhan:Institute of Geodesy and Geophysics,CAS,2002)
- 3 Hernandez-Pajares M, Juan J M, Sanz J, et al. Application of ionospheric tomography to real-time GPS carrier-phase ambiguities resolution, at scales of 400–1 000 km and with high geomagnetic activity [J]. Geophysical Research Letters, 2000,27(13):2 009–2 012.
- 4 Liu J Y, Yang W H, Lin C H, et al. A statistical study on the characteristics of ionospheric storms in the equatorial ionization anomaly region;GPS-TEC observed over Taiwan[J]. Journal of Geophysical Research,2013,118(6):3 856–3 865.
- 5 Liu J B, Chen R Z, An J C, et al. Spherical cap harmonic analysis of the arctic ionospheric TEC for one solar cycle[J]. Journal of Geophysical Research,2014,119(1):601–619.
- 6 闻德保,周义炎. 基于 GPS 的中国区域电离层层析反演结果分析[J]. 大地测量与地球动力学,2010,30(3):55–59. (Wen D B, Zhou Y Y. Result analysis of ionospheric tomography inversion from GPS data over China[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2010,30(3):55–59)
- 7 Austen J R, Franke S J, Liu C H. Ionospheric imaging using computerized tomography[J]. Radio Science, 1988,23(3):299–307.
- 8 Fremouw E J, Secan J A, Howe B M. Application of stochastic inverse theory to ionospheric tomography[J]. Radio Science,1992,27(5):721–732.
- 9 Hansen A J. Real-time ionospheric tomography using Terrestrial GPS sensors[C]. Institute of Navigation GPS-98, Nashville, Tennessee,1998.
- 10 Howe B M, Runciman K, Secan J A. Tomography of ionosphere; four-dimensional simulations [J]. Radio Science, 1998,33(1):109–128.
- 11 Ruffini G, Flores A, Rius A. GPS tomography of the ionospheric electron content with a correlation functional[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998,36(1):143–153.
- 12 Gao Y, Liu Z Z. Precise ionosphere modeling using regional GPS network data [J]. Journal of Global Positioning System,2002,1(1):18–24.
- 13 Kunitsyn V E, Andreeva E S, Razinkov O G. Possibilities of the near-space environment radiotomography[J]. Radio Science,1997,32(5):1 953–1 963.
- 14 Rius A, Ruffini G, Cucurull L. Improving the vertical resolution of ionospheric tomography with GPS occultations [J]. Geophysical Research Letters,1997,14(18):2 291–2 294.
- 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]. J Geophys Res,1998,103:20 789–20 796.
- 16 徐继生,邹玉华. 时变三维电离层层析成像重建公式[J]. 地球物理学报,2003,46(4):438–445. (Xu J S, Zou Y H. Reconstruction formula of time-dependent 3-D computerized ionospheric tomography [J]. Chinese Journal of Geophysics,2003,46(4):438–445)
- 17 Mitchell C N, Spencer P S. A three-dimensional time-dependent algorithm for ionospheric imaging using GPS [J]. Annals of Geophysics,2003,46:687–696.
- 18 Yao Y B, Chen P, Zhang S, et al. A new ionospheric tomography model combining pixel-based and function-based models[J]. Advances in Space Research,2013,52:614–621.
- 19 Pryse S E, Kersley L. A preliminary experimental test of ionospheric tomography[J]. Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics,1992,54(7–8):1 007–1 012.
- 20 Fougere P F. Ionospheric radio tomography using entropy [J]. Radio Science,1995,30(2):429–444.
- 21 Wen D B, Liu S Z, Tang P Y. Tomographic reconstruction of ionospheric electron density based on constrained algebraic reconstruction technique [J]. GPS Solutions,2010,14:375–380.
- 22 Wen D B, Liu S Z. A new ionospheric tomographic algorithm-constrained multiplicative algebraic reconstruction technique (CMART) [J]. Journal of Earth System Science, 2010,119:489–496.
- 23 Hobiger T, Kondo T, Koyama Y. Constrained simultaneous algebraic reconstruction technique (C-SART)-a new and simple algorithm applied to ionospheric tomography [J]. Earth Planets and Space,2008,60:727–735.
- 24 Tsai L C, Tsai W H, Schreiner WS, et al. Comparisons of GPS/MET retrieved ionospheric electron density and ground based ionosonde data [J]. Earth Planets and Space,2001,53:193–205.
- 25 Todorova S, Schuh H, Hobiger T. Using the global Navigation satellite systems and satellite altimetry for combined global ionosphere maps [J]. Advances in Space Research, 2007,42:727–736.
- 26 Dettmering D, Schmidt M, Heinkelmann R. Combination of different space-geodetic observations for regional ionosphere modeling [J]. Journal of Geodesy,2011,85:989–998.
- 27 Alizadeh M M, Schuh H, Todorova S. Global ionosphere maps of VTEC from GNSS, satellite altimetry and formosat-3/COSMIC data [J]. Journal of Geodesy,2011,85:975–987.