

# 附加平滑约束的电离层层析反演

李 慧<sup>1,2</sup> 袁运斌<sup>1</sup> 闫 伟<sup>1,2</sup> 李子申<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室,武汉市徐东大街 340 号,430077)

(2 中国科学院大学,北京市玉泉路甲 19 号,100049)

**摘 要:**根据乘法代数重构算法,利用相邻像素之间的连续性及平滑性,采用附加平滑约束的方法来克服没有任何观测信息的像素对经验模型给出的初值的依赖。利用中国地壳运动观测网络的高精度双频 GPS 观测值,反演了中国区域上空电离层电子密度分布,将反演的结果同检验站的电离层延迟进行对比分析,并且将反演的电子密度剖面与相应的测高仪数据进行比较,验证了此方法的有效性和可靠性。

**关键词:**电离层层析;乘法代数重构法;高斯加权函数

**中图分类号:**P228.42

电离层层析成像(computerized ionospheric tomography, CIT)是空间环境无线电波遥感中的一项重要的新技术<sup>[1-2]</sup>。近几年兴起的电离层 GPS 探测技术,以其高精度、实时、高分辨率的时空监测特性,为监测和研究电离层活动规律提供了有力的工具。在实际的 CIT 问题中,地基 GPS 实验缺乏水平或接近水平方向的扫描射线且接收机分布有限,使得采集的数据不完整,这是影响图像反演重建质量的主要因素<sup>[3]</sup>。目前,常用的 CIT 反演算法之一是乘法代数重构算法(multiplicative algebraic reconstruction techniques, MART),其在投影数据不完整的情况下反演重建结果较好,但对于迭代初值非常敏感<sup>[4-5]</sup>。因此,一些学者提出了一些改进方法来提高 MART 反演的精度<sup>[6-8]</sup>。

中国地壳运动观测网络(Crustal Movement Observation Network of China, CMONOC)是以 GPS 观测技术为主,结合精密重力和精密水准测量构成的大范围、高精度、高时空分辨率的地壳运动观测网络<sup>[9]</sup>,为实现我国区域电离层研究和监测提供了丰富的数据资源。

## 1 电离层层析基本理论与方法

### 1.1 电离层层析的观测方程

利用高精度的双频 GPS 组合观测得到的斜路径上的 TEC 作为基本观测量来反演电子密度的公式为:

$$\tilde{P}_4 + \mathbf{B}_R + \mathbf{B}^T = \alpha \int_{r_t}^{s_t} N_e(\mathbf{r}, t) ds \quad (1)$$

其中,  $\alpha = 1.05 \times 10^{-17} \text{ m}^3 \cdot \text{e}^{-1}$ ;  $r_t$  和  $s_t$  分别为  $t$  时刻接收机和卫星的位置矢量;  $N_e$  为电离层电子密度;  $\mathbf{B}_R$  和  $\mathbf{B}^T$  为接收机和卫星的差分仪器偏差;  $\tilde{P}_4$  为双频载波平滑码组合观测值。组合观测值  $\tilde{P}_4$  连同  $\mathbf{B}_R$ 、 $\mathbf{B}^T$  采用文献[10]提出的静态实时算法一同解算。

利用像素法将电离层空间离散化,并假定在某一反演时段内,像素内的电子密度不变,则式(1)可以表示为:

$$\tilde{P}_4 + \mathbf{B}_R + \mathbf{B}^T = \alpha \sum \sum \sum (N_e)_{i,j,k} a_{i,j,k} \quad (2)$$

式中,  $a_{i,j,k}$  为射线穿过像素  $(i, j, k)$  的截距。

### 1.2 电离层层析算法

MART 目前已被广泛应用于电离层电子密度反演过程中,该算法在迭代之前利用经验电离层模型或其他探测手段作为初值,采用乘法迭代

收稿日期:2013-03-07。

项目来源:国家 973 计划资助项目(2012CB82560X);国家自然科学基金资助项目(41231064, 41104012);国家自然科学基金创新研究群体资助项目(41021003);地理空间信息工程国家测绘地理信息局重点实验室资助项目(201119)。

的方式逐步改善待重构图像的初始估计。目前, MART 算法也有不同的表达, 本文采用文献[11]给出的表达形式:

$$N_{e_j}^k = N_{e_j}^{k-1} \prod_{i=1}^I \left[ \frac{\text{TEC}_i}{\sum_{j=1}^J a_{ij} N_{e_j}^{k-1}} \right]^\mu \quad (3)$$

$$\mu = \lambda \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^J a_{ij}^2}}$$

其中,  $N_{e_j}^k$  表示第  $j$  个像素迭代  $k$  次后的电子密度;  $k$  表示迭代次数;  $\text{TEC}_i$  表示第  $i$  条射线的观测值;  $a_{ij}$  表示第  $i$  条射线在  $j$  个像素内的截距;  $\lambda$  为松弛因子, 本文取  $\lambda=0.2$ 。

### 1.3 附加平滑约束的层析算法

由于电离层电子密度反演过程中观测信息的不足, 有些像素中没有任何观测信息, 那么这些像素内的电子密度值只能依赖于经验模型给出的初值。所以本文利用相邻像素间的电子密度具有连续性以及平滑性的特点, 采用近似高斯距离加权函数的平均滑动窗口对反演区域内的像素进行平滑约束, 克服那些没有观测信息的像素对初值的依赖, 并且防止像素间发生大的突跳。本文将附加平滑约束的 MART 算法简称为 CMART。假设将待求的电子密度向量转化为三维矩阵  $B_{L \times M \times N}$ , 其沿纬度、经度以及高度的格网数分别为  $L, M, N$ , 则平滑约束函数可以表示为:

$$R_{l,m,n} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^{2w+1} \sum_{j=1}^{2w+1} \sum_{k=1}^{2w+1} \omega_{i,j,k} B_{l-w+i, m-w+j, n-w+k}}{\sum_{i=1}^{2w+1} \sum_{j=1}^{2w+1} \sum_{k=1}^{2w+1} \omega_{i,j,k}}, & (4) \\ B_{l,m,n}, & \text{其他} \end{cases}$$

其中,  $l=w+1, \dots, L-w; m=w+1, \dots, M-w; n=w+1, \dots, N-w$ 。

$\omega$  表示高斯加权因子, 其表达式为:

$$\omega = e^{-\frac{(i-w)^2}{c_1^2} - \frac{(j-w)^2}{c_2^2} - \frac{(k-w)^2}{c_3^2}}$$

其中,  $c_1, c_2, c_3$  分别表示经纬度及高度方向上的约束系数;  $w$  表示滑动窗口的宽度。根据经验, 电子密度反演结果具有水平方向分辨率较高, 而垂直方向分辨率较低的特点, 因此垂直方向上的约束较水平方向上略强。同时, 经过试算, 本文实验中取  $c_1=0.5, c_2=0.3, c_3=0.8$  和  $w=3$ 。

## 2 实验方法

实验采用了 2011 年年积日 152 天的中国地壳运动观测网络 88 个观测站的 GPS 双频观测数据用于电离层电子密度反演计算, GSJN、BJFS、

XJRS 和 HNCS 4 个 GPS 观测站的双频观测数据获得的电离层延迟量用来检验电离层层析重建结果, 以及 2 个电离层测高仪观测站数据用来检验电子密度反演的剖面结果, 所有的测站分布如图 1 所示, 其中, 圆点表示观测站, 五角星表示检验站, 三角形表示测高仪测站分布。电离层反演区域的经度范围为  $70^\circ \sim 140^\circ$ , 纬度范围为  $10^\circ \sim 55^\circ$ , 高度范围为  $100 \sim 1\,000$  km。像素间隔在经度和纬度方向上分别取  $5^\circ$  和  $2.5^\circ$ , 高度方向上的间隔取 50 km。

根据上述反演算法, 利用 IRI2007 模型对反演区域的每个格网赋予初值, 反演了中国及其周边区域一天 12 个时段的电离层电子密度, 1~23 点每 2 h 为一个时段, 每个时段的观测时长是 30 min。为了验证反演的有效性及可靠性, 分别将 IRI 模型及反演的电子密度同测高仪数据进行比较, 同时另取 4 个观测站的 GPS 双频观测值, 并计算获取其上空的电离层斜延迟, 将 IRI 模型以及反演获得的电子密度沿接收机至卫星的斜路径进行积分, 将由此重建的电离层斜延迟与实测数据获取的斜延迟进行比较。

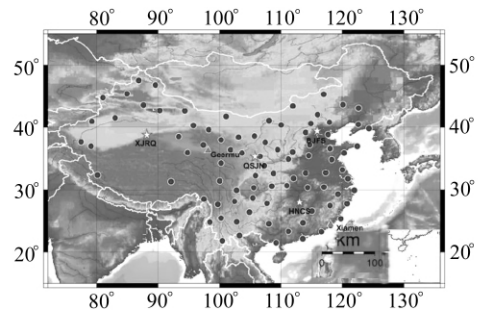


图 1 GPS 测站及测高仪测站分布示意图

Fig. 1 Distribution of Reference Stations and Ionosondes

## 3 实验结果与分析

根据上述实验方案, 本文给出了 IRI 模型与层析反演模型重建的电离层斜延迟与检验站利用双频 GPS 观测值获得的电离层斜延迟比较的残差图, 如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 由利用 IRI 2007 模型估计的电离层斜延迟误差较大, 由其提供的电子密度初值对于反应中国区域的电子密度分布精度较差, 而通过电离层层析反演之后, 重估的电离层延迟精度提高了近 44%, 这也说明了利用电离层层析反演重构电离层结构的有效性。施加平滑约束的层析算法在传统的 MART 算法上, 对整个电离层结构进行平滑, 进一步提高电离层电子密度重构的精度。

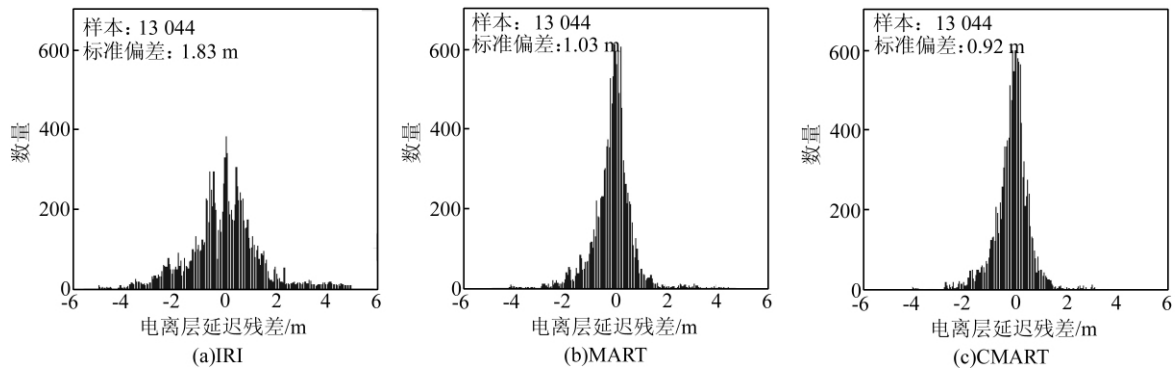


图2 IRI模型与层析反演模型估计的电离层延迟与实测观测值获取的电离层延迟的残差

Fig. 2 Residual Between TEC Delay Retrieved from IRI Model, MART and CMART

为了进一步说明附加平滑约束的层析算法对于电离层电子密度反演精度提高的影响,对选取的4个检验站的电离层延迟中误差单独进行了分析。从图1中可以看出,在BJFS、QSJN和HNCS三个检验站周围均匀分布着较多的观测站,这些观测站提供了丰富的电离层观测信息,因此,格网内的电子密度能通过电子密度反演算法得到较好的修正,而XJRQ周围的观测站稀疏,其上空的电离层空间有效观测值较少,电子密度分布依赖于IRI模型提供的初值。表1给出了分别由IRI模型、MART算法以及附加约束的MART算法重建的电离层斜延迟与检验站观测值获取的电离层斜延迟的在一天12个时段内的中误差比较。从表1中也可以看出,在观测值较丰富的地区,由MART和CMART层析算法重建的电离层斜延迟的精度相当,都能够较好地重构电离层结构分布,而对于测站较为稀疏的地区,CMART通过对那些没有任何观测信息的电离层格网施加平滑约束,克服了这些格网对于初值的依赖,从而提高了电离层电子密度反演的精度。

表1 IRI模型、MART及CMART反演结果获得的电离层斜延迟中误差比较/m

Tab. 1 Comparison of RMS Retrieved from IRI Model, MART and CMART/m

测站	IRI模型	MART	CMART
BJFS	1.121 844	0.415 636	0.425 072
QSJN	1.761 555	0.386 227	0.391 674
HNCS	2.346 420	1.345 848	1.260 607
XJRQ	1.613 673	1.179 723	0.850 343

同时,为了验证电离层电子密度反演的精度,将IRI模型、MART和CMART算法获得的电离层电子密度剖面同测高仪数据进行了比较。图3给出了格尔木和厦门两个测高仪在当地时间15点的电子密度垂直分布。通过和测高仪数据的比

较,可以看出CMART层析算法获得的电子密度峰值最接近测高仪数据。

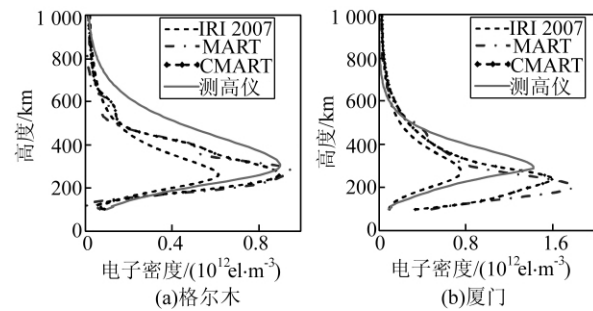


图3 IRI模型、MART算法及CMART算法获得的电子密度剖面与测高仪数据比较

Fig. 3 Comparisons of Ionospheric Density Profile Between Ionosondes and the IRI Model, MART and CMART

## 4 结语

地基GPS观测站分布的不均匀以及有限仰角的影响,在一定程度上限制了电离层电子密度的反演,采用附加平滑约束的乘法代数重构算法,可以克服反演过程中那些没有任何观测信息的像素对初值的依赖,从而提高整个待反演区域电离层电子密度的反演精度。本文将层析反演重建结果和检验站观测获取的电离层斜延迟进行比较,并将反演的电子密度剖面同测高仪数据进行比较,表明了附加平滑约束的反演算法的有效性和可靠性。

同时,由于地基GPS观测数据的水平分辨率较高,垂直分辨率较低,仅利用算法来改进地基GPS观测数据反演电子密度存在的数据缺失问题显然是不够的,因此,需要利用其他观测手段(如掩星观测等)获得的电离层电子密度信息改善电离层电子密度结构的反演结果。

## 参 考 文 献

- [1] 施闯,耿长江,章红平,等. 基于 EOF 的实时三维电离层模型精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2010,35(10):1 143-1 146
- [2] 陈必焰,戴吾蛟,蔡昌盛,等. 层析反演与神经网络方法在电离层建模及预报中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2012,37(8):972-975
- [3] 吴雄斌,徐继生,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
- [4] Censor Y. Finite Series-Expansion Reconstruction Methods[J]. IEEE, 1983,71(3):409-419
- [5] Pryse S E. Radio Tomography: a New Experimental Technique [J]. Surveys in Geophysics, 2003, 24:1-3
- [6] 肖宏波,史小红,王晓颖. 电离层层析成像的一种改进算法[J]. 西安工业大学学报,2008,28(2):115-118
- [7] Wen Debao, Liu Sanzhi. A New Ionospheric Tomographic Algorithm;Constrained Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique (CMART) [J]. Earth Syst Sci, 2010, 119(4): 489-496
- [8] Stolle C, Schluter S, Heise S, et al. A GPS Based Three-Dimensional Ionospheric Imaging Tool: Process and Assessment[J]. Advances in Space Research, 2006, 38:2 313-2 317
- [9] 甘卫军,张锐,张勇,等. 中国地壳运动观测网络的建设及应用[J]. 国际地震动态,2007(7):43-52
- [10] Yuan Yunbin, Huo Xingliang, Ou Jikun. Models and Methods for Precise Determination of Ionospheric Delay using GPS[J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(2):187-196
- [11] Kunitsyn V E, Tereshchenko E D. Ionospheric Tomography [M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003

第一作者简介:李慧,博士生,研究方向为电离层层析方法的研究和应用。

E-mail:hui2011@whigg.ac.cn

## A Constrained Ionospheric Tomography Algorithm with Smoothing Method

LI Hui<sup>1,2</sup> YUAN Yunbin<sup>1</sup> YAN Wei<sup>1,2</sup> LI Zishen<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamic, Institute of Geodesy & Geophysics, CAS, 340 Xudong Street, Wuhan 430077, China)

(2 University of CAS, 19A Yuquan Road, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In order to fill the data gaps in the voxels which were not intersected by any rays and depend on the initialized information, a new ionospheric tomography algorithm with smoothing method was proposed using the continuity and smoothness between the neighbor voxels in the tomography based on the multiplicative algebraic reconstruction techniques. Using the high precise dual-frequency ground-based GPS observation from the crustal movement observation network of China, the ionosphere density was reconstructed over China by the new technique. The retrieved ionosphere delay by the inversed result was compared with that from test stations, and the obtained density profile was compared with the ionosondes. The results demonstrated the efficiency and reliability of the new method.

**Key words:** ionospheric tomography; MART; Gaussian weighted function

**About the first author:** LI Hui. Ph.D candidate, majors in ionospheric tomography methods.

E-mail: hui2011@whigg.ac.cn