

Zhao Haisheng, Xu Zhengwen, Wu Jian, Wang Zhange, Liu Kun, Li Na, Chen Jinsong. New hybrid method for high resolution TEC measurement with the tri-band beacon. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(2): 201-207

三频信标高精度 TEC 测量新方法^{*}

赵海生 许正文 吴 健 王占阁

刘 琨 李 娜 陈金松

(中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术国家重点实验室 青岛 266107)

摘 要 电子总含量 (TEC) 是电离层探测的主要参量之一, 作为层析 (CT) 的输入参量, TEC 测量精度直接影响电离层 CT 成像的结果. 过去主要采用双频信标测量 TEC, 由于相位积分常数的求解、系统硬件延迟等误差, 使得 TEC 测量结果不能满足电离层 CT 高精度重建成像的要求. 三频相干信标技术的出现, 使得电离层天基测量技术有了新的发展. 提出了基于三频信标的传播时延-相位联合测量反演 TEC 的方法, 融合三频信标在电子密度随机起伏探测和相位积分常数计算两方面的优势, 进一步提高了 TEC 的测量精度. 模拟结果显示利用此方法的三频信标 TEC 测量结果提高了电离层 CT 的精度.

关键词 电离层探测, 三频信标, 双频信标, TEC, 电离层 CT 成像

中图法分类号 P 353

New Hybrid Method for High Resolution TEC Measurement With the Tri-band Beacon

ZHAO Haisheng XU Zhengwen WU Jian WANG Zhange

LIU Kun LI Na CHEN Jinsong

(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107)

Abstract The ionospheric Total Electron Content (TEC) is one of the key parameters of ionospheric sounding results. As the main input parameter, the measurement precision of TEC will directly affect the Computer ionospheric Tomography (CT) imaging result. In the past, the dual-band technique was mainly used for TEC measurement. However, due to the solution of the phase integral constant and error of the system hardware delay, the TEC results cannot satisfy the high accuracy requirement of reconstruction imaging by using the ionospheric CT. The newly developed tri-band technique throws new light on the space-based ionospheric sounding techniques. A new method is proposed for inversing TEC on the basis of combining the propagation delay and phase with the tri-band beacon. By using the fusion of advantages of both detecting random electron

* 国家自然科学基金项目 (60771050, 60871076) 和中-英国际合作 (NSFC-RS) 研究与交流项目 (60811130211) 共同资助

2009-09-23 收到原稿, 2010-08-25 收到修定稿

E-mail: zhaohaisheng213@163.com

density fluctuations and computing phase integral constants with the tri-band beacon, it further improves the measuring resolution of the ionospheric TEC. Simulation results show that the CT resolution is improved by using the three-frequency measurement based on this method.

Key words Ionospheric sounding, Tri-band beacon, Dual-band beacon, Total Electron Content (TEC), ionospheric CT imaging

1 引言

2006 年美国和中国台湾联合研制的 COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) 星座发射成功. 它是一项多任务科学卫星, 致力于包括大气层、电离层、地球引力场等多学科领域的研究^[1]. COSMIC 携带有美国海军研究实验室研制的三频信标发射机, 能够提供稠密、精确和全球性的电子密度测量数据, 进而促进空间天气物理模式的研究, 同时 COSMIC 得到的大量高精度电离层观测数据将推动空间天气预报技术的研究^[2].

通过国际上历次震例的观测和分析, 地震引发电离层扰动已经成为人们的共识^[3-5]. 利用卫星观测研究地震前兆越来越受到人们重视, 新的卫星观测技术和电波观测方法的应用, 将在地震监测预警技术乃至预报体系的建设中发挥不可替代的重要作用^[6]. 卫星信标技术可以对电离层电子密度进行层析 (CT) 成像, 观测电离层电子密度的异常变化, 探寻地震电离层前兆变化规律, 其有可能成为地震预报的重要手段之一^[7]. 但是电离层电子密度扰动是地震的二级响应, 其扰动幅度与电离层日变化幅度接近, 加上磁暴等电离层突发事件的影响, 致使探测地震引起的电离层电子浓度的变化变得非常困难, 这对 TEC 测量精度的要求更加严格. 三频信标在 TEC 测量方面的巨大优势, 将使其在地震监测预警方面发挥重要的作用.

中国正在论证的地震电磁试验卫星计划决定采用三频信标系统, 对电离层进行高精度 TEC 测量和闪烁监测, 结合掩星观测数据, 进行电离层高分辨率成像. 三频信标在 COSMIC 星座中已经获得了成功应用, 并积累了大量高精度 TEC 数据和电子密度剖面数据. 美国计划从 2011 年开始用三频信标装备 24 颗卫星, 印度、台湾也有相应采用三频信标装备卫星的计划. 在中国三频信标尚处于研制阶段, 还有许多

关键问题需要解决. 文献 [8-9] 的研究工作在这方面取得了一些重要进展.

本文提出一种高精度的三频信标 TEC 测量方法, 并在电离层 IRI 模型的基础上进行了数值模拟.

2 三频信标测量 TEC 新方法

2.1 电离层 TEC 测量的基本方法

TEC 测量最常见的方法是双频差分时延法和双频差分相位法.

利用双频差分时延法进行测量, 当卫星发射一对载波分别为 f_1 和 f_2 的相干信号时, 由于电离层的折射率随频率变化, 因此两信号在电离层中的传播速度不同, 它们到达地面接收机的时间也不相同, 测量两信号到达的时间差, 即可反演得到 TEC. 考虑到地面多径效应的影响, 测量中一般去除射线仰角比较低的数据, 在适当的频率上可以忽略传播路径弯曲产生的时延. 双频差分时延法的测量原理方程如下:

$$\begin{aligned} t_1 &= t_0 + \frac{40.3}{cf_1^2} \int_s N_e ds, \\ t_2 &= t_0 + \frac{40.3}{cf_2^2} \int_s N_e ds, \end{aligned} \quad (1)$$

$$T = \int_s N_e ds = \frac{cf_1^2 f_2^2 (t_1 - t_2)}{40.3(f_2^2 - f_1^2)}. \quad (2)$$

其中, N_e 为电离层的电子密度; t_0 为信号在真空中传播时, 由发射机至接收机这段距离所需的时间; t_1 和 t_2 分别为频率 f_1 和 f_2 的信号从发射机到达接收机的时延; 积分路径 s 为沿发射机至接收机的信号传播路径; T 为沿斜路径 s 的电子总含量.

利用该方法测量 TEC 的基本前提是, 假设电子密度随机起伏的湍流结构产生的时延可以忽略不计^[8]. 该方法主要误差包括系统硬件偏差和湍流时延误差^[10-11]. 系统硬件偏差在不加修正时可达 7 ns^[12] (1 ns 为 2.853 TECU 所能导致的额外时延,

1 TECU = $1 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$), 在进行系统硬件偏差修正之后, 可以将误差控制在 1 ns 左右^[13]. 随机起伏的电子密度湍流结构所造成的时延误差, 随电离层的状态不同而变化, 一般来说电离层闪烁越严重湍流时延误差就越大.

利用双频差分相位法测量, 由于其色散特性, 频率为 f_1 和 f_2 两相干信号在电离层中的波长不同, 其穿过电离层的相位也不相同, 测量两信号到达的相位差, 可反演得到 TEC, 但因为相位模糊度的存在, 差分相位法只能得到相对 TEC. 双频差分相位法的测量原理方程如下:

$$p_1 = \left(s - \int \frac{\beta N_e}{f_1^2} ds \right) \frac{f_1}{c},$$

$$p_2 = \left(s - \int \frac{\beta N_e}{f_2^2} ds \right) \frac{f_2}{c}, \quad (3)$$

$$p_{12} = p_1 - p_2 \frac{f_1}{f_2} = \frac{(f_1 - f_2)(f_1 + f_2)\beta}{cf_1 f_2^2} \int N_e ds, \quad (4)$$

$$T = \int_s N_e ds = \frac{p_{12} c f_1 f_2^2}{(f_1 - f_2)(f_1 + f_2)\beta}. \quad (5)$$

其中, p_1 , p_2 分别为频率为 f_1 和 f_2 的信号到达接收机时的相位; p_{12} 为双频差分相位; $\beta = 40.3$, 其为一常数. 由于相位测量的码元对齐误差很小, 通常相位闪烁的影响又微弱, 信号信噪比很大, 因此差分相位法测量相对 TEC 的精度很高, 可达 0.001 TECU^[14]. 用该方法求解绝对 TEC 时, 其误差主要来自相位积分常数的计算误差^[15].

2.2 双频时延-相位联合测量 TEC

由上述分析可知, 利用差分时延法能够得到电离层绝对 TEC, 但其精度较低; 利用差分相位法得到的电离层相对 TEC 精度很高, 但是只能反映电离层 TEC 的相对变化情况. 考虑到两种算法各自的优缺点, 再加上两者的时间变化趋势又非常一致, 因此有学者提出时延和相位联合测量电离层 TEC^[16]. 该算法在 GPS 电离层 TEC 测量中得到了成功应用.

对于一个完整观测历元, 假设对卫星信号有 n 个采样点, 差分时延测量得到的绝对电子总含量 $T_{t,i}$ 与差分相位得到的相对电子总含量 $T_{\phi,i}$ 之间存在一个差值, 该差值可表示为

$$\Delta T_i = T_{t,i} - T_{\phi,i}. \quad (6)$$

理论上, 这个差值应该为一常数. 若 GPS 相位观测

中没有周跳发生或者对周跳进行了精确校正, 对每一组卫星和接收机对, 只要其观测值可以利用, 就都可得到一个 ΔT_i , 如果将整个历元的 ΔT_i 取平均, 则可得到一个精度更高的 ΔT .

$$\Delta T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (T_{t,i} - T_{\phi,i}). \quad (7)$$

综合式 (6) 和式 (7), 可得到历元上的绝对 TEC, 即

$$T_i = \Delta T + T_{\phi,i}. \quad (8)$$

该方法的优点在于, 对 ΔT_i 取平均后, 可以去差分时延系统硬件偏差的随机白噪声部分, 从而提高 TEC 测量精度. 但是系统硬件偏差十分复杂, 与卫星、接收机所处的环境, 地理位置, 硬件情况等因素有关, 并且随时间漂移^[17], 因此完全消除系统硬件偏差是不可能的.

2.3 三频信标高精度 TEC 测量方法

双频时延-相位联合测量方法, 通过平滑处理提高了电离层 TEC 测量精度. 但是由于相位模糊值过小, 仅为 $0.13 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ ^[18], 通过平均得到的相位积分常数误差大于此值, 因此无法通过相位模糊值对相位积分常数的测量误差进行修正. 三频信标包括 VHF, UHF 和 L (150.012 MHz, 400 MHz, 1066.752 MHz) 三个频率的载波, 通过三个频率之间的两两差分并结合有关数学处理, 使相位模糊的处理精度得到大幅度提高. 具体推导过程参考文献 [18]. 设卫星发射 3 个频率的信号分别为 f_1 , f_2 , f_3 , 计算方法如下:

$$T = 8.3165 \times 10^{16} [(-\Delta\phi_{13}7 + \Delta\phi_{12}8) \bmod 1 + k]. \quad (9)$$

其中, $\Delta\phi_{13}$ 和 $\Delta\phi_{12}$ 分别为频率 f_1 和 f_2 的差分相位以及频率 f_1 和 f_3 的差分相位, k 为一正整数, 将该常数称为三频相位积分常数. 图 1 给出了式 (9) 将相位模糊值提高到 $8.3165 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ 的结果^[18]. 在硬件工作正常, 并修正了系统硬件误差的情况下, 平均后的相位积分常数误差小于相位模糊值的 1/2. 这样就可以对相位积分常数的测量结果进行精确修正, 使相位积分常数的精度得到提高.

式 (9) 给出了三频信标相对 TEC 的求解方法. 求解绝对 TEC 关键是确定三频相位积分常数 k . 受 GPS 时延-相位联合测量 TEC 方法的启发, 本文提出一种三频时延-相位联合测量 TEC 的方法.

双频差分时延法计算绝对 TEC 时有一个重要

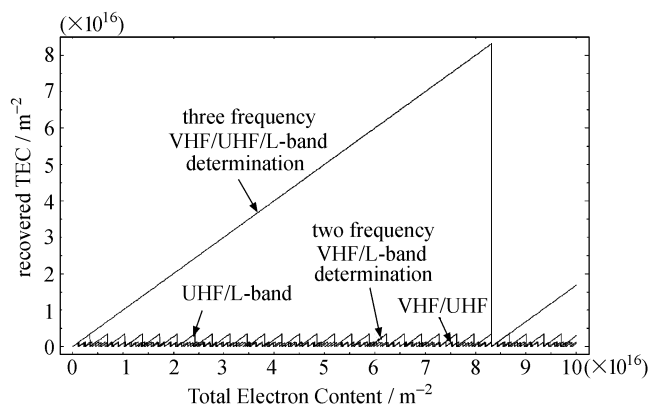


图 1 双频和三频相位模糊的比较

Fig. 1 Comparison of TEC ambiguities using two frequencies and three frequencies

误差源, 即电离层电子密度随机起伏所造成的湍流误差. 利用三频信标通过三频组合测量可以消除这一误差 [8].

卫星发射的三个频率载波的传播时延分别为 [5]

$$t_i = t_0 + \frac{40.3}{cf_i} T + \frac{c^3 r_e^2}{16\pi^2 f_i^4} \Sigma. \quad (10)$$

其中, $i = 1, 2, 3$ 为分别对应的三个频率, r_e 为经典电子半径, Σ 为与斜路径电子密度不规则体有关的参数, 有

$$\Sigma = \frac{L^2}{\cos^2 \theta} \left(1 - \frac{2L}{3z} \right) \nabla^2 A_{\Delta n}(0).$$

式中 L 为电子密度不规则体的厚度; θ 为不规则层重心处传播路径与天顶方向的夹角; z 为层顶距地面的垂直距离; $A_{\Delta n}(\rho)$ 为横向自相关函数, 其是反映电子密度随机起伏统计特性的重要参数.

求解式 (10) 可以得到 [8]

$$T = \frac{c}{40.3} \cdot \frac{f_2^4(f_3^4 - f_1^4)(t_2 - t_3) - f_1^4(f_3^4 - f_2^4)(t_1 - t_3)}{(f_2^2 - f_1^2)(f_3^2 - f_1^2)(f_3^2 - f_2^2)}. \quad (11)$$

其中, $t_2 - t_3$ 和 $t_1 - t_3$ 是地面接收机测量量, 3 个频率是已知量, 通过式 (11) 求得的 TEC 消除了电离层随机起伏误差, 从而提高了 TEC 测量精度. 利用这种方法得到的 TEC 再联合三频差分相位方法, 能够得到高精度的电离层 TEC. 其算法流程设计如图 2 所示.

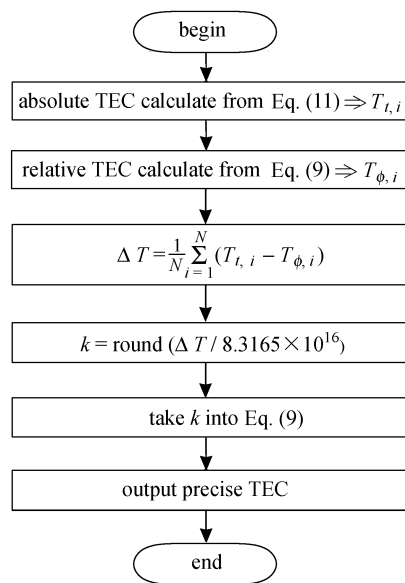


图 2 三频信标时延和相位联合求解 TEC 流程

Fig. 2 Flowchart of the TEC calculation using the method of three frequencies time delay and phase combination

该方法与双频时延-相位联合解算 TEC 有以下两点本质的区别.

①在用三频差分时间法计算绝对 TEC 时考虑了电离层电子密度随机起伏引起的误差, 这样得到的结果比双频差分时间法计算更精确, 保证了下文数值模拟中联合解算 TEC 的高精度.

②该方法不仅吸纳了 GPS 双频-时延相位联合求解的优点, 在相位积分常数求解时采用一个完整历元相位积分常数的平均值, 较好地消除了系统硬件的随机误差. 而且该方法建立在文献 [18] 将相位模糊值提高到 8.3 TECU 的基础上, 再利用三频相位积分常数 k 为整数的特性, 能够再次对三频时延测量结果进行修正, 可以精确修正误差在 4.16 TECU 以内的相位积分常数. 值得注意的是, 在相位模糊值大大提高后, 相位测量引起的误差会被放大, 但是误差放大与整体精度提高量相比是微小的.

3 数值模拟

选取 IRI 2007 模型计算出的电子密度分布作为背景电子密度分布, 地面设置 11 个台站接收卫星信标信号. 图 3 为卫星位于某一位置时双频信标和三

频信标 TEC 测量结果的比较, 图 3 中模型数据由 IRI2007 国际参考电离层模型给出, 双频信标的计算结果根据国际通用 GPS 卫星 TEC 测量精度随机模拟产生, 三频信标的计算结果根据本文算法模拟产生.

从图 3 可以看出, 本文提出的三频 TEC 测量方法不论在平均误差还是在稳定性上都优于双频信标. 为了进一步体现本文算法在电离层 CT 成像中的优势, 分别用本文的三频算法和常用的双频算法算得 TEC, 采用目前最优的 MART 算法进行电离层

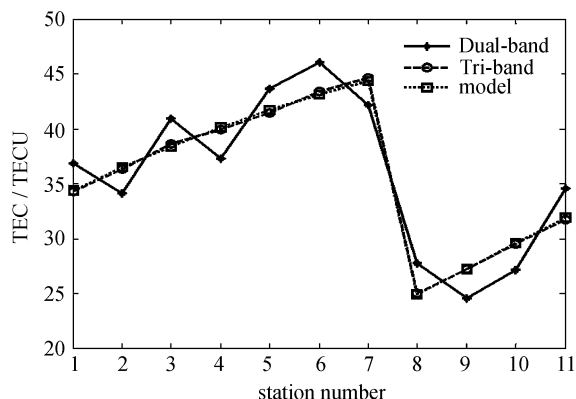


图 3 TEC 计算误差模拟
Fig. 3 Errors of the simulation

CT 模拟. 模拟的参数选取如下.

模型: IRI2007 (加入两个电离层扰动).

时间: 2003 年 11 月 12 日 12:00 LT.

高度范围: 100~500 km.

卫星高度: 500 km.

卫星纬度跨越: $3^{\circ}\text{S}\sim 23^{\circ}\text{N}$.

反演区域纬度: $0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$.

经度: 120°E .

网格划分: 垂直尺度为 10 km,

水平尺度为 0.5 个纬度.

台站布设: 位于 5°N 至 15°N 之间, 沿 120°E 经线每隔 2° 一个台站, 共 6 个台站.

TEC 采样间隔: 约 0.064° (每隔 0.064° 一次 TEC 采样).

迭代初值: 2003 年 12 月 12 日 12:00 LT 时刻 IRI2007 模型电子密度 (与实际模型值的偏离约 25%).

从图 4 模拟结果可以看出, 本文提出的三频重建结果与实际模型吻合较好, 双频重建结果由于 TEC 测量的误差较大, 使图像出现了较大失真. 图 5 给出的是重建结果与模型分布之间的差值结果, 误差比较结果明显可以看出, 三频反演结果的误差小于双频反演结果, 三频反演结果的均方误差为 $8.58 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$,

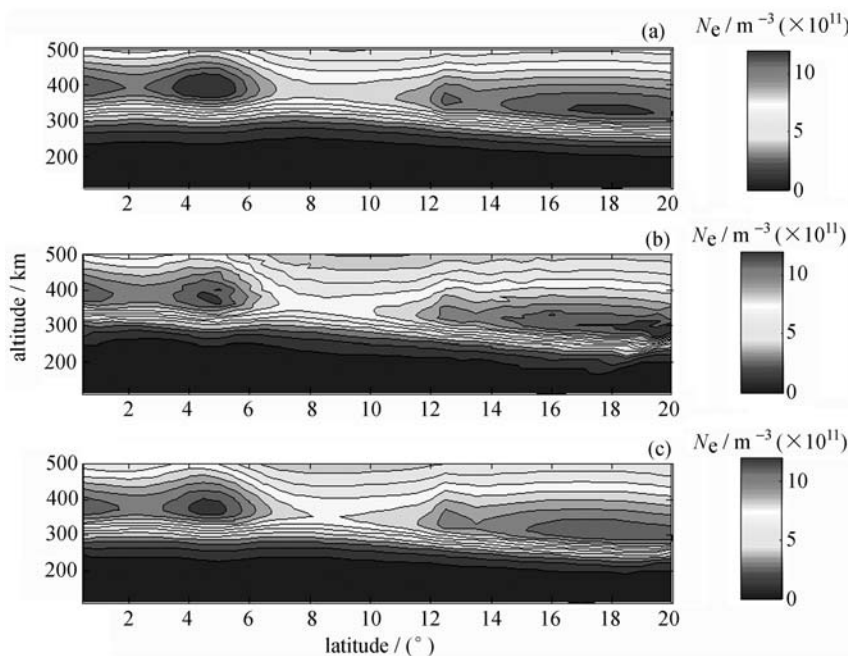


图 4 CT 仿真结果比较. (a) 模型, (b) 双频重建结果, (c) 三频重建结果

Fig. 4 Comparison of the simulations. (a) original electron density distribution simulated by the model, (b) two-frequency reconstruction, (c) three-frequency reconstruction

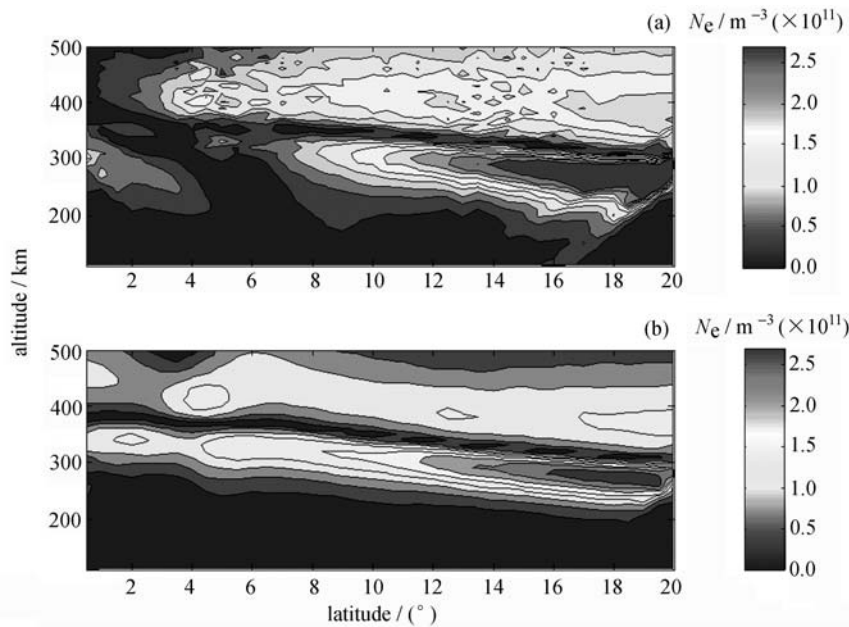


图 5 层析成像仿真结果误差比较. (a) 双频误差, (b) 三频误差

Fig. 5 Difference image between the original image and the reconstructions. (a) two-frequency case, (b) three-frequency case

双频反演结果的均方误差为 $1.34 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$. 仔细观察图 5 可以看出, 两个反演结果在纬度 $10^\circ \sim 20^\circ$, 高度 $250 \sim 350 \text{ km}$ 处误差都较大, 经分析发现这一误差是由迭代初值引起的. 在该区域, 初值的最大电子密度高度与模型偏离较大, 在层析成像的过程中由于水平射线的缺失, 造成了反演结果随初值整体下移, 致使该区域反演误差较大. 由此也可以看出, 水平射线缺失是电离层层析反演的主要误差源之一. 提高层析成像结果的垂直分辨率, 需要增加掩星和其他测量数据, 这方面的研究将另文介绍.

4 结语

以 GPS 时延-相位联合测量电离层 TEC 算法为基础, 提出了三频时延-相位联合测量算法. 该方法不但吸取了原算法的优点, 去除了系统硬件误差中的随机部分, 而且充分发挥了三频差分时延测量能够消除电子密度随机起伏误差, 以及三频差分相位测量能够大大提高相位模糊值的两大优势, 从而进一步提高了电离层 TEC 测量的精度. 模拟结果显示采用本文方法得到的电离层 TEC 更加精确, 能使层析成像

精度得到较大提高.

三频信标测量技术的产生, 必将为电离层层析成像这一新兴的探测技术再次注入活力. 这项技术已经在美国得到了高度重视和实际应用. 但是, 在实际的工程应用中, 该项技术仍然存在一些问题, 需要进一步发挥三频探测的优势, 进而提高探测分辨率等指标. 未来努力的方向是用实测数据对相关的算法做进一步的研究和分析, 逐步形成较高精度的三频信标测量技术, 以期满足地震电磁试验卫星测量的初步需求.

致谢 中国电波传播研究所刘钝高级工程师给予了帮助和有益讨论.

参考文献

- [1] Lei J, Syndergaard S, Burns A G, Solomon S C, et al. Comparison of COSMIC ionospheric measurements with ground-based observations and model predictions: Preliminary results [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, A07308, doi: 10.1029/2006JA012240
- [2] Guo Peng, Hong Zhenjie, Zhang Dahai. COSMIC Project [J]. *Prog. Astron.*, 2002, **20**(4):324-336. In Chinese (郭鹏, 洪振杰, 张大海. COSMIC 计划 [J]. 天文学进展, 2002, **20**(4):324-336)

- [3] Pulnits S A. Seismic activity as a source of the ionospheric variability [J]. *Adv. Space Res.*, 1998, **22**(6):903-906
- [4] Liu J Y, Chen Y L, Pulnits S A, Tsai Y B, Chuo Y J. Seismo-ionospheric signatures prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**(19):3113-3116
- [5] Silina A S, Liperovskaya E V, Liperovsky V A, Meister C V. Ionospheric phenomena before strong earthquakes [J]. *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.*, 2001, **1**:113-118
- [6] Yang Fang, Shen Xuhui, Wu Yun, Zhuo Lin. Electromagnetic satellite and its application in the field of seismo-precursor detection [J]. *Spacec. Eng.*, 2008, **17**(1):68-73. In Chinese (杨芳, 申旭辉, 吴云, 卓林. 电磁环境卫星系统及其在地震短临预测中的应用 [J]. 航天器工程, 2008, **17**(1):68-73)
- [7] S A Pulnits, Legen'ka A D, Gaivoronskaya T V, Depuev V K. Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2003, **65**:1337-1347
- [8] Wu Jian. A new technique for measuring ionospheric weather with Tri-Band Beacon [J]. *Sci. China: A*, 2000, **30**(Sup.):111-114. In Chinese (吴健. 用三频卫星信标测量电离层天气新方法 [J]. 中国科学: A 辑, 2000, **30**(增):111-114)
- [9] Zhen Weiming, Feng Jian. Satellite-borne detection technology with Tri-Band Beacon [C]//The 13th National Solar-Terrestrial Space Physics Conference, 2009. In Chinese (甄卫民, 冯健. 星载三频信标探测技术 [C]//第十三届全国日地空间物理学学术讨论会论文集, 2009)
- [10] Huang Wengeng, Chen Yanhong, Shen Hua, Zhuang Chunbo. Study of ionospheric gradient by means of GPS observations [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(2):183-187 (黄文耿, 陈艳红, 沈华, 庄淳宇. 用 GPS 观测研究电离层 TEC 水平梯度 [J]. 空间科学学报, 2009, **29**(2):183-187)
- [11] Gao Wei, Ma Guanyi, Chen Yanhong, Shen Hua, Li Jinghua. Derivation of GPS-TEC and instrumental biases in the equatorial anomaly region [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2008, **28**(6):541-546. In Chinese (高伟, 马冠一, 陈艳红, 沈华, 李婧华. 赤道异常区 GPS-TEC 与系统硬件偏差的反演. 空间科学学报, 2008, **28**(6):541-546)
- [12] Chang Qing, Zhang Donghe, Xiao Zuo, Zhang Qishan. A method for estimating GPS instrumental biases and its application in the calculation [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2001, **44**(5):596. In Chinese (常青, 张东和, 萧佐, 张其善. GPS 系统硬件延迟估计方法及其在 TEC 计算中的应用 [J]. 地球物理学报, 2001, **44**(5):596)
- [13] Zhang Donghe, Cao Cong, Zhen Weiming. The processing method of ionospheric TEC data from GPS measurements [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 1995, **10**(3):84-87 (张东和, 曹冲, 甄卫民. GPS 接收机测量电离层 TEC 的数据处理方法 [J]. 电波科学学报, 1995, **10**(3):84-87)
- [14] Rocken C, Kuo Y H, Schreiner W, Hunt D, Sokolovskiy S. COSMIC system description [J]. *Special Issue Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, 2000, **11**(1):21-52
- [15] Wu Xongbin, Xu Jisheng, Ma Shuying. An improved reconstruction algorithm for computerized ionospheric tomography [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2000, **43**(1):19-27. In Chinese (吴雄斌, 徐继生, 马淑英. 一种改进的电离层层析成像算法 [J]. 地球物理学报, 2000, **43**(1):19-27)
- [16] Liu Z Z. Ionospheric tomographic modeling and applications using global positioning system (GPS) measurements [D]. Calgary: The University of Calgary, 2004
- [17] Huang Z, Yuan Hong, Wan Weixing. Test of GPS TEC hardware biases estimating methods [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2003, **18**(4):472-476. In Chinese (黄智, 袁洪, 万卫星. GPS TEC 硬件偏差估计方法的有效性 [J]. 电波科学学报, 2003, **18**(4):472-476)
- [18] Bernhardt P A, Siefring C L. New satellite-based systems for ionospheric tomography and scintillation region imaging [J]. *Radio Sci.*, 2006, **41**, RS5S23, doi: 10.1029/2005RS003360