0254-6124/2009/29(3)-281–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Liu Zhaolin, Sun Xuejin, Fu Yang. TEC compensated inversion method of ionospheric occultation. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(3): 281∼286

电离层掩星反演的 TEC 修正反演法*

刘赵林[1,2] 孙学金[1] 符 养[2]

[1](解放军理工大学气象学院 南京 211101)

[2](北京应用气象研究所)

摘 要 电离层掩星数据反演的传统方法是采用改正 TEC 的 Abel 变换反演法, 实际电离层的非球对称性会给电子密度的反演结果带来误差. 文中研究了利用 TEC 修正方法结合背景场来剔除 TEC 受电子密度水平变化的影响, 改善球对称假设适用性, 提高反演精度, 并应用此方法于模拟掩星事件的反演. 结果表明, 与传统的 Abel 变换反演相比, TEC 修正反演法能够减小反演误差. 用 TEC 修正反演法对不同方法获取的背景场的反演结果比较表明, 背景场与实际场吻合的程度越高, 反演效果越好.

关键词 电离层掩星; TEC 修正反演法; 电子密度廓线; IRI-2007

中图法分类号 P 352

TEC Compensated Inversion Method of Ionospheric Occultation

LIU Zhaolin[1,2] SUN Xuejin[1] FU Yang[2]

[1](*Institute of Meteorology People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing* 211101)

[2](*Beijing Institute of Applied Meteorology*)

Abstract A calibrated TEC of Abel inversion method is usually applied in the inversion of ionospheric occultation data, which could cause error for the spherical asymmetry of the real ionosphere. This paper studies a method, TEC compensated inversion method. Combined with background field, this method removes the effect of TEC from the horizontal change of the electron density to improve the applicability of spherical symmetry and inversion accuracy. Then the method is applied in the inversion of simulated data. The result of simulated data inversion validates that TEC compensated inversion method decreases the inversion errors greatly, compared with Abel inversion method. Through the study on background fields obtained by different ways with TEC compensated method, the more close between background and real field, the better inversion result is obtained.

Key words Occultation technology, TEC compensated inversion method, Electron density profile, IRI-2007

* 国家自然科学基金项目资助 (40474069)

2008-06-23 收到原稿, 2008-12-26 收到修定稿

E-mail: liuzhaolin1985@126.com

1 引言

早在 20 世纪 60 年代中期和末期, Kilore 等[1] 和 Fjeldo 等[2] 就对掩星技术进行了探讨. 1993 年美国 UCAR (University Cooperation for Atmospheric Research) 制订了 GPS/MET 的研究计划, 并于 1995 年 4 月 3 日发射了全球第一颗用于研究掩星技术的 MicroLab-1 低轨实验卫星 (LEO), 首次验证了无线电掩星技术探测地球大气和电离层的可行性[3],[4]. 与传统的卫星遥测、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[5]. 随后国际上相继发射了 Orsted, Sunsat, CHAMP, SAC-C, GRACE 和 COSMIC 等卫星或星座[6]. 这些卫星或星座每天接收的掩星观测事件可达数千个, 极大地丰富了电离层观测数据, 促进了空间物理学研究的发展, 提升了空间环境预报的水平, 具有极其重要的意义.

电离层掩星观测实验中接收的观测量是载波相位 L 和伪距 P, 由此计算得到斜路径上的电子总含量 (TEC), 结合卫星轨道数据, 在电离层电子密度近似局部球对称分布的假设下, 可以反演得到电子密度垂直剖面. 事实上, 真实的电离层电子密度分布不是完全球对称的, 因此局部球对称的近似是影响电离层掩星反演精度的一个重要因素[7]. 为了减小球对称假设的反演误差, 有学者提出了一些改进方法[6],[8]~[12], 例如, 用全球 TEC 图来提供电离层水平变化信息, 再依据分离假设进行 Abel 变换反演的分离假设反演法; 用电离层模式来约束反演的三维模式约束反演法; 由邻近的掩星观测反演结果插值来获得电离层水平变化信息, 进而修正 TEC 后进行 Abel 变换反演的 TEC 修正反演法.

本文利用 IRI-2007 电离层模式提供模拟掩星数据, 对 TEC 修正反演法进行了进一步的研究和探讨, 并结合 Abel 变换反演法, 对反演结果进行了比较分析.

2 电离层掩星反演改正 TEC 的 Abel 反演法

电离层掩星观测得到的通常为 GPS 卫星载波 f_1 和 f_2 对应的相位数据 L_1 和 L_2, 而斜路径 TEC 与观测量之间的关系式有

$$\mathrm{TEC}=\int_{\mathrm{raypath}} N_{\mathrm{e}}(s)\mathrm{d}s= \frac{1}{40.3}\times\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2-f_2^2}(L_1-L_2)+\varepsilon. \tag{1}$$

其中, ε 为待定常数项与观测误差之和.

目前, 电离层掩星反演通常采用改正 TEC 的 Abel 反演法[4],[6],[13]. 图 1 所示为电离层掩星观测的几何描述[6], AC 为斜向 TEC 路径, D 为此路径 TEC 对应的掩星切点, 位于掩星切点与 GPS 卫星一侧的 DB 为非掩星侧, CD 一侧为掩星侧, 图 1 中 B,C 点距球心距离相等, 低轨卫星 (LEO) 在 B 和 C 点都观测 GPS 信号, 获得 TEC_{AB} 和 TEC_{AC}. 若假设电子密度为局部球对称分布, 则 AB 段的 TEC 在 B 和 C 点观测时相同, 进而有

$$\mathrm{TEC}_{BC}=\mathrm{TEC}_{AC}-\mathrm{TEC}_{AB}= 2\int_{r_0}^{r_{\mathrm{LEO}}}\frac{rN_{\mathrm{e}}(r)}{\sqrt{r^2-r_0^2}}\mathrm{d}r. \tag{2}$$

其中, N_{e} 为电子密度, r 为积分路径上的点到地心的距离, r_0 为掩星切点到地心的距离, r_{LEO} 为 LEO 卫星到地心的距离. 依据 Abel 变换可以由式 (2) 得 $r=r_0$ 处的电子密度为

$$N_{\mathrm{e}}(r_0)=-\frac{1}{\pi}\int_{r_0}^{r_{\mathrm{LEO}}}\frac{\mathrm{d}(\mathrm{TEC}_{BC})/\mathrm{d}r'}{\sqrt{r'^2-r_0^2}}\mathrm{d}r'. \tag{3}$$

由此可以得到电子密度剖面. 下文中所说的 Abel 变换反演法, 即为此方法.

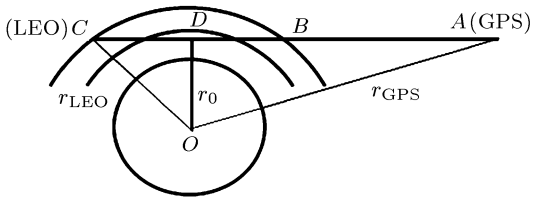


图 1 电离层掩星观测几何示意图

Fig. 1 Geometry of ionospheric occultation observation

3 TEC 修正反演法原理及方法

如图 2 所示[12], 反演截面上的电离层扰动对电离层掩星的反演影响, 可以通过对过反演点路径的 TEC 进行修正来改进, 具体原理如下.

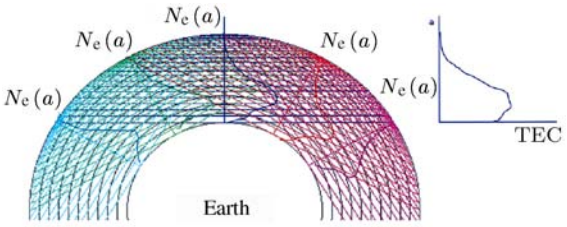


图 2 用临近掩星观测进行修正的 TEC 修正反演原理

Fig. 2 TEC compensated of close-up occultation observations

引入截面 (r,ϕ) 二维坐标, 其中地心坐标为 $(0,0)$, r,ϕ 分别为截面上点 (r,ϕ) 的地心距 (与地心的距离)、点 (r,ϕ) 的地心线 (与地心连线) 与反演掩星点 $(r_0,0)$ 的地心线夹角. 则截面上电离层电子密度为 $N_e(r,\phi)$, 要求掩星点 $(r_0,0)$ 上的电子密度廓线 $N_e(r,0)$, 仅需对路径 TEC 作如式 (4) 修正.

$$\mathrm{TEC}'' = \mathrm{TEC}' + \int_{p_1}^{p_2} [N_e(r,0) - N_e(r,\phi)]\mathrm{d}l. \quad (4)$$

其中, TEC'' 为进行 TEC 修正后掩星点 $(r_0,0)$ 上各高度掩星切点对应的 TEC; TEC' 为进行 TEC 修正前掩星点 $(r_0,0)$ 上各高度掩星切点对应的 TEC; p_1, p_2 分别为图 1 中所示 TEC 路径上对应的 B 点和 C 点; $N_e(r,0)$ 可由掩星点 $(r_0,0)$ 上各高度掩星切点的 TEC 用 Abel 变换反演得到; $N_e(r,\phi)$ 为夹角 ϕ 处的电子密度廓线 $N_e(r)$, 来源于模式提供的参考廓线、电离层垂测仪的密度廓线或相邻掩星反演得到的密度廓线.

TEC 修正反演法对于改进局部球对称假设的 Abel 变换反演电子密度受水平梯度影响具有比较好的效果. 具体的反演方法步骤如下.

①由观测量依据式 (1) 和 (2), 计算掩星点 $(r_0,0)$ 上各高度掩星切点对应的 TEC.

②各高度掩星切点对应的 TEC 依据式 (3) 反演得到掩星点 $(r_0,0)$ 处电子密度廓线 $N_e(r,0)$.

③依据 GPS 和 LEO 卫星位置确定掩星截面, 由模式提供的参考廓线、电离层垂测仪的密度廓线或掩星反演得到的密度廓线插值获得背景场截面密度廓线 $N_e(r,\phi)$.

④由式 (4) 修正掩星点 $(r_0,0)$ 上各高度掩星切点的 TEC 后, 再进行 Abel 变换得到掩星点 $(r_0,0)$ 的电子密度廓线 $N_e(r,0)$.

4 模拟掩星观测数据反演

利用 IRI-2007 电离层模式提供全球格点 (1×1) 上的电离层电子密度廓线模拟数据, 设定的时间为 2007 年 6 月 21 日, 12:00 UT, 高度为 50~1000 km, 其他模式设置项为默认值. IRI-2007 为最近发布的国际电离层参考模式, 是基于大量不同仪器和方法对电离层的长期连续观测量综合得到的电离层三维经验模式, 模式精度较 IRI-2001 等旧版有所提高. 模拟卫星轨道设定为 800 km, 掩星事件最低点为 60 km, 掩星点选为全球 ($-90°$ ~ 90°N, $-180°$ ~ 180°E) 范围内随机的 1000 个点, 并使 1000 个点在全球上均匀分布, 其对应的经纬度分布如图 3 所示. 图 3 中每一点代表一次掩星事件, 对应的掩星截面为球面上任意投影方向的剖面. 截面设定高度范围为 IRI-2007 提供的高度

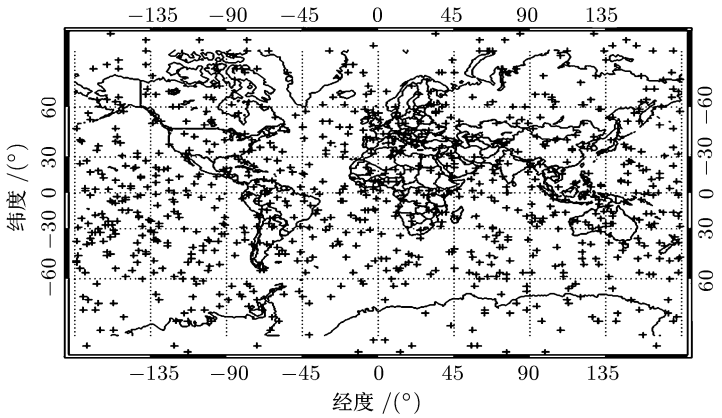


图 3 1000 个模拟的掩星点经纬度分布

Fig. 3 Distribution of the 1000 simulated occultations

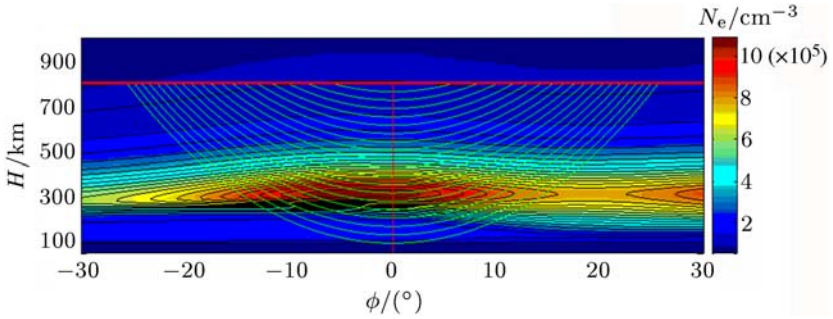


图 4 (−1.726°N, −35.707°E) 处掩星截面和模拟 TEC 路径

Fig. 4 Ionospheric section for the occultation at (−1.726°N, −35.707°E)

50~1000 km, 夹角的范围为 −60° ~ 60°, 每 1° 为一个格点, 对应的格点上的电子密度廓线由 IRI-2007 模式提供的全球电子密度廓线格点数据三维插值获取. 模拟设定时间为 12:00 UT, 掩星点为全球范围内的随机点, 在经度上考虑到不同的地方时区域情形, 从纬度上参考了电离层不同纬度区域现象, 使模拟的掩星事件数据更具有代表性.

用 TEC 修正反演法进行个例分析. 选取掩星点为 (−1.726°N, −35.707°E) 处的掩星事件, 其电波地球投影为南偏东方向, 其掩星事件的截面和路径如图 4 所示. 图 4 中横坐标为夹角, 纵坐标为高度. 夹角 0° 处的实线为掩星点的高度廓线, 800 km 高度处的实线为 LEO 卫星轨道, 规则的弧形曲线为模拟的掩星事件路径, 其中色标所标识的为电子密度.

利用模式提供的夹角为 −30°, −20°, −10°, 10°, 20°, 30° 点上的廓线数据插值构建 TEC 修正反演法的背景场, 简称为 TEC 修正反演法 (实际). 对依据模式数据和式 (2) 模拟得到的掩星点上各高度掩星切点对应的 TEC 进行 Abel 变换反演和 TEC 修正反演 (实际), 得到的密度廓线和实际的模式廓线对比如图 5 所示. 图 5 中虚线为 Abel 变换反演得到的密度廓线, 点划线为 TEC 修正反演法得到的密度廓线, 实线为模式提供的实际电子密度廓线 (EDP). 从图 5 可以看出, 电子密度峰值高度处传统的 Abel 变换反演的电子密度峰值相对误差 σ_m 为 −16.9%, 而利用 TEC 修正反演法得到的峰值相对误差 σ_m 仅为 1.2%.

$$\sigma_m \equiv \frac{N_{eF2i} - N_{eF2r}}{N_{eF2r}} \times 100\%. \qquad (5)$$

其中, σ_m 为电子密度峰值相对误差, N_{eF2i} 为反演

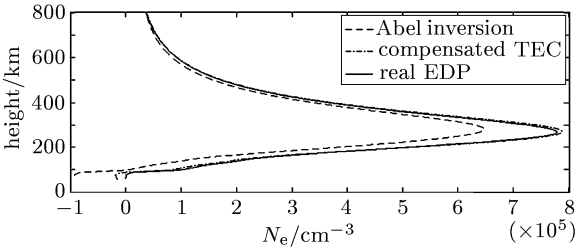


图 5 图 4 中的模拟掩星个例反演结果

Fig. 5 Inversion result of the simulation occultation in Fig.4

的掩星点处电离层 F_2 层电子密度峰值, N_{eF2r} 为实际的掩星点处电离层 F_2 层电子密度峰值.

TEC 修正反演法采用的背景场为 −30°, −20°, −10°, 10°, 20°, 30° 格点上模拟 (实际运用中常为观测值) 的掩星事件反演得到的廓线数据插值构建 TEC 修正反演法的背景场 (简称为 TEC 修正反演法 (掩星)), 原理如图 2 所示. 选取掩星点为 (−0.168°N, 61.057°E), 电波地球投影为北偏东方向, 此掩星点处对应的掩星截面如图 6 所示. 可以看到, 这是一个电离层水平不均匀反演的典型例子, 构建背景场格点处模拟的掩星反演的峰值相对误差偏差 σ_m 在 10% 左右. 图 7 给出了此掩星点反演得到的结果, 从图 7 可以看出, 此处的 Abel 变换反演受水平不均匀的影响较大, 偏离程度比较高, 峰值密度相对误差 σ_m 为 −13.72%, 采用 TEC 修正反演法 (掩星) 的峰值相对误差 σ_m 为 −8.73%, 而用 TEC 修正反演法 (实际) 的峰值相对误差 σ_m 为 1.80%. 显然, 背景场越接近实际场, TEC 修正反演法的反演结果就越接近实际值. 实际应用中, 观测得到的密度廓线常较电离层气候模式的模式值接近于掩星事件实际背景场, 而

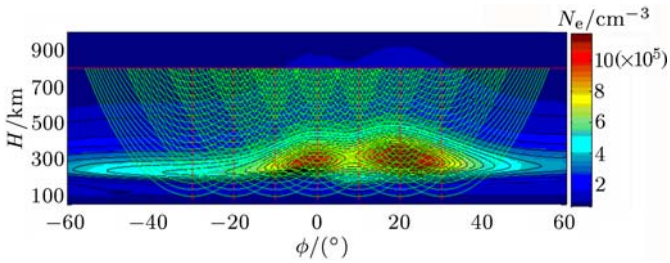


图 6 (−0.168°N, 61.057°E) 处掩星剖面及相临 7 个模拟 TEC 路径

Fig. 6 Ionospheric section for the occultation at (−0.168°N, 61.057°E) and illustration of seven close-up simulative TEC path

TEC 修正反演法 (掩星) 对改善掩星反演受电离层水平梯度影响有一定的效果, 为实际观测的电子密度反演提供了一种提高反演精度的途径.

模拟的 1000 个掩星事件的反演结果统计参见图 8 和表 1. 图 8 给出了 F_2 层峰值电子密度反演结果与模式值的比较. 图 8(a), 8(b) 和 8(c) 分别为 Abel 变换反演法、TEC 修正反演法 (掩星) 和 TEC 修正反演法 (实际) 的反演结果与模式值的比较. 从图 8 中可以看出, TEC 修正反演法 (实际或掩星) 较 Abel 变换反演法反演得到的结果与模式值相关性更高, 且据图 8(b) 与图 8(c) 的比较可以看出, 反演的背景场与实际场的接近程度越近则其相关性越高. 从表 1 的统计结果来看, 采用 TEC 修正反演法 (掩星), F_2 层峰值电子密度反演相对和绝对误差减小为原来的 2/3; 而采用 TEC 修正反演法 (实际), F_2 层峰值电子密度则减小为原来的 1/4.

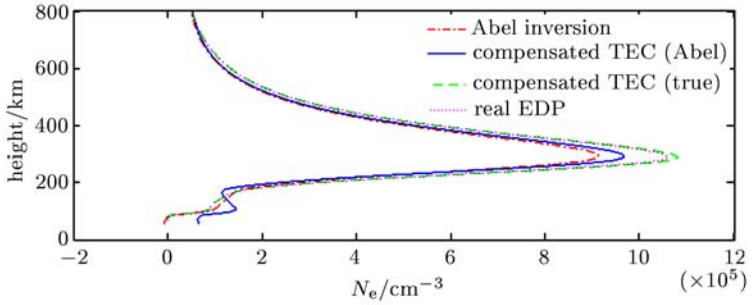


图 7 模拟中的掩星点 (−0.168°N, 61.057°E) 处反演结果

Fig. 7 Inversion result of the simulation occultation in Fig.6

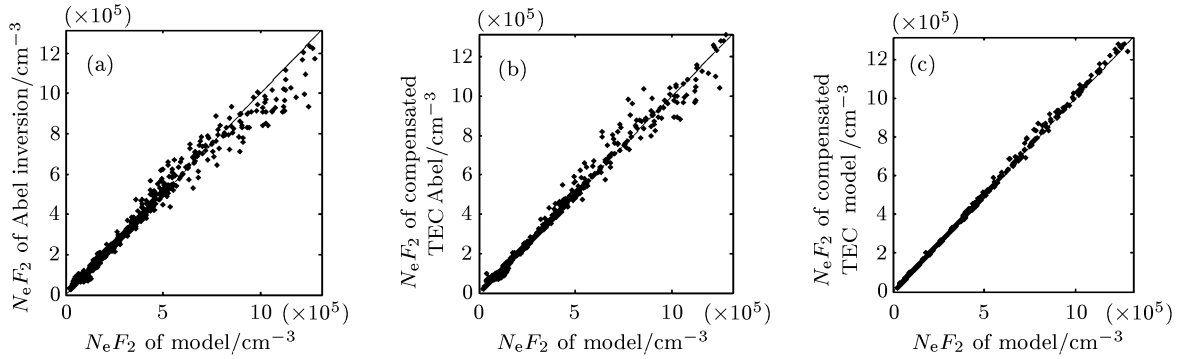


图 8 Abel 变换反演法和 TEC 修正反演法得到的 F_2 层电子密度峰值与模式值的比较. (a) Abel 变换反演法反演得到的电子密度峰值与模式值相关系数为 0.990, (b) TEC 修正反演法 (掩星) 反演得到的电子密度峰值与模式相关系数为 0.994, (c) TEC 修正反演法 (实际) 反演得到的电子密度峰值与模式相关系数为 0.999

Fig. 8 Comparison of results from different methods. (a) Abel inversion method. The correlation coefficient between inversed peak electron density and model value is 0.990. (b) TEC compensated inversion method (Abel), the correlation coefficient between inversed peak electron density and model value is 0.994. (c) TEC compensated inversion method (model), the correlation coefficient between inversed peak electron density and model value is 0.999

表 1 F_2 层峰值电子密度反演值与模式值的误差统计结果

Table 1 Error statistic of inversed peak electron density of F_2 layer

反演方法	F_2 峰值电子密度相对误差 σ_m/(%)		F_2 峰值电子密度绝对误差/cm^{-3}	
	平均值	标准值	平均值	标准值
Abel 反演方法	2.6	12.2	−969.085	36065.76
TEC 修正反演法 (掩星)	0.4	9.7	499.171	26278.99
TEC 修正反演法 (实际)	−0.2	2.6	1558.747	8696.60

5 结论

本文比较详细地阐述了改正 TEC 的 Abel 反演法和 TEC 修正反演法, 并用 IRI-2007 模式提供的模拟数据进行了模拟反演. 模拟数据的反演结果表明, TEC 修正反演法可以提高反演精度. 对比分析针对不同插值形成的 TEC 修正反演法所需的背景场, 可以发现 TEC 修正反演法的反演效果和背景场与实际场的吻合程度密切相关, 低吻合度下, 效果不是很明显, 高吻合度下, 效果比较显著.

依据 TEC 修正反演法原理, 在背景场完全吻合实际场的情况下, 可以完全反演出实际的廓线. 如何改进 TEC 修正反演法的背景场与实际场的吻合情况, 是发展用 TEC 修正反演法提高电离层掩星电子密度反演精度的研究方向.

参考文献

[1] Kilore A J, Cain D L, Levy G S *et al*. Occultation experiment: Results of the first direct measurement of Mars' atmosphere and ionosphere. *Science*, 1965, **149**:1243∼1248

[2] Fjeldo G, Eshleman V R. Atmosphere of Venus as studied with the Mariner V dual radio frequency occultation experiment. *Radio Sci.*, 1969, **4**:879∼897

[3] Kursinski E R, Hajj G A, Schofield J T *et al*. Observing earth's atmosphere with radio occultation measurements using the global positioning system. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(D19):23 429∼23 465

[4] Schreiner W S, Sokolvskiy S V, Rocken C *et al*. Analysis and validation of GPS/MET radio occultation data in the ionosphere. *Radio Sci.*, 1999, **34**(4):949∼966

[5] Todd Mori Kawakami. Validation of ionospheric electron density profiles inferred from GPS occultation observations of the GPS/MET experiment. Austin: Graduate School of The University of Texas, 2001

[6] Wu Xiaocheng, Hu Xong, Gong Xiaoyan *et al*. Three dimensional model constrained inversion method for ionospheric occultation. *Chin. J. Geophys.*, 2008, **51**(3): 618∼625. in Chinese (吴小成, 胡雄, 宫晓燕等. 三维模式约束的电离层掩星反演方法. 地球物理学报, 2008, **51**(3):618∼625)

[7] Zhang Xunjie, Zeng Zhen, Hu Xong *et al*. Effects of ionospheric horizontal inhomogeneity on occultation inversion. *Chin. J. Geophys.*, 2002, **45**(Supp.):1∼6. in Chinese (张训械, 曾桢, 胡雄等. 电离层水平不均匀性对无线电掩星资料反演的影响. 地球物理学报, 2002, **45**(增刊):1∼6)

[8] Hajj G A, Ibanez-Meier R, Kursinski E R *et al*. Imaging the ionosphere with the Global Positioning System. *Int. J. Imag. Sys. Tech.*, 1994, **5**:174∼184

[9] Hernandez-Pajares M, Juan M, Sanz J. Improving the Abel inversion by adding ground data LEO radio occultations in the ionospheric sounding. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**(16):2743∼2746

[10] Garcia-Fernandez M, Hernandez-Pajares M, Juan M *et al*. Improvement of ionospheric electron density estimation with GPS/MET occultations using Abel inversion and VTEC information. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A9):1338∼1342

[11] Garcia-Fernandez M, Hernandez-Pajares M, Juan M *et al*. Performance of the improved Abel transform to estimate electron density profiles from GPS occultation data. *GPS Solutions*. 2005, **9**(2):105∼110

[12] Tsai Lung Chih, Tsai Wei Hsiung. Improvement of GPS/MET ionospheric profiling and validation using the Chung-Li ionosonde measurements and the IRI model. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, 2004, **15**(4):589∼607

[13] Wu Xiaocheng, Hu Xong, Zhang Xunjie *et al*. A calibrated TEC method for inversion of ionospheric GPS occulation data. *Chin. J. Geophys.*, 2006, **49**(2):328∼334. in Chinese (吴小成, 胡雄, 张训械等. 电离层 GPS 掩星观测改正 TEC 反演方法. 地球物理学报,2006, **49**(2):328∼334)