

非球对称电离层掩星数据反演*

洪振杰¹⁾ 刘荣建¹⁾ 郭鹏²⁾ 董乃铭^{1)†}

1) (温州大学数学与信息科学学院, 温州 325035)

2) (中国科学院上海天文台, 上海 200030)

(2010年10月31日收到; 2011年8月31日收到修改稿)

电离层掩星数据的传统反演方法是电离层球对称假设下的 Abel 变换反演方法, 但是实际的电离层电子密度分布不是球对称的, 电离层的非球对称分布给电离层电子密度反演带来误差. 发展了一种新的非球对称电离层掩星反演方法, 利用国际参考电离层模型提供的三维电离层电子密度分布先验信息来修正掩星总电子含量, 再通过球对称假设下的 Abel 变换反演出电离层电子密度. 利用新方法反演了星座气象、电离层和气候观察系统掩星实测数据, 并将得到的反演结果与电离层探测器资料进行了比较. 结果表明, 新方法能够较好地反演出电离层电子密度.

关键词: 电离层掩星, 电子密度, 国际参考电离层模型

PACS: 94.20.Tt, 95.10.Jk

1. 引言

1995年4月, 美国麦博1号低轨卫星发射成功, 首次在理论上和技术上验证了无线电掩星技术用于探测地球大气的可行性^[1-3]. 2006年4月, 中国台湾和美国合作的星座气象、电离层和气候观察系统(COSMIC)卫星发射成功, 为电离层掩星反演提供了大量的观测资料. 电离层的探测, 对开发利用空间、维护人类的生存环境及保障航天活动的安全等都有着重要的应用价值, 它在经济上、军事上都具有重大的意义. 因此, 对电离层的探测已引起众多国家的重视.

传统的电离层反演方法是在电离层电子密度分布球对称假设下进行的, 但真实电离层电子密度分布并不是球对称的, 这就为电离层掩星反演带来了误差. 为了减小这种误差, 许多学者提出了一些解决方法^[4-8], 例如: 利用垂直总电子含量(TEC)来获得电离层水平变化信息, 再通过 Abel 变换反演法得出电离层电子密度廓线; 利用多个邻近的掩星观测结果插值来获得电离层水平变化信息; 利用三维电离层模型提供电离层电子密度水平变化的先验信息来约束反演.

本文介绍了电离层掩星反演的传统方法和改进的 Abel 变换反演方法, 举例说明了两种反演方法的不同, 利用改进的 Abel 变换反演方法反演 COSMIC 掩星数据, 将得到的电子密度与对应的电离层探测器资料进行了比较.

2. 传统电离层掩星反演方法

掩星观测可得到全球定位系统(GPS)卫星双频($f_1 = 1575.42$ MHz, $f_2 = 1227.60$ MHz)载波信号的相位延迟数据 L_1 和 L_2 . 假设双频载波信号传播路径相同, 则通过双频组合可获得斜向 TEC^[9]:

$$C = \int n_e dl = \frac{1}{40.3} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1 - L_2) + N\lambda + \varepsilon, \quad (1)$$

其中 C 为斜向 TEC, 单位为 10^{16} m^{-2} ; n_e 为电子密度, 单位为 cm^{-3} ; l 为 GPS 信号路径长度; N 为整周模糊数; λ 为 GPS 卫星发射到低地球轨道(LEO)卫星的无线电波波长; ε 为测量噪声.

如图1所示, 在电离层电子密度球对称分布和信号直线传播的假设下, GPS 卫星和 LEO 卫星之间的斜向 TEC 与电离层电子密度满足下列关系式:

$$C(r_0) = \int_{r_0}^{r_{\text{GPS}}} \frac{m_e(r)}{\sqrt{r^2 - r_0^2}} dr + \int_{r_0}^{r_{\text{LEO}}} \frac{m_e(r)}{\sqrt{r^2 - r_0^2}} dr, \quad (2)$$

* 国家公益性行业专项科研基金(批准号: 201108004)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2009AA12Z319)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: USPOQ2005@yahoo.com.cn

其中 r_{GPS} 和 r_{LEO} 分别为 GPS 卫星和 LEO 卫星的轨道半径, r_0 为掩星切点到地心的距离.

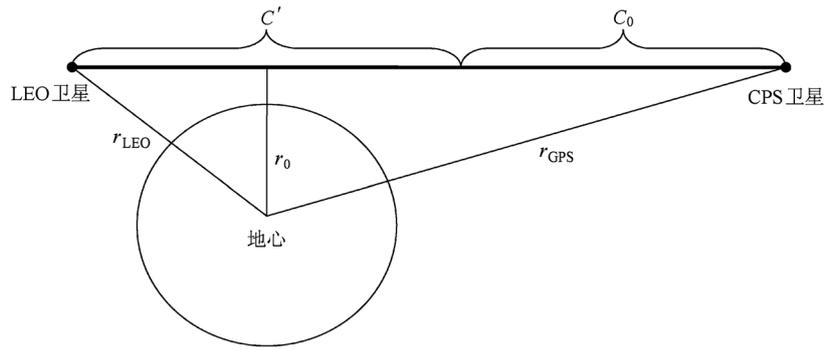


图1 TEC 分布示意图

假设 LEO 卫星轨道为圆轨道且掩星面与 LEO 卫星轨道面共面,利用非掩星侧的辅助观测数据来校正 TEC,消去 LEO 卫星轨道高度以上的 TEC,得到修正的 TEC,记为 $C'(r_0)$,

$$C'(r_0) = C - C_0 = 2 \int_{r_0}^{r_{\text{LEO}}} \frac{rn_e(r)}{\sqrt{r^2 - r_0^2}} dr, \quad (3)$$

其中 C_0 为 LEO 卫星轨道高度以上的 TEC. 通过 Abel 积分逆变换,得到电子密度

$$n_e(r_0) = -\frac{1}{\pi} \int_{r_0}^{r_{\text{LEO}}} \frac{dC'(r)/dr}{\sqrt{x^2 - r_0^2}} dx. \quad (4)$$

以上所述就是 Abel 变换反演方法,它要求电离层电子密度满足球对称分布. 由于实际的电离层电子密度分布并非球对称的,这就给 Abel 变换反演方法的使用带来了局限性,需要对其加以改进.

3. 改进的 Abel 变换反演方法

在一般情况下,电离层电子密度的球对称假设与实际不符,尤其是在低纬地区或日出与日落时,电离层电子密度水平梯度变化比较大,从而导致反演误差较大^[10]. 利用国际参考电离层(IRI) 模型提供的三维电离层电子密度分布先验信息,可以减少电子密度非球对称分布所带来的影响.

从 IRI 电离层模型提供的三维电离层电子密度分布,可以得出 LEO 卫星到 GPS 卫星连线之间的电子密度模型值以及掩星切点上的电子密度模型值. 利用 TEC 与电子密度的关系,可得出 LEO 卫星到 GPS 卫星连线之间修正的 TEC C^{IRI} 和球对称假设下修正的 TEC C'_{sph} (电子密度只与掩星切点的高度有关). 在电离层水平梯度比较小的情况下,假设同一

信号路径上,由 IRI 电离层模型获得的 $C^{\text{IRI}}_{\text{sph}}$ 和 C^{IRI} 之比,与掩星测量得到的球对称下修正的 TEC C'_{sph} 和非球对称下修正的 TEC C' 之比相等,即

$$\frac{C'_{\text{sph}}}{C'} = \frac{C^{\text{IRI}}_{\text{sph}}}{C^{\text{IRI}}}, \quad (5)$$

则可从(5)式得到球对称下的 C'_{sph} . 并通过球对称下的 Abel 积分逆变换反演电离层电子密度,即

$$n_e(r_0) = -\frac{1}{\pi} \int_{r_0}^{r_{\text{LEO}}} \frac{dC'_{\text{sph}}(r)/dr}{\sqrt{x^2 - r_0^2}} dx. \quad (6)$$

由于 Abel 变换反演方法是在电离层电子密度球对称分布假设下进行的,对球对称的 TEC 进行 Abel 积分逆变换反演得到的电子密度更接近真实值,可以减少电子密度非球对称分布所带来的影响.

4. 应用举例

本文采用的掩星观测数据是从 COSMIC 数据分析和存档中心下载的 COSMIC 掩星电离层一级数据.

为了比较传统的 Abel 变换反演法和改进的 Abel 变换反演法的不同,下面分别反演两个例子进行说明.

图 2 所示为从 IRI 模型中得到修正的 TEC 随掩星切点高度的变化情况,横轴表示修正的 TEC,纵轴表示掩星切点高度. 从图 2 可以看出,在修正的 TEC 最大值附近,两者的区别较大,因此不能忽略电离层电子密度非球对称分布所带来的影响.

从 COSMIC 电离层掩星数据可得到非球对称下修正的 TEC,再利用(5)式得到球对称下修正的 TEC. 这两种修正的 TEC 对比情况如图 3 所示(图 3(a)对应图 2(a),图 3(b)对应图 2(b)).

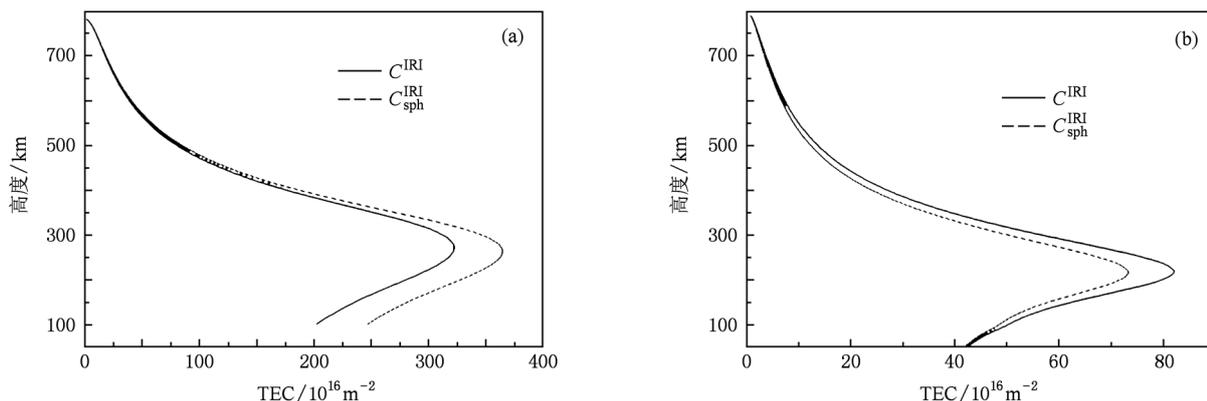


图2 从 IRI 模型中得到修正的 TEC 序列比较 (a)掩星切点位置为西经 95.2°, 南纬 21.9°, 时间为 2007-01-05, 17:06 (UT); (b)掩星切点位置为东经 27.2°, 北纬 29.0°, 时间为 2007-01-05, 06:32 (UT)

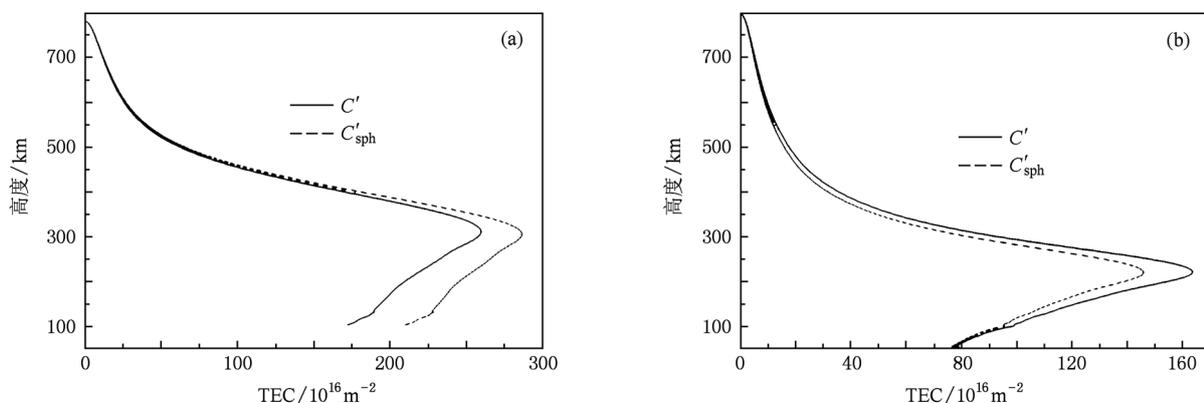


图3 两种反演方法中修正的 TEC 序列比较 (a)掩星切点位置为西经 95.2°, 南纬 21.9°, 时间为 2007-01-05, 17:06 (UT); (b)掩星切点位置为东经 27.2°, 北纬 29.0°, 时间为 2007-01-05, 06:32 (UT)

利用(6)式得出电子密度, 本文讨论的两种反演方法得出的电子密度的对比如图 4 所示(图 4(a) 对应图 3(a), 图 4(b) 对应图 3(b)). 图 4 中实线表示传统的 Abel 变换反演法得出的电子密度 n_e , 虚线表示改进的 Abel 变换反演法得出的电子密度 n_e^{sph} . 从图 4 可以看出, 在掩星切点较高处, 两种反演方法得出的

电子密度区别不大. 这是由于在掩星切点较高处, 通过地球电离层的信号路径较短, 以致于非球对称性所带来的影响较小. 在电子密度峰值附近, 通过地球电离层的信号路径较长, 且电离层电子密度水平梯度变化较大, 导致非球对称性所带来的影响较大, 使得两种反演方法得出的电子密度峰值区别较大.

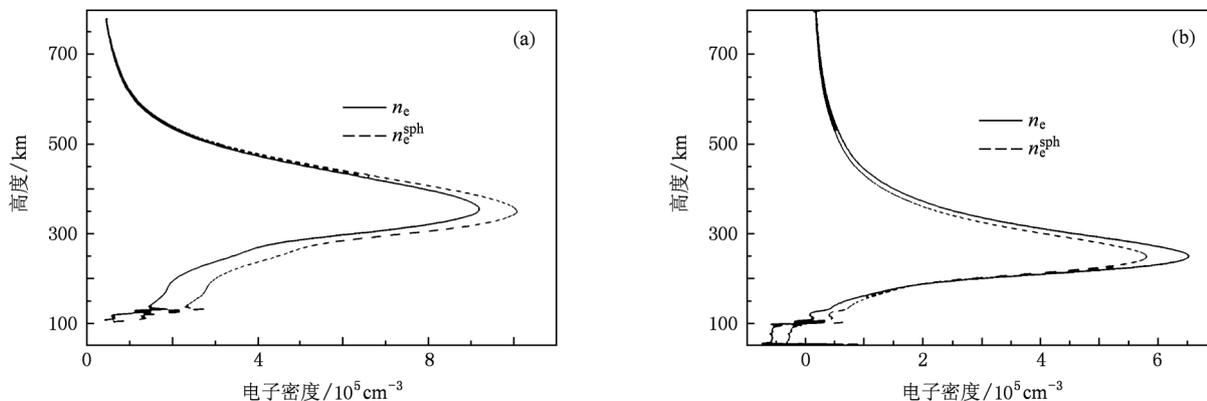
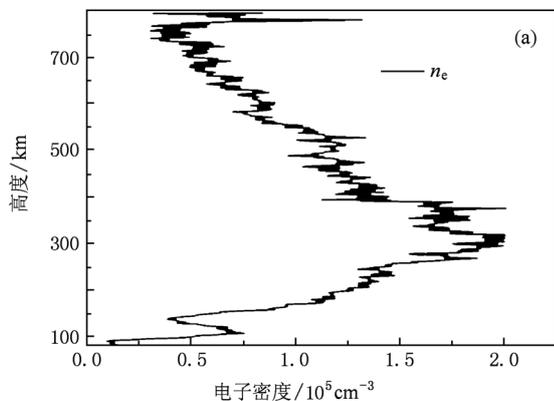


图4 两种反演方法中电子密度的比较 (a)掩星切点位置为西经 95.2°, 南纬 21.9°, 时间为 2007-01-05, 17:06 (UT), (b)掩星切点位置为东经 27.2°, 北纬 29.0°, 时间为 2007-01-05, 06:32 (UT)

5. COSMIC 电离层反演结果比较

在验证电离层掩星反演的精度前,需要先对 COSMIC 电离层掩星数据进行处理,使数据分析更具说服力.对 F_2 层电子密度峰值外存在更大的电子密度数据重新定义电子密度峰值(这是由于 COSMIC 电离层掩星数据提供的是最大电子密度,而并非是 F_2 层电子密度峰值),并将噪声强度大于 0.01 的数据剔除.噪声强度 I_N 定义为

$$I_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (n_e(i) - \overline{n_e(i)})^2}{n(n_e^{\max})^2}}, \quad (7)$$



其中 n_e^{\max} 为 F_2 层电子密度峰值, $n_e(i)$ 为 300 km 以上高度的第 i 层电子密度, $\overline{n_e(i)}$ 为平滑后(平滑窗为 15 s)的第 i 层电子密度.

图 5 显示的是两个质量较差的 COSMIC 电离层掩星数据得出的电子密度.从图 5(a)可以看出,质量较差的数据得出的电子密度噪声强度较大,利用(7)式得出噪声强度为 0.04;从图 5(b)可以看出, F_2 层的电子密度峰值高度大约在 260 km 处,而在 100 km 附近却存在更大的电子密度值.这两种情况会影响数据分析的准确性,需要先对这样的数据进行处理.

为了验证改进的 Abel 变换反演方法的精度,将

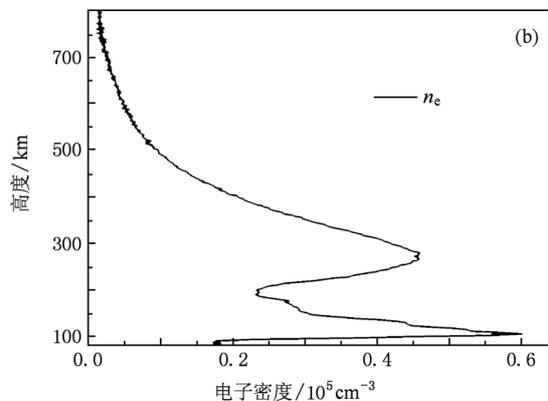


图 5 质量较差的数据示例 (a)掩星切点位置为西经 161.0°,南纬 85.6°,时间为 2007-01-05,05:37(UT), (b)掩星切点位置为西经 75.5°,北纬 55.0°,时间为 2007-01-05,04:25(UT)

COSMIC 电离层掩星数据(2007-01-01 至 2007-02-19)反演的电子密度和对应的电离层探测器(ionosonde)资料进行比较,其中电离层探测器资料是从美国空间物理数据交换中心获得的 17 个站的观测资料. COSMIC 电离层掩星数据反演结果与探测器资料的匹配条件如下:反演得到的 F_2 层电子密度峰值 n_e^{\max} 对应的地理位置与探测器测站的距离在 600 km 以内,并且掩星时间和探测器探测时间相差在 30 min 以内.根据这些条件,共得到 1331 对数据,剔除质量较差的数据后得到 865 对数据.

图 6 所示为 COSMIC 电离层掩星数据反演和电离层探测器探测得到的 n_e^{\max} 的散点图,横轴为 COSMIC 电离层掩星的数据反演 $n_{e,COSMIC}^{\max}$ 结果,纵轴为电离层探测器得到的 $n_{e,ionosonde}^{\max}$ 的结果.改进的 Abel 变换反演方法反演 COSMIC 电离层掩星得出的结果与电离层探测器资料的相关系数为 0.94, $n_{e,COSMIC}^{\max} - n_{e,ionosonde}^{\max}$ 的均值为 $-41918.50 \text{ cm}^{-3}$,方差

为 86486.90 cm^{-3} .

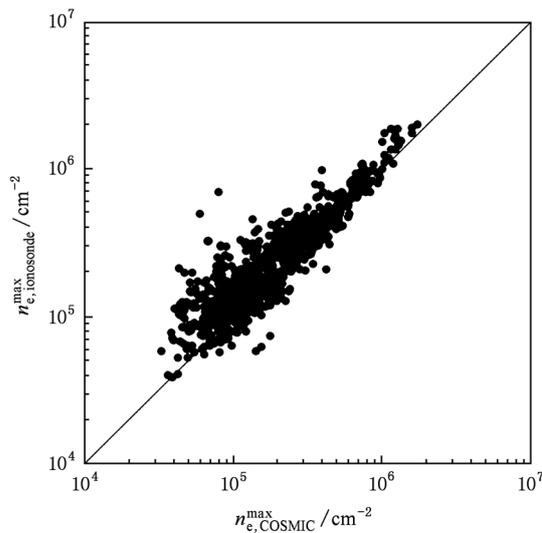


图 6 COSMIC 电离层掩星数据反演与电离层探测器探测得到的电子密度峰值 n_e^{\max} 的比较

6. 结 论

本文发展了一种新的掩星电离层反演方法,利用 IRI 模型提供的三维电子密度分布信息来减小电子密度非球对称分布的影响. 利用改进的 Abel 变换反演方法反演 COSMIC 电离层掩星资料,将其得到的电子密度与相应的电离层探测器资料进行比较后可知,本文提出的方法能较好地反演电离层掩星数据. 但是,电离层电子密度具有很大的日变化特性,而 IRI 三维模型是一个气候模式,不是一个天气模式,这些差别体现在电离层日变化上,电离层日

变化偏离气候模式一般在 20% 左右,这也是该方法不足之处.

理论上,改进的 Abel 变换反演方法对于减小非球对称所带来的影响是有一定帮助的,如何获得更准确的电离层电子密度水平分布信息以进一步发展电离层掩星反演技术是将来一个主要的研究方向.

感谢 COSMIC 数据分析和存档中心提供 COSMIC 掩星观测资料,美国空间物理数据交换中心提供电离层探测器资料.

-
- [1] Kursinski E R, Hajj G A, Schofield T, Linfield R P, Hardy K R 1997 *J. Geophys. Res.* **102** 23419
- [2] Hajj G A, Romans J 1998 *Radio Sci.* **33** 175
- [3] Schreiner W S, Sokolovskiy S V, Rocken C, Douglas C 1999 *Radio Sci.* **34** 949
- [4] Garcia-Fernandez M, Hernandez-Pajares M, Juan M, Sanz J 2003 *J. Geophys. Res.* **108** 1338
- [5] Hernandez-Pajares M, Juan J M, Sanz J 2000 *Geophys. Res. Lett.* **27** 2473
- [6] Tsai L C, Tsai W H 2004 *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* **15** 589
- [7] Wu X C, Hu X, Gong X Y, Zhang X X 2008 *Chin. J. Geophys.* **51** 618 (in Chinese) [吴小成、胡雄、宫晓艳、张训械 2008 地球物理学报 **51** 618]
- [8] Liu Z L, Sun X J, Fu Y 2009 *Prog. Astron.* **27** 270 (in Chinese) [刘赵林、孙学金、符养 2009 天文学进展 **27** 270]
- [9] Xu X S, Hong Z J, Guo P, Liu R J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2163 (in Chinese) [徐贤胜、洪振杰、郭鹏、刘荣建 2010 物理学报 **59** 2163]
- [10] Zhang X X, Zeng Z, Hu X 2002 *Chin. J. Geophys.* **45** (Suppl.) 24 (in Chinese) [张训械、曾桢、胡雄 2002 地球物理学报 **45**(增刊) 24]

Non-spherical symmetric inversion of ionospheric occultation data *

Hong Zhen-Jie¹⁾ Liu Rong-Jian¹⁾ Guo Peng²⁾ Dong Nai-Ming^{1)†}

1) (*College of Mathematics and Information Science, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China*)

2) (*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*)

(Received 31 October 2010; revised manuscript received 31 August 2011)

Abstract

The Abel inversion based on a spherical symmetry of the ionospheric electron density distribution is a traditional inversion method of ionospheric occultation. However, the real ionosphere is not strictly spherically symmetric, which can cause error in inversion process of ionospheric occultation data. In this paper, we develop a non-spherically symmetric ionospheric occultation inversion method, in which the gradient information about international reference ionosphere three-dimensional ionospheric model is used to correct total electron content (TEC), thus the ionospheric electron density can be reconstructed from the corrected TEC by the spherical symmetric Abel inversion method. The inversion results retrieved from the measurements data of Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate (COSMIC) ionospheric occultation are compared with the ionosonde data, showing that the result obtained from the new method is well coincident with the ionospheric electron density profile.

Keywords: ionospheric occultation, electron density, international reference ionospheric model

PACS: 94.20.Tt, 95.10.Jk

* Project supported by the Special Scientific Research Foundation of Public Welfare Profession of China (Grant No. 201108004) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2009AA12Z319).

† Corresponding author. E-mail: USPOQ2005@yahoo.com.cn