

COSMIC 掩星电离层资料反演以及结果验证*

徐贤胜¹⁾²⁾ 洪振杰^{2)†} 郭 鹏³⁾ 刘荣建²⁾

1) (上海大学上海市应用数学和力学研究所, 上海 200030)

2) (温州大学数学与信息科学学院, 温州 325000)

3) (中国科学院上海天文台, 上海 200030)

(2009 年 4 月 21 日收到; 2009 年 6 月 30 日收到修改稿)

通过 COSMIC 掩星电离层观测资料 L1 和 L2 相位组合, 得到相对总电子含量 TEC; 利用非掩星的辅助观测数据校正 TEC, 消除 LEO 卫星高度以上的 TEC 部分; 在电子密度局部球对称假设和信号直线传播的近似下, 通过 Abel 积分变换可以得到电子密度垂直廓线. 将 2007 年度中与电离层测高仪站点经度差小于 10° , 纬度差小于 2° 的 4903 个 COSMIC 掩星电离层资料与相对应的电离层测高仪数据进行比较, F_2 层的临界频率 f_0F_2 的标准差约为 0.59 MHz, 峰值高度 h_mF_2 的标准差约为 33.08 km.

关键词: COSMIC, GPS/LEO 掩星, 电离层测高仪, 电离层反演

PACC: 9420Z, 9510J

1. 引 言

近 30 年来, 电子与通讯等现代科技手段的飞速发展, 使许多卫星技术的研究和应用, 与大气对无线电波传播的影响密切相关. 地球电离层是空间天气的主要组成部分之一, 它的活动和特性直接影响到无线电通信、卫星精密导航定位, 以及无线电技术的航天测控以及其他相关的领域. 全球定位系统 GPS 的建成为电离层研究提供了大量电磁波观测, 从地基 GPS 网的观测可反演出电离层的总电子含量 (total electron content, TEC) 的时空变化^[1], 从空基 GPS 的掩星观测可反演出电子密度的垂直廓线分布^[2]. 在成功进行了 MicroLab1, Orsted, SAC-C 和 CHAMP 等卫星的掩星观测以后, 美国与台湾联合研制的 COSMIC 计划 (中华三号) 6 颗卫星已于 2006 年 4 月 14 日发射成功. 目前, 该系统每天能提供大约 2000 次全球分布的掩星电离层资料^[3].

全球卫星导航系统 GNSS (global navigation satellite system) 发展到今天已有相当规模, 目前正迈向第二代, 它包括了全球定位系统 GPS, GLONASS 和 GALILEO. 在今后的 10 年, 搭载着多模式 GNSS 掩星接收机的 LEO 卫星的数目也将增加

到几十个, 将提供一个前所未有的、连续的、全球覆盖的和近实时的电离层数据. 它们可以实时监测和预报电离层活动, 满足导航、通讯和雷达等所需的精确电离层校正; 监测空间天气事件; 提高人们对太阳活动、电离层活动以及地震、海啸等自然灾害间关系的认识, 磁暴与电离层之间耦合的物理过程的认识; 间接探测上层大气、地磁与太阳活动之间的关系, 为更好研究日地关系奠定基础.

本文介绍了 GPS/LEO 掩星电离层反演软件, 处理了 COSMIC 掩星电离层的 level1 资料, 验证比较了反演结果与相应的电离层测高仪数据, 对结果进行了分析.

2. GPS 信号

GPS 卫星同时发送 L1 和 L2 两个载波信号 ($f_1 = 1575.42$ MHz, $f_2 = 1227.60$ MHz), 它们的波长分别为 19.03 cm 和 24.42 cm. 这些信号被频率为 10.23 MHz 的伪随机测距码 (P 码) 调制; L1 信号同时也被 1.023 MHz 的 C/A 测距码调制. LEO 卫星接收机接收到的 L1 和 L2 信号为

$$S_{L1}(t) = \sqrt{2C_{C/A}} D(t) X(t) \sin(2\pi f_1 t + \theta_1)$$

* 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2009AA12Z319), 国家自然科学基金 (批准号: 40605012) 和浙江省自然科学基金 (批准号: Y506040) 资助的课题.

† E-mail: hong@wzu.edu.cn

$$+ \sqrt{2C_{P1}}D(t)P(t)\cos(2\pi f_1t + \theta_1),$$

$$S_{L2}(t) = \sqrt{2C_{P2}}D(t)P(t)\cos(2\pi f_2t + \theta_2), \quad (1)$$

其中, $C_{C/A}$, C_{P1} 分别为载波 L1 信号的同相和正交分量的接收功率; C_{P2} 为载波 L2 的接收功率; $D(t)$ 为载波 L1 和 L2 上振幅调制包含导航电文数码; $X(t)$ 为 C/A 码, ± 1 的伪随机序列, 1.023 MHz 频率调制在 L1 信号的同相分量; $P(t)$ 为 P 码, ± 1 的伪随机序列, 10.23 MHz 频率调制在 L1 和 L2 信号的正交分量; θ_1, θ_2 为分别是载波 L1 和 L2 的初始相位.

一个双频 GNSS 接收机能同时接收到 C/A 码、L1 和 L2 的 P 码振幅和伪距、以及载波相位测量. C/A 码和 P1 码实质上包含相同的信息, 但是 C/A 码要比 P1 码的功率大 3 dB, 并且不被加密. 因此在掩星实验时通常使用的基本观测量为 LEO 低轨卫星和被掩的 GPS 卫星之间的 C/A 码载波相位和 P2 载波相位测量.

GPS 信号的伪距 P 和相位 L 观测方程可以写成

$$P_i = R_{LG} + c(dT - dt) + 40.3 \frac{TEC}{f_i^2} + \rho_i^{neut} + \rho_i^{rel} + \rho_i^{mul} + b_i^r - b_i^s + v_i, \quad (2)$$

$$L_i = \lambda_i \phi_i = R_{LG} + c(dT - dt) - 40.3 \frac{TEC}{f_i^2} + \rho_i^{neut} + N_i \lambda_i + \rho_i^{rel} + \rho_i^{mul} + b_i^r - b_i^s + \varepsilon_i, \quad (3)$$

其中, ϕ_i 为信号从发射机到接收机传播相位, 下标 $i = 1, 2$: 分别指 L1, L2; R_{LG} 为发射机与接收机之间的几何距离; c 为真空中的光速; dt, dT 为分别为发射机和接收机的钟误差; TEC 为沿信号路径电子密度积分; ρ_{neut} 为中性层产生相位延迟; ρ_{mul} 为多路径影响; ρ_{rel} 为相对论修正; λ 为无线电波波长; N 为相位整周模糊数; b^r, b^s 为分别是接收机和发射机的硬件系统延迟; ε, v 为测量噪声.

3. 掩星资料电离层反演原理

GPS 掩星电离层观测数据通常是掩星观测切点高度在 65 km 以上的数据, 观测信号弯曲很小, 基本小于 0.01° , 因此 GPS 信号可以近似地认为是直线传播. 利用 GPS 双频载波相位延迟数据 L1 和 L2 进行线性组合得到斜向 TEC (单位 $TECu = 10^{16}/m^2$) 为

$$TEC = \int n_e dl = \frac{1}{40.3} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \times (L_1 - L_2) + N\lambda + \varepsilon, \quad (4)$$

其中 n_e 为电子密度 ($1/m^3$), l 是 GPS 信号路径. 需要指出的是双频组合反演的方法是基于双频载波信号传播路径相同的假设, 忽略了因色散影响带来的路径误差. 在太阳活动峰年的日间观测, 对于空基掩星电离层反演, 色散残差的影响往往是比较显著的^[3].

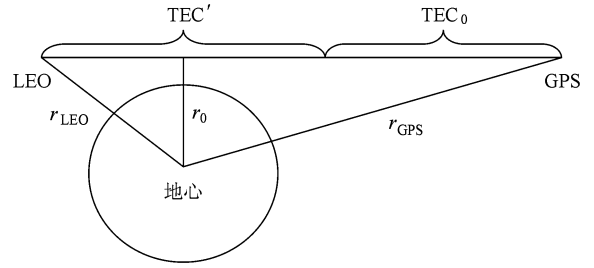


图 1 GPS 掩星示意图

在电子密度局部球对称假设下, GPS 卫星和 LEO 卫星之间视向 TEC 与电子密度满足关系式

$$TEC(r_0) = \left[\int_{r_0}^{r_{GPS}} + \int_{r_0}^{r_{LEO}} \right] \frac{rn_e(r)}{\sqrt{r^2 - r_0^2}} dr, \quad (5)$$

其中 r_{LEO} 和 r_{GPS} 分别是 LEO 和 GPS 卫星的轨道半径, r_0 是掩星点到地心的距离, 见图 1 所示. 由于 LEO 卫星轨道高度远远低于 GPS 卫星轨道高度, 且卫星处于电离层内并满足球对称假设, 电离层反演存在误差. 假设掩星面和 LEO 卫星轨道面一致以及 LEO 卫星轨道为圆轨道, 利用非掩星的辅助观测数据校正 TEC' , 消除 LEO 卫星轨道高度以上的 TEC_0 ,

$$TEC'(r_0) = TEC - TEC_0 = 2 \int_{r_0}^{r_{LEO}} \frac{rn_e(r)}{\sqrt{r^2 - r_0^2}} dr. \quad (6)$$

通过 Abel 积分逆变换, 从校正的电离层延迟 TEC' 得到电子密度^[2],

$$n_e(r_0) = -\frac{1}{\pi} \int_{r_0}^{r_{LEO}} \frac{dTEC'(r)/dr}{\sqrt{x^2 - r_0^2}} dr. \quad (7)$$

但是对积分方程进行数值积分时, 在上边界和下边界都存在反常积分问题 (当 $r \rightarrow r_{LEO}$ 时, $dTEC'/dr \rightarrow -\infty$; 当 $r \rightarrow r_0$ 时, $\sqrt{r^2 - r_0^2} \rightarrow 0$)^[3]. 根据

$$TEC'(r_i) = \sum_{k=i}^{n-1} 2 \int_{r_k}^{r_{k+1}} \frac{rn_e(r)}{\sqrt{r^2 - r_i^2}} dr, \quad (8)$$

假设电子密度在两个采样之间是线性变化^[4], 即 $n_e(r) = A_k r + B_k, (r_k \leq r \leq r_{k+1})$, 那么

$$\text{TEC}'(r_i) = \sum_{k=i}^{n-1} 2 \left[A_k \left(\frac{r_{k+1}}{2} \sqrt{r_{k+1}^2 - r_i^2} - \frac{r_k}{2} \sqrt{r_k^2 - r_i^2} + \frac{r_i^2}{2} \ln \left| \frac{r_{k+1} + \sqrt{r_{k+1}^2 - r_i^2}}{r_k + \sqrt{r_k^2 - r_i^2}} \right| \right) + B_k (\sqrt{r_{k+1}^2 - r_i^2} - \sqrt{r_k^2 - r_i^2}) \right], \quad (9)$$

$$A_k = \frac{n_e(r_{k+1}) - n_e(r_k)}{r_{k+1} - r_k}, \quad B_k = n_e(r_k) - \frac{n_e(r_{k+1}) - n_e(r_k)}{r_{k+1} - r_k} r_k, \quad (9)$$

其中系数 A_k, B_k 来自于对观测序列的拟合. 将方程 (9) 改写成

$$\text{TEC}'(r_i) = \sum_{k=i}^n c_{i,k} n_e(r_k), \quad (10)$$

即

$$n_e(r_i) = \frac{\text{TEC}'(r_i) - \sum_{k=i+1}^n c_{i,k} n_e(r_k)}{c_{i,i}}. \quad (11)$$

假设在接近 LEO 卫星轨道高度的电子密度是常数,

$$n_e(r) = n_e(r_{\text{LEO}}). \quad (12)$$

对于接近 LEO 卫星轨道高度的校正后的 TEC' 可以近似表示

$$\text{TEC}'(r) \approx 2n_e(r_{\text{LEO}}) \sqrt{2r_{\text{LEO}}(r_{\text{LEO}} - r)}. \quad (13)$$

利用最小二乘线性拟合方法可以计算最高处几公里内的电子密度. 利用方程 (11) 可以逐步计算出每个掩星点上的电子密度. 因此, 空基电离层的反演原理可简单归纳为: 先利用双频观测的延迟量的组合计算出电离层的总电子含量 TEC, 对 TEC 进行修正得到校准 TEC' , 再利用电离层延迟 TEC' 与电子密度 n_e 的关系式, 通过 Abel 积分逆变换求出电子密度廓线. 电离层掩星反演数据处理的具体流程如下:

(a) 计算直线碰撞参数和相应的高度、经度和纬度;

(b) 坐标转换到地固参考架;

(c) 在最大的碰撞参数两边重新记录碰撞参数和相位序列 (为 TEC 校正);

(d) 检验充分的高度范围;

(e) 检验时间间隔;

(f) 校正相位;

(g) 样条插值到规定格点;

(h) 计算校正的 TEC;

(i) 从校正的 TEC 计算电子密度剖面;

(j) 计算底部和顶部的高度、经度、纬度和切点位置的 水平漂移 (定义为两点投影到地球表面的距离);

(k) 计算 F_2 层的峰值密度和它的高度、经度、纬度和临界频率;

(l) 计算从 80 km 到顶部之间的垂直 TEC;

(m) 估计顶部以上的垂直 TEC;

(n) 计算掩星面的方位角.

4. COSMIC 电离层反演结果比较

为了验证 GPS/LEO 掩星电离层反演的精度, 我们比较了 COSMIC 电离层反演结果和电离层测高仪的资料. 从 COSMIC Data Analysis and Archive Center (CDAAC) 下载了 COSMIC 掩星电离层 level1 数据 (ionphs). ionphs 数据包包含 1 Hz 采样频率的 L1 和 L2 的相位延迟、GPS 和 LEO 卫星的轨道星历. 从 Space Physics Interactive Data Resource (SPIDR) 获得的电离层测高仪 17 个站的观测资料, 时间采样分辨率是 15 min. COSMIC 电离层反演的结果与电离层测高仪观测资料进行匹配比对. 2007 年 COSMIC 掩星与电离层测高仪的经度差小于 10° , 纬度差小于 2° , 并且当地时间一致, 一共有 4903 对. 图 2 显示的是从中随机选取的 4 对 COSMIC 掩星和电离层测高仪的电子密度廓线个例.

图 3 和图 4 显示的是 COSMIC 和电离层测高仪的 F_2 层临界频率 f_0F_2 和峰值高度 h_mF_2 的散点图 (左图) 和分布图 (右图),

$$f_0F_2 = \sqrt{\frac{1.24 \times 10^{10}}{N_mF_2}}.$$

剔除 f_0F_2 相对误差大于 3 倍方差的观测, 总的个数是 4738 个. COSMIC 掩星和电离层测高仪两者 f_0F_2 的相关性达到 0.91, 两者 f_0F_2 之差和 h_mF_2 之差都接近正态分布. $f_0F_2(\text{COSMIC}) - f_0F_2(\text{ionsonde})$ 的平均值是 -0.13 MHz, 标准差是 0.59 MHz; 相对精度 $(f_0F_2(\text{COSMIC}) - f_0F_2(\text{ionsonde})) / f_0F_2(\text{ionsonde})$ 的平均值为 -2.20% , 标准差为 12.04% . $h_mF_2(\text{COSMIC}) - h_mF_2(\text{ionsonde})$ 的平均值是 -6.30 km, 标准差是 33.08 km.

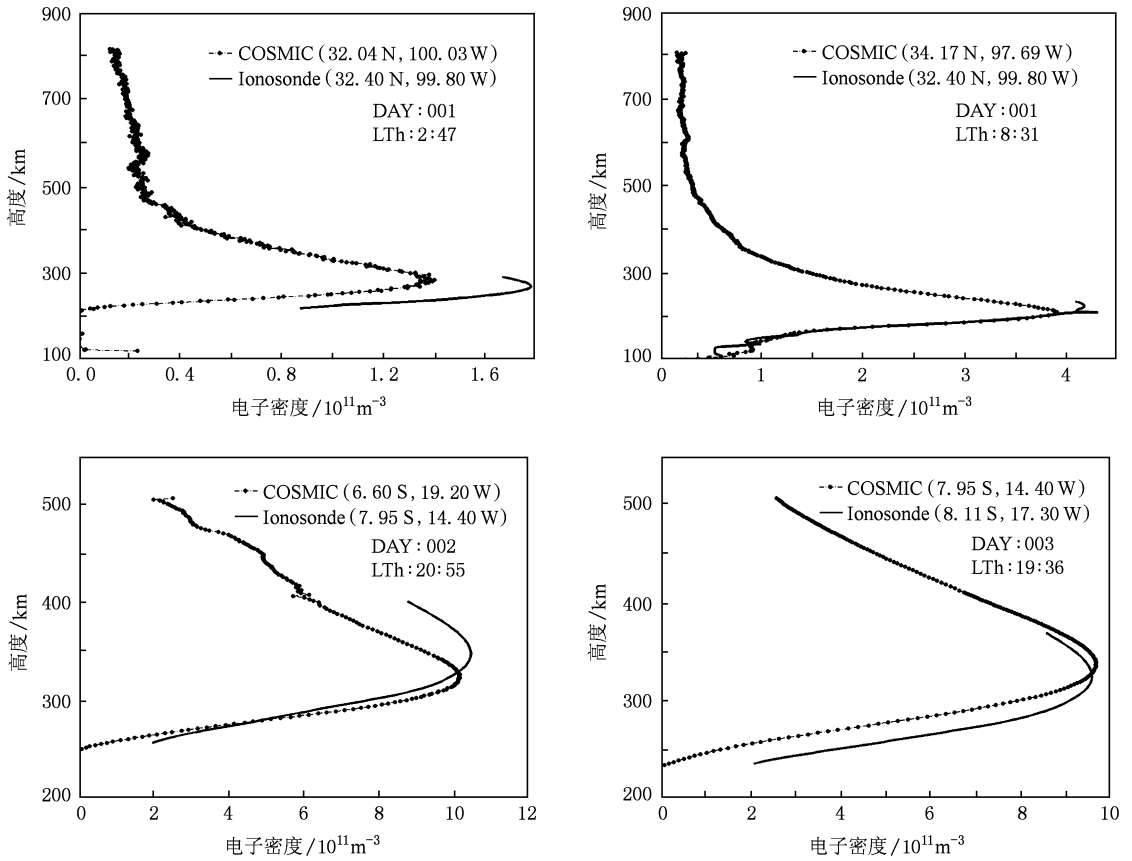


图 2 COSMIC 掩星和电离层测高仪的电子密度廓线比较

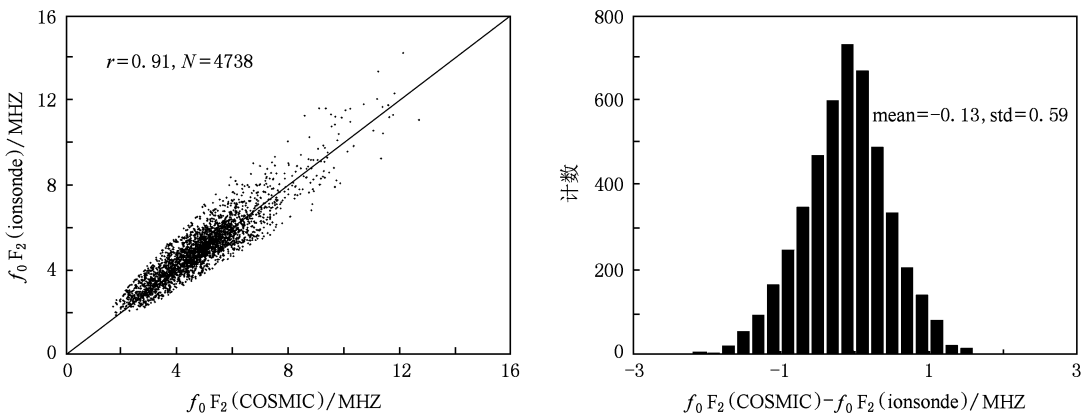


图 3 COSMIC 和电离层测高仪的 F₂ 层临界频率 $f_0 F_2$

其中平均值计算公式如下：

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

标准差计算公式如下：

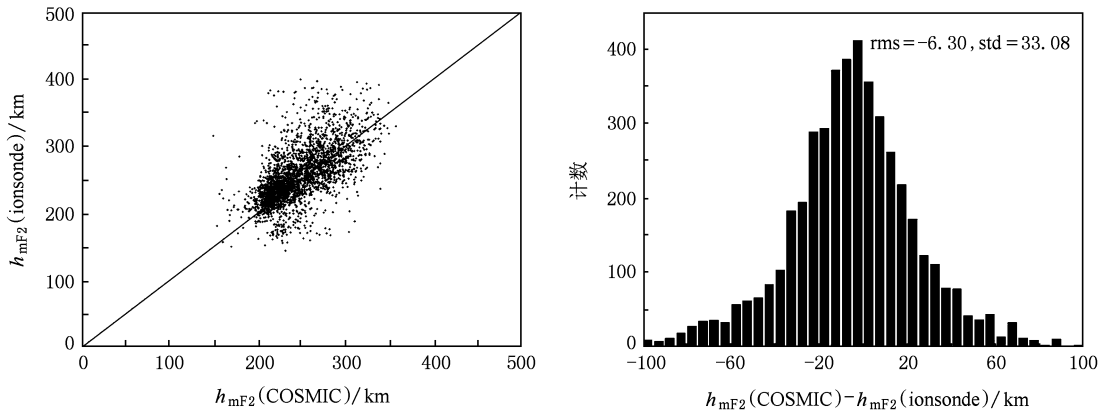


图 4 COSMIC 和电离层测高仪的 F_2 层临界频率 $h_m F_2$

5. 结 论

本文介绍了 GPS/LEO 掩星电离层反演算法, 比较验证了 COSMIC 掩星电离层资料反演精度. 与电离层测高仪数据比较, 两者的 F_2 层的临界频率 $f_o F_2$ 和峰值高度 $h_m F_2$ 的标准差分别是 0.59 MHz 和 33.08 km, 其可能原因有以下几点:

1) 电离层水平不均匀对 GPS/LEO 掩星电离层反演的影响;

2) COSMIC 掩星和电离层测高仪观测匹配时空不一致;

3) 电离层测高仪的观测误差.

进一步研究发展新的 GPS/LEO 掩星电离层反演技术, 改进球对称假设引入的误差, 是将来需要解决的重要问题.

感谢 COSMIC Data Analysis and Archive Center (CDAAC) 提供 COSMIC 掩星观测资料, Space Physics Interactive Data Resource (SPIDR) 提供电离层测高仪资料.

[1] Mannucci A, Wilson B, Yuan D, Ho C, Lindqwister U, Runge T 1998 *Radio Sci.* **33** 565
 [2] Schreiner W S, Sokolovskiy S V, Rocken C, Hunt D C 1999 *Radio Sci.* **34** 949
 [3] Lei J, Syndergaard S, Burns A G, Solomon S C, Wang W, Zeng Z, Roble R G, Wu Q, Kuo Y H, Holt J M, Zhang S R, Hysell D L, Rodrigues F S, Lin C H 2007 *J. Geophys. Res.* **112** A07308 doi: 10.1029/2006JA012240
 [4] Guo P, Yan H J, Hong Z J, Liu M, Huang C 2004 *ChA&A* **28** 441
 [5] Zeng Z, Hu Z, Zhang X X 2004 *Chinese J. Geophys.* **47** 578 (in Chinese) [曾 桢、胡 雄、张训械 2004 地球物理学报 **47** 578]

[6] Guo P, Yan H J, Hong Z J, Huang C, Liu M 2005 *ChA&A* **46** 96 (in Chinese) [郭 鹏、严豪健、洪振杰、黄 斌、刘 敏 2005 天文学报 **46** 96]
 [7] Hong Z J, Guo P, Liu M, Huang C 2006 *ChA&A* **47** 100 (in Chinese) [洪振杰、郭 鹏、刘 敏、黄 斌 2006 天文学报 **47** 100]
 [8] Huang C S, Li J, Kelley M C 1994 *Acta Phys. Sin.* **43** 239 (in Chinese) [黄朝松、李 均、Kelley M C 1994 物理学报 **43** 239]
 [9] Gu Z Y, Ji P Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1022 (in Chinese) [顾震宇、季沛勇 2002 物理学报 **51** 1022]

Retrieval and validation of ionospheric measurements from COSMIC radio occultation*

Xu Xian-Sheng¹⁾²⁾ Hong Zhen-Jie^{2)†} Guo Peng³⁾ Liu Rong-Jian²⁾

1) (*Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200030, China*)

2) (*School of Mathematics Science, Wenzhou University, Wenzhou 325000, China*)

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

(Received 21 April 2009; revised manuscript received 30 June 2009)

Abstract

The relative total electron content (TEC) is obtained through the combination of COSMIC radio occultation ionospheric measurements L1 and L2 phase. The TEC data are then calibrated by non-occultation observation data on the auxiliary side to remove portion of TEC above the LEO orbit altitude. The electron density profile can be retrieved from TEC by Abel integral transformation, with a spherically symmetric assumption of electron density and an approximation of signal straight-line propagation. The computation standard deviation of F_2 -layer critical frequency f_0F_2 is about 0.59 MHz, and the standard deviation of F_2 -layer peak altitude h_mF_2 is about 33.08 km, as through comparing 4903 COSMIC ionospheric occultation profiles with those from ionosonde stations, of which the longitude deviations are less than 10° , the latitude deviations are less than 2° .

Keywords: COSMIC, GPS/LEO radio occultation, ionosonde, ionospheric retrieval

PACC: 9420Z, 9510J

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2009AA12Z319), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40605012) and the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation, China (Y506040).

† E-mail: hong@wzu.edu.cn