

COSMIC 掩星观测数据反演电离层电子密度廓线

赵 莹^{1,2} 张小红¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:利用 COSMIC 掩星观测数据,将 Abel 积分方法和“洋葱分层”反演方法反演得到的电子密度廓线与传统电离层观测方法的观测结果进行了对比。结果表明,通过两种反演方法计算得到的电子密度廓线与垂测仪的结果在整体趋势和结构上符合得较好,反演计算得到的 foF2 与垂测仪的观测结果有较高的一致性,但 h_{\max} 仍存在较大的误差。
关键词:COSMIC; 电离层; 掩星; 反演
中图法分类号:P228.42

早在 1965 年,无线电掩星技术就被应用于行星大气探测。随着 1995 年 GPS/MET 实验的成功,相继实施了一系列掩星计划。中国台湾与美国共同合作的电离层气象与气候星座观测系统(constellation observing system for meteorology ionosphere and climate,COSMIC)计划,由 6 颗低轨卫星组成,用以执行掩星观测任务,于 2006 年 4 月 15 日在美国加州发射升空。卫星轨道高度为 700~800 km,每颗低轨卫星上安装有一台 GPS 接收机,理想情况下每天可提供约 2 500 个掩星观测资料,目前每天可提供的掩星观测资料在 2 000 个左右,可反演得到约 1 500 个大气廓线。大量的观测资料为大气研究提供了丰富的数据,并弥补了传统观测在海洋和极地等区域资料的不足。

GPS 无线电掩星电离层探测具有全球覆盖、成本低廉、垂直分辨率高等优点。目前,国内外许多学者针对这一技术进行了大量的研究^[1-6],无线电掩星反演技术仍在不断发展完善之中。本文利用 COSMIC 掩星观测数据,将 Abel 积分方法和“洋葱分层”反演方法反演得到的电子密度廓线与传统电离层观测方法的观测结果进行了对比,在此基础上,对电离层 F2 层主要参数的对比结果进行了统计分析,讨论了反演过程中出现的问题,并分析了反演计算过程中拟合与插值方法对掩星

结果的影响。

1 掩星数据源

目前,美国大气研究大学联盟(University Corporation for Atmospheric Research, UCAR)在其数据处理中心 COSMIC 数据分析与档案中心(COSMIC Data Analysis and Archival Center, CDAAC)上公布了 COSMIC 自 2006 年第 111 d 以来的一系列数据,包括原始 GPS 观测数据、低轨卫星轨道数据、大气廓线和电离层数据等。表 1 列出的是与电离层反演相关的数据。

表 1 与电离层反演相关的 COSMIC 数据		
Tab. 1 Ionospheric Occultation Data of COSMIC		
名称	内容	格式
podObs	采样率为 1 Hz 的 GPS 原始观测数据	RINEX
ionPhs	电离层掩星观测数据	NetCDF
ionPrf	垂直电子密度廓线	NetCDF
occTab	每一天的掩星事件表	NetCDF

2 电离层掩星反演方法

2.1 Abel 积分反演方法

Abel 积分是目前运用最广泛的电离层掩星

反演方法。对于 GPS 载波的频率,即使在电离层变化最激烈的状态下,由电离层所造成的弯曲角仍是相当小的。因此,可以将传播路径近似为直线传播。在信号传播路径为直线这一假设下,根据低轨卫星载 GPS 观测到的信号传播路径上的总电子含量(STEC),利用 Abel 积分反演技术即可获得不同高度上电离层的电子密度。

在局部球对称假设下,利用 Abel 积分反演,直接利用 STEC 数据反演电子密度的计算式为^[7]:

$$N_e(r)=-\frac{1}{\pi}\int_r^{r_{\text{LEO}}}\frac{\text{dSTE C}(p)/\text{d}p}{\sqrt{p^2-r^2}}\text{d}p\quad (1)$$

式中, p 为碰撞参数。

当 $p\rightarrow r$ 时, $\frac{\text{dSTE C}(p)/\text{d}p}{\sqrt{p^2-r^2}}\rightarrow\infty$, 该积分式存在下限奇点。使用 H φ eg 提出的变换法^[8], 引入一个变换 $\sqrt{\xi^2-r^2}=-a_{\text{ref}}\ln\eta$, 可得:

$$N_e(r)=-\frac{1}{\pi}a_{\text{ref}}\int_b^1\frac{\text{STE C}'(\xi)}{\xi\eta}\text{d}\eta\quad (2)$$

式中,参数 a_{ref} 取 $a_{\text{ref}}=2\,000\text{ km}$ 。式(1)中的下限奇点成为式(2)的积分上限,奇异性不再存在。

2.2 “洋葱分层”反演方法

该方法将电离层分成许多层,层数与整个掩星事件中的掩星路径数量相等。假设电子密度在每一层是线性变化的,在计算得到轨道高度的电子密度值后,便可利用式(3)反演得到不同高度的电离层电子密度^[4]:

$$N(p_i)=c_{i,0}^{-1}\left(\frac{\bar{T}(p_i)}{p_i}-\sum_{k=1}^mc_{i,k}N(p_{i+k})\right)\quad (3)$$

式中, \bar{T} 为优化总电子含量; p 为碰撞参数; $c_{i,k}$ 为系数阵。对于 \bar{T} 和 $c_{i,k}$ 更详细的描述请参阅文献^[4]。

3 反演结果对比与分析

从 COSMIC 数据中心发布的 GPS 原始数据中选取 2008-01-01 的几次掩星事件,采用传统的 Abel 积分反演方法进行反演计算,结果见图 1。从图 1 中可以看出,利用 Abel 积分反演方法能够获得从地表到低轨卫星轨道高度的完整的电子密度廓线。反演结果符合电离层电子密度日夜变化规律。

为了评价反演计算得到的结果,将 Abel 积分反演得到的电子密度廓线与 COSMIC 数据处理中心公布的使用“洋葱分层”反演方法得到的 ion-Prf 电子密度结果数据及电离层垂测仪数据进行对比,并对反演获得的 F2 层临界频率和 F2 层峰

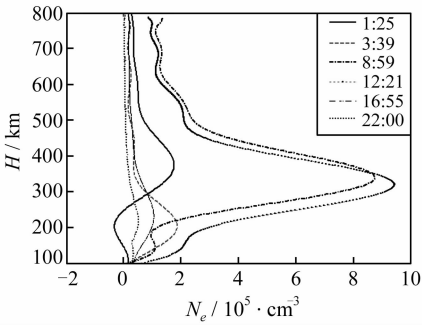


图 1 2008-01-01 不同时刻反演得到的电离层电子密度廓线

Fig. 1 Ionospheric Electron Density Profiles Obtained at Different Time in January 1, 2008

值高度资料进行统计分析。对于全球性的 COSMIC 掩星数据,选取与掩星资料中 F2 层峰值处正切点的位置相差 10° 以内的电离层垂测仪的观测资料,与之进行配对比较。依照此标准,在 2008-01-01 全天筛选出的匹配资料共有 91 对。

3.1 电子密度比较

图 2(a)、2(b) 分别是 2008-01-01T20:04 发生在北纬 52.21°, 东经 14.23° 和 2008-01-01T23:08 发生在北纬 50.9°, 东经 15.498° 的掩星事件,采用英国太阳系数据中心(UK Solar System Data Centre, UKSSDC)提供的观测资料,选取 Juliusruh 站(N54.6°, E13.4°)的垂测仪数据与之进行对比。图中实线表示利用 Abel 积分反演方法得到的电子密度廓线,点划线表示 COSMIC 数据处理中心使用“洋葱分层”反演方法得到的 ionPrf 电子密度数据,其他各加不同标示的虚线表示在掩星发生时间附近各时刻的 Juliusruh 站垂测仪观测结果,图例中数字标示的是垂测仪观测时间与 COSMIC 掩星观测时间的差值,单位为 min。

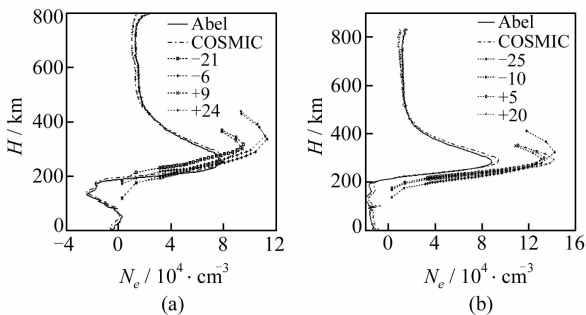


图 2 掩星事件反演结果与垂测仪观测结果的对比图
Fig. 2 Inversion Results Compared with Ionosonde Results in January 1, 2008

图 3(a)、3(b) 分别是 2008-01-01T5:13 发生在北纬 2.474°, 东经 169.312° 和 2008-01-01T20:

03 发生在北纬 37.62°, 东经 26.84° 的掩星事件, 分别选取 Kwajalein 站(N9.0°, E167.2°)和 Athens 站(N38.0°, E23.5°)的垂测仪数据与之进行对比。由于 UKSSDC 无该 2 站的观测资料, 因此参考空间物理交互数据资源(space physics interactive data resource, SPIDR)提供的 foF2、hmF2 资料, 该资料并没有提供完整的廓线以供对比。图中实线表示利用 Abel 积分反演方法得到的电子密度廓线, 点划线表示 COSMIC 数据处理中心使用“洋葱分层”反演方法得到的 ionPrf 电子密度数据, 其他各点状标识表示的是在掩星发生时间附近各时刻 Kwajalein 站和 Athens 站观测得到的 NmF2 和 hmF2, 图例中数字标示的是垂测仪观测时间与 COSMIC 掩星观测时间的差值, 单位为 min。

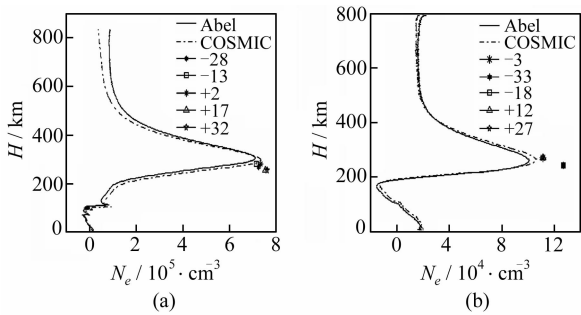


图 3 掩星事件反演结果与垂测仪观测结果的对比图
Fig. 3 Inversion Results Compared with Ionosonde Results in January 1, 2008

有研究表明, 利用 COSMIC 卫星在 800 km 轨道高度的观测资料通过 Abel 积分反演方法和“洋葱分层”反演方法计算得到的结果差别并不大^[9-11]。本文得到的反演结果也是如此。可以看出, 在以上 4 个掩星事件中, 两种方法反演得到的电子密度廓线均符合得比较好, 只在 500 km 以上的电离层上部, Abel 积分反演结果相较于 COSMIC 数据处理中心的“洋葱分层”反演结果有较明显的差异。这可能是由反演方法的不同造成——“洋葱分层”反演方法是根据轨道高度的电子密度值来递推轨道高度以下不同高度的电离层电子密度, 在电离层上部误差累计比较小; 而 Abel 反演方法则是纯粹的积分方法, 可能造成误差累计较大, 并且, 在计算过程中进行 Abel 积分转换时, 球面水平方向上电子密度的非均性也将会对结果造成误差。

和垂测仪观测结果相比, 图 2 中 GPS 掩星观测获得的电子密度廓线与垂测仪的结果在整体趋势和结构上符合得很好, 但仍存在一些差异; 图 3 中 GPS 掩星观测获得的最大电子密度和其对应

的高度与垂测仪的观测结果比较接近, 但在数值上存在偏差。导致这一差异产生的原因可能是: ① GPS 掩星反演中假设电离层电子密度球对称分布, 而实际情况并非如此, 从而造成误差; ② 图 2(a)、2(b)中垂测仪的数据是利用 POLAN 法进行实高分析后的结果, 实高分析过程中可能会造成误差; ③ 掩星观测资料和垂测仪观测资料在时间、空间上并非完全吻合。另外, 由图 2 可以看出, GPS 掩星观测获得的电子密度廓线包含了从地表至低轨卫星轨道高度的电离层范围, 电离层的主要部分都在其中, 但垂测仪只能够获得 F2 层峰值以下的电子密度分布。

3.2 foF2 比较

图 4 为利用 COSMIC 反演得到的 foF2 对电离层垂测仪获得的 foF2 的散点图(全天共 91 对资料), 并在图中标示出用最小二乘法得到的趋势线。计算可得该趋势线斜率 0.943 9, 线性相关系数为 0.901 4。由此可知, 反演计算得到的 foF2 与垂测仪的观测结果有较高的一致性。

3.3 hmF2 与 h_{max} 的比较

h_{max} 是指反演计算得到的电子密度最大时的高度, 将其与垂测仪观测到的 hmF2 进行比较, 由图 5 可以看出, 趋势线仍维持正比关系, 但计算可得该趋势线斜率为 0.61, 线性相关系数为 0.32, 均方根误差和点位误差均比较大, 这可能是因为: ① GPS 掩星反演中球对称假设会对 h_{max} 的计算造成误差; ② 电离层垂测仪存在系统观测误差; ③ SPIDR 提供的 hmF2 的计算误差也会对结果产生影响; ④ 掩星观测资料和垂测仪观测资料在时间、空间上并非完全吻合, 这也是造成较大误差的原因之一。

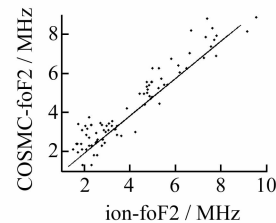


图 4 2008-01-01 foF2 散点图与趋势线
Fig. 4 Scatter Plot and Trendline of foF2 in January 1, 2008

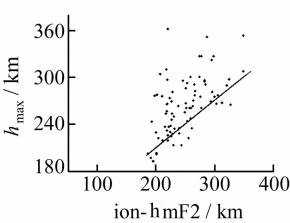


图 5 2008-01-1 h_{max} 散点图与趋势线
Fig. 5 Scatter Plot and Trendline of h_{max} in January 1, 2008

综上所述, COSMIC 反演能获得从地面至 COSMIC 卫星轨道高度的电子密度廓线, 能弥补垂测仪在全球的分布不均, 得到的电子密度廓线与垂测仪的结果在整体趋势和结构上符合得较

好,反演计算得到的 foF2 与垂测仪的观测结果有较高的一致性,但 h_{\max} 仍存在较大的误差。因此,若要获得某地上空可信度高的电离层分布状态,还需将两者结合起来进行分析,取长补短:用掩星反演结果来弥补垂测仪分布不均匀,及在偏远或海洋地区无测量数据的不足;以垂测仪的观测结果来修正掩星反演计算结果的错误。

4 拟合与插值方法对反演结果的影响

在利用 Abel 积分方法反演电离层电子密度廓线的过程中,需要计算 VTEC 的微分,需要用到拟合或插值的方法。

图 6(a)、6(b)为 2008-01-01T0:18 发生的掩

星事件分别用多项式拟合和三次样条插值计算 dVTEC 后的反演结果,图 6(c)、6(d)为 2008-01-01T4:33 发生的掩星事件分别用多项式拟合和三次样条插值计算 dVTEC 后的反演结果。其中,多项式拟合方法中取拟合阶数为 9 阶。可以看出,这两次掩星事件在 UCAR 提供的 COSMIC ionPrf 数据结果中均显示出了电离层不规则现象,而图 6(a)、6(c)中利用拟合而后再进行 Abel 积分反演方法得到的结果却依旧表现得非常光滑。这是因为在反演过程中采用拟合的处理,相当于对数据进行了平滑,所以对于可能存在的电离层不规则现象无法显示出来。在图 6(b)、6(d)中,将拟合的方法用三次样条插值的方法进行替换,保留了电离层不规则的信息,反演结果更加接近实际情况。

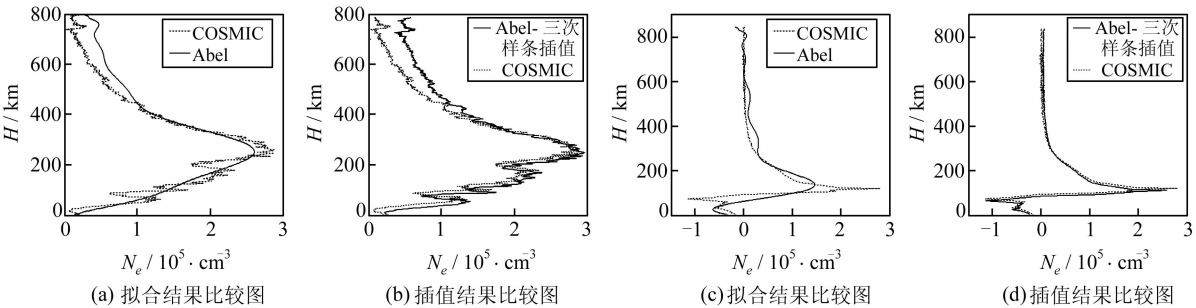


图 6 2008 年 1 月 1 日出现电离层不规则现象的电子密度廓线图

Fig. 6 Electron Dendity Profiles of Ionospheric Irregularities Occurred in January 1, 2008

由此可以看出,三次样条插值后计算得到的结果能更好地反映电离层不规则现象。

5 结论与展望

1) 利用 COSMIC 卫星在 800 km 轨道高度的观测资料,通过 Abel 积分反演方法和“洋葱分层”反演方法计算得到的电子密度廓线符合得较好,只在 500 km 以上的电离层上部存在由反演方法不同而引起的较明显的差异。

2) COSMIC 反演能获得从地面至 COSMIC 卫星轨道高度的电子密度廓线,能弥补垂测仪在全球的分布不均,得到的电子密度廓线与垂测仪的结果在整体的趋势和结构上符合得较好,反演计算得到的 foF2 与垂测仪的观测结果有较高的一致性,但 h_{\max} 仍存在较大的误差。因此,若要获得某地上空可信度高的电离层分布情况,还需将两者结合起来进行分析,或对反演方法进行改进以获得可信度高的 h_{\max} 资料。

3) 对于 COSMIC 电离层掩星 Abel 积分反

演方法,在计算 VTEC 的微分时,利用三次样条插值方法后计算得到的结果能更好地反映电离层不规则现象。

4) 从整个计算结果来看,COSMIC 掩星反演过程中的球对称假设无疑是比较重要的误差源,在今后的研究中,需加入水平信息对其进行改正。

致谢:感谢 UCAR 提供的 COSMIC 观测数据,感谢 UKSSDC 及 SPIDR 提供的 ionosond 观测数据。

参 考 文 献

[1] Jakowski N, Leitingner R, Angling M. Radio Occultation Techniques for Probing the Ionosphere[J]. Annals of Geophysics, 2004, 47(2/3): 1 049-1 066

[2] Schreiner W, Sokolovskiy S, Rocken C, et al. Anagysis and Validation of GPS/MET Radio Occultation Data in the Ionosphere[J]. Radio Science, 1999, 34(4): 949-966

[3] Hajj G, Romans L. Ionospheric Electron Density Profiles Obtained with the Global Positioning System; Result from the GPS/MET Experiment[J].

Radio Science,1998, 33(1): 175-190

[4] Lei Jiuhou, Syndergaard S, Burns A G, et al. Comparison of COSMIC Ionospheric Measurements with Ground-based Observations and Model Predictions: Preliminary Results[J]. Journal of Geophysical Research, 2001,112(A7):308-311

[5] 曾桢, 胡雄, 张训械, 等. 电离层 GPS 掩星观测反演技术[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 578-583

[6] 吴小成, 胡雄, 张训械, 等. 电离层 GPS 掩星观测改正 TEC 反演方法[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2):328-334

[7] Bracewell R. The Fourier Transform and Its Applications[M]. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2000

[8] Høeg P, Larson G B, Benzoni H, et al. GPS Atmosphere Profiling Methods and Error Assessments [R]. Danish Meteorological Institute, Copenhagen, 1998

[9] 林剑, 吴云, 刘经南. 电离层 GPS 掩星反演技术研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(8): 1 947-1 953

[10] 徐晓华, 李征航, 罗佳. GPS 掩星数据反演中的地球扁率影响改正[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 30(4): 502-505

[11] 徐晓华, 罗佳. COSMIC 掩星折射指数廓线的统计验证[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 34(2): 214-217

第一作者简介:赵莹,博士生,主要从事掩星电离层反演研究。
E-mail:zhaoying106@126.com

Inversion of Ionospheric Electron Density Profiles with COSMIC Occultation Data

ZHAO Ying^{1,2} ZHANG Xiaohong¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(2 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: The launched COSMIC (constellation observing system for meteorology ionosphere and climate) satellite in 2006, operated by Taiwan of China and America, provides about 2 000 occultation data everyday, which is abundant for atmospheric probing research. The inversed electron density profiles through Abel integral method and the onion peeling method both have been compared with the results obtained by traditional ionospheric observation methods. Based on this, the statistical analysis has been made on the comparison results of the important ionosphere parameters, and the problems existed in the inversion process, together with the impact of fitting and interpolation methods on the occultation have been discussed. The numerical results indicate that the electron density profiles obtained by the two kinds of inversion methods accord well with the results observed by ionosond. The computed foF2 is consistent with the results of ionosond. However, large error exists between h_{\max} and hmF2. In order to obtain a reliable distribution of the ionosphere over some places, we need to combine the two methods for analysis, or to improve the inversion methods so as to acquire high-credible hmax values.

Key words: COSMIC; ionospheric; occultation; inversion

About the first author: ZHAO Ying, Ph.D candidate, majors in ionosphere occultation inversion.
E-mail: zhaoying106@126.com