

文章编号: 1000-8349(2009)03-0270-10



电离层的掩星分离假设反演法

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, 北京 100029)

摘要: 该文首先简要介绍了无线电掩星探测技术及其发展现状和传统 Abel 变换方法面临的问题。为改进传统 Abel 变换反演方法, 利用电子密度廓线的分离假设, 引进了分离假设反演法。随后利用国际电离层参考模式 IRI2007 给出 1000 个掩星事件截面的模拟数据及 COSMIC 卫星星座的一天实测数据, 进行比较计算, 并对结果进行了分析, 验证了分离假设反演法的有效性。文中还给出了垂直电子总量 VTEC(Vertical Total Electron Content) 先验场的获取途径。最后, 对分离假设反演法的进一步研究的方向进行了探讨。

关键词: 掩星技术; Abel 变换; 分离假设; VTEC; IRI2007; COSMIC

中图分类号: P352.7, P171.3 **文献标识码:** A

1 引 言

无线电掩星技术(Radio Occultation, 简称 RO 技术)是 20 世纪 60 年代美国喷气推进实验室(JPL)和 Stanford 大学为研究行星大气和电离层而开发的一种临边(Limb)探测技术。早在 20 世纪 60 年代, Fishbuch(1965)^[1]和 Lusignan(1969)^[2]就对这种技术进行了探讨。1993 年美国 UCAR(University Cooperation for Atmospheric Research)制订了 GPS/MET(GPS Meteorology)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(Low Earth Orbit, LEO)。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^[3]。随后为进一步开展相关的研究,国际上相继发射了 Orsted、Sunsat、CHAMP、SAC-C、GRACE 和 COSMIC 等卫星或星座^[10]。

一般情况下,电离层水平电子密度梯度的变化相对来说比较小,利用球对称假设以得到反演结果是可行的^[3],但是在电离层低层电子水平梯度大,或太阳作为主要电离源在昼夜更

收稿日期: 2008-10-13; 修回日期: 2008-12-16

替时(如日出/日没时刻)的影响发生改变、地球赤道 Appleton-Hartree 不规则体附近和大的地磁风暴造成的电离层扰动时,球对称假设就不是很适用了,反演结果可能存在较大误差,不能满足实际应用的要求^[4],进一步的误差分析表明在某些情况下误差可达 100%^[5]。为了减小球对称假设引起的误差,一些学者提出了一些改进方法^[6~15],如:用全球 TEC 图来提供电离层水平变化信息、用电离层层析结果或模式来约束反演、用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等。

在传统的 Abel 变换反演电离层密度廓线时,不考虑电子密度水平梯度的影响的假定,蕴含着其垂直电子总量为一常量的前提。本文采用电离层分离假设 (Separability hypothesis),利用全球 TEC 图(实测反演)和电离层模式(模拟反演)提供的电离层水平变化信息对 Abel 变换反演进行修正,以改进电离层掩星反演。文章第 2 节介绍引进 VTEC 改善的 Abel 变换反演方法,即分离假设反演法;第 3 节利用模拟掩星观测数据来检验这种反演方法;第 4 节,利用 COSMIC 观测数据反演,结合垂测仪观测结果进行比较,最后,对分离假设反演方法的结果进行讨论。

2 分离假设反演法

电离层分离假设^[12,13]假定在一定区域(这里为掩星反演区域)内的电子密度 $N_e(\lambda, \phi, h)$ 为垂直电子总量 $VTEC(\lambda, \phi)$ 和形函数 $F(h)$ 的乘积函数,即:

$$N_e(\lambda, \phi, h) = VTEC(\lambda, \phi) \cdot F(h), \quad (1)$$

其中 λ 依据选取不同的参考框架需求可为本地时间或经度, ϕ 为纬度, h 为高度。

垂直电子总量 $VTEC(\lambda, \phi)$ 可以提供电子密度的水平梯度,形函数 $F(h)$ 则描绘电子密度的垂直分布情况。在电离层的洋葱模型下,利用分离假设,可以对传统的 Abel 变换反演电子密度廓线进行改进,改善其受水平电子密度梯度的影响,其原理可参见图 1。传统的 Abel 变换反演电子密度廓线为对下式进行回归计算,

$$STEC(p_i) = 2 \cdot l_{ii} \cdot N_e(p_i) + \sum_{j=1}^{i-1} 2 \cdot l_{ij} \cdot N_e(p_j), \quad (2)$$

代入分离假设后,则有,

$$STEC(p_i) = 2 \cdot l_{ii} \cdot VTEC(\lambda_{ii}, \phi_{ii}) \cdot F(p_i) + \sum_{j=1}^{i-1} l_{ij} \cdot \left[VTEC(\lambda_{ij}, \phi_{i,j}) + VTEC(\lambda'_{ij}, \phi'_{ij}) \right] \cdot F(p_j) \quad (3)$$

其中 i, j 分别为图 1 中电离层的相应层的中心层弧线与对应的电波路径交点的编号,从电离层外层至内层依次增大; p_i, p_j 分别为对应编号为 i, j 交点处的地心距; $STEC(p_i)$ 是掩星点位于 i 层的斜向 TEC; l_{ii}, l_{ij} 分别为掩星点位于第 i 层的电波路径上编号为 i 的交点至掩星点的长度、编号 j 的交点至编号为 $j+1$ 的交点的长度; $N_e(p_i), N_e(p_j)$ 分别为编号为 i, j 的交点处的电子密度; $VTEC(\lambda_{ii}, \phi_{ii})$ 为第 i 层掩星点地球投影经纬度为 $(\lambda_{ii}, \phi_{ii})$ 点处的垂

直 TEC ; $VTEC(\lambda_{ij}, \phi_{ij})$, $VTEC(\lambda'_{ij}, \phi'_{ij})$ 分别为掩星点位于第 i 层的 $STEC$ 路径上掩星侧编号为 j 的交点 (地球投影经纬度为 $(\lambda_{ij}, \phi_{ij})$)、对应非掩星侧 $(\lambda'_{ij}, \phi'_{ij})$ 的垂直 TEC ; $F(p_i)$, $F(p_j)$ 分别为编号为 i, j 的交点处的形函数。

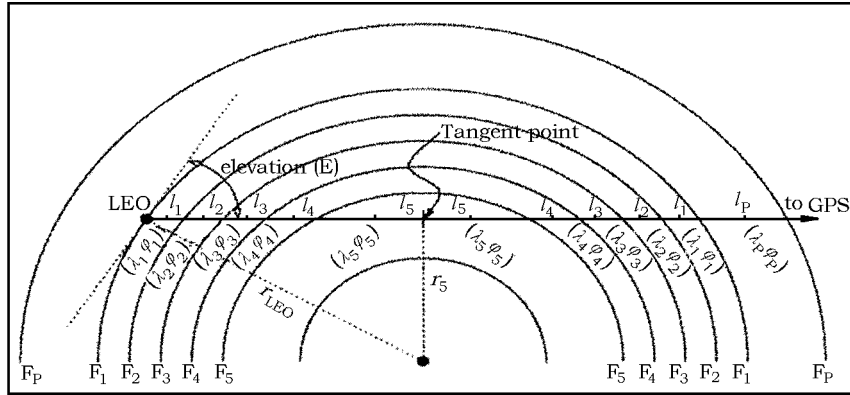


图 1 分离假设反演法示意图^[12]

3 模拟数据反演

设计模拟试验, 利用 IRI2007 模式, 可以提供全球格点 ($1^\circ \times 1^\circ$) 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, UT 为 12 h, 高度为 50~1000 km, 其他设置项为默认值。IRI2007 为最近发布的国际电离层参考模式, 是依据大量不同仪器对电离层的观测量综合得到的电离层三维经验模式, 模式精度较 IRI2001 等旧版有所提高。模拟卫星轨道高度设定为 800 km, 掩星事件最低点为 60 km, 掩星点可在 ($-90^\circ \sim 90^\circ$ N, $-180^\circ \sim 180^\circ$ E) 范围内随机地选取 1000 点, 其经纬度分布图如图 2 所示, 全球分布比较均匀。图中每一点代表一次掩星事件, 对应的掩星截面为球面上投影方向随机的剖面。截面的高度范围为 IRI2007 设定的 50~1000 km, 夹角范围为 $-30^\circ \sim 30^\circ$, 每 1° 为一个格点, 对应的格点上的电子密度

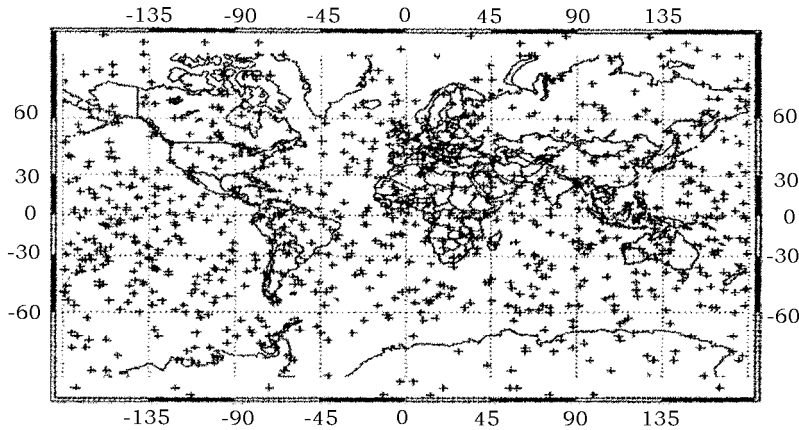


图 2 1000 个模拟的掩星点经纬度分布图

廓线由 IRI2007 模式提供的全球电子密度廓线格点数据通过三维插值获得。模拟设定 UT=12 h, 掩星点为全球范围内的随机点, 近似均匀分布于全球, 故而在经度上考虑到不同的地方时, 在纬度上参考了电离层水平梯度不同区域, 使模拟的掩星事件数据更具代表性, 也为今后的掩星点发展为全球分布提供理论参考。

对掩星点为 $(-12.21^{\circ}\text{N}, -105.92^{\circ}\text{E})$ 处的掩星事件, 用分离假设反演方法和 Abel 变换反演法对模拟的掩星事件进行个个分析, 其电波路径地球投影近似为经线方向, 其掩星事件的截面和路径见图 3, 图中横坐标为图 1 中的 r_{LEO} 与中心线 r_5 的夹角, 单位为 $(^{\circ})$;

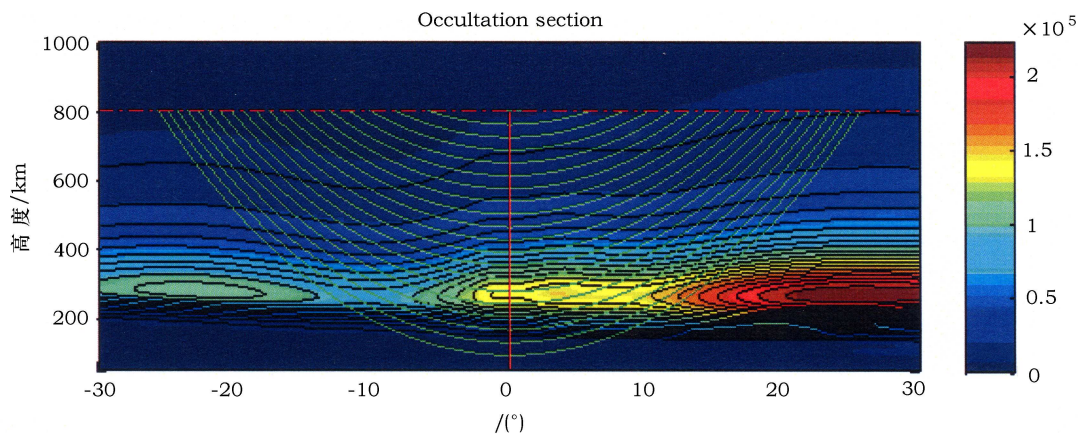


图 3 $(-12.21^{\circ}\text{N}, -105.92^{\circ}\text{E})$ 处模拟的掩星截面示意图

纵坐标为高度, 单位为 km; 0° 处的直线为掩星点 $(-12.21^{\circ}\text{N}, -105.92^{\circ}\text{E})$ 处的高度廓线, 800 km 处的点划线为掩星轨道, 曲线为模拟的掩星事件的路径线, 图中电子密度单位为电子数 $/\text{cm}^3$ 。从图中可以看出, 此掩星事件发生于电子密度水平梯度较大的地方。

利用模式提供的截面格点廓线数据计算出各格点上的 $VTEC$ 值, 作为分离假设反演的 $VTEC$ 先验场。对模拟路径的 TEC 序列进行 Abel 变换反演法和分离假设反演法得到的电子密度廓线和实际的模式廓线列于图 4。图中点划线为 Abel 变换反演得到的电子密度廓线, 实

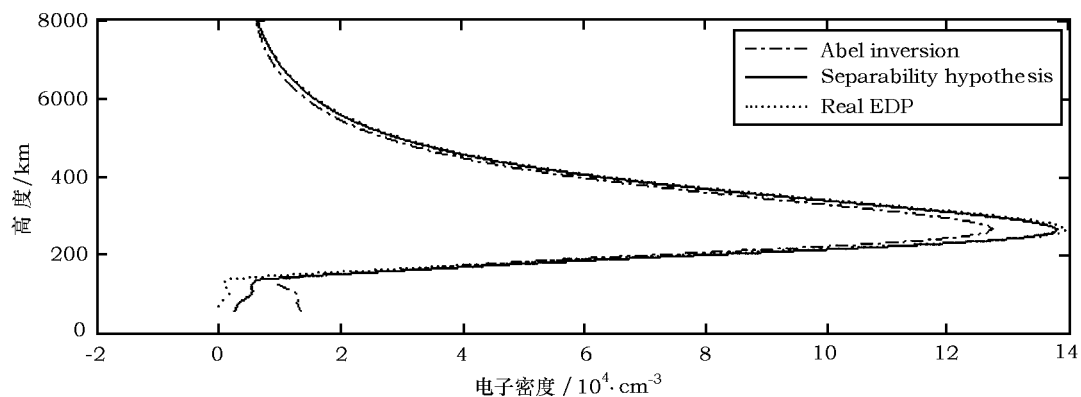


图 4 图 3 中的模拟掩星个个反演结果图示

线为分离假设反演法得到的电子密度廓线，点线为模式提供的实际电子密度廓线。从图 4 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为 -8.7% ，而利用分离假设反演法得到的峰值相对误差仅为 -1.07% 。

$$\text{峰值相对误差 (\%)} \equiv \frac{N_{e,i} - N_{e,r}}{N_{e,r}} \times 100\% , \quad (4)$$

其中 $N_{e,i}$ 为反演的 F_2 层电子密度峰值， $N_{e,r}$ 为实际的 F_2 层电子密度峰值。

模拟的 1000 个随机掩星事件按上述反演法反演得到的统计结果参见图 5 和表 1。图 5 给出了 F_2 层峰值电子密度反演值与模式值的比较，图 5a 和 5b 分别是 Abel 变换反演方法和分离假设反演法的结果，横坐标为峰值电子密度的模式值，纵坐标为峰值电子密度的反演结果。从图中可以看出，分离假设反演的峰值密度与模式值相关性更高。表 1 为 F_2 层峰值电子密度反演值与模式值的误差统计结果。从表 1 的统计结果来看，采用分离假设反演法，峰值电子密度反演误差与 Abel 变换反演法相比有大幅度减小。表明在电离层水平梯度大时分离假设反演法较 Abel 变换反演法的反演效果好。

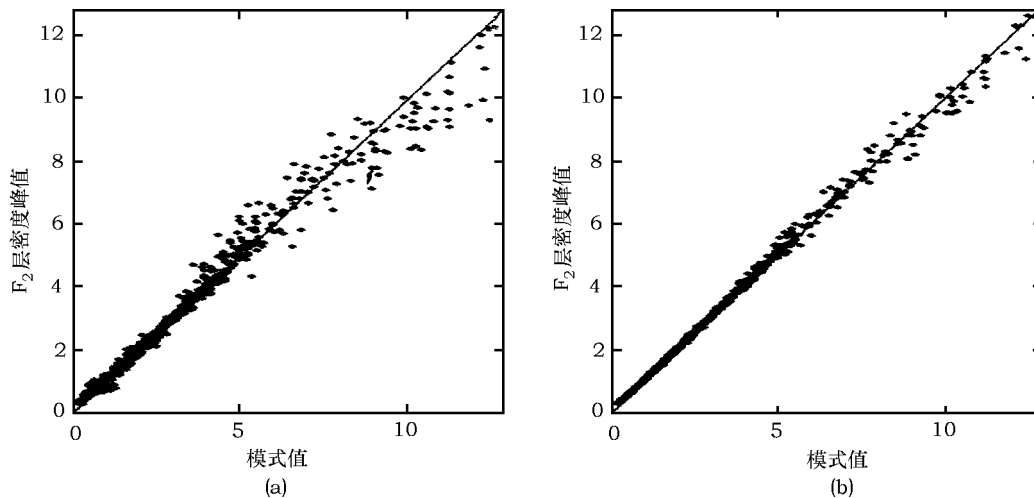


图 5 Abel 变换反演法和分离假设反演法得到的 F_2 层电子密度峰值与模式值比较 (单位: $10^6 \cdot \text{cm}^{-3}$)

(a) Abel 变换反演法反演得到的密度峰值与模式值相关系数为 0.9903;

(b) 分离假设反演法，反演得到的密度峰值与模式相关系数为 0.9984

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

反演方法	相对误差 (%)		绝对误差 / 电子数 $\cdot \text{cm}^{-3}$	
	平均值	标准差	平均值	标准差
Abel 变换反演方法	2.5	12.0	-699.3111	34795.8
分离假设反演法	-0.060	2.27	-244.4497	13653.5

4 COSMIC 实测数据反演

COSMIC 电离层掩星观测数据具有掩星侧和非掩星侧数据, 其反演廓线的方法是改正 TEC 的 Abel 变换反演法^[13]。COSMIC 的 Abel 变换反演结果从 CDAAC(COSMIC Data Analysis and Archive Center) 网站上下载; 全球 TEC 图格点数据从 IGS(International GPS Serves) 网站上下载; 电离层测高仪 (垂测仪) 数据从 SPIDR(The Space Physics Interactive Data Resource) 网站上下载。分离假设反演中需用到的各时刻点上掩星截面的 $VTEC$ 数据为全球 TEC 格点在时间、经纬度上的插值, 本文假设在掩星事件发生的过程中 $VTEC$ 不变。掩星数据和垂测仪数据的匹配方法是, 首先选择站点经纬度位于掩星点经纬度的 $\pm 2^\circ$ 范围内的垂测仪数据, 再对数据取时间上的插值, 来匹配对应的掩星数据。数据时间选取 2007 年的第 173 天的 COSMIC 掩星数据 (共 1535 组数据), 对应的全球 TEC 图格点数据 (13 组, 每两小时一组), 对应的站点 F_2 层的数据 (34 个站点, 临界频率 f_0 数据, 有 $N_e = f_0^2/80.6$), 经匹配方法匹配后得到 18 组数据, 如图 6 所示。图 6 左表示一天掩星事件发生的全球分布图, 图中所示的每一个 ‘+’ 代表一次掩星事件, 可以看出当天的掩星事件在低纬度地区比较集中, 在高纬度比较稀疏, 经度上分布比较均匀, 图 6 右表示的掩星事件和站点的匹配图, 图中所示的每一个 ‘ Δ ’ 代表一个站点, 其周边的 ‘+’ 代表的是站点匹配的对应掩星事件。匹配到的 18 组数据的反演结果误差统计见表 2。表 2 表示掩星反演得到的峰值密度转换的临界频率 f_0 与垂测仪探测结果的误差统计结果, 对于这两种反演方法, 分离假设反演结果的平均值偏差较 Abel 变换反演结果的平均值偏差要小, 但两者标准差相当。

表 2 掩星反演 F_2 层的临界频率与垂测仪探测结果的误差统计

反演方法	f_0 相对误差 (%)		f_0 绝对误差 /MHz	
	平均值	标准差	平均值	标准差
Abel 变换反演方法	3.77	13.55	0.21258	0.63337
分离假设反演法	1.71	17.96	0.15227	0.74714

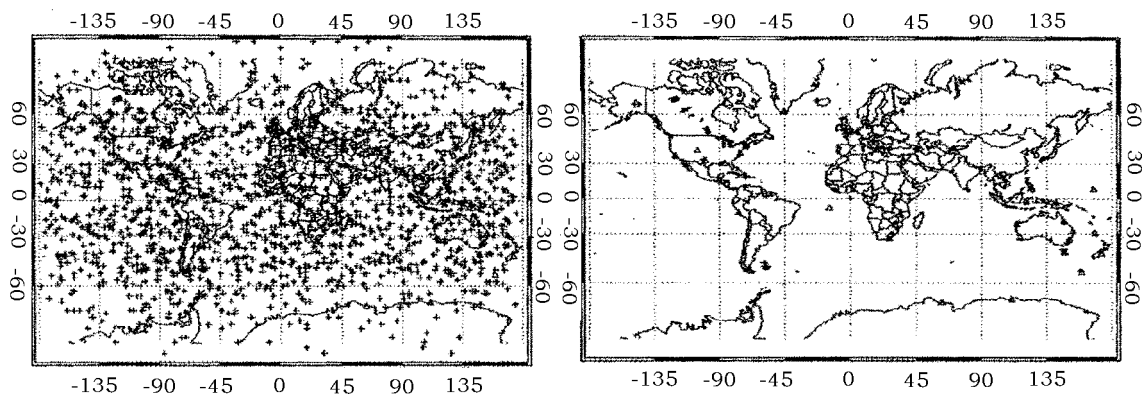


图 6 一天掩星点全球分布图 (左) 和站点掩星点匹配图 (右)

图 7 给出了其中的两个反演实例图。图 7(a) 上图表示掩星事件位于全球 TEC 图上的位置, 五角星为掩星点位置, 过五角星的线为掩星截面在球面上的投影; 图 7(a) 下图表示反演结果和垂测仪实测值的比较, 点线为 Abel 变换反演结果, 实线为分离假设反演结果, 点划线为垂测仪测量值, 图 7(b) 类同, 图中 $VTEC$ 的单位为 $TECU$ 。图 7(a) 中 Abel 变换反演法得到 F_2 层的 f_0 的结果较分离假设的要差 (Abel 变换反演法的 f_0 相对误差 8.5246%, 分离假设的 f_0 相对误差为 3.1095%), 而图 7(b) 中 Abel 变换反演法得到 f_0 的结果较分离假设的要好 (Abel 变换反演法的 f_0 相对误差为 -1.9417%, 分离假设的 f_0 相对误差为 -4.73%)。从总的匹配数据反演结果看来, Abel 变换与分离假设反演法对垂测仪的偏差相当, 而分离假设反演法稍占优势, 表明了 Abel 变换和分离假设反演法的实际可行性。

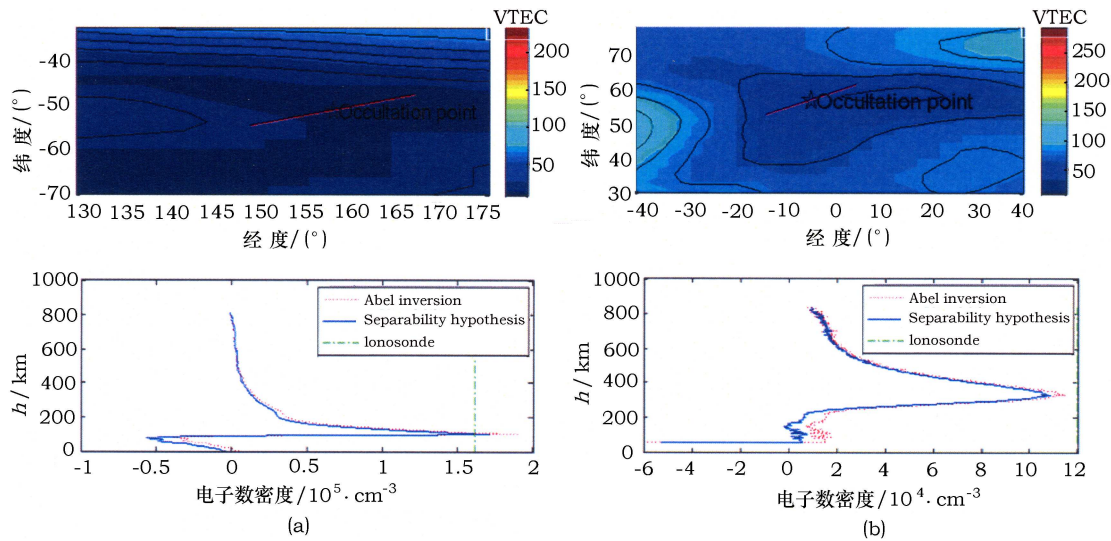


图 7 实测数据反演结果和垂测仪探测结果比较个例

上图为对应掩星点位于全球 TEC 图的位置, 下图为反演效果和对比图

需要指出的是, 垂测仪数据本身存在一定的测量误差, 电离层本身也存在一定空间和时间尺度上的复杂变化特性 (有时可达 30%)^[10], 因此, 仅与垂测仪数据比较, 只能用来对两种反演方法的可靠性进行检验, 很难检验哪种反演方法的精度更高。为了表征两种反演方法的整个廓线上的偏离程度, 引入平均绝对偏差和平均相对偏差两个量:

$$\text{平均绝对偏差} \equiv \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(N_{e,s} - N_{e,a}(i, j) \right), \quad (5)$$

$$\text{平均相对偏差} \equiv \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \left(\frac{N_{e,s}(i, j) - N_{e,a}(i, j)}{N_{e,a}(i, j)} \right), \quad (6)$$

其中 $N_{e,s}(i, j)$, $N_{e,a}(i, j)$ 分别为第 i 个掩星事件上, 高度序列第 j 个点上的分离假设反演

值和 Abel 变换反演值; m 为掩星事件总数, 此时为 1535; n_i 为第 i 个掩星事件高度序列个数。

另外, 对这天的 1535 组数据进行反演, 计算出 Abel 变换反演和分离假设反演之间的平均绝对偏差和平均相对偏差, 统计结果见表 3。

表 3 实测数据用 Abel 变换反演法和分离假设反演法得到的 N_e 相互偏差统计

	平均值	标准差
平均绝对偏差 / 电子数 $\cdot \text{cm}^{-3}$	132.9345	10321
平均相对偏差 (%)	0.70	151.74

从表 3 可以看出在太阳活动低年的 2007 年, Abel 变换反演法和分离假设反演法结果总体上比较接近 (平均绝对和平均相对偏差平均值小), 但是部分反演结果偏差比较大 (标准差值较大)。图 8 表示在电离层水平梯度大的地方, Abel 变换和分离假设反演的结果偏差较大。图 8 上表示的两个掩星事件其截面对应的全球 TEC 图上的位置情况, 五角星处为掩星点, 穿过五角星的直线为掩星事件的截面, 图 8(下) 表示的是上图的两个掩星事件分别用 Abel 变换反演法和分离假设反演法反演得到的效果图。从图 8 (上) 左右两图中可以看出掩星事件位于等

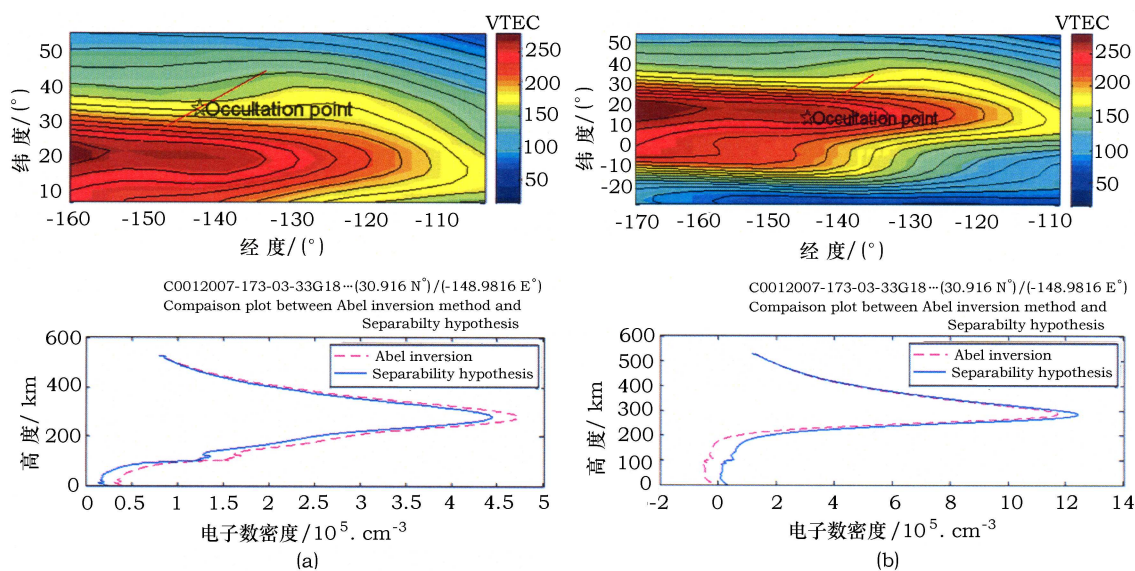


图 8 掩星点位于高电离层水平梯度区的 Abel 变换和分离假设反演效果比较个例

值线密集的部位, 对应的截面的电离层水平梯度大, 从上节的模拟数据、实测数据和理论分析可得到 Abel 变换反演的球对称假设在电离层水平密度大区域不适用, 分离假设反演对结果有一定的改进。

在反演中运用分离假设反演法, 其 VTEC 先验场可以从电离层模式 (如 IRI2007) 或从 IGS 网站上发布的 TEC 全球图确定。本文模拟计算中用的是模式计算的值, 而 COSMIC 实测数据反演部分用的是 IGS 网站上下下载的 TEC 全球图数据。

5 讨论和结论

本文简述了掩星技术及传统的 Abel 变换反演面临的困难, 详细阐述了分离假设反演方法, 利用 IRI2007 模型的模拟数据, 验证了其对应的改进效果。与此同时, 也将 Abel 变换反演法和分离假设反演法应用于 COSMIC 实测数据的反演, 并将反演结果与全球电离层垂测仪的探测结果进行比较分析。模拟数据和实测数据的反演结果表明, 在太阳活动低年、电离层电子密度水平梯度不大, Abel 变换与分离假设两种反演方法都可以很好地反演得到满意的电离层剖面。

从理论上分析, 分离假设反演法效果较 Abel 变换反演法反演效果要好, 是基于对 Abel 迭代思想的改进, 能够提高电离层掩星反演密度廓线的精度。但受分离假设条件的符合程度及反演区域 $VTEC$ 先验场的精度约束, 影响到反演结果的精度。其中分离假设条件的符合程度和反演区域 $VTEC$ 先验场精度的影响的具体情况有待于进一步的研究, 消减其对应的影响也有待下一阶段的探讨。

致谢 感谢 CDAAC 提供 COSMIC 电离层掩星数据, 感谢 IGS 提供全球 TEC 格点数据, 感谢 SPIDR 提供电离层测高仪数据。

参考文献:

- [1] Fishbach F. Am. Meteorol. Soc., 1965, 46(9): 528
- [2] Fjeldo G, Eshleman V R. Radio Sci. 1969, 4: 879
- [3] Kursinski E R, Hajj G A, Sehtleld J T, *et al.* JGR, 1997, 102(DI9): 3429
- [4] 张训械, 曾 桢, 胡雄等. 地球物理学报, 2002, 45(增刊): 1
- [5] Todd Mori Kawakami. Dissertation. Austin: Graduate School of The University of Texas, 2001: 265
- [6] Hajj G A, Ibanez M R, Kursinski E R, *et al.* International Journal of Imaging Systems and Technology. 1994, 5: 174
- [7] Hernandez-Pajares M, Juan M, Sanz J. Geophysical Research Letters. 2000, 27(16): 2743
- [8] Garcia-Fernandez M, Hernandez-Pajares M, Juan M, *et al.* JGR, 2003, 108(A9): 1338
- [9] Garcia-Fernandez M, Hernandez-Pajares M, Juan M, *et al.* GPS Solutions. 2005, 9(2): 105
- [10] Tsai Lung-Chih, Tsai Wei-Hsiung. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sci., 2004, 15(4): 589
- [11] 吴小成, 胡 雄, 宫晓燕等. 地球物理学报, 2008, 51(3): 618
- [12] Miquel Garcia'la-Fernández. Dissertation. Spain: Research group of Astronomy and Geomatics (gAGE) Depts. of Applied Mathematics IV and Applied Physics Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2004: 80
- [13] 吴小成, 胡 雄, 张训械等. 地球物理学报, 2006, 49(2): 328
- [14] 黄 斌, 郭 鹏, 洪振杰等. 天文学进展, 2007, 25(3): 236
- [15] 刘 敏, 郭 鹏. 天文学进展, 2006, 24(1): 27

Separability Hypothesis Inversion Method of Ionospheric Occultation

LIU Zhao-lin^{1,2}, SUN Xue-jin¹, FU Yang²

(1. *Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China*; 2. *Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China*)

Abstract: With the increasing number of Global Positioning System (GPS) applications, the knowledge of the elements that affect their radio signals has become an important field of study. One of the most important effects on ionosphere monitoring is the ionospheric radio occultation, IRO. Using IRO, the monitoring data of ionosphere has been richer. How to inverse these data to the Electric Density Profile, EDP, is the important problem of ionospheric occultation. On traditional, base on the assumption of (local) spherical symmetry, Abel inversion has been applied to solve the problem. In ill-suited condition of the assumption, the error from using Abel inversion is very large, and the result is unauthentic. How to improve the problem of Abel inversion becomes the focus research of ionospheric occultation.

The purpose of this paper is to improve the problem of Abel inversion. First, briefly introduce the radio occultation sounding technology and developing situation. Separability hypothesis of EDP and its inversion method has been introduced for improving the problem of using Abel inversion. Then using 1 000 sections simulative cases from International Reference Ionosphere 2007(IRI2007) model and one day's real ionospheric observed data from COSMIC, the validity of Separability hypothesis inversion method has been confirmed. Third, the way to get the pre-VTEC(Vertical Total Electron Content) field has been pointed out. In the end, the development orientation of the Separability hypothesis inversion method in future has been probed.

Key words: Occultation technology, Abel inversion, Separability hypothesis, VTEC, IRI2007, COSMIC