

周义炎, 申文斌, 吴云等. 地基 GPS VTEC 约束的电离层掩星反演方法. 地球物理学报, 2012, 55(4): 1088-1094, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.003.

Zhou Y Y, Shen W B, Wu Y, et al. Ground-based GPS VTEC constrained inversion method for ionospheric occultation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(4): 1088-1094, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.003.

地基 GPS VTEC 约束的电离层掩星反演方法

周义炎^{1,2,3}, 申文斌¹, 吴云³, 张训械⁴

1 武汉大学测绘学院, 武汉 430079

2 中国科学院空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

3 中国地震局地震研究所, 武汉 430071

4 中国科学院武汉物理与数学研究所, 武汉 430071

摘 要 本文在分析 GPS 电离层掩星 Abel 积分变换反演的基础上, 介绍了一种顾及电离层水平梯度信息的反演新方法, 即地基 GPS VTEC 约束的电离层掩星反演法, 并将该方法应用于 COSMIC 低纬掩星观测资料的反演. 初步的统计结果表明, 与经典 Abel 变换反演相比, 地基 GPS VTEC 约束反演的临界频率 f_oF_2 更接近于电离层测高仪观测的结果.

关键词 GPS 电离层掩星, Abel 变换反演, VTEC 约束反演, COSMIC

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.003

中图分类号 P352

收稿日期 2011-04-11, 2012-02-06 收修定稿

Ground-based GPS VTEC constrained inversion method for ionospheric occultation

ZHOU Yi-Yan^{1, 2, 3}, SHEN Wen-Bin¹, WU Yun³, ZHANG Xun-Jie⁴

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 State Key Laboratory of Space Weather, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3 Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

4 Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

Abstract This paper firstly analyzes the Abel transform inversion of GPS ionospheric occultation, and then introduces a new inversion method, which takes the horizontal gradient information of the ionosphere into account, called the ground-based GPS VTEC constrained inversion method for ionospheric occultation. Subsequently, this new method is applied in the inversion of COSMIC low-latitude occultation observations. The preliminary statistical results show that the retrieved critical frequency f_oF_2 values using the ground-based GPS VTEC constrained inversion are closer to the ionosonde measurements than those using the classical Abel transform inversion.

Keywords GPS ionospheric occultation, Abel transform inversion, VTEC constrained inversion, COSMIC

1 引言

20 世纪 90 年代开发的 GPS 无线电掩星技术使低成本、全天候、全球覆盖的近地空间观测成为可能. 这种技术的观测原理是在低轨卫星 (LEO) 上, 安放一台 GPS 双频掩星接收机, 通过测量被电离层和大气遮蔽的 GPS 卫星信号来反演电离层和大气参数 (图 1). 由于传播介质折射指数的变化, GPS 卫星信号在穿过地球电离层和中性大气时, 电波路径会出现弯曲和延迟. 因此, 从 LEO 掩星接收机测量的电波相位数据, 就可以计算信号弯曲量大小, 并利用 Abel 积分变换解算电离层或中性大气折射指数, 继而推导电离层电子密度或中性大气密度、压力和温度等参数廓线^[1-4]. 自 1995 年美国 Microlab-1 低轨卫星 (GPS/MET) 首次验证了 GPS 无线电掩星探测地球电离层和大气的可行性^[5-11] 以来, 国际上相继实施了 Orsted、CHAMP、SAC-C、GRACE、COSMIC、Metop-A 等掩星观测计划, 尤其是 COSMIC 星座掩星计划的实施使探测电离层的能力得到了极大的提升, 为空间天气的研究提供了大量的基础资料.

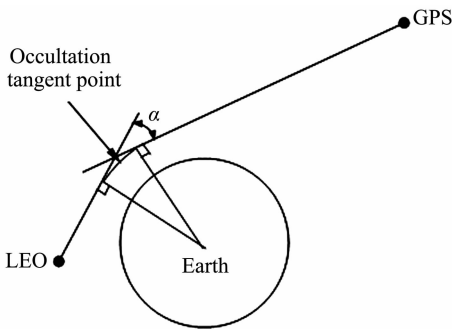


图 1 GPS 掩星几何示意图

Fig. 1 Illustration of geometry of GPS occultation

但是, 利用经典 Abel 积分变换反演电离层或大气的前提条件都是假设介质在掩星射线穿越的区域呈球对称分布. 通常情况下, 这种球对称假设与真实的介质分布难以吻合; 相对而言, 这一假设对中性大气掩星反演影响较小, 而对较长路径的电离层掩星反演影响较大. 因此, 电子密度局部球对称近似是经典 Abel 电离层掩星反演的最大误差源^[10-14]. 针对经典 Abel 掩星反演方法的这种局限, 一些学者提出了若干引入电离层水平梯度信息的改进反演法, 如利用地基垂直总电子含量 VTEC、邻近掩星观测结果或电离层参考模式等来进行约束反演^[15-21], 以提

高电离层掩星反演的精度.

接下来, 本文在分析经典 Abel 电离层掩星反演算法的基础上, 介绍了一种地基 GPS VTEC 约束的电离层掩星反演法, 并利用这两种方法对 COSMIC 电离层掩星观测数据进行了反演, 最后将反演结果与电离层测高仪观测结果进行了比较.

2 经典 Abel 电离层掩星反演

基于光学近似的经典 Abel 电离层掩星反演主要采用了两个假设条件: ①电离层电子密度的局部球对称; ②一次掩星事件中所有掩星射线近似地位于同一平面. 在此条件下, Abel 积分变换可采取基于射线弯曲角或总电子含量 TEC 的方式来进行电离层掩星反演.

2.1 基于射线弯曲角的 Abel 反演

在这种反演方法里, 掩星射线弯曲角与电离层折射指数构成的 Abel 积分变换对形成了经典电离层掩星反演的基础^[11], 其表达式为

$$\tilde{\alpha}(a) = -2a \int_a^{r_{\text{LEO}}} \frac{dn/dx}{n(x) \sqrt{x^2 - a^2}} dx, \quad (1)$$

$$n(x) = n(x_{\text{LEO}}) \exp \left[\frac{1}{\pi} \int_x^{r_{\text{LEO}}} \frac{\tilde{\alpha}(a)}{\sqrt{a^2 - x^2}} da \right], \quad (2)$$

这里 $a = n(r_0)r_0$ 为射线碰撞参数, 即地心至掩星射线的垂直距离; r_0 为掩星切点 (即射线近地点) 半径; $\tilde{\alpha}$ 为改正的射线弯曲角, 是整个射线弯曲角的一部分, 即处于 LEO 轨道高度以下那部分掩星路径的弯曲量, 我们称其为改正的弯曲角, 其计算可通过多普勒频移法用掩星侧 LEO 处的弯曲角减去非掩星侧与 LEO 对称点 (关于掩星切点对称) 处的弯曲角而得到^[11]; n 为电离层折射指数 ($n = 1 - 40.3N_e/f^2$, N_e 为电子密度, f 为载波信号频率); $x = n(r)r$ 为折射半径. 不难看出, 该 Abel 变换反演可得到 LEO 轨道高度以下的电子密度廓线. 对轨道较高的 LEO 卫星, 公式 (2) 中的 $n(x_{\text{LEO}})$ 可取 1, 如 GPS/MET、COSMIC 等; 而对轨道较低的 LEO 卫星, 如 CHAMP 等, 该 $n(x_{\text{LEO}})$ 需通过其他途径得到.

鉴于多普勒频移求解弯曲角需要高精度的星历数据, 且计算相对复杂, 因此, 在实际的掩星反演中, 较少采用这种通过多普勒频移求解弯曲角的 Abel 积分变换来反演电子密度廓线.

2.2 基于射线 TEC 的 Abel 反演

鉴于 GPS-LEO 掩星射线在电离层中的弯曲量是个较小的量 (在电离层 F₂ 层区域其弯曲一般不超

过 0.03°), 且 GPS 掩星射线与直线传播的偏离量比电离层的垂直结构尺度小得多^[10-11], 在考虑 L1/L2 信号传播路径近似相同的条件下, 常引入 LEO 轨道高度以下那部分掩星射线路径上的总电子含量 TEC 来反演电离层折射指数, 其 Abel 积分变换对构成如下^[11, 22]:

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

$$N_e(r_0) = -\frac{1}{\pi} \int_{r_0}^{r_{\text{LEO}}} \frac{d\text{TEC}'(r)/dr}{\sqrt{r^2 - r_0^2}} dr. \quad (4)$$

这里的 TEC' 称为改正的 TEC, 该 TEC' 通常采用掩星侧 LEO 处的 TEC 减去非掩星侧 LEO 对称点(关于掩星切点对称)处的 TEC 来确定^[11, 22]. 不难看出, (3)、(4) 两式构成的改正 TEC 的 Abel 反演法可得到 LEO 轨道高度以下的电子密度廓线.

事实上, 在利用 Abel 积分变换进行电离层掩星反演时, 都会碰到异常积分的问题. 如公式(4)所示, 当 r 趋近 r_{LEO} 时, $d\text{TEC}'(r)/dr$ 趋近于 $-\infty$, 这会给数值积分带来困难; 同样, 在反演顶部电子密度廓线时也较困难, 因为这时的 r_0 趋近 r_{LEO} , 从而使 $r^2 - r_0^2$ 趋近于 0, 而 $d\text{TEC}'(r)/dr$ 趋近于无穷大. 通常而言, 下限积分异常可通过变量替换来解决, 而上限积分异常的解决则较复杂. 鉴于这种情况, COSMIC Data Analysis and Archive Center(CDAAC)通过对 LEO 轨道高度以下电离层进行球形分层(确保每层至少包含有一条掩星射线的切点), 直接将公式(3)右边的积分项进行了分层离散化, 在考虑球对称及层间电子密度线性变化的条件下, 从顶到底可依次递归确定各层的电子密度^[23-24]. 显然, CDAAC 的反演方法尽管计算简单, 但相对于公式(3)和(4)构成的 Abel 反演方法而言却引入了离散误差.

从上面的分析来看, 在考虑一次掩星事件中所有掩星射线近似地位于同一平面的前提下, 经典 Abel 反演都是基于电离层电子密度局部球对称假设条件下的反演方法, 而这一假设的引入正是 Abel 积分变换反演电离层的最大误差源, 因为这种假设与实际电离层分布结构不一定吻合, 而 Abel 积分变换对是建立在水平结构线性分布条件下的表达式, 当掩星射线穿越区域的电离层具有非线性的水平梯度时, Abel 积分变换反演的结果精度将显著降低^[12].

此外, 在轨道相对较高的 LEO 电离层掩星反演中, LEO 所处高度电离层折射指数 $n = 1$ 的假设也不可避免地会引入反演误差, 这一假设忽略了 LEO

轨道高度以上电离层对射线弯曲角或 TEC 计算的影响; 而在轨道相对较低的 LEO 电离层掩星反演中, LEO 轨道高度以下那部分掩星射线弯曲角或 TEC 的精确求定也存在实际的困难, 这主要是因为: 一方面需要有非掩星侧的跟踪观测数据; 另一方面即使不考虑一次掩星事件中电离层的动态变化, 并可计算非掩星侧各采样观测点或内插点处的 TEC(或弯曲角), 但由于在掩星侧观测的射线(LEO-掩星 GPS)与在非掩星侧观测的射线(LEO 对称点-掩星 GPS)一般情况下并不共面, 如果这两条射线穿越的空间区域相距甚远或构成的夹角较大, 将导致掩星侧 TEC(或弯曲角)减去非掩星侧对称点 TEC(或弯曲角)所得的差值不能代表 LEO 轨道高度以下那部分掩星路径上的真实 TEC(或弯曲角), 甚至会有毫无实际意义的 TEC 差值出现.

可见, 电离层局部球对称假设是经典 Abel 积分变换应用于电离层掩星反演的重要前提. 因此, 在电离层电子密度局部球对称假设得不到近似满足的情况下, 引入电离层水平梯度信息, 寻求新的反演方法, 将显得甚为必要.

3 地基 VTEC 约束的电离层掩星反演

目前, 地基 GPS 连续观测站的广泛分布为我们获取高精度 VTEC 信息提供了非常好的条件, 最方便的 VTEC 信息源是各 GPS 研究机构如国际 GNSS 服务中心(IGS)、美国喷气推进实验室(JPL)、欧洲定轨中心(CODE)等提供的全球电离层图 GIM, 这些丰富的电离层水平分布信息为我们改善经典 Abel 电离层掩星反演创造了条件. IGS 的 GIM 是通过赋权合并其他机构的计算结果而得到, 其提供的全球 VTEC 数据可作为精确的电离层信息源^[25]. 因此, 充分利用这一信息源, 以改善球对称电离层掩星反演具有相当的可行性.

3.1 反演方法介绍

一般情况下, 就一次电离层掩星事件而言, 其覆盖的空间区域可达数千公里之距; 在这一区域内相距较远的两个地理位置, 同一空间高度处的电子密度值一般具有较大的差异, 使得电离层电子密度球对称分布假设不成立; 在日出日落的分界区、磁暴期间以及低纬地区尤其明显. 有鉴于此, 在新的掩星反演中, 通过地基 VTEC 引入真实的电离层水平梯度信息, 尤其是非线性的水平梯度信息, 以克服 Abel 反演中电离层球对称假设的影响, 则具有提高掩星

反演精度的可能性.

假设对地面任意一点,其上空的电子密度分布与 VTEC 之间的关系可表示为

$$N_e(\lambda, \phi, h) = \text{VTEC}(\lambda, \phi) \cdot F(h), \quad (5)$$

这里的 $F(h)$ 我们称其为归一化的电子密度,且满足 $\int_0^{\infty} F(h)dh = 1$. 统计分析表明:一般条件下,某区域内不同地理位置的电子密度廓线可能存在较大差异,但它们的归一化电子密度廓线却极为相似,即使在电离层赤道异常区也是这样^[26]. 因此,可以用归一化的电子密度球对称假设来取代经典 Abel 掩星反演中的电子密度球对称假设.

目前,进行 GPS 掩星观测的 LEO 卫星中,电离层掩星观测的采样频率一般设置为 1 Hz,其相邻两条掩星射线的掩星切点高度之差通常在 3 km 以内. 因此,在新的反演中,可以将电离层进行球形分层(LEO 轨道高度以上每 3 km 为一层,直至 1200 km 高度附近;LEO 轨道高度以下也采用每 3 km 为一层,直至 60 km 高度附近;共划分为 380 层),确保每层内至少包含有一条掩星射线的切点. 在假设掩星信号近似直线传播的前提下,就可以以地基 GPS VTEC 为先验信息,在归一化电子密度局部球对称假设条件下,反演射线穿越区域的各层电子密度值,而掩星射线 TEC 即是这些电子密度值沿射线路径积分的结果. 在考虑层间电子密度线性变化并对积分进行分层离散化后,对每一条掩星射线,均可建立相应分层归一化电子密度(未知常数)与该射线 TEC 之间的一个线性方程,整个掩星过程即可构成一个包含各分层归一化电子密度的 TEC 观测方程组,它包括了最靠近下降掩星发生时刻或上升掩星结束时刻的部分非掩星观测射线的 TEC 方程,通过最大熵原理求解该方程组可得到各个分层的归一化电子密度,进而利用地基 VTEC 信息获得掩星观测区域的真实电子密度值. 在本文中,上述反演方法被称为地基 VTEC 约束的电离层掩星反演法. 图 2 为这一反演方法中通过射线 TEC 重建归一化电子密度廓线的示意图.

从图 2,掩星射线 TEC 可表达为

$$\begin{aligned} \text{TEC}(j) = & \sum_{k=p}^{380} [l_{j,(k,k+1)} \cdot F(k) \cdot \text{VTEC}(\lambda_{j,k}, \phi_{j,k})] + \\ & \sum_{k=1}^{p-1} \{l_{j,(k,k+1)} \cdot [\text{VTEC}(\lambda_{j,k}, \phi_{j,k}) + \text{VTEC}(\lambda'_{j,k}, \phi'_{j,k})] \cdot \\ & F(k)\}, \end{aligned} \quad (6)$$

j 为电离层掩星观测采样编号, F 为各分层的归一

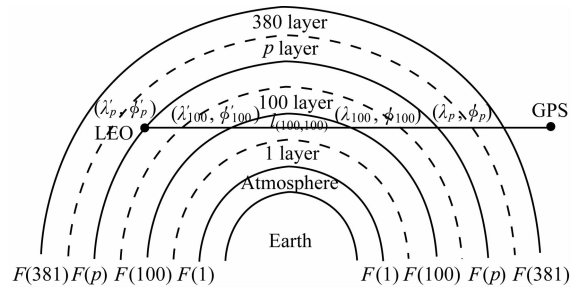


图 2 掩星射线 TEC 重建示意图

Fig. 2 Illustration of reconstructed TEC along occultation ray

化电子密度,是待求参数,其中 $F(p)$ 为 LEO 所在分层(第 p 分层)的归一化电子密度, VTEC 为射线与各分层交点处的垂直总电子含量. 考虑掩星期间观测的所有射线 TEC(包括部分非掩星射线 TEC),即可形成一个超定的线性方程组. 对此方程组,可以采用倍乘代数重建法(MART)来求解,其各分层迭代初始值 $F_0(k)$ 可按以下方式给出:

$$F_0(k) = \frac{N_{e,0}(k)}{\text{VTEC}(\lambda_{T(300)}, \phi_{T(300)})}, \quad k = 1, 2, \dots, p, \dots, 380, \quad (7)$$

其中 $(\lambda_{T(300)}, \phi_{T(300)})$ 为掩星射线切点高度在 300 km 附近的地理位置, p 为 LEO 所处圈层的编号,该圈层为 $p-1$ 与 p 层的分界线(见图 2). 各层电子密度初始值 $N_{e,0}$ 可以用电子密度球对称假设计算

$$\begin{cases} N_{e,0}(k) = \frac{\sum_{j=p}^{380} \text{TEC}(j)}{\sum_{j=p}^{380} \sum_{i=p}^{380} l_{j,(i,i+1)}}, & p \leq k \leq 380 \\ N_{e,0}(k) = \frac{\text{TEC}'(k)}{l_{k,(k+1,k+1)}}, & k = p-1 \\ N_{e,0}(k) = \frac{\text{TEC}'(k) - 2 \sum_{i=k+1}^{p-1} N_{e,0}(i) \cdot l_{k,(i,i+1)}}{l_{k,(k+1,k+1)}}, & 1 \leq k < p-1 \end{cases}, \quad (8)$$

这里, TEC 为非掩星观测射线的总电子含量, TEC' 为掩星射线在 LEO 轨道高度以下那部分路径上的总电子含量. 需要注意的是,在利用公式(8)计算电离层底部各分层的初始电子密度值时,由于电子密度球对称假设或 TEC' 计算的不精确性,可能导致一些分层出现负电子密度值,这时我们将用与其相邻的上分层的电子密度值来代替. 事实上,在确定 LEO 轨道高度以下各分层电子密度初始值时,掩星切点处于同一分层的射线通常不止一条,但在计算

初始值时每个分层仅取一条射线,而对 LEO 轨道高度以上各分层初始值的确定则取最靠近下降掩星发生时刻或上升掩星结束时刻的非掩星观测射线。

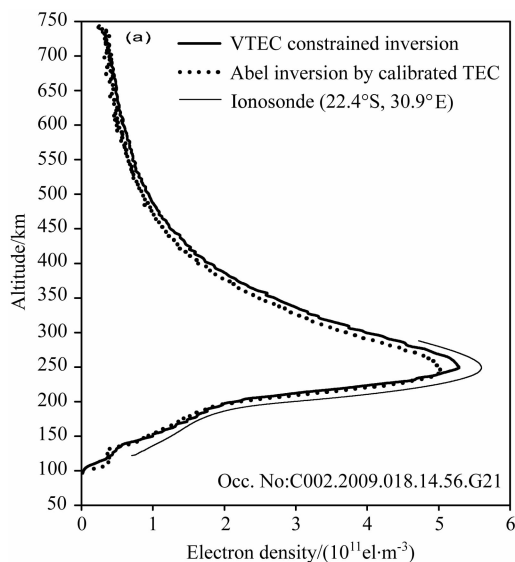
如果掩星射线穿越区域的 VTEC 为常数或关于地理经、纬度呈线性关系分布,则上述反演获得的解与球对称假设的 Abel 反演解理论上是相等的,其差别仅是由于算法不同而引入的误差;当掩星射线穿越区域的 VTEC 呈线性分布时,对所有射线 TEC 构成的方程组(6)求解则仅需每条掩星射线切点处的 VTEC(λ_T, ϕ_T) 和非掩星侧那边射线与相应圈层交点处的 VTEC 值,因为有下列的关系存在(考虑射线关于掩星切点的几何对称性)

$$\text{VTEC}(\lambda, \phi) + \text{VTEC}(\lambda', \phi') = 2\text{VTEC}(\lambda_T, \phi_T). \quad (9)$$

当 VTEC 为非线性变化时,对方程组(6)求解则需要有射线与各圈层交点处的所有 VTEC 数据,而任意地理位置处的 VTEC 均可通过 IGS GIM 或将其对应的四个格网点 VTEC 值内插而得到^[27]。

3.2 计算实例与比较分析

为了检验地基 VTEC 约束电离层掩星反演方法的可行性,分别采用改正 TEC 的 Abel 反演方法和地基 VTEC 约束的反演方法对 COSMIC 掩星观测数据(来源于 <http://cosmic-io.cosmic.ucar.edu/cdaac>)进行了反演,并将反演结果与电离层测高仪观测结果进行了比较。所选的 COSMIC 观测时间段为 2009 年 1 月 1 日至 31 日,所选的掩星观测区域为非线性水平梯度较为显著的低纬地区(25°N, 25°S);



电离层测高仪观测数据则从 Space Physics Interactive Data Resource (SPIDR, <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr>)获得,共选用 10 个低纬电离层测高仪观测资料,它们的时间分辨率为 15 min。掩星事件与测高仪观测相匹配的标准为:掩星观测发生地(掩星射线切点高度在 300 km 附近时的位置)与电离层测高仪经度差小于 5°,纬度差小于 2.5°;掩星观测时间(掩星射线切点高度在 300 km 附近时的时间)与测高仪观测时间之差小于 5 min;一个月内,共有 292 次掩星事件符合该匹配标准。

图 3 是从样本集中随机抽取的两次掩星事件反演比较结果。不难看出,地基 VTEC 约束反演的电离层廓线与改正 TEC 的 Abel 反演的廓线结构比较相似;但就反演的电离层参数 F_2 层峰值电子密度 $N_m F_2$ 而言,其结果还是略有差异。与电离层测高仪观测结果相比,在图 3a 中,地基 VTEC 约束反演的 $N_m F_2$ 其相对偏差为 -5.6%,而改正 TEC 的 Abel 反演的 $N_m F_2$ 其相对偏差为 -9.9%;在图 3b 中,两者反演的 $N_m F_2$ 其相对偏差分别为 -3.7%、-6.9%。可见,在这两次掩星事件中,地基 VTEC 约束反演的结果更趋近于电离层测高仪的观测结果。

图 4 是对这 292 次掩星事件反演的电离层 F_2 层临界频率 $f_o F_2$ ($f_o F_2 = \sqrt{80.6 N_m F_2}$) 的统计分析,其中地基 VTEC 约束反演的 $f_o F_2$ 与电离层测高仪观测结果的相关系数为 0.9197,平均相对偏差为 -0.8%(图 4a);而改正 TEC 的 Abel 反演的 $f_o F_2$ 与电离层测高仪观测结果的相关系数为 0.9044,

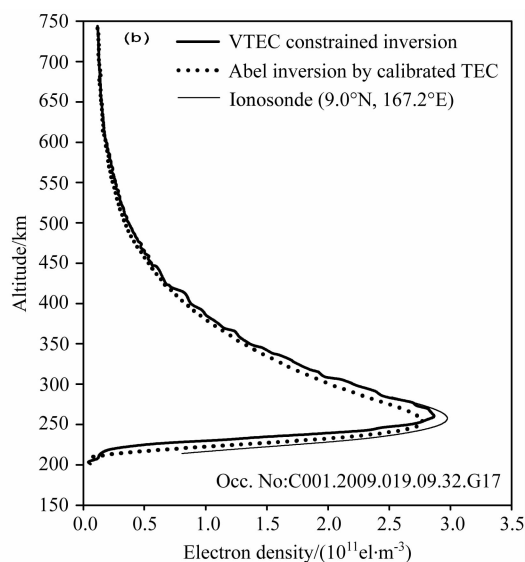


图 3 COSMIC 掩星反演的电子密度廓线与电离层测高仪观测结果比较

Fig. 3 Comparison between the electron density profiles retrieved from COSMIC occultations and those from the ionosonde measurements

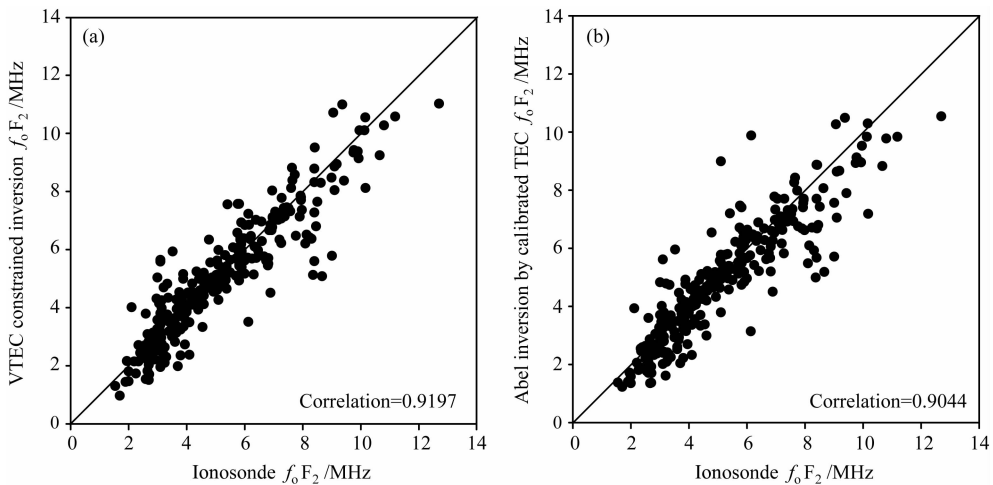


图 4 COSMIC 掩星反演的 f_0F_2 与电离层测高仪观测结果的统计比较

(a) 地基 VTEC 约束反演的比较; (b) 改正 TEC Abel 反演的比较.

Fig. 4 Statistical comparison between the f_0F_2 values retrieved from COSMIC occultations and those from the ionosonde measurements

(a) Comparison between the ground-based VTEC constrained inversion and the ionosonde measurements;

(b) Comparison between the Abel inversion by calibrated TEC and the ionosonde measurements.

平均相对偏差为 -4.3% (图 4b). 这个统计结果初步表明, 地基 VTEC 约束反演的 f_0F_2 更接近于电离层测高仪的观测结果, 在一定程度上比球对称 Abel 反演的精度要高.

4 讨论与结论

针对 GPS 电离层掩星观测, 本文详细地阐述了 Abel 积分变换反演方法和地基 GPS VTEC 约束的反演方法, 并将这两种方法应用于低纬实测掩星资料的反演. 通过与电离层测高仪观测结果进行比较, 结果表明, 地基 GPS VTEC 约束的反演结果比 Abel 积分变换反演的结果具有更高的精度. 然而, 与 Abel 反演方法基于电子密度局部球对称假设一样, 地基 GPS VTEC 约束反演法也引入了一个基于归一化电子密度的局部球对称假设, 尽管前一假设比前一假设更为合理^[26], 但与真实的电离层分布情况仍会有差异, 也是影响电离层掩星反演精度的主要误差源.

电离层水平梯度信息的精确获取与融合对电离层掩星反演精度的提高具有至关重要的意义, 因此, 引入电离层模式或实测电离层结果的反演方法将在一定程度上改善 Abel 电离层掩星反演的精度. 而且, 随着地基 GPS 连续观测站高密度、广范围的分布, 联合 GPS 掩星和地基 GPS 采用电离层层析重建技术也将会提高电离层掩星的反演精度. 进一步,

随着电离层同化模型不断完善, 融合电离层物理模式与掩星观测数据进行电离层反演也具有提高反演精度的可能性.

致谢 作者感谢 CDAAC 提供 COSMIC 掩星观测数据, 感谢 SPIDR 提供电离层测高仪观测数据, 感谢 IGS 提供 VTEC 数据.

参考文献 (References)

- [1] Yunck T P, Lindal G F, Liu C H. The role of GPS in precise earth observation. IEEE Position, Location and Navigation Symposium, Orlando, FL., 1988.
- [2] Gurvich A S, Krasilnikova T G. Navigation satellites for radio sensing of the Earth's atmosphere. *Soviet Journal of Remote Sensing*, 1990, 7(6): 1124-1131.
- [3] Hardy K R, Hajj G A, Kursinski E R. Accuracies of atmospheric profiles obtained from GPS occultations. *Int. J. Satell. Commun.*, 1994, 12(5): 463-473.
- [4] Melbourne W G, Davis E S, Duncan C B, et al. The application of spaceborne GPS to atmospheric limb sounding and global change monitoring. JPL Publication, 94-18, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1994.
- [5] Ware R, Rocken C, Solheim F, et al. GPS sounding of the atmosphere from low Earth orbit: preliminary results. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1996, 77(1): 19-40.
- [6] Kursinski E R, Hajj G A, Bertiger W I, et al. Initial results of radio occultation observations of Earth's atmosphere using the Global Positioning System. *Science*, 1996, 271(5252): 1107-1110.
- [7] 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): 23429-23465.
- [8] Hocke K. Inversion of GPS meteorology data. *Ann. Geophys.*, 1997, 15(4): 443-450.
- [9] Rocken C, Anthes R, Exner M, et al. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(D25): 29849-29866.
- [10] Hajj G A, Romans L J. Ionospheric electron density profiles obtained with the Global Positioning System: Results from the GPS/MET experiment. *Radio Science*, 1998, 33(1): 175-190.
- [11] Schreiner W S, Sokolovskiy S V, Rocken C, et al. Analysis and validation of GPS/MET radio occultation data in the ionosphere. *Radio Science*, 1999, 34(4): 949-966.
- [12] 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.
Zhang X J, Zeng Z, Hu X, et al. Effects of ionospheric horizontal inhomogeneity on occultation inversion. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, 45(Suppl.): 1-6.
- [13] Wu X C, Hu X, Gong X Y, et al. Analysis of inversion errors of ionospheric radio occultation. *GPS Solutions*, 2009, 13(3): 231-239.
- [14] Yue X, Schreiner W S, Lei J, et al. Error analysis of Abel retrieved electron density profiles from radio occultation measurements. *Ann. Geophys.*, 2010, 28(1): 217-222.
- [15] Hernández-Pajares M, Juan J M, Sanz J. Improving the Abel inversion by adding ground GPS data to LEO radio occultations in ionospheric sounding. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, 27(16): 2473-2476.
- [16] García-Fernández M, Hernández-Pajares M, Juan J M, et al. Improvement of ionospheric electron density estimation with GPSMET occultations using Abel inversion and VTEC information. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(A09): 1338-1346.
- [17] 刘赵林, 孙学金, 符养. 电离层的掩星分离假设反演法. *天文学进展*, 2009, 27(3): 270-279.
Liu Z L, Sun X J, Fu Y. Separability hypothesis inversion method of ionospheric occultation. *Progress in Astronomy* (in Chinese), 2009, 27(3): 270-279.
- [18] Aragon-Angel A, Hernandez-Pajares M, Zornoza J M J, et al. Improving the Abel transform inversion using bending angles from FORMOSAT-3/COSMIC. *GPS Solutions*, 2010, 14(1): 23-33.
- [19] Hajj G A, Lee L C, Pi X Q, et al. COSMIC GPS ionospheric sensing and space weather. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2000, 11(1): 235-272.
- [20] Tsai L C, Tsai W H. Improvement of GPS/MET ionospheric profiling and validation using the Chung-Li ionosonde measurements and the IRI model. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2004, 15(4): 589-607.
- [21] 吴小成, 胡雄, 宫小艳等. 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.
Wu X C, Hu X, Gong X Y, et al. Three dimensional model constrained inversion method for ionospheric occultation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(3): 618-625.
- [22] Tsai L C, Tsai W H, Schreiner W S, et al. Comparisons of GPS/MET retrieved ionospheric electron density and ground based ionosonde data. *Earth Planets Space*, 2001, 53(3): 193-205.
- [23] Lei J H, Syndergaard S, Burns A G, et al. Comparison of COSMIC ionospheric measurements with groundbased observations and model predictions: Preliminary results. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112(A7): A07308, doi: 10.1029/2006JA012240.
- [24] 林剑, 吴云, 刘经南. 电离层 GPS 掩星反演技术研究. *地球物理学报*, 2009, 52(8): 1947-1953.
Lin J, Wu Y, Liu J N. Research on ionospheric inversion of GPS occultation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(8): 1947-1953.
- [25] Hernández-Pajares M, Juan J M, Sanz J, et al. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. *J. Geodesy*, 2009, 83(3-4): 263-275.
- [26] García-Fernández M. Contributions to the 3D ionospheric sounding with GPS data. Catalunya: Departments of Applied Mathematics IV and Applied Physics, Polytechnic University of Catalonia, 2004.
- [27] Schaer S, Gurtner W, Feltens J. IONEX: The ionosphere map exchange format version 1. Proceedings of the 1998 IGS Analysis Centers Workshop, ESOC, Darmstadt, Germany, 1998: 233-247.

(本文编辑 何 燕)