

Zeng Z, Hu X, Zhang X J, et al. Inversion of ionospheric GPS occultation data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47 (4): 578 ~ 583

# 电离层 GPS 掩星观测反演技术

曾 桢 胡 雄 张训械 万卫星

中国科学院武汉物理与数学研究所, 武汉 430071

**摘 要** 在电离层局部地区球对称假设下, 推导了利用双频和单频无线电掩星观测数据, 反演电离层电子密度剖面的两种方法. 双频反演的误差来自于载波相位的观测误差, 单频反演误差则主要由伪距的观测精度决定. 由于载波相位测量精度比伪距测量精度高两个量级, 因此双频反演的精度一般比单频反演的高些. 不过, 两载波信号 L1 和 L2 之间的传播路径差异会给双频方法带来误差. 利用三维射线追踪的程序模拟的无线电掩星数据来评估这些方法, 结果表明, 反演出的电离层剖面与给定的模式电离层非常吻合, 验证了两种方法的可靠性和准确性. 将这两种反演方法应用于处理实测的 GPS/MET 掩星观测数据, 均能获取合理的电离层剖面信息. 且单频方法得到的反演剖面与双频方法相当一致, 这为利用 LEO 星载单频 GPS 接收机进行电离层掩星观测提供了理论基础.

**关键词** GPS/MET 双频方法 单频方法 电离层掩星

文章编号 0001-5733(2004)04-0578-06 中图分类号 P535 收稿日期 2003-06-13, 2004-02-16 收修定稿

## INVERSION OF IONOSPHERIC GPS OCCULTATION DATA

ZENG Zhen HU Xiong ZHANG Xun-Jie WAN Wei-Xing

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

**Abstract** Based on the assumption of the local spherical symmetric ionosphere, we propose two inversion methods with which ionospheric density profiles are extracted from the dual frequencies and single frequency radio occultation data respectively. The estimation errors of the dual-frequency method come from errors of the carrier phase measurements, while the errors of the single frequency method mainly are determined by the precision of the pseudo-range measurements. Since the pseudo-range measurements tend to be about 100 times noisier than those of the carrier phase, the retrieval precision with the dual-frequency method may be generally higher than that with the single frequency. However, slightly different paths of carrier L1 and L2 will bring errors to estimations of the dual-frequency method. The radio occultation simulation data with a 3 dimensional ray-tracing program are used to evaluate these inversion methods. Results show that the inversion profiles agree very well with the given model ionosphere, which indicates reliabilities and accuracies of both methods. Then, two inversion methods are applied to the processing of GPS/MET ionospheric occultation data. The inversion results show reasonable ionospheric profiles. Inversion profiles with the single-frequency method are consistent with those of the dual-frequency method, which provide the theoretical inversion base for ionosphere radio occultation observations with a single frequency GPS receiver onboard LEO.

**Key words** GPS/MET, Dual-frequencies method, Single-frequency method, Ionospheric occultation.

**基金项目** 国家自然科学基金项目(40204011)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJ CX2-SW-T1).

**作者简介** 曾 桢, 女, 1978 年 1 月生, 2003 年获中国科学院武汉物理与数学研究所博士, 从事空间物理和探测技术研究.

E-mail: zeng @wipm. ac. cn

## 1 引 言

无线电掩星技术是 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探测技术<sup>[1-3]</sup>。20 世纪 80 年代末和 90 年代初,人们提出将这种探测技术应用于地球大气和电离层探测的设想, GPS 星座系统的建成使得这种设想成为现实。GPS 星座系统由 24 颗平均分布在 6 个轨道面上的卫星组成,轨道倾角为 55°,高度约 20200 km,运行周期为 12 h。每颗 GPS 卫星发射两个 L 波段的微波信号。1993 年美国 UCAR (University Cooperation for Atmospheric Research) 制订了 GPS/MET 的研究计划<sup>[4]</sup>,并于 1995 年 4 月 3 日发射了第一颗用于掩星技术研究的 MicroLab-1 低轨实验卫星 (LEO),质量 69 kg,轨道高度为 760 km,倾角为 70°,周期约 100 min。LEO 上安置的 GPS 接收机则用于接收两频率信号的幅度、伪距和相位数据。当电波传播路径经过地球大气层时,由于电离层和中性大气对电波的折射作用,电波路径发生弯曲和信号延迟。随着 GPS 和 LEO 卫星的相对运动,电波将完成从大气顶部直至地面的垂直扫描过程。结合 GPS 掩星观测数据和卫星精密轨道资料,可反演出 90 km 至低轨小卫星运行高度范围内电离层电子密度剖面<sup>[5-8]</sup>和中性大气气象场 (0 ~ 60 km 的密度、温度、压力、位势高度和水汽含量等)<sup>[9,10]</sup>。GPS/MET 的初步结果表明,一个载于 LEO 上的全视场接收机平均每天可提供约 500 次掩星事件。5 ~ 30 km 高度上温度的平均误差为 1 ~ 2 K。垂直分辨率为 0.2 ~ 1 km,水平分辨率 150 ~ 300 km。它与传统的卫星探测、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。目前,除美国外,许多其他国家和地区都正在制订各自的发展掩星计划或已发射低轨小卫星进行 GPS 气象学研究,如:德国的 CHAMP 计划、阿根廷 SAC-C 计划、丹麦的 Orsted 计划、美国和台湾地区联合的 COSMIC 计划、欧洲的 ACE+ 计划、澳大利亚 FedSat 计划等等。这些研究计划的主要目的是遥感中性大气的气象场,尤其是水汽的全球分布,为全球数值天气预报服务;同时,掩星观测提供大量的电离层观测数据,将极大促进空间物理学研究的发展,提升空间环境预报的水平,具有极其重要的社会效益和军事价值。

人们从电离层掩星观测的伪距和载波相位数

据,可计算出沿电波路径的斜向电子总含量 TEC (Total Electron Content),将其对时间差分得到电离层引起的附加 Doppler 频移。在电离层局部地区球对称假设下,已知 GPS 和 LEO 卫星的位置和速度,从附加 Doppler 频移可推导出电波弯曲角随碰撞高度  $a$  变化的关系,再用 Abel 方法可反演出电离层电子密度剖面,实现单次电离层掩星事件的反演。由掩星观测推断 TEC 的方法有几种,依据所采用观测量的不同,可分为双频反演和单频反演等。本文的主要目的是阐明电离层掩星数据双频反演和单频反演原理和方法;通过计算机仿真掩星试验来验证这两种方法的可靠性,评估其反演精度;并应用于 GPS/MET 的电离层掩星资料的反演;最后对这两种方法各自的优缺点和适用条件加以比较和讨论。

## 2 电离层掩星反演方法

双频 GPS 接收机的基本观测量是两个频率信号的幅度、伪距和载波相位数据。电离层是色散媒质,在一阶近似的情况下,电离层折射率与电波频率的平方成反比。其中,伪距和载波相位的观测方程分别为<sup>[11]</sup>

$$P_k = R + \frac{\text{neutral}}{k} + 40.3 \times \frac{(\text{TEC})_k}{f_k^2} + cd + \epsilon_k, \quad (1)$$

$$L_k = -\frac{c}{f_k} \epsilon_k = N_k \lambda_k + R + \frac{\text{neutral}}{k} - 40.3 \times \frac{(\text{TEC})_k}{f_k^2} + c \cdot d + \epsilon_k, \quad (2)$$

其中,下标  $k$  ( $k=1,2$ ) 用来标识频率  $f_1$  或  $f_2$  ( $f_1=1.57542\text{GHz}$  和  $f_2=1.22760\text{GHz}$ );  $P$  为伪距观测值;  $L$  为载波相位 (距离单位);  $R$  表示发射机和接收机之间的几何距离;  $\frac{\text{neutral}}{k}$  为载波相位 (弧度单位);  $\frac{\text{neutral}}{k}$  为中性大气引起的附加延迟; TEC 是沿射线路径方向的电子总含量;  $c$  为真空中的光速;  $d$  表示钟差项,它包括 GPS 和 LEO 卫星钟差,即 LEO 卫星上所安装的原子钟的钟面时与 GPS 标准时间的误差;  $\epsilon_k$  表示伪距测量误差,包括接收机的热噪声部分和信号多径传输部分;  $N_k$ 、 $\lambda_k$  分别为载波相位整周数、工作载波波长和载波相位测量噪声。

对于 LEO 和 GPS 卫星之间、穿过电离层的电波传播,由于电离层的折射作用,电波射线将发生弯曲。在球对称电离层的假设下,掩星信号弯曲角与电离层折射指数  $\mu$  之间满足 Abel 积分关系<sup>[12]</sup>

$$(a) = -2a \frac{1}{\sqrt{a^2 - a^2}} \frac{d \ln(\mu)}{da} da, \quad (3)$$

其中,  $a = \mu r$ , 称为碰撞参数;  $r$  是掩星切点距地心的距离;  $a$  为掩星电波射线上某积分元至地心的距离. 如果通过测量得到弯曲角, 电离层折射指数  $\mu$  可由 Abel 积分逆变换计算

$$\mu(a) = \exp \left[ \frac{1}{a} \frac{(a)}{\sqrt{a^2 - a^2}} da \right]. \quad (4)$$

对于 GPS 的  $f_1$  和  $f_2$  微波频率, 在一阶近似下, 电离层的折射指数与电子密度  $N_e$  的关系为

$$\mu = 1 - 40.3 \times \frac{N_e}{f^2}. \quad (5)$$

此时电离层的折射指数  $\mu > 1$ , 可得到下面近似公式

$$\frac{d \ln \mu}{da} = - \frac{40.3}{f^2} \frac{dN_e}{da}, \quad (6)$$

设  $s$  表示掩星切点沿射线路径到对应积分元的距离, 由射线的几何关系知<sup>[13]</sup>  $a = \sqrt{a^2 + s^2}$ , 则有

$$\begin{cases} \frac{da}{ds} = \frac{a}{s} \Rightarrow \frac{dN_e}{ds} = \frac{a}{s} \frac{dN_e}{da}, \\ ds = \frac{a}{\sqrt{a^2 - a^2}} da, \end{cases} \quad (7)$$

将公式(6)和(7)代入方程(3)中, 有

$$\begin{aligned} \frac{80.6}{f^2} \frac{a}{\sqrt{a^2 - a^2}} \frac{dN_e}{da} da &= \frac{80.6}{f^2} \frac{dN_e}{da} ds \\ \frac{40.3}{f^2_{LEO}} \frac{dN_e}{da} ds &= \frac{40.3}{f^2} \frac{d(TEC)}{da}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中, TEC 为沿 GPS-LEO 掩星电波路径的电子总含量, 结合(4)、(5)、(8)式, 得到

$$N_e(a) = - \frac{1}{a} \frac{d(TEC)(a)}{da} \frac{1}{\sqrt{a^2 - a^2}} da. \quad (9)$$

可见, 通过掩星观测量方程(1)或(2), 计算确定斜路径的 TEC, 就可根据(9)式计算得到电离层的电子密度剖面, 这里感兴趣的不是 TEC 的绝对值, 而是其微分.

### 2.1 双频反演方法

由公式(2)知, 利用 GPS 两载频  $f_1$  和  $f_2$  的载波相位延迟数据  $L_1$  和  $L_2$  进行线性组合可得到相对 TEC:

$$TEC = \frac{1}{40.3} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1 - L_2) + B + e, \quad (10)$$

$B$  为一待定常数项,  $e$  表示 TEC 观测误差. 这种方法可以消除卫星钟差和轨道误差的影响, 但放大了热噪声误差<sup>[11]</sup>. 由误差传递公式知, 计算出来的 TEC 的误差为

$$e = \frac{1}{40.3} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}. \quad (11)$$

式中  $\sigma_1$  与  $\sigma_2$  分别为相位延迟数据  $L_1$  和  $L_2$  的误差. 当反电子欺骗 (Anti-spoofing, 简称 AS) 政策取消时, 或采用增强无码型 GPS 接收机时, 双频反演的误差通常控制在  $10^{14} \text{ m}^{-3}$  范围内.

### 2.2 单频反演方法

从公式(1)、(2)中, 我们注意到: 伪距测量中电离层引起的信号延迟项与载波相位测量中电离层部分的贡献项数值相同, 符号相反, 这是由电磁波在电离层中传播的色散关系所决定的. 掩星观测中伪距数据反映的是信号的群延迟, 而载波相位测的是信号相延迟.

可以仅利用频率  $f_1$  的信号观测值, 即载波相位延迟  $L_1$  和伪距  $P_1$  数据计算相对 TEC,

$$TEC = \frac{f_1^2}{2 \times 40.3} (P_1 - L_1) + B + \sigma, \quad (12)$$

$B$  为相位模糊度引起的待定常数项,  $\sigma$  表示 TEC 观测误差. 计算出的 TEC 的误差为

$$\sigma = \frac{f_1^2}{2 \times 40.3} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_1^2}. \quad (13)$$

$\sigma_1$  为伪距  $P_1$  的误差. 由于伪距测量通常要比相位观测的误差大 100 倍, 所以这种方法得到的 TEC 测量噪声主要来自于  $P_1$  数据的观测噪声.

需指出的是, (10) 式双频方法是基于两载波信号传播路径相同的假设<sup>[14]</sup>, 忽略了因路径差异带来的对 TEC 估计的误差, 由于掩星观测时电波在电离层中传播的路径较长, 这种路径不同带来的误差有时可能会较大. 而单频方法没有这种影响.

## 3 数值模拟试验

GPS-LEO 掩星观测过程, 人们可通过三维射线追踪技术进行仿真<sup>[15]</sup>. 仿真选用实际的 GPS 和 LEO 卫星的轨道数据. 同时, 它还需要给定电离层和大气模式、太阳活动水平、掩星时间、月份等数据, 利用射线追踪程序模拟掩星信号的相位延迟和伪距数据. 利用上述的双频和单频反演方法计算出电离层电子密度的垂直分布, 再与原给定的模式值进行比较, 评估两反演方法的可靠性. 以 1997 年 2 月 14 日

225 号 GPS/MET 掩星观测的卫星轨道数据为例,计

算结果见图 1.

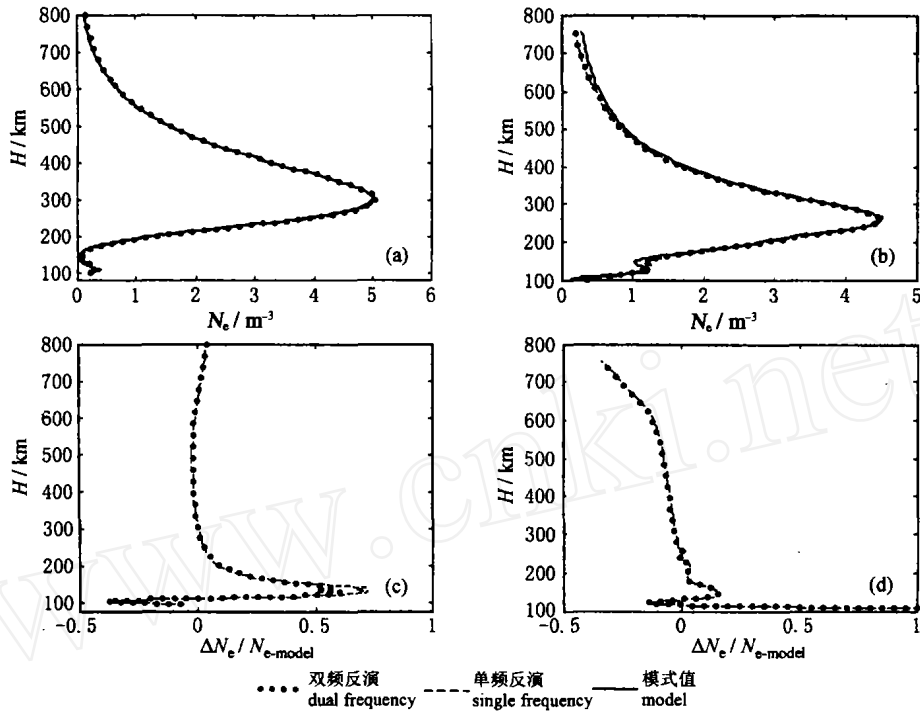


图 1 电离层模式和模拟反演得到的电子密度垂直分布比较  
 (a) 双 Chapman 模式; (b) NeUoG 模式; (c) 单频方法算得相对误差; (d) 双频方法算得相对误差。  
 Fig. 1 Comparisons of electron density profiles between the given ionospheric model and the retrieval from the simulated observations

图 1a 是利用双 Chapman 电离层模式计算出来的电子密度剖面。该模型中,电离层 E 层和 F 层分别用 Chapman 廓线表示(模型没考虑电离层 F1 层和 D 层),其数学式为:

$$N_e(h) = N_e(h_0) \exp\left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{h - h_0}{H} \right] - \exp\left[ -\frac{h - h_0}{H} \right] \right\}, \quad (14)$$

其中,  $N_e(h_0)$  为峰值电子密度,  $h$  为距地面的高度,  $h_0$  为峰值电子密度对应的高度,  $H$  为标高。由于此次掩星观测发生在夜间,因此 E 层和 F 层参数分别选为: E 层:  $N_e(h_0) = 4 \times 10^{10} m^{-3}$ ,  $h_0 = 105$  km,  $H = 5$  km; F 层:  $N_e(h_0) = 5 \times 10^{11} m^{-3}$ ,  $h_0 = 300$  km,  $H = 60$  km。

图 1b 是在 NeUoG<sup>[16]</sup> 电离层模式下计算的结果。NeUoG 模式是由奥地利的 Graz 大学开发的经验电离层气候模式,提供电离层随经纬度、高度、月份、太阳活动水平(F10.7 指数)和 UT 时变化的全球电离层电子密度分布。由于 NeUoG 模式的电离层电子密度及其导数均连续,因此非常适用于进行诸如射线追踪之类的计算工作。本模拟计算中,F10.7 指数给

定为 71.3。

此掩星事件发生在 07:56 UT 时左右,持续时间近 10 min。掩星切点位置基本沿东西方向移动,经度由  $-57.53^\circ \sim -29.58^\circ E$ , 纬度由  $-68.04^\circ \sim -69.73^\circ N$ 。计算结果表明:单频和双频方法反演出的电子密度与模式中给出的电子密度基本符合,说明这两种反演电离层数据的方案是完全可行的。比较图 1a 和 1b,发现用双 Chapman 模式比用 NeUoG 模式的验证结果要好些,这是由于双 Chapman 模式是球对称模式,NeUoG 模式为非球对称模式; Abel 反演计算是基于电离层为球对称媒质的假设下做出的,因此有理由相信这样的差异主要是由于电离层球不对称性造成的<sup>[7]</sup>。另外,由于 GPS/MET 的电离层掩星数据的采样率为 0.1 Hz,相应数据的高度分辨率约为 20 ~ 30 km,引起电子密度模式值与反演结果在峰高上的细微差别。

图 1c 和 1d 分别给出单频和双频方法反演模拟掩星观测数据所得的电子密度的相对误差  $(N_e - N_{e-model}) / N_{e-model}$ ,可见两种方法反演精度基本相同。在 200 km 以下,不同电离层模式反演的电子密度剖面相对误差比较大,这主要是由于模拟反演出的掩

星切点高度误差所致;200 km 以上,利用双 Chapman 模式,两种方法反演的电子密度相对误差不超过 10%;NeUoG 模式下,两方法反演的相对误差不超过 20%.

#### 4 GPS/MET 实测掩星资料反演应用

GPS/MET 电离层掩星二级数据资料分为两类: 1) 含两频率相位观测结果  $L_1$ 、 $L_2$ ; 2) 频率  $f_1$  的伪距  $P_1$  和载波相位观测  $L_1$ , 两类文件中还包含 GPS 和 LEO 卫星的轨道位置和飞行速度的数据. 可以用 1) 数据进行电离层双频数据反演; 利用 2) 进行单频数据反演, 并将两种方法计算的结果进行比较.

从 GPS/MET 1997 年 2 月 14 日掩星观测到的 300 多次掩星事件中随机选取四次作为例子. 利用单频反演方法得到的弯曲角的垂直剖面数据如图 2 所示, 在  $F_2$  层峰值高度处, 弯曲角也达到极值. 弯曲角为正, 表示电波向地球弯曲. 图 3 给出单频和双频方法反演出的电子密度廓线, 可见, 两种反演方法得到的电离层电子密度垂直分布廓线非常

一致. 在 200 ~ 350 km 的高度上, 反演出的电离层电子密度达到最大, 与  $F_2$  层的峰值密度相对应; 某些日间掩星观测数据反演的结果还清晰可见  $F_1$  层的信息, 如图 3(a~c). 反演出的电离层剖面与典型的电离层结构相似, 说明反演结果是合理的.

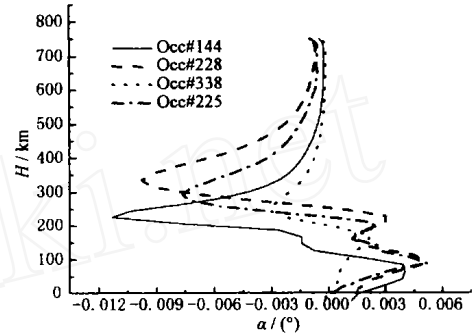


图 2 掩星信号  $L_1$  的弯曲角 随碰撞高度  $H$  变化的廓线

图例标识出各曲线所对应的掩星事件的掩星号.

Fig. 2 Bending angles of occulted signal  $L_1$  as a function of impact height  $H$

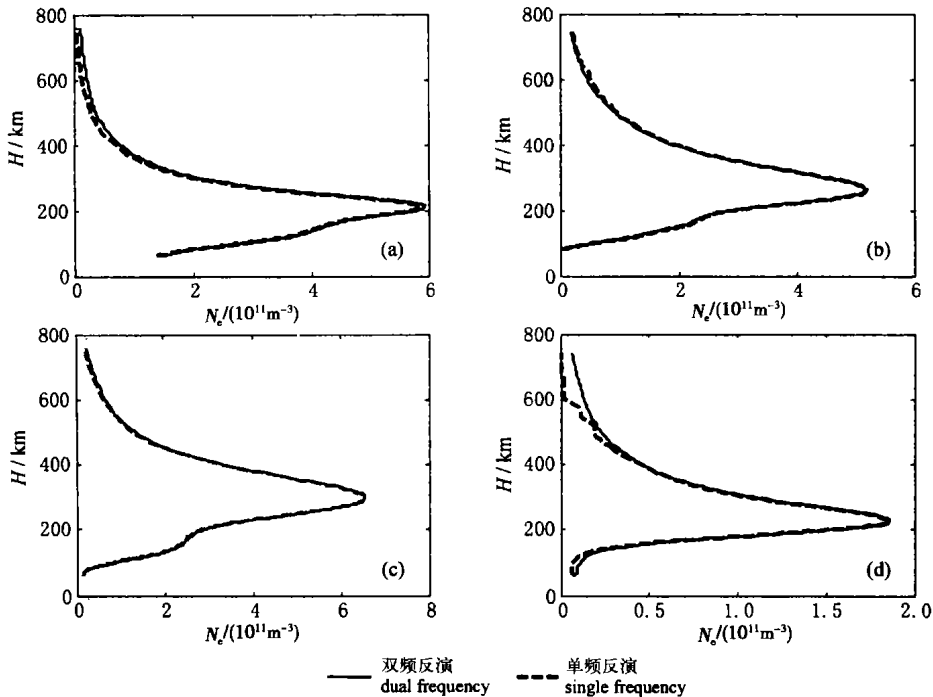


图 3 1997 - 02 - 14 日 GPS/MET 实测数据反演的电子密度垂直分布廓线

各子图对应的掩星事件的掩星号, 以及约 300 km 高度处掩星时刻和掩星切点经纬度分别为:

- (a) Occ # 144, 05 06UT, 14 43LT, 35.49 N, 144.32 E; (b) Occ # 225, 08 00UT, 09 43LT, - 36.55 N, 25.77 E; (c) Occ # 228, 08 03UT, 11 04LT, - 26.54 N, 45.32 E; (d) Occ # 338, 11 54UT, 16 28LT, 62.87 N, 67.95 E.

Fig. 3 Electron density profiles obtained from GPS/MET actual data on 1997-02-14

## 5 结 论

对 GPS 电离层掩星观测反演方法进行了推导,利用掩星仿真数据对双频和单频方法的算法进行了验证,结果表明,双频和单频反演方法均能简单地、准确地处理电离层掩星观测资料,获取高垂直分辨率的电离层电子密度剖面。通过对 GPS/MET 实测的电离层掩星数据反演的应用,双频和单频反演方法都得到了一致的合理结果;从反演精度上来说,单频反演的结果不逊于双频反演结果,这就为技术上使用单频 GPS 接收机进行电离层掩星观测提供了理论依据,而单频 GPS 接收机的使用将降低开展星载电离层掩星实验的技术难度。另外,电离层水平不均匀性结构对反演结果的影响将是将来研究工作中有待解决的重要问题。

作者感谢 UCAR 提供 GPS/MET 掩星观测资料。

## 参考文献

- [ 1 ] Kliore A J, Cain D L, Levy G S, et al. Occultation experiments: Results of the direct measurements of Mars' atmosphere and ionosphere. *Science*, 1995, **149**: 1243 ~ 1248
- [ 2 ] Lindal G F, Hotz H B, Sweetnam D N, et al. The atmosphere of Jupiter: An analysis of the Voyager radio occultation measurements. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**: 8721 ~ 8727
- [ 3 ] Fjeldbo G F, Kliore A J, Eshleman V R. The neutral atmosphere of Venus as studied with the Mariner V radio occultation experiments. *Astron. J.*, 1971, **76**: 123 ~ 140
- [ 4 ] Ware R, Exner M, Feng D, et al. GPS sounding of the atmosphere from Low Earth Orbit: Preliminary results. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1996, **77**: 17 ~ 40
- [ 5 ] Hajj G A, Romans L J. Ionospheric electron density profiles obtained with the Global Positioning System: Results from the GPS/MET experiment. *Radio Sci.*, 1998, **33**(1): 175 ~ 190
- [ 6 ] Rius A, Ruffini G, Romeo A. Analysis of ionospheric electron density distribution from GPS/MET occultations. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1998, **36**: 383 ~ 394
- [ 7 ] 张训械, Hoeg P, Larsen GB, et al. 奥斯特/GPS 掩星和地面雷达联合观测电离层电子密度的初步结果. *全球定位系统*, 2000, **25**: 1 ~ 5
- Zhang XJ, Hoeg P, Larsen GB, et al. Preliminary results of ionospheric electron density obtained from Oersted/GPS occultation and grounded radar joint observation. *Chinese Global Positioning System*, 2000, **25**: 1 ~ 5
- [ 8 ] 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**: 193 ~ 205
- [ 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**: 29 849 ~ 29 866
- [ 10 ] Kursinski E R, Hajj G A, Hardy K R, et al. Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 23 429 ~ 23 465
- [ 11 ] Hajj G A, Lee L C, Pi X, et al. COSMIC GPS ionospheric sensing and space weather. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sci.*, 2000, **11**(1): 235 ~ 272
- [ 12 ] Born M, Wolf E. Principles of Optics. New York: Pergamon, 1980
- [ 13 ] Hoeg P, Larsen GB, Benzon H H, et al. GPS atmosphere profiling methods and error assessments. Scientific Reports COS/TRP/0004/SE, Oct. 1998. Copenhagen: Danish Meteorological Institute, 1998
- [ 14 ] Syndergaard S. On the ionosphere calibration in GPS radio occultation measurements. *Radio Sci.*, 2000, **35**: 865 ~ 885
- [ 15 ] 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(增刊)*, 2002, **45**: 1 ~ 6
- Zhang XJ, Zeng Z, Hu X, et al. Effects of ionospheric horizontal inhomogeneity on occultation inversion. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45** (Suppl.): 1 ~ 6
- [ 16 ] Leitinger R, Titheridge J E, Kirchengast G, et al. A "simple" global empirical model for the F layer of the ionosphere (in German). *Kleinheubacher Ber.*, 1996, **39**: 697 ~ 704