

文章编号:1671-8860(2005)06-0502-04

文献标志码:A

# GPS 掩星数据反演中的地球扁率影响改正

徐晓华<sup>1</sup> 李征航<sup>1</sup> 罗佳<sup>1</sup>

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

**摘要:**采用 CHAMP 实测轨道数据和 MSISE-90 经验大气模型,分别将地球作为圆球和椭球,前向模拟了附加相位延迟,然后对模拟数据进行反演。通过不同方案下反演温度廓线与大气模型温度廓线的比较,发现实测掩星数据的反演中,忽略地球扁率影响会给温度反演结果带来较大的误差;而采用相应方法对地球扁率影响进行改正后,温度廓线的误差明显减弱,从而证明了改正方法的正确性。

**关键词:**掩星;反演;地球扁率

中图法分类号:P228.42

掩星技术是 18 世纪在天文学的研究中建立的。自 20 世纪 60 年代美国喷气动力实验室(JPL)和斯坦福大学发展了该技术以来,无线电掩星方法在过去几十年里广泛地应用于各种行星探测任务,提供了关于太阳系其他行星大气的重要信息<sup>[1]</sup>。Fischbach 于 1965 年提出将掩星技术应用于地球大气探测<sup>[2]</sup>。近 10 年来, GPS/MET、SAC-C 和 CHAMP 等各项 GPS 掩星实验的成功验证了利用 GPS 掩星观测探测地球大气的可行性,肯定了其成果在大气与气象研究领域中广阔的应用前景。

在利用无线电掩星技术探测木星大气的过程中,研究者发现,如果把木星看作球形而不考虑其扁率影响,所反演的温度误差在一定高度以上可能达到 100%。Syndergaard 利用 GPS/MET 实验的真实轨道数据进行了掩星观测数据的模拟和反演,证明了虽然相对于木星地球的扁率非常小,但它对大气参数反演结果带来的误差也不容忽视<sup>[3,4]</sup>。本文针对 CHAMP 的掩星数据处理工作,利用 CHAMP 掩星实验的真实轨道数据,对掩星数据处理中地球扁率的影响和改正方法进行了讨论和验证。其结论对未来其他掩星系统如 COSMIC<sup>[5]</sup>星座的数据处理也有参考价值。

## 1 改正原理

从掩星观测的卫星轨道和附加相位延迟数据

出发,采用 Abel 积分变换方法反演地球大气参数的数学模型与反演流程可参考文献[6]。当把地球看作圆球时,地球大气呈球对称分布,大气折射中心与地球的球心重合;而当考虑地球扁率影响时,折射中心相对于地球椭球中心有了偏移。为了改正由于地球扁率带来的偏差,折射角与影响参数的计算应该相对于折射中心。虽然一次掩星事件中各条射线路径的折射中心事实上并不完全重合,但在应用 Abel 变换时,需要确定一个固定点作为平均折射中心。对于地球而言,平均折射中心可以用在掩星地点与地球椭球相切,半径为掩星平面内的曲率半径的一个球的球心来逼近<sup>[3]</sup>。在这种情况下,不同掩星事件的折射中心不同。反演计算不再基于纯粹的球对称大气假设,而是采用局部大气球对称假设。

图 1 表现了在掩星平面与某条子午线重合,

信号路径渐进线

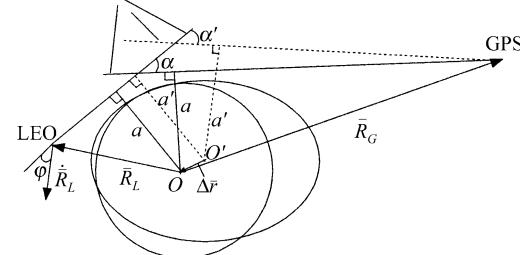


图 1 地球扁率对折射中心的影响<sup>[3]</sup>

Fig. 1 Effect of Earth's Oblateness  
on Refraction Center

且 GPS 卫星速度与掩星平面垂直的简化情况下折射中心  $O$  与地球椭球中心  $O'$  的关系。如图 1 所示,当用椭球中心作为折射中心时,所计算的影响参数  $a'$  和折射角  $\alpha'$  与真实的  $a$  和  $\alpha$  相比,存在着较大的偏差。在反演过程中进行地球扁率改正的目的就是计算折射中心相对于椭球球心的偏移量  $\Delta r$  以及掩星平面内的曲率半径,并且将卫星的位置和速度改正到以折射中心为原点的空间直角坐标系中。 $\Delta r$  的计算方法如下<sup>[4]</sup>:

假设  $T$  为整个掩星事件的近地点,  $T_0$  为  $T$  在椭球面上的投影, 对应的地心向径为  $r=(x, y, z)$ , 其中,  $x, y, z$  为  $T_0$  在地心空间直角坐标系中的坐标, 该方向的单位向量用  $\hat{r}=(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$  表示。过  $T_0$  的椭球法线向量用  $n_s$  表示, 根据微分几何知识有:

$$J_s = \frac{1}{R_{eq}} \begin{bmatrix} 1 - \bar{x}^2 - f\bar{z}^2(1 - 7\bar{x}^2) & -\bar{x}\bar{y}(1 - 7f\bar{z}^2) & -\bar{x}\bar{z}(1 + f(4 - 7\bar{z}^2)) \\ -\bar{x}\bar{y}(1 - 7f\bar{z}^2) & 1 - \bar{y}^2 - f\bar{z}^2(1 - 7\bar{y}^2) & -\bar{y}\bar{z}(1 + f(4 - 7\bar{z}^2)) \\ -\bar{x}\bar{z}(1 + f(4 - 7\bar{z}^2)) & -\bar{y}\bar{z}(1 + f(4 - 7\bar{z}^2)) & (1 - \bar{z}^2)(1 + f(2 - 7\bar{z}^2)) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $R_{eq}$  是地球赤道半径。于是, 折射中心  $O$  相对于地心  $O'$  的偏移量为:

$$\Delta r = R_{eq} \left( 1 - f \cdot \frac{z^2}{x^2 + y^2 + z^2} \right) \cdot \hat{r} - \mathbf{R}_c \quad (4)$$

## 2 模拟实验和相关结论

为了检验地球扁率对反演结果的影响和采用式(4)进行改正的作用, 笔者进行了以下模拟实验: 采用 CHAMP 掩星资料的真实轨道数据, 利用丹麦气象局(DMI)开发的三维射线追踪器, 大气模型则采用了 MSISE-90 大气模型, 前向模拟大气附加相位延迟信息。由于目的是研究地球扁率对反演结果的影响, 为了将问题简化, 在模拟中没有加入电离层影响, 得到的是无电离层影响的大气附加相位延迟, 因此, 在反演计算中不用进行电离层的改正。

以 CHAMP2002 年 8 月 1 日第 9 号掩星事件(occ0009\_02, 213)的真实轨道数据为例, 按照上述方法进行了附加相位延迟的前向模拟, 并利用模拟数据进行了大气参数的反演。分别采用以下三种方案进行。

方案 1 前向模拟中将地球看作圆球, 地球上任意点对应的地球半径为 6 371.0 km。反演中同样不考虑地球扁率。图 2(a)是在掩星地点大气模型的温度廓线与反演温度廓线的比较, 其中实线为大气模型的温度廓线, 虚线为反演的温度廓线; 图 2(b)是反演值减模型值的差值。

方案 2 前向模拟中地球用 WGS-84 椭球代

$$\mathbf{n}_s = \hat{r} - 2f\bar{z} \begin{bmatrix} \bar{x}\bar{z} \\ \bar{y}\bar{z} \\ \bar{z}^2 - 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $f$  为椭球的扁率。定义  $\hat{n}_p$  为在掩星过程中当 GPS 与 LEO 卫星之间的直线连线在椭球外且与椭球面最接近时, 从 GPS 到 LEO 卫星的单位向量, 其值可以从卫星的位置和速度采样序列计算得到。与椭球相切于  $T_0$  点, 半径为掩星平面内的曲率半径的圆球的球心就是折射中心。曲率半径的计算可以近似采用下式:

$$\mathbf{R}_c = \frac{\mathbf{n}_s}{|J_s \cdot \hat{n}_p|} \quad (2)$$

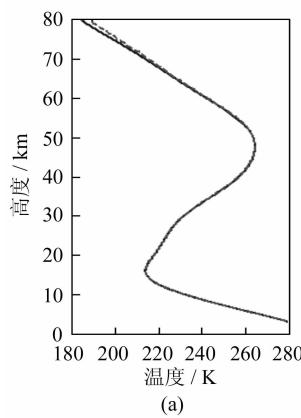
式中,

替方案 1 中的圆球。反演中则仍然将地球看作圆球。图 3 该方案的结果。

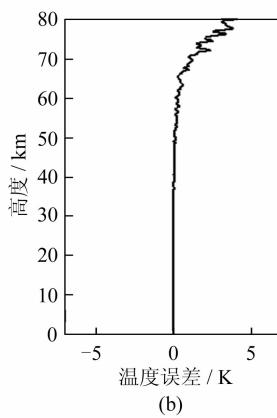
方案 3 在前向模拟中, 地球为 WGS-84 椭球。反演中同样将地球设置为 WGS-84 椭球, 并且折射中心为在掩星地点与地球椭球相切, 半径为掩星平面内的地球曲率半径的圆球的球心。图 4 为该方案的结果。

由图 2 可见, 当前向模拟中采用球形地球, 并且反演中也采用球形地球时, 反演的温度与模型温度在对流层和平流层符合得很好, 差异在 1 K 以内。但在 60 km 以上, 由于 Abel 变换和解大气静力平衡方程中对于积分上限假定的影响逐渐增大, 因此, 反演的误差也增大, 在 80 km 高度左右温度反演误差增大到 5 K 左右。

由图 3 可见, 当在前向模拟中采用椭球地球, 而反演中不考虑折射中心相对于椭球中心的变化时, 温度反演结果与相应的模型值相差较大。误差在 40 km 左右处相对最小, 在这个高度之上和之下, 误差的绝对值逐渐增大。误差廓线在 14 km 高度左右, 对流层顶附近有一个明显的向外凸起, 这个特征与温度廓线本身的变化趋势对应, 因为对应的温度廓线在这个高度也有很大变化。这种情况在其他文献中也有反映。如利用 GPS/MET 某次掩星事件的轨道数据, 采用一个一维大气模型(大气状态只随高度变化的大气模型)模拟附加相位延迟, 然后进行反演也得到类似的结论<sup>[4]</sup>。而这种误差现象在进行地球扁率改正, 即将大气折射中心和折射的曲率半径采用式(4)进行改正后, 由图 4 可见, 反演温度的误差得到了明显的削弱。



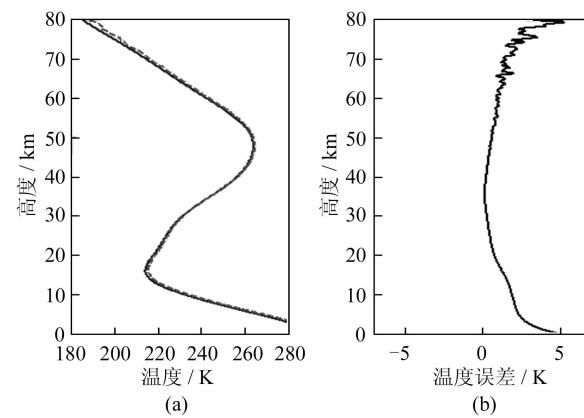
(a)



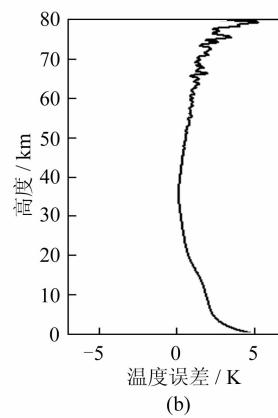
(b)

图2 方案1中模型温度与反演温度的比较

Fig. 2 Comparison Between Model Temperature and Inverted Temperature in Scheme 1



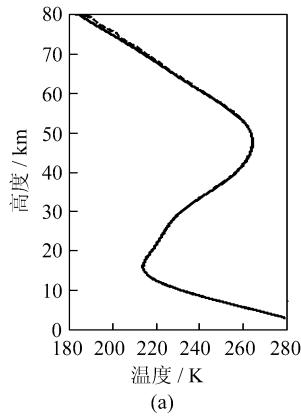
(a)



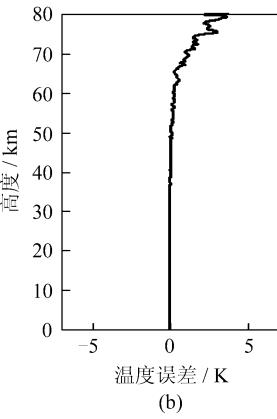
(b)

图3 方案2中模型温度与反演温度的比较

Fig. 3 Comparison Between Model Temperature and Inverted Temperature in Scheme 2



(a)



(b)

图4 方案3中模型温度与反演温度的比较

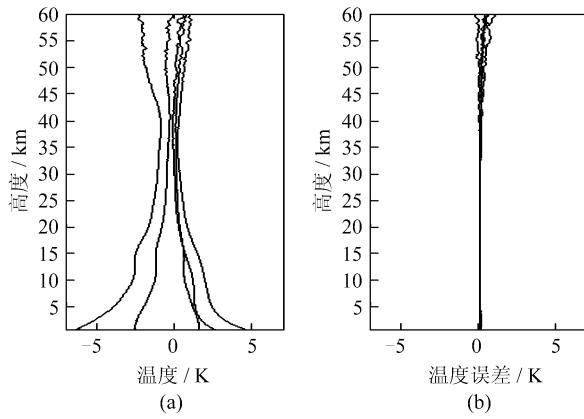
Fig. 4 Comparison Between Model Temperature and Inverted Temperature in Scheme 3

为了进一步验证这种地球扁率改正方法的有效性,随机采用2002年213日的其他几次掩星事件的轨道资料也进行了相应的前向模拟和反演,各模拟掩星事件的位置和掩星号如表1所示。其温度反演结果见图5。其中,图5(a)是采用方案2得到的温度反演误差,图5(b)是采用方案3的温度反演误差。由两幅图的比较可见,虽然各掩星事件所发生的地理位置差别较大,相应的大气模型温度廓线会有较大差别(见图6),但是

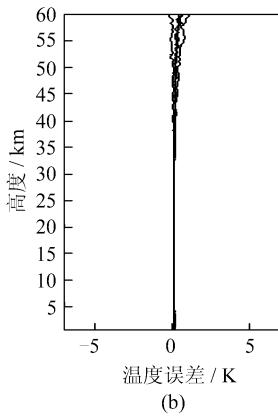
表1 模拟掩星事件相关信息

Tab. 1 Information of Simulated Occultation Events

掩星号	经度/(°)	纬度/(°)
0009	-85.42	44.22
0128	-95.88	-14.65
0168	30.20	-18.27
0190	162.12	-42.74
0210	132.78	28.99



(a)



(b)

图5 表1中各模拟掩星事件反演温度误差的比较

Fig. 5 Comparison Between Inverted Temperature Errors

当采用方案2时,各误差廓线有相似的性质:在对流层顶附近误差廓线有一向外凸起;40 km附近误差达到最小。采用方案3后,这些误差都被消除。

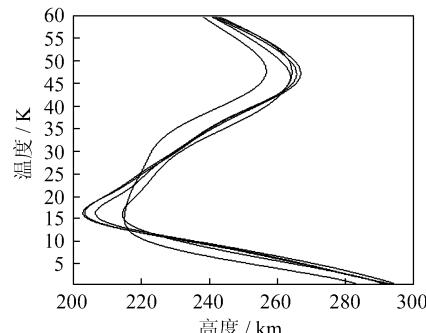


图6 表1中各模拟掩星事件对应的大气模型温度廓线

Fig. 6 Corresponding Model Temperature Profiles of Simulated Occultation Events in Tab. 1

### 3 结语

掩星数据的反演中存在一些细节问题需要探讨和验证,其中包括地球扁率的影响和改正。本文采用CHAMP掩星实验的真实轨道数据和MSISE-90经验干大气模型,利用三维射线追踪器前向模拟了无电离层影响的附加相位延迟数据。在前向模拟中分别将地球视作圆球和椭球,然后采用不同的方案对模拟数据进行反演。通过不同方案下反演温度廓线与大气模型温度廓线的比较发现,在实际数据反演中如果忽略地球扁率影响会给温度反演结果带来较大的误差;而当在反演程序中对地球扁率影响进行改正后,误差明显减弱,从而证明了改正方法的正确性。

### 参考文献

- 1 徐晓华,李征航,罗佳.利用GPS掩星资料反演地球中性大气参数折射角方法研究.武汉大学学报·信息科学版,2003,28(5):589~592

- 2 Fischbach F F. A Satellite Method for Pressure and Temperature Below 24 km. Bulletin of American Meteorological Society, 1965, 46: 528~532
- 3 Syndergaard S. Retrieval Analysis and Methodologies in Atmospheric Limb Sounding Using the GNSS Radio Occultation Technique: [Ph. D Dissertation]. Denmark: Danish Meteorological Institute, 1999
- 4 Syndergaard S. Modeling the Impact of the Earth's Oblateness on the Retrieval of Temperature and Pressure Profiles from Limb Sounding. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 1998, 60 (2): 171~180
- 5 Anthes R A, Rocken C, Kuo Y H. Applications of COSMIC to Meteorology and Climate. Special Issue of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science, 2000, 11(1): 115~156
- 6 徐晓华.利用GNSS无线电掩星技术探测地球大气的研究:[博士论文].武汉:武汉大学,2003

**第一作者简介:**徐晓华,博士。现从事GPS气象学方面的研究。  
E-mail:xhxu@sgg.wtusm.edu.cn

## Correction of Effect of Earth's Oblateness in Inversion of GPS Occultation Data

XU Xiaohua<sup>1</sup> LI Zhenghang<sup>1</sup> LUO Jia<sup>1</sup>

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

**Abstract:** The effect of Earth's oblateness in the inversion of GPS occultation data and corresponding correcting method are studied. By using observed CHAMP orbit ephemerides and MSISE-90 dry air model and regarding Earth as a sphere and an ellipsoid respectively, excess phase delays are simulated and the simulated data are retrieved under different schemes. The comparisons between the Inverted temperature profiles and the model temperature profiles show that when inverting observed data, we will get temperature results with large errors if the effect of Earth's oblateness is omitted. The correction method is tested useful because the temperature errors decreased obviously with this method.

**Key words:** occultation; inversion; Earth's oblateness

**About the first author:** XU Xiaohua, Ph.D. she is concentrated on the research of GPS meteorology.

E-mail:xhxu@sgg.wtusm.edu.cn

(责任编辑: 晓晨)